62 Т.1
Ч-376

А. И. Чекренев
К. В. Гришанин

ВОДНЫЕ ПУТИ

Издание
второе переработанное
и дополненное

Допущено
Управлением кадров
и учебных заведений МРФ
в качестве учебника
для институтов водного
транспорта

М720/102

Библиотека
ЛИИВТа

МОСКВА «ТРАНСПОРТ» 1975

УДК 627 (075.8)

Водные пути. Чекренев А. И., Гришанин К. В. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Транспорт», 1975. 472 с.

В книге излагаются все темы, относящиеся к курсу «Водные пути»: водные пути и методы их улучшения для судоходства; речной поток и его русло; водохранилища и реки с зарегулированным стоком; судоходные прорези на реках и судовые ходы на водохранилищах; выправление рек для судоходства и выправительная трасса; работа выправительных сооружений в потоке и их расчет; извлечение и удаление грунта землесосными и черпаковыми снарядами при улучшении водных путей; выправительные сооружения и их возведение; судоходная обстановка и руслоочищение; проектирование производства путевых работ на навигацию.

Книга рекомендуется в качестве учебника для студентов гидротехнической специальности институтов водного транспорта и может быть использована специалистами-путейцами, работающими на водных путях.

Рис. 246, табл. 8, список лит. 41 назв.

Ч $\frac{31807—327}{049(01)—75}$ 327—75

© Издательство «Транспорт», 1975 г.

ОТ АВТОРОВ

Реки, озера и моря с незапамятных времен служили путями торговли, движения людей, способствовали познанию окружающего мира. Реки, озера и моря — это пути, созданные природой, и по настоящее время эти естественные водные пути занимают доминирующее место в общей сети водных сообщений. Искусственные водные пути, каналы и шлюзованные системы получили развитие лишь в последние два-три столетия и несмотря на быстрый рост составляют по длине небольшую долю всего протяжения водных путей.

К внутренним водным путям, которым посвящен настоящий курс, относятся реки, озера и водохранилища.

Существование специальной дисциплины, изучающей водные пути, обусловлено тем, что ни река, ни озеро, ни водохранилище не могут быть использованы без проведения на них путевых работ — инженерных мероприятий, обеспечивающих безопасность и удобство плавания судов.

Простейшие, минимально необходимые путевые работы состоят в указании границ и направления судового хода специальными знаками и в очистке судового хода от случайных препятствий — камней, карчей и т. п. Но если произвести только эти работы, осадка плавающих судов будет ограничена естественными глубинами реки, которые даже у крупных равнинных рек в меженный период могут быть малыми. Отсюда возникает главная задача путевых работ — углубление (и уширение) судового хода. На реках, остающихся в естественном состоянии, эта задача решается с помощью дноуглубительных и выправительных работ. Радикальное увеличение габаритов пути достигается шлюзованием рек и постройкой шлюзованных каналов. В связи с большим объемом учебного материала и специфическим характером вопросов строительства и эксплуатации подпорных гидротехнических сооружений (шлюзов, плотин, гидростанций), эти вопросы выделены в специальный курс гидросооружений. Таким образом в настоящем курсе изучаются следующие виды путевых работ: судоходная обстановка, руслоочищение, дноуглубление, выправление, регулирование речного стока водохранилищами.

Разнообразный характер этих работ требует от инженера-гидротехника водного транспорта широкой теоретической подготовки, глубокого знания законов движения воды в открытых руслах, водного и руслового режима рек. Поэтому гидрология и гидравлика

служат теоретической основой курса водных путей. Изучение устройства и работы дноуглубительных снарядов требует основательного знания таких курсов, как сопротивления материалов, деталей машин, электротехники. Работа дноуглубительных снарядов полностью или частично автоматизирована. Отсюда вытекает необходимость пользоваться знаниями по теории автоматического регулирования и электроники. Еще большие требования к знаниям электроники предъявляются современной судоходной обстановкой, большинство знаков которой снабжено автоматами для тушения и зажигания огней и обеспечения проблескового режима горения. Выбор источников света и определение дальности видимости знаков опираются на законы оптики и светотехники.

По мере ускорения технического прогресса срок службы отдельных конструкций и устройств становится все более коротким. Поэтому в подготовке современного инженера на первое место выдвигаются теоретические основы технических дисциплин, а изучение существующих конструкций и технологических методов получает подчиненное значение. Это в полной мере относится и к подготовке инженеров-гидротехников водного транспорта. Для успешного ведения работ по улучшению судоходных условий рек прежде всего необходимо свободное творческое владение представлениями и методами речной гидравлики, а для управления работой дноуглубительных снарядов и совершенствования знаков обстановки — методами автоматики. Приводимые в курсе современные решения различных вопросов путевых работ не должны восприниматься догматически, это скорее отправные пункты для дальнейшего движения вперед.

Настоящий учебник написан по программе курса «Водные пути», читаемого на факультетах водных путей и портов институтов водного транспорта. Под водными путями здесь понимаются только внутренние водные пути.

Гл. I, V—VII, IX—XII и гл. XIV (кроме § 90), а также § 25 и 32 гл. IV и § 58 и 59 гл. VIII написаны д-ром техн. наук А. И. Чекреневым, гл. II, III, IV (кроме § 25 и 32), гл. VIII (кроме § 58 и 59) и § 90 гл. XIV — д-ром техн. наук К. В. Гришаниным; гл. XIII по просьбе авторов написана д-ром техн. наук В. В. Дегтяревым.

При написании гл. IV—VI были использованы работы кафедры «Водные пути и изыскания» ЛИВТа, выполненные под руководством авторов с участием Н. П. Гилярова, В. М. Селезнева и А. В. Серебрякова, а при написании гл. VIII, XI и XII — полезные рекомендации А. С. Старикова и И. Е. Шмерлинга.

Глава I

ВОДНЫЕ ПУТИ И МЕТОДЫ ИХ УЛУЧШЕНИЯ ДЛЯ СУДОХОДСТВА

§ 1. ВОДНЫЕ ПУТИ СОВЕТСКОГО СОЮЗА И ИХ РАЗВИТИЕ

Водные пути по отношению к материку разделяются на внутренние (реки, внутренние каналы, озера и водохранилища) и внешние (моря, океаны и морские каналы). В составе внутренних водных путей преобладают реки, поэтому их часто называют речными путями.

В СССР имеется широко разветвленная сеть внутренних водных путей — более 110 тыс. рек общей протяженностью около 2,5 млн. км и тысячи озер. Многие наши реки принадлежат к числу крупнейших в Европе и Азии. Примерно 520 тыс. км речных путей могут быть освоены для судоходства. В настоящее время протяженность внутренних судоходных путей Советского Союза составляет более 145 тыс. км, что значительно превышает протяженность судоходных путей США, ФРГ и ГДР, Франции, Англии, Голландии и Италии, вместе взятых.

Ни одно государство в мире не имеет такого огромного морского побережья, как Советский Союз: 13 морей и 3 океана омывают внешние берега нашей Родины, примерно на 50 тыс. км растянулись ее морские границы.

В состав внутренних водных путей входят: 1) реки в свободном состоянии, с зарегулированным стоком и шлюзованные; 2) каналы — открытые и шлюзованные; 3) озера и водохранилища; 4) водные системы, включающие в себя реки и каналы в различном состоянии, озера и водохранилища.

Под судоходными реками, находящимися в свободном состоянии (свободными реками), понимают реки, не перегороженные плотинами, на которых судоходные условия поддерживаются путевыми работами — дноуглублением снарядами, выправлением сооружениями и судоходной обстановкой.

Под шлюзованными судоходными реками понимают реки, перегороженные плотинами с судоходными сооружениями, гидроэлектростанциями и водозаборными сооружениями. На таких реках подпором от плотин создаются водохранилища или подпертые бьефы, в которых судоходные условия обеспечиваются за счет больших глубин от подпора и путевых работ.

Через судоходные сооружения (шлюзы или судоподъемники) пропускаются суда или плоты из водохранилища в реку ниже плотины или обратно; на гидроэлектростанции вырабатывается электроэнергия; через водозаборные сооружения из водохранилища подается вода для орошения и водоснабжения.

Участки рек с зарегулированным стоком находятся по длине рек ниже питающих их водохранилищ, откуда подаются зарегулированные расходы воды на эти участки. Питающие водохранилища могут быть расположены или на самой реке, или на ее притоках, но выше тех участков, которые обеспечиваются зарегулированным стоком.

В водохранилищах задерживается избыточный сток многоводных периодов (например паводка) с тем, чтобы израсходовать его в маловодные периоды (например, в межень) для увеличения глубин ниже водохранилищ, для выработки электроэнергии или для целей орошения и водоснабжения. Судоходные условия на участках рек, лежащих ниже водохранилищ, поддерживаются за счет подаваемых из водохранилищ зарегулированных расходов и путевых работ.

Таким образом, на одной судоходной реке могут быть свободные, зарегулированные и шлюзованные участки.

Судоходными реками Советского Союза, находящимися в настоящее время полностью или частично в свободном состоянии, являются: Северная Двина, Вычегда, Сухона, Печора, Нева, часть Свири, бóльшая часть Оки, Кама выше Камского водохранилища, Белая, Вятка, бóльшие части Немана и Днестра, Днепр выше Киевского водохранилища, Десна, бóльшая часть Припяти, Дон выше Цимлянского водохранилища, часть Кубани, Урал, бóльшая часть Оби, Чулым, Кеть, бóльшая часть Иртыша, Конда, Тобол, бóльшая часть Енисея, часть Ангары, Селенга, Лена, Алдан, бóльшая часть Вилюя, Витим, Индигирка, бóльшая часть Колымы, Яна, Амур, бóльшая часть Зеи, Уссури, Шилка и др.

К озерам, используемым для судоходства, относятся: Ладожское, Онежское, Выг-озеро, Чудское, Ильмень, Селигер, Белое, Кубенское, Байкал, Балхаш, Зайсан, Иссык-Куль и др. Кроме того, на территории СССР расположено одно внутреннее «море» — Аральское.

В состав шлюзованных рек, каналов, водохранилищ и водных систем, созданных в России еще до Великой Октябрьской социалистической революции и используемых для судоходства в настоящее время, входят: Северо-Двинская система; шлюзованные участки рек Оки и Северского Донца; Верхне-Волжское водохранилище.

Другие шлюзованные реки, каналы, водохранилища и водные системы дореволюционной постройки или потеряли в настоящее время свое значение, или полностью реконструированы. В тот же период построены Приладожский и Онежский обходные судоходные каналы, используемые для движения судов и составов в обход этих озер.

После Великой Октябрьской социалистической революции построено несколько крупных судоходных каналов (водных систем) и шлюзован ряд крупных судоходных рек.

Построены каналы и водные системы: Беломорско-Балтийский канал, канал имени Москвы, Волго-Донской канал имени

В. И. Ленина, Волго-Балтийский водный путь имени В. И. Ленина, Днепро-Бугский канал.

Шлюзованы возведением нескольких гидроузлов с водохранилищами или подпертыми бьефами реки: Волга и Кама, Днепр и Дон, Иртыш и Ангара, Свирь и Москва, Припять. По одному гидроузлу построено на Оби и Енисее, Волхове и Немане и на Днестре. На Ангаре, Немане и Днестре гидроузлы пока не имеют судопропускных сооружений. В настоящее время строительство гидроузлов на Волге, Каме, Днепре и Москве заканчивается, на Дону, Ангаре и Енисее, Колыме и Зее продолжается.

К числу участков судоходных рек со стоком, значительно зарегулированным вышележащими водохранилищами, относятся: Дон ниже Цимлянского водохранилища, Волга ниже Волгоградского и Горьковского водохранилищ, Иртыш ниже Усть-Каменогорска, Обь ниже Новосибирского водохранилища, Енисей ниже Красноярского водохранилища и Ангара ниже Братского водохранилища.

На некоторых несудоходных реках в среднеазиатских республиках и в южных районах европейской части страны для получения электроэнергии, орошения земель и водоснабжения тоже построены гидроузлы, и из их бьефов проложены оросительные каналы. Некоторые из наиболее крупных оросительных каналов могут использоваться также для судоходства, например Кара-Кумский и Северо-Крымский.

После Великой Октябрьской социалистической революции значительно возросла протяженность судоходных рек СССР, находящихся в свободном состоянии, улучшились судоходные условия на них, причем на многих реках увеличились глубина, ширина и радиус закруглений судовых ходов. Улучшение судоходных условий на этих реках достигнуто вследствие широкого развития путевых работ: дноуглубительных с применением наиболее совершенных дноуглубительных снарядов; выправительных, производство которых широко механизируется; внедрения судоходной обстановки с электрическим освещением и др. В настоящее время путевые работы ведутся на всех внутренних водных путях, что обеспечивает пропуск большого количества судов и с большим количеством грузов.

В России первые работы по улучшению судоходных условий на реках относятся еще к XVII—XVIII вв.; в первой половине XIX в. появилась судоходная обстановка. Улучшение судоходных условий на реках в нашей стране проводилось вначале простейшими дноуглубительными снарядами и легкими выправительными сооружениями, а затем с помощью капитальных выправительных сооружений и более совершенных дноуглубительных снарядов.

В дореволюционный период в России судоходные условия улучшались главным образом на крупных реках, по которым шли основные перевозки грузов и пассажиров. Дноуглубление получило преимущественное распространение на реках Волге, Каме, Оке, Дону, Днепре, Северной Двине и на некоторых реках Сибири.

Значительные выправительные работы были выполнены на отдельных участках рек Волги, Днепра, Дона и Припяти. Первые водные системы в нашей стране начали строить в XVIII и XIX вв.; тогда были соединены бассейны рек Волги и Невы — сооружены Вышневолоцкая, Мариинская и Тихвинская водные системы. В дореволюционный период водные пути шлюзовались исключительно в транспортных целях. Водные ресурсы очень мало использовались для получения электроэнергии и для орошения и водоснабжения.

Великая Октябрьская социалистическая революция дала мощный толчок к развитию наших водных путей. Огромную роль в этом сыграл подписанный В. И. Лениным в 1918 г. декрет о национализации водного транспорта. Первенцем крупного энерготранспортного гидростроительства в СССР стал Волховский гидроузел.

Волго-Балтийский, Волго-Донской имени В. И. Ленина и Беломорско-Балтийский каналы соединили между собой водные пути Черноморско-Азовского, Волжско-Камского, Северного и Северо-Западного бассейнов в единую глубоководную систему европейской части СССР. После сооружения канала имени Москвы столица нашей родины Москва стала портом пяти морей: Белого, Балтийского, Каспийского, Азовского и Черного.

Несмотря на большой размах гидротехнического строительства, около 85% протяженности судоходных речных путей остается еще в свободном состоянии. В связи с этим перед речным транспортом стоят задачи дальнейшего улучшения судоходных условий и развития судоходства на свободных реках. Подлежат освоению судоходством новые водохранилища и судоходные каналы, а также большие оросительные каналы.

В восьмой пятилетке велись крупные путевые работы, дноуглубительные и выправительные, на судоходных реках европейской части Союза и в Сибири — на Оби, Иртыше, Енисее и Лене — для превращения их в судоходные магистрали, а также на Витиме, Алдане, Пуре, Тазе, Яне, Колыме и Индигирке — для улучшения на них судоходных условий.

План развития народного хозяйства предусматривает: продолжить работы по улучшению водных путей в восточных районах страны и в ее европейской части; завершить строительство гидроузлов Николаевского на Дону, Каневского на Днепре, второй очереди Днепровской гидростанции с судоходным шлюзом, а также реконструкцию шлюзованной части р. Москвы ниже столицы; продолжить строительство гидроузлов — Чебоксарского, Нижне-Камского, Саянского, Усть-Илимского и Зейского; начать строительство Колымского гидроузла.

По окончании строительства гидроузлов р. Волга от Волгограда до г. Калинина, р. Кама от устья до г. Соликамска и р. Днепр от г. Каховки до устья р. Припяти превратятся в каскад водохранилищ с озерными условиями плавания. Глубины на остальных частях Волги, Камы и Днепра будут поддерживаться зарегулированными расходами воды и путевыми работами.

§ 2. МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА ВОДНЫХ ПУТЯХ

На водных путях судоходство допускается не по всей их ширине, а только в пределах судового хода.

Судовым ходом называется часть ширины водного пути, подготовленная для движения по ней судов и обозначенная специальными знаками.

Судовой ход прокладывается преимущественно в той части водного пути, где имеется меньше препятствий для судоходства. Различают судовые ходы: а) основные — на транзите водных путей; б) подходные — с транзита к портам, пристаням, судоремонтным пунктам и т. п.; в) внутрипортовые — в пределах акваторий портов.

Глубина, ширина и радиус закруглений судового хода называются его габаритами. Гарантированные габариты судовых ходов устанавливаются на основании технико-экономических расчетов. При этом для прохода наибольших судов или их составов, допущенных к плаванию по данному водному пути, выдерживаются установленные запасы глубины под днищем судов, запасы по ширине судового хода и необходимые радиусы на закруглениях.

Судоходные условия любого водного пути характеризуются прежде всего габаритами его судового хода. Глубокий, широкий и слабо криволинейный судовой ход дает возможность передвигаться по нему большим составам судов со значительными осадками и на больших скоростях. Наоборот, по мелкому, узкому и криволинейному судовому ходу могут передвигаться только небольшие суда с малыми осадками и на малых скоростях.

На судоходные условия водных путей значительное влияние оказывают также скорости течения и волнение. Течение воды увеличивает скорости хода судов, идущих по течению, и уменьшает скорости хода судов, идущих против течения. Но большие скорости течения и течения, направленные косо к судовому ходу, могут препятствовать передвижению судов, идущих и против течения и по течению. Волнение на озерах и водохранилищах затрудняет судоходство, и поэтому при значительных размерах волн судам приходится искать укрытье. Продолжительность навигации тоже является важной характеристикой водного пути: чем больше продолжительность навигации, тем больше можно перевезти грузов и пассажиров.

Если на водном пути судоходные условия не удовлетворяют требованиям судоходства, их улучшают; если же они хорошие, их поддерживают во избежание ухудшения.

Для улучшения и поддержания судоходных условий на водных путях применяют следующие методы: а) судоходную обстановку и руслоочищение; б) дноуглубление (землечерпание и скалоуборочные работы в русле); в) выправление русла и укрепление берегов; г) регулирование стока; д) шлюзование и устройство каналов. Как правило, эти мероприятия осуществляются комплекс-

но, но в различных сочетаниях и размерах. Комплекс дноуглубительных, выправительных и берегоукрепительных, руслоочистительных и обстановочных работ носит общее название путевых работ или путевых мероприятий.

Необходимо отметить, что в официальных положениях и инструкциях по путевым работам под дноуглублением понимают все виды работ по углублению и выправлению речного русла: землечерпание и скалоуборочные работы, выправление русла и укрепление берегов. В настоящей книге в соответствии с исторически установившейся терминологией под дноуглублением подразумеваются только землечерпательные и скалоуборочные работы.

Судоходная обстановка состоит из совокупности береговых и плавучих знаков, показывающих направление и границы судового хода, минимальные глубины и отдельные препятствия на нем. В дополнение к обстановке на озерах и водохранилищах, а также в низовьях крупных рек судам передают штормовые предупреждения.

Руслоочистительные работы проводят для расчистки судового хода от отдельных препятствий, лежащих на дне. Эти работы выполняются руслоочистительными снарядами.

Дноуглубление, или дноуглубительные работы, выполняют главным образом с помощью дноуглубительных снарядов, которые извлекают и удаляют грунт с углубляемых участков. Эти работы называются также землечерпательными. Дноуглубление проводят как на существующих судовых ходах для их углубления, так и для создания новых судовых ходов.

Дноуглубительные снаряды для извлечения грунта оборудованы всасывающими или черпаковыми устройствами; удаление грунта производится преимущественно по плавучим грунтопроводам или в шаландах. К дноуглубительным относятся также камнеуборочные и скалоуборочные работы; при этом камни и скала, раздробленные взрывами или скалодробителями, удаляются черпаковыми снарядами.

На реках дноуглубительные снаряды углубляют наиболее мелкие участки русла — перекаты, на которых разрабатывают подводные каналы (прорези) с заданной глубиной и шириной.

На рис. 1, *а* и 1, *б* показаны соответственно поперечный и продольный профили речного русла с глубиной T_1 по судовому ходу на верхнем перекате при низком меженном уровне (НМУ), где после прорытия прорези с заглублением в речное дно на величину h_3 глубина на прорези T_2 получилась равной

$$T_2 = T_1 + h_3 - \Delta z, \qquad (1)$$

где Δz — величина понижения уровня воды в реке, вызванного разработкой прорези. При малом поперечном сечении прорези по сравнению с живым сечением реки величина Δz мала и ее можно не учитывать.

На многих перекатах дноуглубительные прорези постепенно деформируются и их приходится ежегодно восстанавливать или

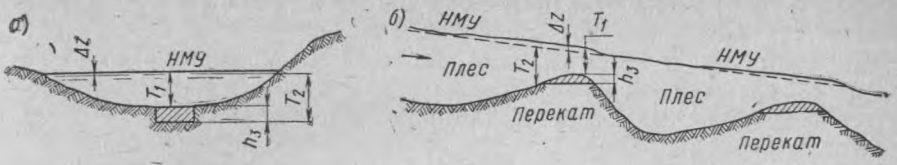


Рис. 1. Профили участка реки при дноуглублении:
а — поперечный; *б* — продольный

ремонтировать. В устьях судоходных рек, впадающих в озера и моря, дноуглубительными снарядами тоже углубляют мелкие места (бары).

Выправление, или выправительные работы,— это устройство в речном русле специальных русловых сооружений, под влиянием которых энергия речного потока направляется на углубление мелких мест размываемого русла и на удаление продуктов размыва в сторону от углубляемого участка. Для предохранения берегов рек от размыва или для прекращения размыва возводят береговые укрепления. На песках меженного русла для повышения их устойчивости рассаживают кустарник. При выправлении рек берегоукрепление и посадки входят в состав выправительных работ.

На рис. 2 показано поперечное сечение речного русла с глубиной T_1 по судовому ходу, в котором со стороны одного берега было поставлено русловое сооружение *А*. Вначале это вызвало некоторый подъем уровня воды на величину Δz, а затем размыв речного дна на величину h_3 и понижение уровня воды (примерно в прежнее положение), в результате чего и получилась новая глубина T_2:

$$T_2 \cong T_1 + h_3. \qquad (2)$$

Таким образом, дноуглубительные и выправительные работы на реках направлены на увеличение глубины существующего судового хода или на устройство нового хода путем понижения речного дна, которое достигается в одном случае непосредственным воздействием снарядов на дно, а в другом — за счет энергии самого речного потока.

В настоящее время на судоходных реках, находящихся в свободном состоянии, габариты судовых ходов поддерживаются и увеличиваются в основном дноуглублением, а полученные при этом прорези закрепляются выправительными сооружениями, т. е. применяется комплекс дноуглубительных и выправительных работ.

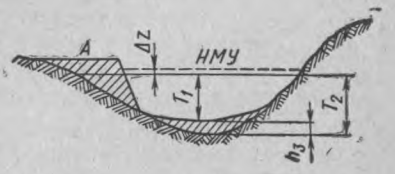


Рис. 2. Поперечный профиль участка реки при выправлении

Для регулирования стока на реках и их притоках или на озерах устраиваются, как уже упоминалось, водохранилища, где в многоводные периоды (например, в паводковые) собираются большие объемы воды, которые затем расходуются в маловодные периоды (например, в межень) и дополняют бытовые расходы реки.

Ниже этих водохранилищ водный и русловой режимы рек изменяются вследствие уменьшения продолжительности и высоты паводка, повышения меженных расходов и поступления осветленных вод из водохранилищ. Это приводит к сложному по длине реки и по времени переформированию русла, но в итоге — к увеличению глубин. Однако на реках с зарегулированным стоком одними попусками воды из водохранилищ не удается обеспечить на нижележащих затруднительных участках судовые ходы с необходимыми глубинами, поэтому одновременно ведут еще дноуглубительные и выправительные работы. Обычно регулирование стока рек осуществляется при возведении на них крупных гидроузлов.

При шлюзовании рек возводятся гидротехнические узлы сооружений, позволяющие комплексно использовать водный поток для получения гидроэлектроэнергии, улучшения судоходных условий, орошения земель, водоснабжения и т. д. В состав гидроузла в этом случае входят плотина, гидростанция, шлюз (судоподъемник) и водозаборные сооружения.

Плотина, возведенная поперек реки, подпирает воды на вышележащем речном участке и создает на гидроузле сосредоточенное падение или напор. Если подпертая плотиной вода перекрывает только русло реки между меженными берегами, выше плотины образуется подпертый бьеф небольшой длины, ширины, площади и емкости. При перекрытии же подпертой водой не только меженного русла, но и поймы до коренных берегов, выше плотины образуется водохранилище большой длины, ширины, площади и емкости. Напор на гидроузле необходим для работы турбин, через которые под этим напором пропускается вода, для увеличения судоходных глубин выше плотины, для забора воды на орошение, водоснабжение и т. д.

На шлюзованных реках, в подпертых бьефах и водохранилищах глубины по длине распределяются неравномерно: выше плотин создаются большие глубины, но по мере удаления от плотин они уменьшаются. Шлюз (судоподъемник) служит для пропуска судов из подпертого бьефа или водохранилища в реку, в следующий подпертый бьеф или водохранилище, и наоборот, т. е. для преодоления судами напора на гидроузле.

Шлюзование рек, в отличие от дноуглубления, выправления и регулирования стока, резко меняет скоростной режим речного потока. В подпертых плотинами бьефах и водохранилищах скорости течения уменьшаются и условия движения судов по течению и против течения существенно не отличаются. В широких и глубоких водохранилищах с большими площадями зеркала воды

особое значение приобретают ветровой и волновой режимы, которые создают озерные условия плавания. В связи с этим, кроме подкрепления судов, для их укрытия при большом волнении требуется устройство убежищ.

Для поддержания и увеличения габаритов судовых ходов в подпертых бьефах и на водохранилищах необходимо проводить еще дноуглубительные работы. Такие работы требуются прежде всего на перекатах в зонах выклинивания подпора, т. е. в хвостовых частях бьефов и водохранилищ как на реке, так и на ее притоках, впадающих в бьеф или водохранилище.

На водохранилищах судовой ход местами идет по затопленной пойме в подводных каналах-прорезях, которые постепенно деформируются и тоже требуют периодических дноуглубительных работ. Кроме того, дноуглубительные работы требуются на подходах к портам, пристаням и другим пунктам, расположенным на водохранилищах, а также на судовых ходах притоков, подпертых водохранилищами. Берега водохранилищ в районах населенных пунктов, портов, пристаней, промышленных предприятий приходится укреплять, чтобы защитить их от разрушения волнами.

Судоходные каналы можно разделить на соединительные — при соединении рек через водоразделы, обходные — идущие в обход озер, спрямляющие — в обход извилин, подходные — на подходах к шлюзам, портам, пристаням, судоремонтным заводам, а также на шлюзованные и открытые.

Откосы и дно судоходных каналов под влиянием судовых волн и течения постепенно деформируются, и для поддержания и закрепления их габаритов тоже требуются дноуглубительные и берегоукрепительные работы.

Выбор метода улучшения водного пути и габаритов судового хода для расчетного объема перевозок и грузооборота должен решаться на основании технико-экономических расчетов, учитывающих капиталовложения и эксплуатационные расходы по пути и флоту, а также использование водного пути другими отраслями народного хозяйства. (Технико-экономические расчеты излагаются в дисциплине «Экономика водного транспорта».)

§ 3. ТРАНСПОРТНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДНЫХ ПУТЕЙ И ПЕРСПЕКТИВНАЯ СХЕМА УЛУЧШЕНИЯ ИХ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ

Технико-экономическое обоснование габаритов водных путей и методов их улучшения может привести к назначению различных по габаритам судовых ходов и судоходных сооружений. Однако различные габариты судовых ходов и судоходных сооружений определяют и разные размерения транспортных судов, пользующихся этими ходами и сооружениями, что может повлечь за собой неоправданную их многотипность. Многотипность транспортных судов ограничивает серийность их постройки, приводит к увеличению строительной стоимости судов, к усложнению и удо-

рожанию их ремонта, к ухудшению условий эксплуатации судов и увеличению себестоимости перевозок. Разнообразие габаритов судоходных сооружений не позволяет применять типовые сборные конструкции и оборудование, что удорожает их строительство и эксплуатацию.

Во избежание такого неоправданного разнообразия габаритов судовых ходов, судоходных сооружений и размерений транспортных судов все водные пути разделены на классы с определенными габаритами. При такой классификации технико-экономическое обоснование габаритов для данного водного пути сводится к обоснованию выбора габаритов одного из этих классов.

Внутренние водные пути делятся на четыре характерные для основных видов транспорта группы сообщений: общесоюзные; межрайонные; внутрирайонные; подъездные.

Общесоюзные сообщения — главнейшие воднотранспортные сверхмагистрали страны, обеспечивающие перевозку транзитных грузов и пассажиров. Межрайонные сообщения являются основными и преобладающими водными магистралями, обеспечивающими транспортные связи между крупными экономическими районами. Внутрирайонные сообщения представляют собой водные пути местного значения для перевозок на коротких пробегах внутри экономических районов; они имеют выход на смежные магистрали. Подъездные пути — это «малые реки», связывающие предприятия, совхозы, колхозы и места добычи сырья с внутрирайонными сообщениями.

Каждая группа сообщений, кроме общесоюзной, разделена на два класса. Такое деление позволяет разбить водные пути на семь классов: I — сверхмагистрали, II и III — магистрали, IV и V — пути местного значения, VI и VII — подъездные пути или малые реки.

В качестве транспортно-гидрологических показателей, отражающих влияние характеристик пути на использование провозной способности флота, эксплуатируемого на данном пути, приняты: грузоподъемность и размерения наибольших судов; глубины на судовом ходу, минимальные гарантийные и средненавигационные (используемые судоходством), ширина и радиус закруглений судового хода, допустимые эксплуатационные скорости течения и длительность навигации; для шлюзов — габариты камер и время шлюзования.

В табл. 1 приведены для четырех классов водных путей средненавигационные и минимальные глубины, минимальная густота движения, ширина и радиусы закруглений судового хода.

В настоящее время каждое управление пути и канала имеет перспективную проектную схему развития и улучшения водных путей своего бассейна. В соответствии с этой схемой разрабатывают годовые планы работ по бассейну и проекты производства путевых работ на каждую навигацию. Проектная схема периодически корректируется и является основным документом, определяющим направленность путевых работ.

Q=100-250 – средние реки

Таблица 1

Наименование показателя	Величина показателя для класса водных путей			
	I	III	V	VII
Средняя навигационная используемая судоходством глубина судового хода, м	>3,0	2,4—1,65	1,35—1,0	<0,75
Минимальная гарантийная глубина судового хода, м	>2,0	2,0—1,1	1,1—0,6	<0,6
Минимальная густота движения на 1 км пути (для свободных рек), тыс. ткм	500—16 000	150—2 500	50—500	<100
Ширина судового хода, м . .	100—85	75—70	50—40	20—14
Радиус закругления, м . . .	1000—600	600—350	300—200	120—90

Примечание. Значительный диапазон густоты движения на путях одного и того же класса объясняется различным объемом путевых работ для достижения одних и тех же глубин.

Перспективная проектная схема улучшения судоходных условий содержит гидрологическую, геоморфологическую и судоходную характеристики водного пути, а также характеристики выполняемых путевых работ и имеющихся судоходных сооружений. В этой схеме устанавливают требования к водному пути со стороны судоходства, выясняют намечаемое на нем гидростроительство и его значение для речного транспорта и на основании этого разрабатывают комплекс путевых работ для улучшения судоходных условий.

В перспективной схеме улучшения судоходных условий на реке выбирают положение судового хода, устанавливают перечень затруднительных для судоходства участков, разрабатывают проектные схемы и очередность улучшения этих участков, определяют виды путевых работ для этого и подсчитывают объемы работ. При наличии на реке водохранилищ корректируют на них положение судовых ходов, намечают необходимые путевые работы и подсчитывают объемы этих работ. Кроме того, устанавливают влияние зарегулированных расходов из водохранилищ на русло реки ниже их, требуемые здесь путевые работы и их объемы. В итоге рассчитывают технические средства для выполнения всех видов работ и экономические показатели.

Вся ежегодная работа управлений пути и каналов должна проводиться в соответствии с проектной схемой улучшения судоходных условий водных путей на перспективу. Составление этой перспективной схемы, разработка проектов улучшения затруднительных участков и проектов производства путевых работ на каждую навигацию, а также выполнение этих работ требует знания особенностей режима рек и водохранилищ.

Глава II

РЕЧНОЙ ПОТОК И ЕГО РУСЛО

§ 4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЧНОМ ПОТОКЕ И РУСЛЕ

Дноуглубительные и выправительные работы, производимые на реках, опираются на законы движения воды в речном русле. Эти законы имеют сложный характер и изучены еще недостаточно.

Можно отметить следующие основные особенности речных потоков.

1. Неустановившееся движение. В результате колебаний стока с поверхности бассейна расходы и уровни воды в реке все время меняются. Особенно сильные изменения происходят во время паводков. Высота весеннего подъема уровней на некоторых реках европейской территории Советского Союза превосходит 10 м.

2. Пространственная неоднородность. Вследствие сложных, неправильных форм русел векторное поле скоростей речного потока неоднородно по любым трем координатным направлениям. Линии тока представляют собой сложные пространственные кривые. Схематизируя эту картину, говорят об основном, продольном движении воды и наложенных на него вторичных (поперечных) течениях.

3. Перемещение наносов. Речные потоки транспортируют во влекомом и взвешенном состояниях большие количества частиц грунта — наносов. Наиболее мелкие частицы, поступающие в реку с поверхности бассейна, имеют поперечник порядка нескольких микронов. По дну рек движутся частицы песка, гравия, гальки, а в горных реках — и валуны. Объем годового стока взвешенных наносов у большинства рек измеряется миллионами и десятками миллионов кубических метров.

4. Взаимодействие с руслом. В каждый данный момент времени состояние потока — поле скоростей, рельеф свободной поверхности полностью определены состоянием русла — его размерами, формой, шероховатостью. Однако под действием течения эти размеры, форма и шероховатость меняются — будучи сложено из подвижных частиц, русло деформируется. Деформации русла вызывают перестройку потока, и таким образом осуществляется непрерывное взаимодействие между движущейся жидкостью и подстилающей твердой средой. Активную сторону в этом взаимодействии представляет, конечно, поток. Русла рек созданы текущей водой, и движение воды продолжает их изменять.

Законы движения естественных потоков и их взаимодействия с руслом изучаются специальной дисциплиной: динамикой русловых потоков. Одной своей стороной она примыкает к гидравлике, составляя ее естественное продолжение, другой — к геоморфологии, где те же объекты — реки, их долины и русла изучаются описательными методами. Динамика русловых потоков связана также с гидрологией и гидрометрией.

Основные положения динамики русловых потоков приводятся в этой главе. В первых параграфах изложены вопросы движения воды в реках, далее транспорт наносов и в конце главы — закономерности образования и развития русел. Более подробные сведения по этим вопросам содержатся в специальных руководствах [1].

§ 5. УРАВНЕНИЯ ОДНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ

Многие важные для инженерной практики результаты можно получить с помощью одномерной теории движения жидкости в открытом русле, излагаемой в курсе гидравлики. Теория называется одномерной потому, что изменение элементов движения рассматривается в ней вдоль одной пространственной координаты — продольной (в общем случае криволинейной) оси потока. Сами элементы движения в каждом поперечном сечении осредняются: скорости — по площади живого сечения, глубины — по его ширине.

Для общего случая неустановившегося неравномерного движения открытого потока мы располагаем следующей системой уравнений гидравлики:

$$I = -\frac{\partial z}{\partial l} = \frac{v^2}{C^2 h} + \frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial l} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}; \qquad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0. \qquad (4)$$

Здесь I — уклон свободной поверхности; z — высота свободной поверхности; l — продольная координата; C — коэффициент Шези; $h = \frac{\omega}{B}$ — средняя глубина (B — ширина сечения по зеркалу воды); ω — площадь живого сечения; $v = \frac{Q}{\omega}$ — средняя скорость; g — ускорение силы тяжести; t — время; Q — расход воды.

Уравнение движения (3) выражает закон изменения количества движения движущейся частицы жидкости. Члены этого уравнения отнесены к единице веса жидкости и по-

[1] Для целей курсового и дипломного проектирования служит учебное пособие: К. В. Гришанин. Теория руслового процесса. М., «Транспорт». 1972. Этой книгой могут пользоваться также инженеры, занимающиеся путевыми и другими гидротехническими работами на реках.

этому безразмерные. Член, стоящий в левой части, выражает силу тяжести, первый член правой части — силу трения, второй член — интенсивность изменения количества движения частицы при ее перемещении вдоль потока (по оси l), третий член — локальную интенсивность изменения количества движения (при произвольном фиксированном значении l). Применяя к задаче о движении частицы жидкости принцип Даламбера, эти два последних члена можно рассматривать как приложенные к частице (фиктивные) силы инерции.

Уравнением неразрывности (4) формулируется закон сохранения вещества жидкости. Из этого уравнения видно, что колебания уровня (изменения площади живого сечения во времени) обусловлены изменением расхода вдоль потока. Если расход по длине реки не меняется, колебания уровня невозможны. Изменяемость расхода по длине реки объясняется тем, что колебания расхода, возникшие в каком-нибудь пункте (в устье притока, в створе гидроэлектростанции), распространяются вниз и вверх по реке в форме волн, т. е. не мгновенно (как в трубе), а с конечной скоростью. Ввиду того что крутизна этих волн (величина отношения высоты к длине) пренебрежимо мала, и чтобы отличить эти волны от ветровых (коротких) волн, их называют длинными волнами. Длинные волны переносят массы жидкости, поэтому их называют также волнами перемещения.

Чтобы получить частное решение системы дифференциальных уравнений (3), (4), т. е. решить конкретную задачу, необходимо располагать начальными и граничными условиями. Начальными условиями для уравнений (3), (4) служат профиль свободной поверхности и закон изменения расхода воды по длине потока на начальный момент времени $t=0$:

$$z=z(l,\ 0),\ Q=Q(l,\ 0).$$

Граничным условием в верхнем конце рассматриваемого участка реки служит закон изменения расхода во времени — «входной гидрограф»: $Q=Q\ (0,\ t)$. На нижнем конце участка, к которому колебания уровня затухают, используется условие однозначной связи между расходом и уровнем, т. е. кривая расходов

$$Q=Q(z).$$

В межень, а также в отдельные периоды паводка, когда колебания расхода незначительны, движение речного потока допустимо считать установившимся. Дифференциальные уравнения установившегося неравномерного движения получают из уравнений (3), (4) путем приравнивания производных по времени нулю. Результат имеет вид

$$I=\frac{v^2}{C^2h}+\frac{v}{g}\ \frac{dv}{dl};\qquad (5)$$

$$Q=\omega v=\text{const}.\qquad (6)$$

Для получения частных интегралов систем (5), (6) достаточно одного граничного условия — кривой расходов $Q=Q(z)$ на нижней границе рассматриваемого участка.

Решая систему уравнений неустановившегося движения (3), (4) можно получить полную картину распространения паводка или попуска по реке: ход изменений расхода и уровня в интересующих нас пунктах, мгновенные профили свободной поверхности для ряда моментов времени.

Система уравнений установившегося неравномерного движения (5), (6) используется для построения кривых свободной поверхности, а также в задачах о распределении расхода по рукавам разветвленного русла.

§ 6. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РУСЕЛ

Надежность результатов, получаемых с помощью уравнений гидравлики, в сильной степени зависит от точности определения сил трения, т. е. от точности оценки гидравлического сопротивления русла. Произвести такую оценку гораздо труднее, чем рассчитать, скажем, сопротивление водопроводной магистрали. Это объясняется тем, что сопротивление естественных русел зависит от ряда факторов и представить влияние каждого из них в количественном виде не удается.

Суммарное сопротивление, оказываемое естественным руслом движению воды, слагается из трех главных частей: сопротивления зернистой поверхности дна; сопротивления донных гряд, сопротивления формы русла. Зимой сюда добавляется сопротивление ледяного покрова. На малых реках в летнюю межень становится заметным сопротивление водной растительности.

Рассмотрим наиболее простой случай прямолинейного или слабо изогнутого русла с плавным изменением глубин. Здесь достаточно учесть влияние двух факторов: зернистой шероховатости дна и макрошероховатости, создаваемой донными грядами. Общий градиент потерь энергии (гидравлический уклон) на таком участке можно представить в виде суммы двух градиентов — градиента I_d, определяемого крупностью донных частиц, и градиента I_r, определяемого размерами гряд:

$$I_f=I_d+I_r. \tag{7}$$

Удобно ввести и соответствующие коэффициенты Шези. Связь коэффициента Шези, отражающего полную пропускную способность русла с двумя частными коэффициентами, записывается в виде

$$\frac{1}{C^2}=\frac{1}{C_d^2}+\frac{1}{C_r^2}. \tag{8}$$

Опыт и теоретические соображения показывают, что соотношение между градиентами I_d и I_r определяется крупностью дон-

ных частиц. На реках, где донные отложения состоят из крупного гравия и гальки и высота гряд невелика (соизмерима с крупностью частиц), преобладающее значение имеет сопротивление зернистой поверхности дна — градиент I_d велик по сравнению с градиентом I_r. На реках с песчаными и песчано-гравелистыми грунтами картина обратная: грядовый рельеф дна сильно развит, высота гряд на 3—4 порядка превосходит диаметр частиц и преобладающее значение имеет макрошероховатость грядового рельефа. На таких реках (а среди судоходных рек их большинство) градиент I_r составляет 80—90% общего градиента потерь. Так как высота гряд определяется глубиной и скоростью потока, то это соотношение означает, что в реках с мелкозернистыми донными грунтами поток сам создает и регулирует шероховатость своего дна.

Величину коэффициента Шези, связанного с донными частицами, можно определить по эмпирической формуле Штриклера

$$C_d = 6{,}7\sqrt{g}\left(\frac{h}{d_{50}}\right)^{1/6}, \qquad (9)$$

где d_{50} — медианный диаметр донных частиц по кривой гранулометрического состава.

Для коэффициента Шези, связанного с грядами, имеется несколько формул, но их точность недостаточна. Основная трудность в определении коэффициента C_r обусловлена тем, что при колебании уровней высота гряд меняется, причем связь высоты гряд с уровнем неоднозначна.

Надо полагать, что ведущиеся интенсивные исследования позволят в не очень далеком будущем создать формулы сопротивления гряд, пригодные для инженерных расчетов. В отличие от этого, нет реальных надежд на создание способов количественной оценки третьей слагающей руслового сопротивления — сопротивления формы. Величина сопротивления формы зависит от кривизны русла и от быстроты изменения глубин и ширин по длине реки. Она отражает также воздействие на поток таких препятствий движению, как косы, побочни, осередки. Сопротивление формы особенно велико в местах резкого расширения потока. По своему физическому характеру сопротивление формы одинаково с местными сопротивлениями в трубопроводах. Однако неправильная, сложная и широко меняющаяся геометрия естественных русел делает невозможным построение сколько-нибудь общих расчетных рекомендаций.

Ввиду незавершенности исследований по сопротивлению гряд и невозможности количественно учесть сопротивление формы речная гидравлика прибегает к суммарной оценке сил трения, вводя для этого на каждом участке русла один, охватывающий все виды сопротивлений, коэффициент шероховатости. Значения такого коэффициента неизбежно оказываются сильно меняющимися от участка к участку. При известном значении коэф-

фициента шероховатости n величина коэффициента Шези определяется по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}. \qquad (10)$$

Имеется таблица значений коэффициента n для речных русел, составленная М. Ф. Срибным. Пользование табличными данными допустимо однако лишь в тех случаях, когда оценивается сопротивление участка русла длиною не менее нескольких десятков ширин. В общей величине сопротивления такого участка изменчивость сопротивлений по длине сглаживается. Пользование табличными данными для более коротких участков (порядка B) может вести к грубым ошибкам. Единственный способ выйти из затруднения состоит в определении значений n на основе натурных измерений расхода воды и уклона свободной поверхности (располагая планом русла, зная расход и уклон, нетрудно подсчитать коэффициент Шези C, а от коэффициента C перейти, по формуле Маннинга, к коэффициенту n).

Добавочное осложнение в выбор значений коэффициента шероховатости речного русла вносится тем, что его значения существенно изменяются с изменением уровня воды. В плесовых лощинах наибольшие значения коэффициента шероховатости наблюдаются при низких уровнях. С повышением уровней коэффициент n монотонно убывает — вначале быстро, затем медленно. На перекатах приходится наблюдать более сложную картину. В межень, когда побочни обнажены, рост уровней, так же как в плесовых лощинах, сопровождается уменьшением коэффициента. Однако с началом затопления побочней коэффициент n быстро возрастает — обширная поверхность побочней, при малом слое воды на них, оказывает сильное сопротивление потоку. С дальнейшим повышением уровней, пройдя через максимум, коэффициент n снова убывает и достигает наименьших значений при наибольших наполнениях меженного русла.

При затопленной пойме необходимо рассматривать отдельно русловой и пойменный поток. Шероховатость пойм, как правило, очень велика.

Из изложенного видно, что для достоверной оценки гидравлического сопротивления короткого участка речного русла требуется значительный объем исходных данных — расходы воды и уклоны, измеренные при трех-четырех различных уровнях воды.

§ 7. ДВИЖЕНИЕ ПАВОДКА

Колебания стока у равнинных рек происходят медленно. Подъем уровня на 0,5 м за сутки считается большим. Поэтому значения локального ускорения $\frac{\partial v}{\partial t}$, входящего в правую часть уравнения (3), всегда малы. Малость локального ускорения приводит

к очень важному для речной гидравлики результату — практической однозначности связей между расходом и уровнем. Кривые расходов $Q=Q(z)$, которые строятся на основании гидрометрических данных, дают, в рамках точности измерений, для каждого уровня одно значение расхода — и на подъеме и на спаде уровней. Как будет показано дальше, совсем иная картина имеется при быстрых колебаниях расхода, вызываемых суточным регулированием мощности гидроэлектростанций. Так как производная $\frac{\partial v}{\partial t}$ на подъеме уровней положительна, а на спаде отрицательна, то при ее большой абсолютной величине уклон свободной поверхности на подъеме может сильно превосходить уклон свободной поверхности на спаде. В результате при одном и том же уровне расход во время подъема может быть гораздо больше, чем во время спада. При естественных колебаниях стока неоднозначность связи между Q и z встречается как исключение и никогда не бывает резкой.

Если расход однозначно зависит от уровня, то, пренебрегая деформациями русла, можно считать, что он однозначно связан и с площадью живого сечения. Таким образом, при медленных колебаниях расхода воды должна существовать функция

$$Q=Q(\omega,\ l) \tag{11}$$

(изменяемость расхода по длине потока есть обязательное условие неустановившегося движения). Взяв частную производную от Q по ω, умножим на нее члены уравнения неразрывности (4). Учтя, что $\frac{\partial Q}{\partial \omega}\frac{\partial \omega}{\partial t}=\frac{\partial Q}{\partial t}$, будем иметь

$$\frac{\partial Q}{\partial l}\frac{\partial Q}{\partial \omega}+\frac{\partial Q}{\partial t}=0. \tag{12}$$

Возьмем некоторое определенное значение расхода воды $Q=$ $=\text{const}$ и проследим за его распространением вниз по реке. Так как расход фиксирован, то его полный дифференциал должен равняться нулю:

$$dQ=\frac{\partial Q}{\partial l}\,dl+\frac{\partial Q}{\partial t}\,dt=0,$$

что можно переписать в виде

$$\frac{\partial Q}{\partial l}\cdot\frac{dl}{dt}+\frac{\partial Q}{\partial t}=0. \tag{13}$$

Производная $\frac{dl}{dt}$ есть, очевидно, скорость распространения расхода. Сравнивая уравнение (13) с уравнением (12) и обозначая скорость распространения расхода c_Q, получим:

$$c_Q=\frac{\partial Q}{\partial \omega}. \tag{14}$$

Подставив сюда $Q=\omega v$, после дифференцирования найдем:

$$c_Q = v+\omega\frac{\partial v}{\partial \omega}\,. \qquad (15)$$

Так как скорость течения с ростом площади ω (с повышением уровня) возрастает, то производная $\frac{\partial v}{\partial \omega}>0$, и, таким образом, скорость распространения расхода всегда больше скорости течения. Из уравнения (15) следует также, что скорость распространения увеличивается с увеличением расхода. Скорость c_Q в гидрологии называется скоростью добегания. Формула (15) была получена Бретоном.

Постоянные гидрометрические створы разбиваются, по возможности, в устойчивых, прямолинейных плесовых лощинах с цилиндрической формой русла. Движение воды на таких участках рек близко к равномерному. Это значит, что сила тяжести здесь практически уравновешена силой трения и глубина не изменяется вдоль потока:

$$I=\frac{v^2}{C^2h}\,, \quad \frac{\partial h}{\partial l}=0.$$

Учтя эти условия в уравнениях неустановившегося движения (3), (4), можно получить, что все однозначные кривые расходов отвечают одному и тому же универсальному закону изменения средней глубины сечения с изменением расхода воды. Этот закон записывается так:

$$h=M\frac{Q^{1/2}}{(gB)^{1/4}}\,, \qquad (16)$$

где M — безразмерный коэффициент, постоянный для данного гидроствора.

Решая уравнение (16) относительно расхода воды, получаем:

$$Q=\frac{1}{M^2}\,h^2(gB)^{1/2}\,. \qquad (17)$$

Если в данном гидростворе измерены единичные расходы, то, определив по этим измерениям значение постоянной M, можно воспользоваться уравнением (17) для интерполяции и экстраполяции кривой расходов (в пределах меженного русла).

Теоретические соображения показывают, что в реках с мелкозернистыми донными отложениями, где поток сам регулирует шероховатость своего дна, постоянная M должна лишь слабо, случайным образом, меняться от одного устойчивого гидрометрического участка к другому. Гидрометрические данные это подтверждают. Среднее значение постоянной M, подсчитанное по данным измерений на 35 гидрометрических створах СССР, равно $0{,}92\pm0{,}12$. В расчетах для рек с мелкозернистыми грунтами можно пользоваться округленным значением $M=0{,}9$. График

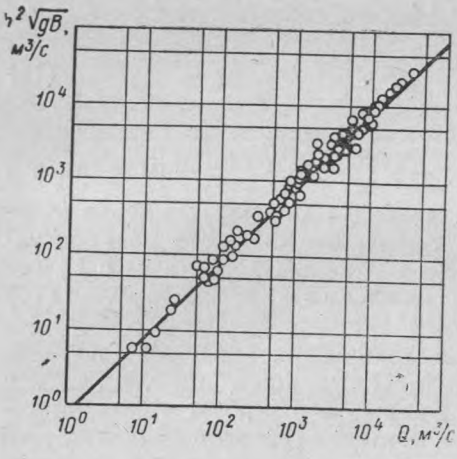


Рис. 3. Универсальная кривая расходов для рек с песчаным дном

уравнения (17), построенный при этом значении M, с нанесенными точками измерений показан на рис. 3. Этот график представляет собою универсальную кривую расходов, действительную для всех гидрометрических створов на равнинных реках с мелкозернистыми грунтами. Если мы располагаем поперечным сечением устойчивой прямолинейной плесовой лощины, где не производилось никаких измерений, то по графику (см. рис. 3) можно найти приближенное значение расхода воды при любом наполнении меженного русла.

Разделив обе части уравнения (17) на площадь живого сечения $\omega = Bh$, получим формулу средней скорости течения

$$v = \frac{1}{M^2} h \left(\frac{g}{B}\right)^{1/2}. \qquad (18)$$

Подстановка этого выражения в уравнение Бретона (15) приводит к следующей формуле скорости распространения расхода:

$$c_Q = (1+3\beta)\frac{v}{2}, \qquad (19)$$

где $\beta \leqslant 1$ — отношение средней глубины сечения к максимальной. При параболической форме поперечных сечений $\beta = \frac{2}{3}$ и отсюда $c_Q = \frac{3}{2}v$. В русле прямоугольного сечения $\beta = 1$ и $c_Q = 2v$. Наблюдения показывают, что пока поток движется в основном русле, скорости распространения расхода действительно бывают больше скорости течения в 1,5—2,0 раза. С выходом реки на пойму скорость распространения расхода снижается. Формула (16) и последующие были получены К. В. Гришаниным.

Так как данный расход воды распространяется вдоль реки с одной и той же скоростью и на подъеме уровней и при спаде, то волна паводка, двигаясь по бесприточному участку, не расплывается. Если бесприточный участок длинный, делается заметным перекашивание гидрографа — большие расходы движутся быстрее малых и подъем становится продолжительнее, а спад короче.

§ 8. УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ. РАСЧЕТ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Участки с формой русла, близкой к цилиндрической, встречаются на реках не часто и не бывают длинными. На всем остальном протяжении реки размеры и форма поперечных сечений непрерывно меняются и движение потока является неравномерным. С другой стороны, у равнинных рек изменения размеров сечений происходят достаточно плавно, а абсолютные значения скоростей невелики (0,5—1,5 м/с). Это приводит к тому, что силы трения обычно преобладают над силами инерции и во многих случаях расчетов последними пренебрегают.

Ввиду неправильности форм речных русел описать их геометрию в простом аналитическом виде невозможно. Поэтому системы уравнений движения как установившегося, так и неустановившегося решаются в конечных разностях. Это значит, что рассматриваемая часть речного русла разбивается на расчетные участки конечной длины и изменение элементов движения в пределах каждого участка считается линейным. При решении задач неустановившегося движения время также разбивается на конечные интервалы. Для удобства расчетов скорость потока выражается через расход и площадь живого сечения, в уравнение движения вводится модуль расхода $K=\omega C\sqrt{h}$.

Разностная запись уравнения установившегося неравномерного движения (5) получается следующей:

$$\Delta z=\frac{Q^2}{K_{\text{ср}}^2}\Delta l+\frac{Q^2}{2g}\left(\frac{1}{\omega_{i+1}^2}-\frac{1}{\omega_i^2}\right). \qquad (20)$$

Здесь Δz — падение свободной поверхности; Δl — длина расчетного участка; i — номер поперечного сечения, считая сверху вниз; $K_{\text{ср}}$ — среднее на участке значение модуля расхода.

$$K_{\text{ср}}=\frac{K_i+K_{i+1}}{2}.$$

Если силами инерции можно пренебрегать, уравнение движения принимает совсем простую форму:

$$\Delta z=\frac{Q^2}{K_{\text{ср}}^2}\Delta l. \qquad (21)$$

В курсах гидравлики излагается ряд способов построения кривых свободной поверхности в естественных руслах. Выбор между ними надо основывать на составе исходных данных и на виде используемого уравнения — (20) или (21). Здесь в методических целях мы изложим наиболее простой способ последовательных приближений, применив его к тому чаще всего встречающемуся случаю, когда силами инерции можно пренебрегать.

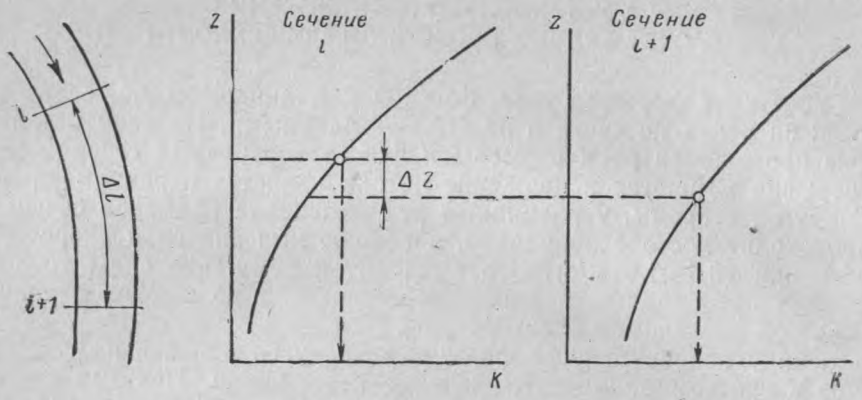


Рис. 4. Расчет падения свободной поверхности с помощью кривых модуля расхода

Исходные данные должны состоять из плана русла, кривой расходов в нижнем замыкающем створе и сведений о коэффициенте шероховатости. Подготовительная работа включает в себя: 1) разбивку расчетных участков; 2) вычисление гидравлических элементов граничных сечений и 3) построение кривых зависимости модуля расхода в этих сечениях от уровня воды. Разбивку расчетных участков обычно удобно вести так, чтобы изменение площади живых сечений в пределах каждого участка было монотонным. Гидравлические элементы сечений ω, B, h определяются для трех-четырех уровней в предполагаемом диапазоне изменения высот свободной поверхности.

Расчет падений свободной поверхности выполняется следующим образом. Пусть уровень на нижней границе расчетного участка — в сечении $i+1$, при заданном расходе воды, известен. Пользуясь кривой $K=K(z)$ для этого сечения, находим значение модуля расхода K_{i+1} (рис. 4). Далее задаемся падением свободной поверхности $\Delta z^{(1)}$ в первом приближении и получаем соответствующее значение уровня на верхней границе участка: $z_i^{(1)} = z_{i+1} + \Delta z^{(1)}$. По уровню $z_i^{(1)}$ определяем модуль расхода $K_i^{(1)}$ и подсчитываем средний модуль расхода:

$$K_{\text{ср}}^{(1)} = \frac{1}{2}\,(K_{i+1} + K_i^{(1)}).$$

Подставив значение $K_{\text{ср}}^{(1)}$ в формулу (21), находим Δz. Если оказывается, что $\Delta z = \Delta z^{(1)}$, т. е. падение, рассчитанное по формуле (21), совпадает с тем, которым мы задались, расчет для данного участка закончен. В противном случае задаемся падением $\Delta z^{(2)}$ во втором приближении и повторяем подсчеты. Обычно двух-трех приближений достаточно для получения окончательного значения Δz. В практике расчетов способ последовательных при-

ближений, ввиду его трудоемкости, применяется редко. Для решения уравнения (21) обычно используется графический способ Н. Н. Павловского.

Если расчеты носят массовый характер, прибегают к машинному счету.

§ 9. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ РЕЧНЫХ ПОТОКОВ

Во всех естественных потоках наблюдается развитое турбулентное движение воды. Для средних и больших рек характерны значения числа Рейнольдса $\mathrm{Re}=\frac{vh}{\nu}$ порядка 10^6. Эти высокие числа Рейнольдса в сочетании с шероховатым дном и обеспечивают действие в реках квадратичного закона сопротивления.

Как известно, главная черта турбулентности состоит в перемешивании жидкости, в наложении на основное течение хаотических движений отдельных жидких масс. В фиксированной точке эти хаотические движения вызывают пульсацию скорости и давления. В связи с этим, по предложению Рейнольдса, компоненты мгновенной скорости и мгновенное давление в точке выражают в виде сумм соответствующих осредненных величин и пульсационных добавок:

$$v_x=\overline{v}_x+v'_x,\quad v_y=\overline{v}_y+v'_y,\quad v_z=\overline{v}_z+v'_z,\quad p=\overline{p}+p'.$$

Чертой здесь отмечены осредненные величины, штрихом — пульсационные.

В большинстве практических задач главный интерес представляют осредненные величины. В частности, важно знать, как распределяются осредненные скорости в поперечном сечении потока. Надежное и проверенное опытом, хотя и приближенное, решение этого вопроса имеется лишь для простейшего случая плоско-параллельного осредненного движения. Такое движение можно наблюдать в середине широкого канала прямоугольного сечения, когда течение воды в нем равномерное. Тогда осредненные скорости изменяются только по вертикали.

Приближенный закон распределения осредненных скоростей по вертикали равномерного открытого потока имеет вид (индекс x у обозначения скорости опускаем)

$$\overline{v}=\overline{v}_{\mathrm{ср}}-\frac{1}{\varkappa}\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}\left(\ln\frac{h}{z}-1\right). \qquad (22)$$

Здесь $\overline{v}_{\mathrm{ср}}$ — средняя скорость на вертикали; τ_0 — касательное напряжение на дне; ρ — плотность жидкости; h — глубина потока; z — расстояние от дна; $\varkappa$ — эмпирический коэффициент, известный под названием постоянной Кармана. По данным опытов В. Вано-ни, с течениями в открытых лотках $\varkappa=0{,}46$.

Согласно уравнению равномерного движения,

$$\tau_0 = \rho g h I, \tag{23}$$

где I — гидравлический уклон. В целях простоты записи во всех расчетах, касающихся турбулентных потоков, используется обозначение

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{ghI} = v_*.$$

Так как величина v_* имеет размерность LT^{-1}, ее называют динамической скоростью. Использовав обозначение динамической скорости, можем переписать формулу (22) в виде

$$\bar{v} = \bar{v}_{ср} - \frac{v_*}{\varkappa}\left(\ln\frac{h}{z} - 1\right). \tag{24}$$

При $z=h$, скорость $\bar{v}$ равна максимальной. По уравнению (24) получаем

$$\bar{v}_{max} = \bar{v}_{ср} + \frac{v_*}{\varkappa}. \tag{25}$$

Исключив с помощью равенства (25) среднюю скорость $v_{ср}$ из уравнения (24), будем иметь вторую форму закона распределения скоростей

$$\bar{v} = \bar{v}_{max} - \frac{v_*}{\varkappa}\ln\frac{h}{z}. \tag{26}$$

Измерения, выполненные в реках, подтверждают логарифмический закон распределения скоростей на вертикали, однако значения коэффициента $\varkappa$ получаются меняющимися в довольно широких пределах. Это объясняется как отклонениями течений от равномерного, так и неточностями в определении гидравлического уклона. Заметим, что получаемое из экспериментов Ванони значение $\varkappa=0{,}46$, ввиду небольшого числа опытов, также нельзя считать окончательным. Для течений в круглых трубах обычно принимают $\varkappa=0{,}4$, что установлено опытами И. Никурадзе.

Перемешивание жидкости в турбулентном потоке имеет своим результатом диффузию содержащихся в жидкости «примесей» или субстанций. Такими диффундирующими субстанциями могут быть: растворенные вещества, взвешенные твердые частицы, тепло, количество движения и т. д. Так как диффузионный перенос производится массами жидкости, самые мелкие из которых заключают в себе гигантские количества молекул, то интенсивность турбулентной диффузии несоизмеримо велика по сравнению с интенсивностью молекулярной диффузии. Поэтому турбулентным потокам свойственна сглаженность, выровненность распределений всех участвующих в движении величин. Скорости течения в турбулентном потоке распределены на вертикали гораздо более равномерно, чем в

ламинарном. Температура воды у дна обычно мало отличается от температуры у свободной поверхности. Концентрация мелких глинистых и илистых частиц меняется вдоль вертикали незначительно. Вопрос о турбулентной диффузии более подробно рассматривается в § 15.

§ 10. ДВИЖЕНИЕ РЕЧНОГО ПОТОКА НА ИЗГИБЕ РУСЛА

Двигаясь в криволинейном русле, частицы воды испытывают действие центростремительного ускорения. Ускорение, направленное поперек потока (в сторону центра местной кривизны русла), вызывает поперечный перекос свободной поверхности и перестройку поля скоростей.

Движение жидкости в криволинейном русле имеет ряд общих черт с вращением жидкости. Поэтому, прежде чем рассмотреть изогнутый открытый поток, напомним кратко особенности вращения жидкостей. Простейшим случаем вращательного движения жидкости является плоский вихрь, в котором жидкие частицы движутся по концентрическим окружностям. В тех вихрях, которые мы наблюдаем в природе — за устоем моста, за выступающей из воды сваей, за веслом во время гребка,— кроме кругового движения, всегда имеется осевое и радиальное, однако окружные скорости распределяются приблизительно так же, как при чисто круговом движении. Внимательно наблюдая за движением жидкости в вихре, легко заметить коренное различе между вращательным движением жидких частиц и вращением частиц твердого тела. В то время как у твердого тела, равномерно вращающегося вокруг неподвижной оси, окружные скорости точек линейно растут с радиусом, по закону $v_\varphi = \Omega r$ (Ω — модуль угловой скорости), окружные скорости частиц жидкости в вихре убывают с увеличением расстояния от оси. Гидромеханический анализ явления позволяет получить закон этого убывания в аналитическом виде. Если исключить тонкую цилиндрическую область вокруг оси вихря (так называемое «ядро вихря»), то распределение окружных скоростей следует формуле

$$v_\varphi = \frac{\Gamma}{2\pi r}, \tag{27}$$

где Γ — интенсивность вихря. Интенсивность вихря численно равна циркуляции вектора скорости по контуру, охватывающему ядро вихря (по всем таким контурам циркуляция одинакова):

$$\Gamma = \oint_L (\vec{v} \cdot \vec{\sigma}) dL, \tag{28}$$

где $\vec{\sigma}$ — единичный вектор касательной к кривой L.

Уравнение (27) называется законом площадей. Это название объясняется тем, что при движении по закону (27), радиусы-векторы всех вращающихся частиц ометают в единицу времени одинаковую площадь (секторная скорость всех частиц одна и та же).

Обратимся к криволинейному открытому потоку. Чтобы установить главные свойства движения, рассмотрим наиболее простой случай русла прямоугольного сечения с боковыми стенками, очерченными по дугам концентрических окружностей. Большинство экспериментальных исследований изгиба открытого потока было выполнено в лотках такой формы. В экспериментах изучались: рельеф свободной поверхности, распределение (в плане) средних скоростей на вертикалях, поле местных осредненных скоростей.

Эксперименты показывают следующую картину. В начале поворота (на переходе от прямолинейного участка русла к изогнутому) движение воды довольно хорошо следует закону площадей. Линия наибольших скоростей резко смещается в сторону внутреннего (выпуклого) берега. Под выпуклым берегом располагается глубокая впадина свободной поверхности. Одновременно обнаруживается расслоение потока: донные линии тока отклоняются к выпуклому берегу гораздо круче, чем поверхностные. Это расслоение далее усиливается, и если поток поворачивает на 180°, то во всей нижней половине поворота поверхностные линии тока оказываются прижатыми к внешнему (вогнутому) берегу. Сходясь у вогнутого берега, они перемещают сюда максимум скоростей. Асимметричное распределение скоростей, с наибольшими значениями у внешнего и наименьшими у внутреннего берега, сохраняется довольно далеко за концом изгиба. Продольный уклон свободной поверхности на участке изгиба мал. На крутых поворотах он значительно уступает поперечному уклону. Наиболее высокие отметки свободной поверхности наблюдаются у вогнутого берега — в середине поворота или несколько ниже. Если векторы скоростей разложить на окружную, радиальную и осевую (вертикальную) составляющие, то в плоскости поперечного сечения получается картина циркуляционного движения: вблизи свободной поверхности радиальные скорости направлены в сторону вогнутого берега, а вблизи дна — в сторону выпуклого.

Попытаемся объяснить результаты наблюдений. Свое рассмотрение ограничим участком поворота с наиболее развитым радиальным движением. В поворотах на 180° этот участок находится в середине поворота. Будем пользоваться цилиндрической системой координат r, φ, z. Начнем с поперечного уклона. Поставив целью получить приближенное решение, введем следующие упрощающие положения: 1) радиальная компонента сил трения пренебрежимо мала; 2) давление распределяется в потоке по гидростатическому закону; 3) влияние неравномерности распределения скоростей по вертикали на поперечный уклон несущественно. Проведем две бесконечно близкие координатные плоскости (r, z) и две бесконечно близкие координатные цилиндрические поверх-

ности (φ, z). Пересекаясь, они выделят столб жидкости с основанием $dS = dr\, rd\varphi$ и высотой h (рис. 5, *а, б*). Пользуясь принципом Даламбера, составим условие динамического равновесия этого столба в проекциях на радиальную ось. При отсутствии сил трения на столб жидкости действуют по оси r две силы: обусловленная негоризонтальностью свободной поверхности разность давлений ΔP и центробежная сила инерции ΔR. При гидростатическом распределении давления для силы ΔP имеем выражение (см. рис. 5, *б*)

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial r} dr = \frac{\partial}{\partial r}\left(\rho g \frac{h^2}{2} rd\varphi\right) dr =$$

$$= \rho g h \frac{\partial h}{\partial r} rdrd\varphi.$$

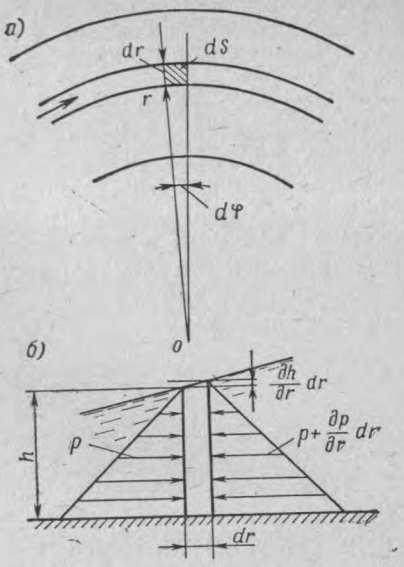


Рис. 5. Схема к определению радиального уклона на изгибе русла:
а — план; *б* — поперечный разрез

Сила инерции

$$\Delta R = \rho\, dr\, rd\varphi\, h \frac{v^2_{\varphi\,\text{ср}}}{r} = \rho h v^2_{\varphi\,\text{ср}}\, dr\, d\varphi,$$

где $v_{\varphi\,\text{ср}}$ — окружная компонента средней скорости на вертикали.

Приравняв сумму сил нулю, найдем:

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{v^2_{\varphi\,\text{ср}}}{gr}. \qquad (29)$$

Так как дно мы считаем горизонтальным, то производная $\frac{\partial h}{\partial r}$ совпадает по абсолютной величине с местным значением радиального уклона свободной поверхности. Приближенное значение среднего радиального уклона можно найти, заменив в формуле (29) среднюю скорость на вертикали средней скоростью в живом сечении и текущий радиус — радиусом r_0 геометрической оси русла:

$$I_r = \frac{Q^2}{gr_0\omega^2}. \qquad (30)$$

Примем теперь во внимание неравномерность распределения осредненных скоростей по вертикали. Сразу же при этом обнаруживается, что равенство (29) может удовлетворяться только в одной точке вертикали — той, где местная осредненная окруж-

ная скорость $v_\phi(z)$ равна средней на вертикали окружной скорости. Выше этой точки $\frac{v_\varphi^2}{gr} > \left|\frac{\partial h}{\partial r}\right|$, ниже этой точки $\frac{v_\varphi^2}{gr} < \left|\frac{\partial h}{\partial r}\right|$ (значки осреднения у местных скоростей опускаем). Это значит, что отбрасывание радиальной компоненты сил трения в общем случае неправомерно — только введя силы трения, можно получить уравнение динамического равновесия, действительное для всех точек вертикали. Отсылая за довольно громоздким аналитическим выводом к руководствам по динамике русловых потоков, ограничимся здесь качественными соображениями. Обозначив отнесенную к единице веса силу трения через f, можем написать уравнение динамического равновесия в следующем общем виде:

$$-\frac{\partial h}{\partial r} + \frac{v_\varphi^2}{gr} \pm f_r = 0, \qquad (31)$$

где f_r — радиальная компонента силы f.

Приняв во внимание указанные выше соотношения между центробежной силой инерции и градиентом давления (поперечным уклоном), находим, что в верхней части вертикали сила f_r имеет знак минус, т. е. направлена к центру кривизны (к выпуклому берегу), а в нижней части вертикали она имеет знак плюс, т. е. направлена в положительном направлении оси r (к вогнутому берегу). Так как силы трения возникают в результате движения жидкости и направлены против течения, то отсюда следует, что в изогнутом потоке имеется радиальное течение, с направлением у свободной поверхности к вогнутому, а у дна — к выпуклому берегу. Это то самое, что дают опыты в лабораториях и измерения в натуре. Таким образом, если поперечный уклон есть необходимое следствие самого существования поперечной инерционной силы, то поперечное течение обусловлено неравномерным распределением этой силы по глубине потока.

На рис. 6, *а* показана картина радиального течения в поперечном сечении изогнутого потока — такая, какую мы наблюдаем

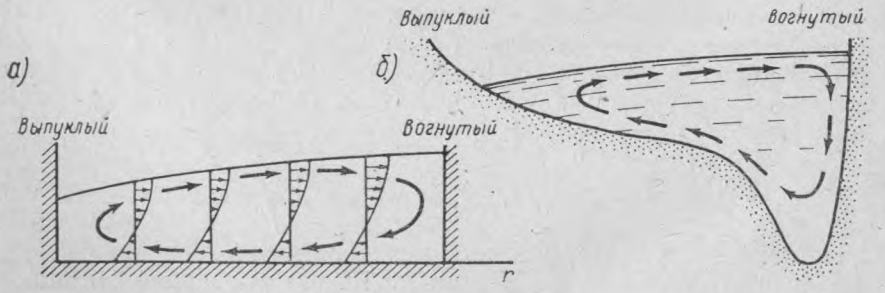


Рис. 6. Радиальное течение:
а — в лабораторном лотке; *б* — в естественном изогнутом русле

в лабораторном лотке. Как уже говорилось, под действием поверхностной ветви радиального течения максимум скоростей смещается к вогнутому берегу. В деформируемом русле это приводит к размыву берега и прилегающей части дна. Увеличение глубины привлекает сюда дополнительный расход воды, и размыв усиливается еще больше. Донная ветвь радиального течения отводит продукты размыва в сторону выпуклого берега. В результате как распределение скоростей, так и форма поперечных сечений на изогнутых участках деформируемых русел оказываются резко несимметричными (рис. 6, *б*).

Радиальное движение воды на изогнутых участках русел играет в жизни рек огромную роль. Создаваемая им неравномерность распределения скоростей в живых сечениях — прижим течения к вогнутым берегам — обусловливает распределение глубин, плановые формы русел и ход их деформаций.

§ 11. ДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ

Речные русла часто делятся на рукава. Между рукавами делится расход воды и расход наносов.

Распределение между рукавами расхода воды зависит от соотношения между сопротивлениями рукавов. Бóльшие расходы идут в рукава с меньшим сопротивлением (т. е. с меньшей длиной и бóльшими площадями живых сечений).

Располагая планом разветвленного участка реки и зная полный расход воды в реке, распределение расхода между рукавами можно найти расчетом. Расчет основан на совместном решении уравнений движения, записанных для отдельных рукавов, и уравнений баланса расходов, записанных для узлов соединения. Для разветвлений с числом узлов больше двух (многоузловых) расчет приходится вести подбором и если число узлов, а значит и рукавов, велико (как например в речных дельтах), необходимо применять вычислительную машину (имеется алгоритм и блок-схема решения задачи на ЭЦВМ, составленные В. В. Ивановым). Расчет двухузловых разветвлений (т. е. разветвлений, имеющих один узел деления и один узел слияния), при известном наполнении русла, выполняется без подбора — при любом числе рукавов. Наиболее простым и часто встречающимся случаем является расчет двухрукавного разветвления. Этот расчет приведен в гл. VI в связи с расчетом запруд.

Вопрос о распределении между рукавами расхода наносов гораздо сложнее вопроса о распределении расхода воды. Не говоря уже о том, что расход наносов далеко не всегда проходит через отдельный рукав транзитом, доля расхода наносов, поступающих в рукав, часто находится в резком несоответствии с долей расхода воды. Причину такого несоответствия составляют особенности внутренней структуры потока в месте деления.

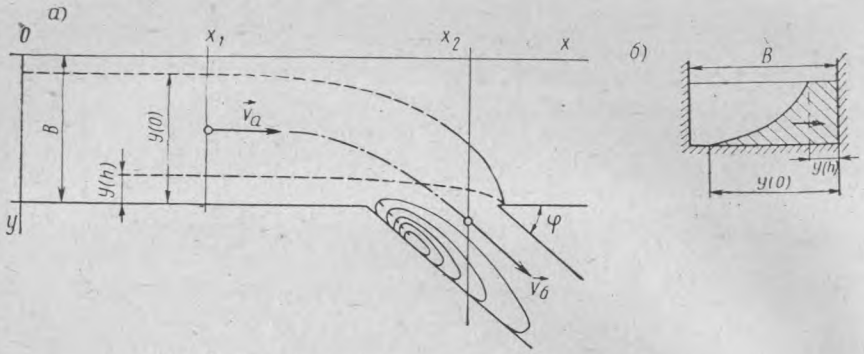


Рис. 7. Деление прямолинейного открытого потока:
а — план; *б* — поперечное сечение с координатой x_1

Чтобы выяснить, в чем состоят эти особенности, так же как в случае изгиба потока, рассмотрим русло с наиболее простой геометрией. Таким будет прямой канал прямоугольного сечения с отходящим от него боковым отводом, тоже прямым и имеющим прямоугольное сечение (рис. 7, *а*). Проследим за перемещением из основного канала в отвод частицы жидкости. Пусть в сечении с координатой x_1, где возмущающим влиянием отвода можно пренебрегать, вектор скорости частицы равен $\vec{v}_a$. Продвинувшись по оси x до сечения с координатой x_2, частица попадает в отвод и вектор ее скорости становится $\vec{v}_б$. Полученное частицей приращение количества движения, в расчете на единицу объема жидкости, напишется

$$\rho\Delta\vec{v}=\rho(\vec{v}_б-\vec{v}_a).$$

Так как участок движения короткий, ролью сил трения можно пренебрегать, и тогда приращение количества движения $\rho\Delta\vec{v}$ должно быть равно интегралу от импульса сил давления, взятому по времени перемещения частицы. Поскольку $dt=\frac{dx}{v_x}$, где v_x — компонента скорости по оси x, указанное равенство имеет вид

$$\rho\Delta\vec{v}=\int_{x_1}^{x_2}\frac{\operatorname{grad}p}{v_x}\,dx. \qquad (32)$$

Подчеркнем, что величины градиента давления — вектора $\operatorname{grad}p$ — берутся в выражении (32) по пути движения частицы. Так как донные скорости по модулю существенно меньше поверхностных, то из уравнения (32) следует важный вывод: для отвлечения донных частиц в боковой отвод необходимы меньшие градиенты давления, т. е. меньшие поперечные уклоны свободной поверхности, чем для отвлечения поверхностных частиц. Посколь-

ку поперечные уклоны свободной поверхности в основном русле убывают с удалением от отвода, это значит, что полоса захвата отводом донных струй основного потока всегда должна быть шире полосы захвата поверхностных струй (рис. 7, *б*):

$$У(0) > У(h). \qquad (33)$$

При делении русла в плане поток расслаивается по глубине (см. рис. 7, *б*).

Опытные данные находятся в полном согласии с проведенным качественным анализом явления. За верховым углом отвода располагается резкая впадина свободной поверхности, к которой стягиваются донные линии тока с большей части, а иногда и со всей ширины основного канала. Жидкость из поверхностных слоев в отвод почти не поступает. Питаясь преимущественно донными слоями основного потока, боковой отвод, как правило, перехватывает почти весь расход наносов. Этим объясняется, в частности, известная из многовековой практики сильная заносимость входов в боковые отводы от магистральных оросительных каналов.

Эксперименты показывают, что ширина $У(0)$ полосы захвата донных струй линейно растет с увеличением скорости течения в отводе. Влияние угла отвода φ (см. рис. 7, *б*) на ширину полосы захвата несущественно.

В разветвлениях естественных русел установленные закономерности, разумеется, сохраняют свою силу, однако неправильные, криволинейные очертания русел и изменчивость глубин добавочно осложняют явление. Во многих случаях одна плановая конфигурация разветвления не позволяет судить о том, как распределяются наносы между рукавами.

Если не прибегать к прямому измерению расходов наносов, то достаточно достоверное качественное суждение можно в этих случаях получить с помощью нивелировки урезов воды. Результаты нивелировки материковых и островных урезов позволяют построить изогипсы свободной поверхности и, следовательно, установить направление поперечного уклона в месте деления. Донные струи основного потока, а с ними и преобладающая часть наносов поступают в рукав, в сторону которого направлен поперечный уклон (рис. 8). Помимо плановой конфигурации участка деления, на рельеф свободной поверхности могут влиять рельеф дна и соотношение между длинами рукавов.

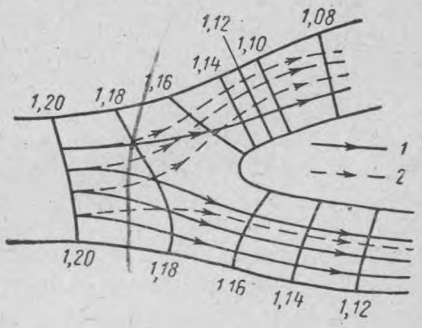


Рис. 8. Линии тока на участке деления речного русла:
1 — поверхностные; *2* — донные

Напомним известные из курса гидрологии основные характеристики речных наносов.

Объемный вес наносов составляет в среднем 2,65 гс/см³. По поперечному размеру (диаметру равновеликой сферы) наносы делятся на следующие фракции (мм): глина — <0,001; ил — 0,001—0,01; пыль — 0,01—0,1; песок — 0,1—1,0; гравий — 1,0—10,0; галька — 10—100; валуны — >100.

Среди донных отложений равнинных рек преобладают пески. Песок с диаметрами частиц 0,1—0,2 мм называется мелким, с диаметрами 0,2—0,5 мм — средним и с диаметрами 0,5—1,0 мм — крупным. Частицы песка и гравия имеют вид скругленных многогранников, частицы гальки имеют уплощенную форму. Состав донных отложений, а также составы влекомых и взвешенных наносов всегда неоднородные. Степень неоднородности гранулометрического состава характеризуется коэффициентами неоднородности. Чаще всего в качестве такого коэффициента берется отношение $\frac{d_{50}}{d_{90}}$ диаметров частиц с вероятностью 90 и 50% по кривой гранулометрического состава. Частицы наносов той же крупности, что крупность донных отложений, называются русловыми. Более мелкие наносы, не встречающиеся в донных отложениях и проходящие весь свой путь во взвешенном состоянии, называются в н е р у с л о в ы м и.

В процессе перемещения наносов важную роль играет их г и д р а в л и ч е с к а я к р у п н о с т ь, т. е. скорость равномерного падения в спокойной воде. В общем случае гидравлическая крупность зависит от плотностей жидкой среды ρ и частиц ρ_s, ускорения силы тяжести g, диаметра частиц d, формы частиц, характеризуемой коэффициентом формы α, и вязкости жидкости μ:

$$w_0 = f(\rho, \rho_s, g, d, \alpha, \mu).$$

Так как у воды и кварца, из которого состоят наносы, плотности практически постоянны и постоянным можно считать также ускорение g, то изменчивость w_0 у речных наносов определяется влиянием только трех факторов: d, α и μ. Коэффициент формы α заметно меняется лишь при переходе от песчано-гравелистых частиц к гальке. Вязкость жидкости влияет на гидравлическую крупность мелких частиц — диаметром не более 1,5 мм. Таким образом, получаем, что гидравлическая крупность песчаных частиц фактически изменяется в зависимости от двух факторов: d и μ. Гидравлическая крупность частиц гравия зависит только от их диаметра. Она выражается простой формулой

$$w_0 = 1{,}2\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d}. \qquad (34)$$

Гидравлическая крупность частиц гальки определяется этой же формулой, но с численным коэффициентом меньше единицы. Таб-

лицы значений гидравлической крупности приводятся в гидравлических справочниках. Так как вязкость воды меняется только с ее температурой, то значения w_0 для частиц диаметром меньше 1,5 мм даются в функции d и $t°$.

Весовое содержание взвешенных наносов в воде называется в гидрологии мутностью и выражается в гс/м³. В динамике русловых потоков вместо мутности принято говорить о весовой концентрации наносов. При этом в теоретических зависимостях более удобной оказывается объемная концентрация — безразмерное отношение объема твердых частиц к объему смеси воды и частиц. Так как размеры взвешенных частиц малы, то допустимо говорить о весовой или объемной концентрации в точке потока. Величина концентрации твердых частиц в точке устанавливается с помощью такого же предельного перехода, как величина точечной концентрации растворенных веществ. Так же как все элементы турбулентного потока, концентрация в точке пульсирует, и ее принято разлагать на осредненную и пульсационную слагаемые.

§ 13. НЕРАЗМЫВАЮЩАЯ СКОРОСТЬ. КОЭФФИЦИЕНТЫ УСТОЙЧИВОСТИ ДОННЫХ ЧАСТИЦ

Опыт показывает, что при некоторых малых скоростях течения даже самые мелкие донные частицы не двигаются. Средняя скорость на вертикали, при которой начинается движение донных частиц, называется неразмывающей скоростью или скоростью начала влечения. В реках скорости меньше неразмывающей могут встретиться только во время межени в пересыхающих второстепенных рукавах. В основном русле скорости всегда больше неразмывающей и по дну перемещаются наносы. Однако неразмывающая скорость входит в виде параметра в ряд расчетных зависимостей и знание ее необходимо.

Сдвиг лежащей на дне твердой частицы происходит под действием сил давления, развиваемых на поверхности частицы обтекающим ее потоком. На лобовой и особенно на обращенной к дну частях поверхности течение замедляется и, в соответствии с законом Бернулли, давление оказывается повышенным. Над частицей поток ускоряется и давление в воде падает. Это пониженное давление передается и в застойную зону за кормой частицы (рис. 9). Следствием такого несимметричного распределения давления является результирующая сила F, направленная косо вверх. Принято раскладывать ее на лобовую $F_л$ и подъемную $F_п$ составляющие. Подъему частицы вверх сопротивляется ее избыточный вес в воде, сдвигу — сила трения, пропорциональная тому же избыточному весу. При равенстве сил, стремящихся сдвинуть частицу, силам, ее удерживающим, создается состояние предельного равновесия, которое всегда неустойчиво. Неразмывающая скорость и отвечает этому состоянию. Разумеется, состояние предельного равновесия не может возникнуть одно-

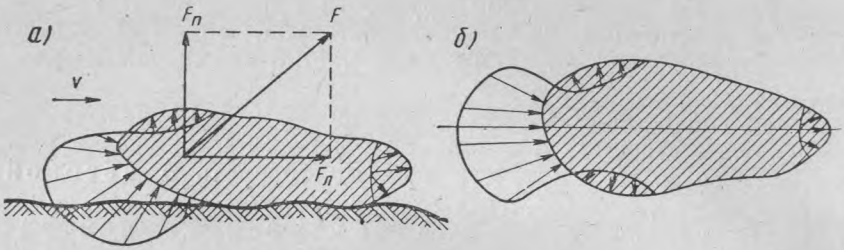


Рис. 9. Распределение гидродинамического давления по поверхности донной частицы:
а — продольный разрез; *б* — план

временно у всех частиц, покрывающих дно. Оно прежде всего создается у отдельных частиц, выступающих над поверхностью дна. С них и начинается движение.

Главные факторы, влияющие на величину неразмывающей скорости, те же, что влияют на гидравлическую крупность частиц,— диаметр частиц и вязкость (температура) воды. И даже граница влияния вязкости та же — диаметр частиц около 1,5 мм. Однако механизм влияния вязкости иной, чем в явлении падения частиц в воде. В то время как влияние вязкости на гидравлическую крупность объясняется ламинарным движением воды в ограниченной зоне вокруг мелкой падающей частицы, в явлении начального сдвига мелких частиц мы имеем дело с ламинарным движением в тонком слое, покрывающем все дно потока. Такой тонкий (толщиной в доли миллиметра) слой ламинарного движения существует на дне, если шероховатость дна (т. е. крупность донных частиц) мала и, кроме того, невелика скорость течения. Непосредственно на поверхности дна скорость равна нулю, в пределах ламинарного слоя она нарастает по линейному закону. Таким образом, если имеются две частицы, обе с диаметром меньше толщины ламинарного слоя, т. е. достаточно мелкие, при одной и той же средней скорости течения бóльшая частица будет подвергаться действию бóльших скоростей, меньшая — меньших. Отношение скоростей на расстояниях от дна, равных диаметрам частиц, равно отношению диаметров. Отсюда следует, что сдвиг обоих частиц может произойти практически одновременно и неразмывающая скорость окажется почти не связанной с их диаметрами. В этом косвенном результате — ослаблении связи с диаметром частиц — и проявляется главным образом влияние вязкости на неразмывающую скорость для мелких фракций.

В общем случае, помимо двух главных факторов — средней геометрической крупности частиц и вязкости воды, на неразмывающую скорость влияют также шероховатость дна и степень неравномерности гранулометрического состава донного грунта.

Для определения неразмывающей скорости имеется ряд расчетных зависимостей. Приведем здесь две из них: эмпирическую

формулу В. Н. Гончарова (1938 г.), применимую во всем диапазоне крупностей частиц песка и гравия, и полуэмпирическую формулу И. И. Леви, действительную для частиц гравия диаметром более 1,5 мм, т. е. вне области влияния вязкости. Формула Гончарова имеет вид

$$v_{\text{нр}}=0{,}96\sqrt{g}\,(d_{50}+0{,}0014)^{0.3}\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\,h\right)^{0.2}. \qquad (35)$$

Формула Леви

$$v_{\text{нр}}=1{,}3\sqrt{gd_{50}}\lg\frac{12h}{d_{90}}. \qquad (36)$$

Значения диаметров частиц должны подставляться в обе формулы в метрах. С уменьшением среднего диаметра частиц величина $v_{\text{нр}}$ по формуле Гончарова стремится к постоянной, т. е. утрачивает связь с диаметром. Эта особенность формулы Гончарова отражает то косвенное влияние вязкости, о котором говорилось выше. Если диаметр частиц велик по сравнению со слагаемым 0,0014 м, формула Гончарова дает тот же закон пропорциональности, что формула Леви: $v_{\text{нр}}\sim\sqrt{gd}$.

Если просуммировать на единице площади дна лобовые силы, приложенные ко всем частицам, получим силу, которая равна по абсолютной величине касательному напряжению на дне τ_0. Этот результат есть простое следствие закона равенства действия противодействию. Дно тормозит поток с такой же силой, с какой поток стремится увлечь дно. Когда имеют в виду последнюю сторону силового взаимодействия между потоком и дном, вместо касательного напряжения говорят о в л е к у щ е й с и л е.

Таким образом, зная касательное напряжение на дне, мы знаем силу, стремящуюся привести донные частицы в движение. Поскольку $\tau_0=\rho v_*^2$, то квадрат динамической скорости или сама динамическая скорость могут служить удобными характеристиками этой силы. Что касается удерживающих сил, то их естественной характеристикой является гидравлическая крупность частиц. Отсюда получаем, что отношение $\frac{w_0}{v_*}$ или $\frac{w_0^2}{v_*^2}$ может быть принято за меру сопротивления частиц сдвигающим усилиям потока. В практике расчетов используются обе эти возможности, причем написанные отношения именуются к о э ф ф и ц и е н т а м и у с т о й ч и в о с т и д о н н ы х ч а с т и ц. В менее широких пределах меняются, очевидно, значения коэффициента устойчивости

$$\xi=\frac{w_0}{v_*}=\frac{w_0}{\sqrt{ghI}}. \qquad (37)$$

Это дает ему преимущество в расчетах. Квадратичный коэффициент обычно применяется в форме, предложенной Г. Эйнштейном:

$$\psi=\left(\frac{\rho_s}{\rho}-1\right)\frac{gd}{v_*^2}=\left(\frac{\rho_s}{\rho}-1\right)\frac{d}{hI}. \qquad (38)$$

Строго говоря, эта форма применима лишь в области значений d, где нет влияния вязкости, но фактически ею пользуются для всех фракций.

Величины, обратные коэффициентам устойчивости,

$$\frac{1}{\xi} = \frac{\sqrt{ghI}}{w_0}\ ;\quad \frac{1}{\psi} = \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho}\right)\frac{hI}{d}$$

называются коэффициентами подвижности донных частиц.

Условию предельного равновесия донных частиц отвечают определенные критические значения коэффициентов устойчивости, обозначаемые ξ_0 и ψ_0. Чем меньше значения ξ и ψ по отношению к своим критическим значениям, тем интенсивнее перемещаются донные частицы, тем больше расход наносов.

Применение коэффициентов ξ и ψ к речным потокам, дно которых всегда покрыто грядами, затрудняется тем обстоятельством, что уклон I в выражениях этих коэффициентов относится к сопротивлению одной лишь зернистой шероховатости дна. В § 6 мы обозначали этот частный уклон I_d. Выделить его из полного уклона свободной поверхности можно лишь расчетом [например, использовав формулу Штриклера (9)]. В связи с этим для сравнительной оценки устойчивости донных частиц в речных руслах последнее время стало применяться отношение $\frac{w_0}{v_{ср}}$ гидравлической крупности частиц к средней скорости течения. Имея условный характер, эта оценка удобна тем, что обе входящие в нее величины легко определимы.

§ 14. ДВИЖЕНИЕ ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ

Влекомыми называются частицы, которые попадают в поток на короткие интервалы времени под действием импульса, сообщенного им на дне силами гидродинамического давления. Движение влекомых наносов имеет скачкообразный характер. Высота скачков имеет порядок диаметра d частиц, длина — порядок $10d$. Наиболее крупные частицы почти не поднимаются над дном. Подъемная сила достаточна только для того, чтобы вызвать их обезвешивание; они перекатываются или проскальзывают по дну.

Скачки и перекатывание по ровному дну — это, однако, лишь простейшая форма движения, которая может существовать в очень ограниченном диапазоне скоростей — пока скорости немного превосходят неразмывающую. При увеличении скоростей происходит общее нарушение устойчивости движения и дно делается волнообразным — покрывается грядами. Транспорт наносов после этого совершается в форме перемещения гряд (рис. 10). Размыв напорного ската гряды и отложение наносов на тыловом скате приводят к непрерывному перемещению гряды вниз по течению. Движение отдельных частиц приобретает при

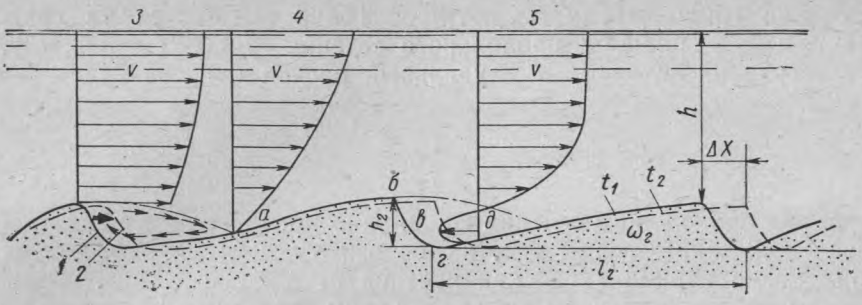


Рис. 10. Движение донных гряд:
1 и *2* — последовательные положения гряд в моменты времени t_1 и t_2; *3, 4, 5* — эпюры распределения скоростей (*а* — напорный скат; *б* — гребень; *в* — тыловой скат; *г* — подвалье; *д* — валец)

этом циклический характер. Совершив серию скачков по напорному скату гряды, частица сваливается на тыловой скат, погребается там под следующими за ней частицами и остается в теле гряды, пока та не продвинется настолько, что частица вновь окажется на поверхности напорного ската. Затем цикл повторяется.

Грядовая форма движения — основная форма движения русловых наносов в реках с песчаным и гравелистым дном. Гряды могут размываться и исчезать при больших скоростях течения — в 2,5—3,0 раза превосходящих неразмывающую скорость. Русловые наносы при этом в массовом количестве переходят во взвешенное состояние. Неразмывающая скорость для условий средних и больших рек с песчаным дном составляет обычно 0,6—0,7 м/с. Отсюда следует, что для смыва гряд требуются скорости течения в интервале 1,5—2,0 м/с. Такие скорости могут наблюдаться далеко не на всех равнинных реках, и то только во время паводка.

Высота гряд (превышение гребня над подвальем) пропорциональна глубине потока. Обычно она составляет от одной десятой до трети глубины. Длины гряд колеблются в широких пределах, составляя примерно от 10 до 50 глубин. На реках с большой подвижностью донных отложений во время паводка наблюдаются гряды и большей длины — примерно до 100 глубин, т. е. порядка ширины русла. Гребни гряд в плане всегда изогнуты. Они имеют вид дуг, обращенных выпуклостью в направлении течения. Скорость движения гряд измеряется тысячными и десятитысячными долями скорости течения. При колебаниях уровня изменения размеров гряд отстают от хода уровней. Это отставание особенно заметно на спаде паводка, и поэтому в конце спада в русле могут встречаться крупные гряды, не соответствующие упавшим глубинам.

Зная размеры и скорость гряд, легко подсчитать переносимый грядами удельный расход наносов. Пусть $T_г$ — период

движения гряд — время, за которое гряда смещается на свою длину, и $\omega_г$ — площадь продольного сечения гряды (см. рис. 10). Тогда средний за время $T_г$ удельный расход наносов будет равен

$$q_s = \frac{\omega_г}{T_г}.$$

Площадь продольного сечения $\omega_г$ можно представить в виде произведения длины гряды $l_г$, на ее высоту $h_г$ и коэффициент формы σ, а период $T_г$ — как частное от деления длины гряды $l_г$ на скорость перемещения $c_г$. Таким образом, получаем:

$$q_s = \sigma h_г c_г. \qquad (39)$$

Формула (39) может быть использована для определения расхода наносов в речном потоке. Закрепив на местности продольный створ, следует сделать по нему два последовательных промера эхолотом. Длина промера должна быть такой, чтобы на батиграмму попало не менее десяти гряд. Совместив батиграммы, можно найти путь Δx, пройденный каждой грядой за время между промерами Δt, а следовательно, и скорость движения гряды $c_г = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Значения коэффициента формы для каждой гряды находятся из соотношения $\sigma = \frac{\omega_г}{l_г h_г}$. Осреднив значения $h_г$, $c_г$ и σ по всем грядам и подставив эти средние в формулу (39), получим удельный расход наносов. Значения коэффициента σ довольно устойчивы, и если гряды по форме однообразны, то для подсчета среднего значения σ можно воспользоваться не всем числом гряд. Обычные значения σ близки к $^2/_3$. Проделав измерения и подсчеты по нескольким продольным створам, можно получить полный расход влекомых наносов в живом сечении. Точность этого способа измерения расхода наносов выше точности способа измерения донными батометрами.

При проектировании путевых работ часто встречается необходимость знать расход влекомых наносов в условиях, которые будут созданы после выполнения намечаемых работ (устройства прорези, постройки выправительных сооружений и т. д.). К сожалению, узнать этот расход с достаточной надежностью в настоящее время невозможно. Даже лучшие из имеющихся расчетных зависимостей имеют очень малую точность. Это объясняется рядом причин, из которых главные следующие: 1) расход наносов пропорционален скорости течения в степени 4—6, поэтому небольшая погрешность в определении скорости вызывает большую ошибку в определении расхода наносов; 2) подавляющее большинство формул получено из измерений в лабораторных лотках при однородном составе наносов, в реках же мы всегда имеем неоднородный состав; 3) измерения в лабораториях ведутся при ровном (безгрядовом) дне, что опять-таки не наблюдается в реках.

Приведем все же несколько формул, имея в виду возможность их использования в ориентировочных расчетах. При дне, сложенном крупными песками и гравием, с относительной зернистой шероховатостью $\frac{d}{h} > 2 \cdot 10^{-4}$, применима формула И. И. Леви

$$q_s = 7{,}6 \cdot 10^{-4} \left(\frac{v_{ср}}{\sqrt{gd}} \right)^3 d (v_{ср} - v_{нр}) \left(\frac{d}{h} \right)^{0{,}25}. \qquad (40)$$

При дне, сложенном средними и мелкими песками, с относительной зернистой шероховатостью $\frac{d}{h} < 5 \cdot 10^{-4}$, можно пользоваться следующей формулой, полученной на кафедре водных путей ЛИВТа на основе данных о деформациях русла и элементах движения гряд на нескольких участках больших равнинных рек СССР:

$$q_s = 0{,}015 \left(\frac{v_{ср}}{v_{нр}} \right)^3 d (v_{ср} - v_{нр}). \qquad (41)$$

Величина неразмывающей скорости $v_{нр}$ для формулы Леви определяется по его же формуле (36) и для формулы ЛИВТа — по зависимости Гончарова (35).

Во всем диапазоне крупностей песка и мелкого гравия допустимо применение формулы Эйнштейна—Брауна

$$q_s = 40 \frac{w_0 d}{\psi^3}, \qquad (42)$$

где ψ — коэффициент устойчивости, определяемый выражением (38). Диаметр d во всех трех формулах следует брать медианный (с вероятностью 50%). Величина q_s выражает удельный объемный расход наносов в плотном теле. Все три формулы полуэмпирические, т. е. построены на основании теоретических соображений, а численные коэффициенты определены из опыта.

§ 15. ДВИЖЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

Перенос потоками твердых частиц во взвешенном состоянии осуществляется посредством механизма *турбулентной диффузии* (см. § 9). Чтобы уяснить этот механизм, рассмотрим простейший случай плоского равномерного открытого потока с неизменяющимся по его длине распределением осредненной концентрации наносов по вертикали (рис. 11). Все находящиеся во взвеси частицы падают со скоростями, равными в среднем их гидравлической крупности. Проведя в потоке произвольную горизонтальную плоскость $z = \text{const}$, найдем, что через единицу ее площади за единицу времени проходит сверху вниз под действием силы тяжести объем наносов, равный в среднем $w_0 \bar{s}$, где $\bar{s} = \bar{s}(z)$ — осредненная объемная концентрация. В результате турбулентно-

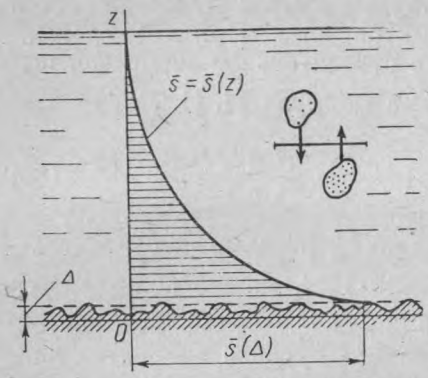


Рис. 11. Эпюра распределения концентрации взвешенных наносов по вертикали и схема турбулентного обмена через горизонтальную площадку

го перемешивания параллельно совершается обмен массами жидкости между частями потока, разделенными данной плоскостью. Так как жидкость несжимаема и в ней нет пустот, то между обменивающимися объемами всегда имеется строгое равенство. Однако в силу неравномерного распределения концентрации, объемы, движущиеся снизу вверх, содержат больше твердых частиц, чем объемы, движущиеся сверху вниз. За счет разности концентраций у встречных объемов и образуется диффузионный поток наносов. В нашем случае диффузия одномерная — диффузионный поток направлен по оси z снизу вверх. Количество диффундирующего вещества (или любой субстанции), проходящее в определенном направлении через единицу площади в единицу времени, называется плотностью диффузионного потока. В теории турбулентной диффузии, так же как в теории молекулярной диффузии, принимается, что плотность диффузионного потока пропорциональна градиенту концентрации.

Применительно к диффузии взвешенных наносов имеем:

$$\vec{q}_{sd}=-K_t \operatorname{grad} \bar{s}, \tag{43}$$

где $\vec{q}_{sd}$ — вектор плотности диффузионного потока наносов и K_t — коэффициент турбулентной диффузии. Знак минус перед правой частью стоит вследствие того, что диффузионный поток направлен в сторону уменьшения концентрации. В первом (довольно грубом) приближении допустимо считать коэффициент K_t скалярной величиной, одинаковой для всех диффундирующих субстанций. В случае одномерной диффузии по оси z из уравнения (43) имеем:

$$(q_{sd})_z=-K_t \frac{d\bar{s}}{dz} \tag{44}$$

при остальных двух компонентах вектора $\vec{q}_{sd}$, равных нулю. Распределение концентрации может оставаться неизменным только в том случае, если диффузионный поток наносов в точности компенсирует их падение в жидкости. Отсюда получаем уравнение установившейся диффузии

$$w_0\bar{s}+K_t\frac{d\bar{s}}{dz}=0. \tag{45}$$

Разделяя в уравнении (45) переменные и интегрируя его от средней высоты выступов шероховатости $z=\Delta$ (т. е. от поверхности дна) до текущего z, находим:

$$\bar{s}(z)=\bar{s}(\Delta)\exp\left(-w_0\int_{\Delta}^{z}\frac{dz}{K_t}\right) \tag{46}$$

— концентрация наносов изменяется на вертикали по экспоненциальному закону, причем неравномерность распределения растет с гидравлической крупностью частиц. При $w_0 \to 0$ (очень мелкие наносы) распределение концентрации приближается к равномерному.

Чтобы довести уравнение (46) до расчетного вида, необходимо знать величину коэффициента диффузии K_t. В отличие от коэффициента молекулярной диффузии, который полностью определяется физическими свойствами среды и практически не изменяется по области движения, коэффициент турбулентной диффузии является функцией координат пространства $K_t=K_t(x, y, z)$, а в общем случае меняется и во времени. Изменчивость коэффициента турбулентной диффузии объясняется тем, что он определяется размерами перемешивающихся масс жидкости, а эти размеры меняются с расстояниями от ограничивающих поток поверхностей. В рассматриваемом плоском равномерном потоке изменение коэффициента турбулентной диффузии дается формулой

$$K_t=\varkappa\rho v_* h\left(1-\frac{z}{h}\right)\frac{z}{h}. \tag{47}$$

Максимальное значение $K_{t\,\max}=0{,}25\,\varkappa\rho v_* h$ коэффициент диффузии имеет на середине глубины. На дне и на свободной поверхности он обращается в нуль. Подставив выражение K_t по формуле (47) в уравнение (46), получаем:

$$\bar{s}(z)=\bar{s}(\Delta)\exp\left[-\frac{w_0 h}{\varkappa v_*}\int_{\Delta}^{z}\frac{dz}{(h-z)z}\right]$$

и после интегрирования окончательно

$$\bar{s}(z)=\bar{s}(\Delta)\left(\frac{h-z}{z}\cdot\frac{\Delta}{h}\right)^{\frac{w_0}{\varkappa v_*}}. \tag{48}$$

При записи выражения (48), предположено, что высота выступов шероховатости мала по сравнению с глубиной: $\Delta \ll h$. Формула (48) была получена Х. Раузом. Она с достаточной точностью описывает распределение концентрации на участках равнинных рек с течением, близким к равномерному, и небольшими значениями концентрации. При больших концентрациях, свойственных горным и полугорным рекам, коэффициент диффузии становится зависимым от концентрации и крупности наносов. Закон распределения (48) сохраняет свой вид, но величина параметра Кармана

$\varkappa$ делается переменной — она убывает с ростом концентрации и крупности наносов.

Заметим, что формула распределения коэффициента диффузии (47) действительна также для процесса диффузии количества движения и именно она лежит в основе закона распределения осредненных скоростей (24). Таким образом, логарифмический закон распределения скоростей и закон распределения концентрации (48) согласованы друг с другом.

При неоднородных наносах формула (48) должна применяться отдельно для каждой фракции и получаемые значения частных концентраций должны складываться. Тогда удельный расход взвешенных наносов выразится формулой

$$q_s = \int_{\Delta}^{h} \Sigma \bar{s}_i(z)\bar{v}(z)dz, \tag{49}$$

где i — номер фракции.

Основные затруднения при пользовании формулой распределения концентрации (48) связаны с большой изменчивостью значений придонной концентрации $\bar{s}(\Delta)$ и неоднозначностью ее связи со скоростью и глубиной потока. Процессы насыщения потока взвешенными наносами и выпадения наносов из потока требуют времени и поэтому происходят на некоторой длине потока. Отсюда местное состояние потока далеко не всегда позволяет судить о количестве содержащихся в нем взвешенных наносов. Теория и опыт показывают, что каждой скорости и глубине потока отвечает некоторое предельное насыщение потока взвешенными наносами определенной крупности. Для этого предельного насыщения М. А. Великановым предложена следующая формула придонной концентрации:

$$\bar{s}(\Delta) = 0{,}8\,\frac{Iv_*}{w_0}\,. \tag{50}$$

Расход взвешенных наносов, отвечающий предельному насыщению, называется транспортирующей способностью потока. Для определения транспортирующей способности имеется ряд формул, из которых приведем здесь лишь формулу М. А. Великанова, вид которой удовлетворительно согласуется с данными измерений в реках,

$$q_s = A\,\frac{v_{\text{ср}}^4}{gw_0}\,, \tag{51}$$

где A — эмпирический коэффициент, значения которого рекомендуется находить на основании гидрометрических измерений.

По данным измерений на р. Среднем Днепре при подъеме паводка, когда концентрация взвешенных наносов бывает наибольшей, коэффициент A составлял около $3\cdot10^{-5}$. Средняя крупность взвешенных русловых наносов была равна 0,2 мм ($w_0 \approx 0{,}015$ м/с).

В равнинных реках фракции крупнее 0,25 мм в состав взвешенных наносов почти не попадают. Во время межени русловые наносы во взвешенном состоянии практически не транспортируются.

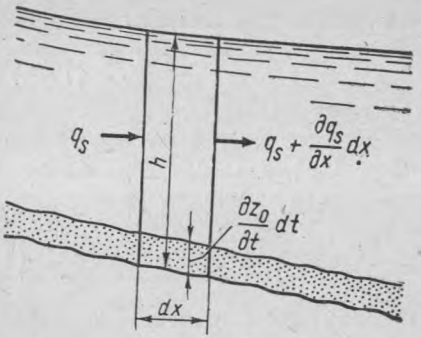


Рис. 12. Схема к выводу уравнения деформации

§ 16. УРАВНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ

Уравнение деформации устанавливает связь между расходом наносов и деформациями дна потока. Оно представляет собой одну из важнейших зависимостей динамики русловых потоков.

Рассмотрим плоский открытый поток, движущийся по деформируемому дну, и выделим в нем элементарный объем в виде параллелепипеда с основанием $dx\,dy$ и с высотой h, равной глубине потока (рис. 12). Составим для этого объема баланс наносов. Будем считать, что движения наносов через его боковые грани нет. Пусть полный расход русловых (влекомых и взвешенных) наносов через верхнюю по течению грань параллелепипеда равен $q_s dy$. Расход наносов через нижнюю грань равен

$$\left(q_s + \frac{\partial q_s}{\partial x} dx\right) dy.$$

Разность между объемами наносов, вошедших через верхнюю и вышедших через нижнюю грань, за малый интервал времени dt составит

$$\left[q_s - \left(q_s + \frac{\partial q_s}{\partial x} dx\right)\right] dy\,dt = -\frac{\partial q_s}{\partial x} dx\,dy\,dt.$$

Эта разность должна быть равна приращению за время dt объема наносов, слагающих дно выделенного параллелепипеда плюс приращение количества содержащихся в нем взвешенных наносов. Первое из этих приращений записывается:

$$(1-\varepsilon)\frac{\partial z_0}{\partial t} dt\,dx\,dy,$$

где ε — коэффициент пористости донных отложений и z_0 — высота дна. Второе равно

$$\frac{\partial (hS)}{\partial t} dt\,dx\,dy,$$

где S — средняя по вертикали объемная концентрация. Собирая все члены баланса вместе, имеем:

$$-\frac{\partial q_s}{\partial x} dx\,dy\,dt = (1-\varepsilon)\frac{\partial z_0}{\partial t} dt\,dx\,dy + \frac{\partial (hS)}{\partial t} dt\,dx\,dy.$$

Сокращая на $dx\,dy\,dt$ и перенося все члены влево, получаем:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x}+(1-\varepsilon)\frac{\partial z_0}{\partial t}+\frac{\partial (hS)}{\partial t}=0. \qquad (52)$$

Концентрация русловых взвешенных наносов в равнинных реках обычно мала. Это позволяет отбросить последний член левой части и писать уравнение деформации в простом виде:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x}+(1-\varepsilon)\frac{\partial z_0}{\partial t}=0. \qquad (53)$$

В практике расчетов нас чаще всего интересует изменение высоты дна, среднее по ширине потока или по ширине выделенной в потоке плановой струи. Выполнив такое осреднение и введя вместо оси x криволинейную геометрическую ось l русла (или струи), будем иметь:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial l}+(1-\varepsilon)B\frac{\partial z_{0\,\mathrm{ср}}}{\partial t}=0. \qquad (54)$$

В этой записи предположено, что ширина B русла (или струи) мало изменяется во времени. Одномерное уравнение деформации (54) преимущественно и применяется в расчетах. И по своему физическому смыслу — закону сохранения наносов — и математически уравнение (54) является аналогом уравнения неразрывности (4) — закона сохранения жидкости. Как из уравнения (4) следует, что колебания уровня в реке возможны лишь в силу изменения расхода воды по длине реки, так и из уравнения (54) следует, что дно может деформироваться только за счет изменения по длине реки расхода наносов. На участках нарастания расхода наносов дно размывается, на участках его уменьшения идет намыв дна. Так как изменения расхода наносов тесно следуют за изменениями скорости течения, то производная $\frac{\partial z_{0\,\mathrm{ср}}}{\partial t}$ всегда имеет знак, обратный знаку производной $\frac{\partial v_{\mathrm{ср}}}{\partial l}$.

Чтобы выполнить с помощью уравнения (54) расчет деформаций, в него необходимо подставить то или иное выражение расхода наносов. Некоторые из формул расхода наносов позволяют получить общий интеграл уравнения деформации. Другие приводят к необходимости решать уравнение в конечных разностях.

§ 17. ВИДЫ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И ТИПЫ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Совокупность явлений образования и последующих переформирований естественных русел под действием текущей воды называется русловым процессом. Наблюдения показывают, что русловой процесс может идти несколькими разными путями и в соответствии с этим в природе встречаются различные виды

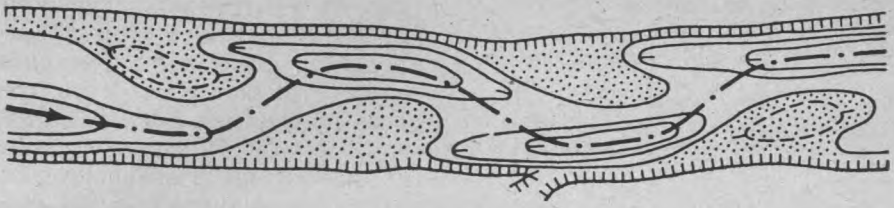


Рис. 13. Участок речного русла с побочневым типом руслового процесса

речных русел. В результате работ ряда авторов, в первую очередь К. И. Россинского, И. А. Кузьмина, Н. Е. Кондратьева и И. В. Попова, к настоящему времени разработана классификация речных русел и типов руслового процесса, которая оказывает существенную помощь в выборе способов улучшения затруднительных участков рек.

Существуют три основных вида речных русел: 1) прямолинейные, или состоящие из длинных прямых участков, однорукавные русла; 2) извилистые однорукавные русла, обычно называемые меандрирующими; 3) разветвленные. Рассмотрим каждый из этих видов.

Если берега реки на значительном протяжении остаются приблизительно прямыми, между ними располагается шахматная цепочка побочней (рис. 13). Плесовые лощины неглубокие и короткие — их длины такие же, как длины побочней. Линия наибольших глубин, и с ней меженный судовой ход, попеременно переваливают от одного берега к другому и обратно. Основное явление руслового процесса состоит в движении и попутном переформировании побочней. Вместе с побочнями смещаются и плесовые лощины, а значит и перевалы между ними — весь русловой рельеф сползает вниз по течению между относительно стабильными берегами. Это сползание идет во времени очень неравномерно. Практически весь свой годовой путь русловые формы проходят за время весеннего паводка, пока побочни покрыты водой. Длина пути, проходимого побочнями, составляет от нескольких десятков до нескольких сот метров в год. Так как над стрежневыми частями побочней скорости течения больше, чем над корневыми, то, перемещаясь, побочни перекашиваются. Этот перекос приводит к тому, что между вытянувшейся вниз оконечностью побочня и берегом образуется затонина, где течение в межень отсутствует. При затоплении побочней затонина не только оживает, но и привлекает большой расход воды. Двигаясь по прямому пути через корневую часть побочня, весенний поток может отторгнуть побочень от берега. Тогда основной поток устремляется в прорыв, отторгнутый побочень некоторое время существует в качестве осередка, а затем его остатки причленяются к пескам противоположного берега.

Если при побочневом типе руслового процесса деформации берегов малы и плановое положение русла меняется крайне мед-

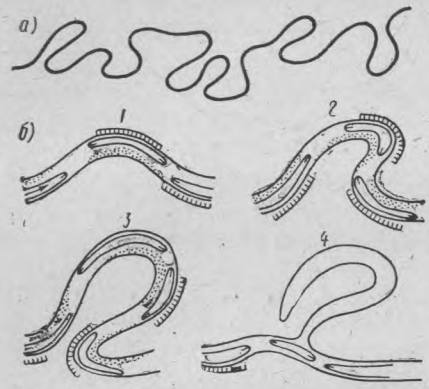


Рис. 14. Свободное меандрирование: *а* — общая конфигурация русла; *б* — последовательные *(1—4)* стадии деформаций извилины

ленно, то противоположную картину мы наблюдаем при меандрировании. Плановые изменения русла составляют здесь суть руслового процесса, и размыв вогнутых берегов есть главное звено этих изменений. Различают три подтипа меандрирования: 1) свободное, 2) незавершенное, 3) ограниченное.

Свободное меандрирование развивается при широкой пойме, когда переформирования извилин не сдерживаются коренными берегами. Второе условие, необходимое для свободного меандрирования, состоит в относительной устойчивости грунтов, слагающих пойму. При свободном меандрировании речные русла способны принимать предельно искривленные плановые формы (рис. 14, *а*). Отдельная извилина проходит следующий цикл изменений (рис. 14, *б*). Слабая в начале кривизна русла с течением времени нарастает, так как чем меньше радиус кривизны, тем интенсивнее радиальное течение и, следовательно, тем сильнее поток прижимается к вогнутому берегу. Извилина, искривляясь, увеличивает свою длину и наконец принимает форму петли — начало и конец извилины сближаются. Во время паводков поток, затопив пойму, устремляется через перешеек извилины и на поверхности поймы появляются промоины и ложбины. Особенно высокий паводок совершает решающий прорыв — русло спрямляется. Входная часть извилины, став боковым отводом, быстро закладывается наносами, и извилина превращается в пойменную старицу. В спрямившемся русле начинается новый цикл меандрирования.

Если грунты, слагающие пойму, слабые, спрямление извилин происходит задолго до стадии предельного искривления. Извилина при этом может долго не отмирать — пока не разовьется спрямляющая протока. Такой ход процесса называется незавершенным меандрированием. Участок реки, развивающийся путем незавершенного меандрирования, показан на рис. 15. Одна из двух показанных на рисунке извилин недавно спрямилась; ложбины на пойме намечают направление, по кото-

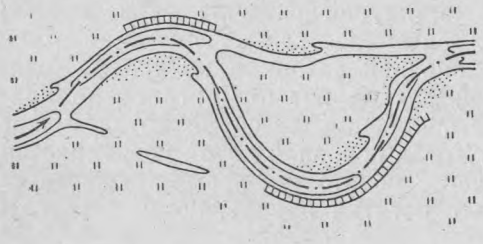


Рис. 15. Участок речного русла с незавершенным меандрированием

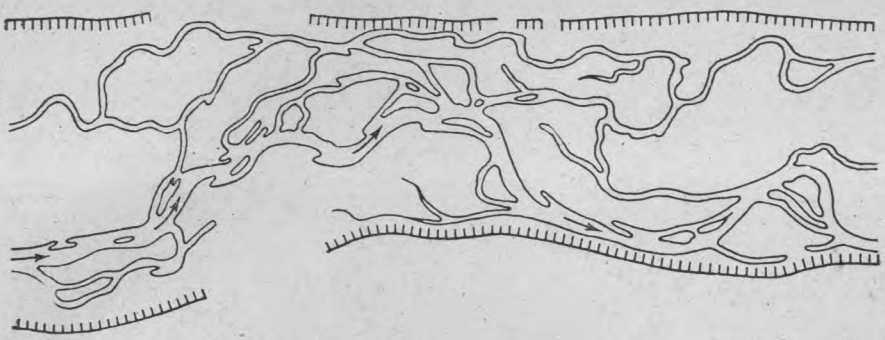


Рис. 16. Пойменная многорукавность

рому может спрямиться вторая извилина. На судоходных реках спрямление извилин часто осуществляется искусственным путем — с помощью дноуглубительных снарядов. На свободно меандрирующих реках работы этого рода имеют первостепенное значение.

Ограниченным называется меандрирование у рек с узкими долинами. В этом случае извилины имеют вид более или менее правильных синусоид, касающихся своими вершинами коренных берегов. Такие синусоидальные извилины медленно сползают вниз по долине, почти не меняя своих форм.

Разветвленность может быть пойменной и русловой. При пойменной разветвленности сеть рукавов расчленяет пойму, создавая острова больших размеров (рис. 16). Главное русло всегда остается ясно выраженным — оно пропускает бóльшую часть расхода воды. Длины пойменных рукавов могут быть весьма значительными — порядка ширины поймы. Сеть рукавов с течением времени меняет свою конфигурацию: отдельные рукава отмирают, на смену им развиваются новые.

При русловой разветвленности острова формируются в пределах самого меженного русла в результате накопления наносов на поверхностях осередков (рис. 17). Эти осередки в свою очередь могут возникать путем отторжения побочней или обсыхания на спаде паводка отдельных крупных гряд. Когда осередок становится настолько высоким, что на нем появляется растительность, процесс отложения наносов усиливается и в конечном итоге высота острова становится равной высоте поймы. Длины образующихся таким путем островов могут равняться нескольким ширинам меженного русла. Число параллельных рукавов чаще всего равно двум-трем, но может быть и больше. Набегая на приверх острова, поток его подмывает, а в застойной зоне за ухвостьем острова идет отложение наносов. В результате большинство островов медленно сползает вниз по реке. В процессе развития и ослабления рукавов значительную роль играют эффекты непропорционального распределения жидкого и твер-

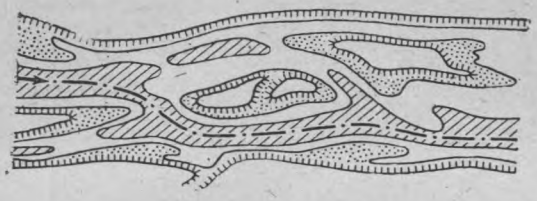


Рис. 17. Русловая (островная) многорукавность

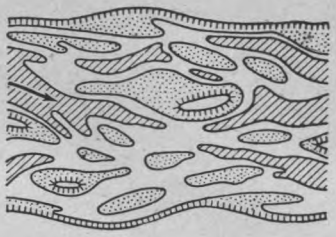


Рис. 18. Осередковая многорукавность

дого расхода, о котором говорилось в § 11. Развивающийся рукав может стать конкурентом основного русла, а иногда и принять на себя его роль. Это вызывает и соответствующий перенос судового хода. Весьма часто перенос судового хода из одного рукава в другой делается искусственно. Для этого в выбранном для судоходства рукаве производятся дноуглубительные работы и одновременно принимаются меры по уменьшению расхода воды и увеличению расхода наносов в закрываемом для судоходства рукаве.

У рек, выходящих из гор и транспортирующих очень много влекомых наносов, развивается особая разновидность русловой многорукавности, которая называется осередковой. Для нее характерна крайняя разветвленность русла (рис. 18). В пределах широкого и мелкого русла разбросано множество осередков, из которых лишь небольшое число покрывается растительностью. Выделить основной рукав трудно или невозможно. Все осередки подвижны, быстро меняют свое очертание, с ними меняется и конфигурация сети рукавов.

Условия, при которых развивается тот или иной тип руслового процесса, еще не до конца ясны. Решающими факторами, по-видимому, являются: величина твердого стока реки, уклон и ширина долины, состав грунтов русла и поймы. По длине одной и той же реки тип руслового процесса может меняться. Часто встречается комбинация двух или трех типов с преобладанием одного из них. Наибольшее распространение из типов руслового процесса имеет свободное и незавершенное меандрирование. Свободное меандрирование может развиваться в чистом виде — без сочетания с другими типами процесса. Ярким примером свободно меандрирующей реки на территории СССР является средний Иртыш. Пример реки с русловым процессом незавершенного меандрирования дает р. Припять. Побочневый процесс в его чистом виде можно наблюдать на р. Вятке. У р. Днепра — в среднем ее течении — пойменная многорукавность комбинируется с побочневым процессом в главном русле. На Большой Северной Двине имеется сложное сочетание русловой и пойменной многорукавности с побочневым процессом на прямолинейных участках реки. Осередковая многорукавность развилась на верхней Оби.

§ 18. ПЕРЕКАТЫ

Продольный профиль дна реки всегда имеет волнообразный вид: глубокие места чередуются с мелкими — плесовые лощины — с перекатами. Перекатом в широком (морфологическом) смысле этого слова, называется всякое обширное скопление донного материала, которое, перекрывая меженное русло по всей его ширине, уменьшает глубины потока по сравнению с выше и нижележащими участками. Такой вал наносов простирается поперек русла почти всегда в косом направлении, и поэтому судовой ход, пересекая его, переваливает от одного берега к другому. В связи с этим в путейской терминологии относительно низкие, перегораживающие русло скопления наносов, глубины на которых всегда больше судоходной глубины, принято называть перевалами. Перекатами же именуются лишь те скопления, глубины на которых в межень ограничивают судоходство. По мере увеличения осадки плавающих судов часть перевалов переходит в перекаты. Ведя на перекате путевые работы, можно превратить его в перевал. В этой и следующей главах применяется общее (морфологическое) понятие переката, а при изложении вопросов путевых работ проводится различие между перекатами и перевалами.

Было предпринято несколько попыток классифицировать перекаты по морфологическим и генетическим признакам. Ни одна из этих классификаций не получила общего признания. Тем не менее они были полезны, так как выявили небольшое число характерных типов, которые повторяются на реках разного масштаба и текущих в разных физико-географических условиях. Эти типы рассмотрены в гл. IV в связи с вопросом о трассировании судоходных прорезей. Здесь ограничимся тем, что приведем схематический план переката с затонской частью с целью показать на нем основные морфологические элементы перекатов. Перекаты с затонской частью, иначе называемые перекатами с заходящими плесовыми лощинами, распространены в реках и представляют большие затруднения для судоходства.

На рис. 19 выделяются следующие элементы переката: верхний и нижний побочни; соединяющая их седловина переката с наиболее низкой частью перекатного вала — корытом переката, по которому проходит судовой ход; пологий напорный скат, более крутой тыловой скат, заканчивающийся подвальем. Вверх от подошвы напорного ската простирается верхняя плесовая лощина. Ложбинка, которая тянется от нее вдоль берега к корневой части нижнего побочня, называется выбоиной верхней плесовой лощины. От подвалья переката начинается нижняя плесовая лощина. Ее тупиковая оконечность, расположенная между берегом и песками верхнего побочня, называется затонской частью переката. Затонская часть может быть сильно развита. Длина ее может превосходить ширину русла, глубины могут лишь немного уступать максимальным глубинам нижней плесовой лощины. Развитая затонская часть и есть та специфическая особенность пере-

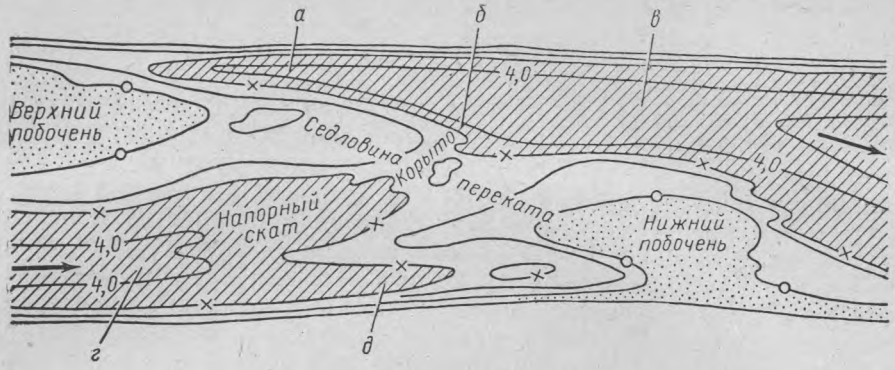


Рис. 19. Перекат с затонской частью и его элементы:
а — затонская часть; *б* — подвалье; *в* — нижняя плесовая лощина; *г* — верхняя плесовая лощина; *д* — выбоина верхней плесовой лощины

катов рассмотренного типа, которая дала им их название. У перекатов других типов она либо слабо развита, либо отсутствует совсем. Далеко не у всех перекатов (в том числе не у всех перекатов с затонской частью) имеется выбоина верхней плесовой лощины. У многих перекатов наблюдается неравное развитие побочней. Довольно часто верхний побочень развит слабо, а нижний занимает обширную площадь. Отмеченными особенностями не ограничиваются различия в строении перекатов — каждый из них имеет свои индивидуальные черты.

Так как для своего образования перекаты нуждаются в наносном материале, то они расположены чаще на тех реках и на тех участках рек, где велик расход наносов. Реки с побочневым типом руслового процесса, как правило, имеют повышенную интенсивность транспорта наносов по сравнению с меандрирующими реками. Поэтому на многих участках рек с побочневым процессом перекаты следуют один за другим так, что нижний побочень одного переката служит верхним побочнем следующего (см. рис. 13). У меандрирующих рек перекаты разделены относительно длинными плесовыми лощинами.

По длине одной и той же реки перекаты располагаются неравномерно — группами. Участок, где расположена группа перекатов, называется перекатным участком. Так как наибольшие расходы русловых наносов проходят в реке во время паводка, то формирование перекатов тесно связано с условиями транспорта наносов паводочным потоком. Группа перекатов образуется там, где на значительной длине русла во время паводка процесс выпадения наносов из потока преобладает над процессом их захвата. Чтобы такое преобладание имелось, необходимы два условия: 1) значительный расход наносов во входном сечении участка; 2) общее (хотя и не монотонное) уменьшение скоростей по длине участка. Питание перекатного участка наносами происходит в основном за счет размыва берегов на вышерасположен-

ном участке русла. Важным источником пополнения реки наносами являются также притоки, а именно те из них, где концентрация и крупность взвешенных русловых наносов больше, чем на главной реке. В степной полосе очень много наносов выносится ливневыми паводками из оврагов и балок. Общее падение скоростей течения во время паводка наблюдается в местах расширения поймы, в местах, где направление русла не совпадает с направлением пойменного потока, а также на участках, которые оказываются в подпоре. Долины многих рек состоят из чередующихся сужений и расширений. К началу каждого большого расширения поймы в русле реки приурочена группа перекатов. Группы перекатов формируются также выше резких сужений поймы, так как такие сужения подпирают речной поток. Если направление течения на пойме составляет большой угол с направлением меженного русла (это бывает там, где русло переходит от одного коренного берега к другому), то при значительных затоплениях поймы течение в меженном русле почти прекращается. Подпоры весеннего потока, помимо сужений поймы, создаются крупными притоками и дамбами мостовых переходов. Подпор от притока возникает в том случае, если паводок на притоке не совпадает во времени с паводком на главной реке. Особенно неблагоприятны подпоры при опережении паводком на притоке паводка на главной реке, так как в этом случае подпор приходится на время подъема уровней, когда вода в главной реке насыщена наносами. Из сказанного видно, что конкретные условия формирования и сохранения перекатных участков разнообразны. При анализе руслового режима перекатного участка всегда следует устанавливать источники питания его наносами и обращать внимание на кинематику потока при затопленной пойме.

Так как течение воды на перекате всегда неравномерное, а часто бывает и не плавно изменяющимся, то перекаты подвержены сильным деформациям. Для путевых работ наибольшее значение имеют ежегодно повторяющиеся циклы намыва и размыва перекатов, их называют сезонными деформациями перекатов. Во время стояния высоких паводочных уровней, когда расход русловых наносов достигает максимальных значений, на большинстве перекатов происходит отложение наносов. Плесовые лощины в это время размываются. Во второй половине спада паводка и в межень на перекатах идет размыв, а в плесовых лощинах — аккумуляция наносов. Ежегодная весенняя заносимость перекатов обусловливает необходимость в ежегодных дноуглубительных работах, т. е. по существу предопределяет всю существующую организацию транзитного дноуглубления.

Огромное практическое значение сезонных деформаций перекатов привлекло к ним внимание ряда ученых и инженеров-гидротехников. Первое теоретическое объяснение явления дал В. М. Лохтин (1897 г.), указав на связь между изменением знака деформаций и изменением знака приращений скорости при переходе от плеса к перекату (в паводок скорость от плеса к

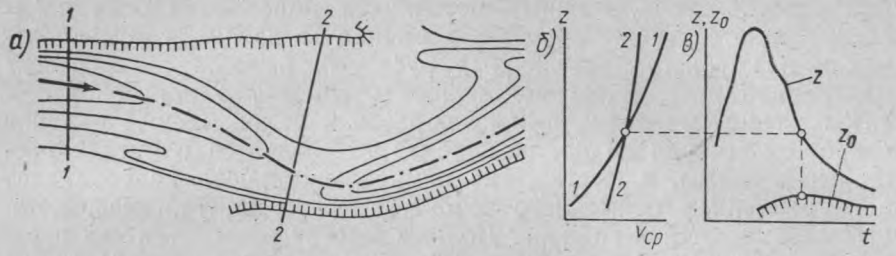


Рис. 20. Сезонные деформации переката в уширении русла:
а — план переката; *б* — графики зависимости скорости течения от уровня; *в* — графики колебания уровней z и высоты гребня переката z_0

перекату падает, в межень растет). Объяснение Лохтина было уточнено К. И. Россинским и И. А. Кузьминым. В последние годы ЛИВТ, совместно с ведущими бассейновыми управлениями пути, выполнил большой цикл натурных исследований перекатов, позволивший выяснить некоторые важные стороны режима перекатов.

Хотя полностью проблема сезонных деформаций перекатов еще не решена, общие контуры такого решения уже определились.

Будем различать два основных случая: а) перекаты, расположенные в уширениях меженного русла, и б) перекаты, расположенные на участках с практически постоянной шириной. Первый случай обычно наблюдается в меандрирующих руслах, второй — в руслах с побочневым процессом.

Рассмотрим первый случай. Типичным для него является одностороннее расширение русла. На подходе к перекату один из пойменных берегов резко отворачивает в сторону, давая место обширному нижнему побочню. Верхний побочень обычно развит слабо (рис. 20, *а*). В межень, когда побочни обнажены, ширина живых сечений в верхней плесовой лощине и на перекате примерно одна и та же. Так как глубины в направлении от плесовой лощины к гребню переката уменьшаются, то уменьшается и площадь живых сечений, т. е. скорость течения, а с ней расход наносов возрастают. В соответствии с уравнением деформации (54) это значит, что напорный скат переката размывается. При подъеме уровней и затоплении побочней ширина живых сечений на перекате резко увеличивается. В направлении от плесовой лощины к гребню переката площади живых сечений растут, скорости падают и на перекате откладываются наносы. Таким образом, как это и заметил Лохтин, смена процесса размыва процессом намыва объясняется изменением знака конвективного ускорения $\frac{\partial v_{co}}{\partial l}$ на напорном скате переката при переходе от низких уровней к высоким. Это изменение можно сделать наглядным, если, как показано на рис. 20, *б*, построить графики $v_{ср} = f(z)$ зависимости средней скорости течения от уровня в плесовой лощине (сечение

1—1) и на перекате (сечение *2—2*). Кривая $v_{ср}=f(z)$ для переката получается почти параллельной оси z, кривая $v_{ср}=f(z)$ для плеса более пологая. Точка пересечения кривых определяет уровень, при котором происходит изменение знака конвективного ускорения. Выше этой точки $v_{ср.пл} > v_{ср.прк}$, ниже этой точки $v_{ср.прк} > v_{ср.пл}$. На перекатах, расположенных в уширениях русла, наблюдаются очень сильные колебания отметок дна (рис. 20, *в*). Толщина весеннего намыва гребня часто составляет 1—2 м. Характерная особенность сезонных деформаций этих перекатов состоит в том, что намыв охватывает почти всю площадь переката и его напорный и тыловой скаты. Намыв напорного ската бывает иногда столь значительным, что гребень переката — наивысшая точка продольного профиля дна — смещается вверх по течению. Размыв во время спада паводка сосредоточивается на напорном скате и гребне переката.

Перейдем ко второму случаю, когда перекат расположен между параллельными пойменными берегами. В этом случае повышение уровней (затопление побочней) увеличивает ширину русла в плесовой лощине так же, как на перекате (это легко представить, взглянув на рис. 13). Почти одинаково увеличивается и скорость течения. Лишь направление скорости на перекате несколько меняется — при низких уровнях оно совпадает с направлением линии наибольших глубин, переваливающей здесь от одного берега к другому, при высоких — оно становится параллельным берегам. В результате распределения деформаций по длине русла в основном определяется ходом глубин. В нижней части верхней плесовой лощины и на пологом напорном скате, где глубины падают, идет размыв. Глубины здесь падают относительно медленно (отношение глубины в плесовой лощине к глубине на перекате, при больших наполнениях русла, не так уже велико) и толщина слоя размыва небольшая. Поскольку однако размывом охвачен длинный участок русла, к гребню переката подходят значительные объемы наносов. Попав на крутой тыловой скат, где скорости течения резко падают, влекомые наносы останавливаются и, накапливаясь на коротком участке, создают эффект продвижения вала переката в сторону нижней плесовой лощины (рис. 21). Такое продвижение может составлять до 200—300 м за один паводок. Так как при подчинении хода деформаций ходу глубин производная $\frac{\partial Q_s}{\partial l}$ обращается в нуль там же, где производная $\frac{\partial z_0}{\partial l}$, т. е. на гребне переката, то отметка гребня почти не меняется — она испытывает лишь циклические колебания с размахом в несколько десятков сантиметров, обусловленные прохождением донных гряд. С падением уровней подчинение хода деформаций ходу глубин сохраняется, сохраняются, следовательно, и знаки деформаций, однако ввиду общего уменьшения скоростей абсолютные значения деформаций становятся малыми. В верхней плесовой лощине деформации практически прекращаются. Таким

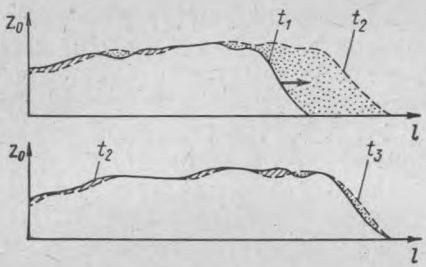


Рис. 21. Сезонные деформации переката на участке с параллельными берегами. Продольные профили дна: перед началом паводка t_1; в середине спада t_2 и в конце навигации t_3

образом, сезонные деформации перекатов в русле с мало изменяющейся шириной сводятся в основном к их перемещению вниз по потоку во время стояния высоких уровней.

В § 14 указывалось, что на реках с большой подвижностью донных отложений во время паводка в русле встречаются очень крупные донные гряды, с длинами порядка ширины русла. Перемещаясь со скоростями от 5 до 20 м/сут, эти гряды наползают на перекаты и вызывают там значительные изменения высоты дна. Отмечено два основных случая взаимодействия больших гряд с валами перекатов. Если тыловой скат переката пологий, большая гряда проходит через перекат транзитом, вызывая на нем временное уменьшение глубин. Если тыловой скат крутой, гряда, дойдя до гребня переката, останавливается, сливаясь с ним в одно целое. Тыловой скат гряды «надстраивает» тыловой скат переката. В течение относительно короткого времени, которое нужно гряде, чтобы с напорного ската переката переместиться к гребню, отметка гребня получает положительное приращение, равное высоте гряды.

Описанные в этом параграфе деформации перекатов — типовые. В связи с разнообразными местными условиями на отдельных перекатах возможны значительные отклонения от типовых схем. Встречаются, в частности, перекаты, где намыв гребней происходит во второй половине спада паводка. Этот намыв не бывает большим, но так как он происходит при низких уровнях, на таких перекатах требуются неоднократные дноуглубительные работы.

Глава III

ВОДОХРАНИЛИЩА И РЕКИ С ЗАРЕГУЛИРОВАННЫМ СТОКОМ

§ 19. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩАМИ

На реках СССР уже создано много крупных водохранилищ и создание новых, особенно на реках Сибири, будет продолжаться. Водохранилища коренным образом меняют режим рек и судоходные условия на них. В зоне самого водохранилища условия плавания близки к тем, которые имеются в больших озерах, ниже гидроузла, подпирающего водохранилище, судоходство должно считаться с особым ходом колебания расходов и уровней и с изменившимся характером руслового процесса. При том огромном размахе, который получило в нашей стране гидротехническое строительство, знание режима водохранилищ и рек с зарегулированным стоком столь же необходимо, как знание режима рек, находящихся в естественном состоянии.

Водохранилища создаются с целью регулирования речного стока, т. е. для перераспределения стока во времени, в соответствии с потребностями хозяйственной деятельности человека. В перераспределении стока заинтересованы следующие отрасли народного хозяйства: энергетика, водный транспорт, мелиорация земель (орошение), водоснабжение. Путем задержки паводочного стока в водохранилище решается также задача предотвращения наводнений. Требования, предъявляемые к регулированию стока различными потребителями, во многом противоречивы. Так, подача из водохранилища наибольших зарегулированных расходов желательна для водного транспорта в летнюю межень, а для энергетики — в осенне-зимний период. Орошение нуждается в резком увеличении зарегулированных расходов на короткий вегетационный период. Интересы энергетики вынуждают к неравномерному расходованию воды в течение суток и по дням недели. Однако эта неравномерность вызывает сильные колебания уровней в нижних бьефах гидроузлов и приводит к затруднениям для судоходства. В СССР при проектировании крупных гидроузлов стремятся к комплексному использованию водохранилищ всеми заинтересованными отраслями народного хозяйства, с возможно лучшим согласованием их требований и получением наибольшего общего экономического эффекта.

Регулирование стока представляет собой циклический процесс: фазы наполнения водохранилища чередуются с фазами его сработки (опорожнения). В зависимости от продолжительности цикла различают регулирование: многолетнее, годичное, суточное и недельное. Наиболее простым является годичное регули-

рование. В условиях снегового питания, свойственного большинству рек СССР, годичное регулирование сводится к следующему. Перед началом весеннего паводка полезная емкость водохранилища полностью освобождается. Начало паводка служит началом годового водохозяйственного цикла. Паводочные воды наполняют водохранилище. Излишек притока воды сбрасывается через плотину. Затем наступает длительный период сработки, когда по установленному графику из водохранилища подаются зарегулированные расходы воды. При превышении притока над отдачей, что может быть например во время осенних дождей, водохранилище частично наполняется, а затем снова идет сработка. Если, положим, в результате высокого осеннего притока к концу цикла в водохранилище остается неизрасходованный запас воды, он сбрасывается через плотину и к началу следующего весеннего паводка полезная емкость водохранилища снова пустая. Таким образом, сток перераспределяется только внутри данного водохозяйственного года.

При многолетнем регулировании сток перераспределяется не только внутри отдельных лет, но и между годами. В многоводные годы водохранилище наполняется до нормального подпорного уровня, а полная сработка его полезного объема производится только к концу маловодного периода, охватывающего обычно группу из 2—3-х лет с низким стоком. Между временем, когда водохранилище наполнено до нормального подпорного уровня, и временем полной сработки его полезного объема водохранилище может проходить через ряд годовых циклов частичного наполнения и частичного опорожнения. Сбросы воды через плотину производятся только в годы высокой водности.

Водохранилища, осуществляющие многолетнее регулирование стока, должны иметь бо́льшие объемы, чем водохранилища годичного регулирования. В СССР к водохранилищам многолетнего регулирования относятся: Верхне-Свирское на р. Свири, Рыбинское на р. Волге, Цымлянское на р. Дону, Мингечаурское на р. Куре, Бухтарминское на р. Иртыше, Иркутское и Братское на р. Ангаре, Красноярское на р. Енисее, Зейское на р. Зее.

Если при годичном и многолетнем регулировании сток по сравнению с его естественным ходом всегда выравнивается, то результат суточного и недельного регулирования обратный — цель этих видов регулирования состоит в обеспечении неравномерного потребления электрической энергии внутри суток и по дням недели. Наибольшее потребление энергии имеется в дневные и особенно в вечерние часы, наименьшее — ночью. В субботу и воскресенье, когда многие предприятия не работают, потребление энергии существенно меньше, чем в другие дни недели. Неравномерная, с короткими простоями работа тепловых электростанций невыгодна, так как поддерживать давление пара в котлах, т. е. сжигать топливо, надо при этом все время. Поэтому во всех крупных энергосистемах проводится деление общего графика нагрузки на две части — базовую,

покрываемую за счет непрерывной работы тепловых станций, и пиковую — покрываемую за счет работы гидроэлектростанций в течение части суток. Для большинства гидроэлектростанций характерен такой график суточной работы: ночью (от 0 до 5—6 ч) работают одна-две турбины с единственной целью не допустить сильного понижения уровней и прекращения течения в нижнем бьефе. Затем по мере роста нагрузки число работающих турбин увеличивается, но на полную мощность станция работает только в вечерние часы (зимой — с 16 ч). В субботу и воскресенье работает лишь небольшая часть турбин. Следствием неравномерной работы гидроэлектростанции являются резкие колебания расходов воды и уровней в ее нижнем бьефе. В створе старейшей из наших гидростанций — Волховской расход воды в течение суток меняется от 200 до 800 м³/с. В нижнем бьефе Иваньковской ГЭС на р. Волге, где глубины обеспечиваются подпором от нижерасположенного Угличского гидроузла, расход воды колеблется за сутки от 10 до 280 м³/с. Объемы, которые требуются для суточного и недельного регулирования, малы и легко размещаются, как, например, у Волховской ГЭС, в призме подпертого речного бьефа. Поэтому суточное и недельное регулирование совмещаются с годичным и многолетним без необходимости в каком-нибудь согласовании.

Водохранилища принято делить по гидрографическому признаку на три вида: озерные, русловые и смешанные. Первые образуются в чашах существующих озер. Подпор только поднимает уровень этих озер и увеличивает площадь зеркала. Примером озерного водохранилища может служить Кубенское, образованное еще в дореволюционное время в чаше озера с тем же названием для обеспечения судоходных глубин на р. Сухоне. Русловые водохранилища создаются за счет затопления части речной долины. Правильнее было бы называть их долинными или пойменными, но, как всегда бывает, неточный, но ставший привычным термин трудно изменить. Все водохранилища на реках Волге, Каме и Днепре — русловые[1]. Смешанными называются водохранилища, размещенные частью в долине реки и частью в чаше озера, из которого река вытекает. К смешанным водохранилищам принадлежат: Верхне-Свирское, включающее долину верхней Свири и Онежское озеро, Череповецкое, включающее долину верхней Шексны и Белое озеро, Бухтарминское, включающее долину верхнего Иртыша и озеро Зайсан.

Основной характеристикой всякого водохранилища служат кривые зависимости площади F его зеркала и его объема V от уровня воды z (рис. 22). Эти кривые строятся на основании подробной съемки чаши водохранилища, выполняемой при проекти-

[1] Исключением является Верхне-Волжское водохранилище, созданное в начале прошлого столетия. Плотина водохранилища была разрушена немецко-фашистскими захватчиками, но после войны восстановлена, и водохранилище по сей день помогает поддерживать судоходство на Верхней Волге.

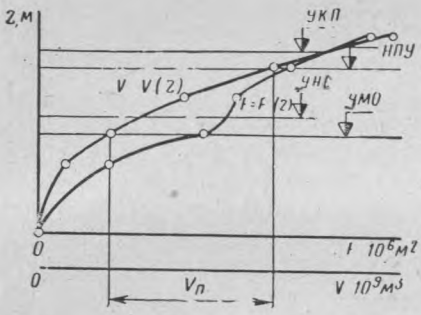


Рис. 22. Кривые площади зеркала и объемов водохранилища

ровании подпорного гидроузла. На эти кривые наносятся установленные проектом расчетные уровни воды. Такими расчетными уровнями являются: нормальный подпорный (НПУ), до которого водохранилище наполняется при нормальной эксплуатации, уровень навигационной сработки (УНС), до которого разрешается срабатывать водохранилище в период навигации, уровень мертвого объема (УМО) — предельный уровень сработки. Объем $V_п$, заключенный между НПУ и УМО, называется полезным объемом водохранилища, а объем, лежащий ниже УМО,— мертвым объемом. Последний для регулирования стока не используется. Кроме трех указанных основных уровней, расчетом определяется также уровень катастрофического паводка (УКП), до которого возможно повышение уровня воды в водохранилище при пропуске паводка с обеспеченностью 0,01% (повторяющегося один раз в 10 000 лет).

Для каждого водохранилища устанавливается несколько определенных значений среднесуточных зарегулированных расходов, причем значения навигационных расходов согласовываются с Министерством речного флота РСФСР. Так, в годы высокой и средней водности в навигационное время из Рыбинского водохранилища подается 800 м³/с. В годы низкой водности навигационный среднесуточный расход уменьшается до 600 м³/с. Назначение величины расхода производится по специальным диспетчерским графикам, в соответствии с запасом воды в водохранилище и фазой водохозяйственного цикла (датой). Для водохранилищ годичного регулирования составляются отдельные диспетчерские графики пропуска паводка. Ими, в зависимости от величины паводочного притока воды в водохранилище, регламентируется порядок маневрирования затворами плотины. Для каждой гидростанции устанавливаются графики ее внутрисуточной и недельной работы. Обычно имеется два суточных графика — для летней межени и для осенне-зимнего периода. По первому из них, с учетом требований судоходства, предусматриваются менее резкие колебания мощности, чем по второму (зимнему). Во время сбросов через плотину гидростанция работает круглосуточно всеми агрегатами.

Совокупность всех указаний, регламентирующих работу гидростанции и водосбросной плотины, называется правилами водопользования. Правила водопользования согласовываются со всеми организациями, заинтересованными в работе данного водохранилища.

В табл. 2 приведены сведения о площади зеркал и объемах некоторых водохранилищ СССР, а также двух наиболее крупных водохранилищ США.

Таблица 2

Река	Водохранилище	Площадь зеркала при НПУ, км²	Объем, км³	
			полный	полезный
Волга	Рыбинское	4550	25,4	16,7
»	Куйбышевское	6450	58,0	21,0
»	Волгоградское	3300	31,5	5,7
Дон	Цимлянское	2700	23,9	13,3
Днепр	Кременчугское	2250	13,5	9,0
Ангара	Братское	5500	169	50,0
Енисей	Красноярское	2130	77,5	32,1
Колорадо (США)	Грэнд Кули	290	11,7	6,1
То же	Боулдер	590	39,5	31,4
Иртыш	Бухтарминское	5490	49,6	30,8
Енисей	Саяно-Шушенское	633	29,1	14,7

§ 20. ВОДНЫЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩ

Амплитуда колебания подпорных уровней (глубина сработки) у водохранилищ, созданных низко- и средненапорными плотинами, всегда бывает меньше амплитуды колебания уровней в реке до постройки плотины. Из волжских водохранилищ самую большую глубину сработки имеет Куйбышевское водохранилище. Она равна 7,5 м, причем глубина навигационной сработки составляет 4 м, в то время как амплитуда колебания уровней р. Волги у Куйбышева при естественном состоянии реки достигала 12 м. Имеющее небольшую емкость Горьковское водохранилище срабатывается за навигацию лишь на 0,4 м. У водохранилищ, подпертых высоконапорными плотинами, глубина сработки может быть очень большой. Так, у Красноярского водохранилища она равна 18 м.

Годовой ход уровней у водохранилищ отличается плавностью, и характер его мало меняется из года в год. У водохранилищ годичного регулирования имеются три фазы годового цикла: весенний подъем от уровня мертвого объема до нормального подпорного, фаза поддержания нормального подпорного уровня, во время которой излишек притока сбрасывается через плотину, и длинный, медленный спад, охватывающий бóльшую часть года. Зимой и особенно перед началом паводка интенсивность спада увеличивается. Годовой ход уровней у водохранилищ многолетнего регулирования имеет ту особенность, что нормальный подпорный уровень достигается только в многоводные годы, а в годы средней и низкой водности подъем непосредственно сменяется спадом.

Вследствие большой площади зеркала водохранилищ на состояние их свободной поверхности сильное влияние оказывает ветер. Воздействие ветра проявляется в развитии волн, сравнимых по высоте с волнами на больших озерах и в сгонно-нагонных колебаниях уровней. Рассмотрим оба эти явления.

Высота ветровых волн зависит, в общем случае, от следующих факторов: скорости ветра, длительности его действия, длины разгона волны и глубин водоема. Под длиной разгона понимается расстояние места, где наблюдается волна, от берега по наветренному направлению. При увеличении длины разгона, т. е. при удалении от берега, влияние разгона на высоту волны ослабевает и, наконец, перестает сказываться. Аналогично обстоит дело и с длительностью действия ветра. Если ветер дует с постоянной силой, то по прошествии некоторого времени рост волн прекращается, волнение делается квазистационарным — его осредненные характеристики не изменяются во времени. Промежуток времени, необходимый для полного развития волнения, увеличивается с увеличением длины разгона. Глубина влияет на высоту волны только в мелководных водоемах. В связи с этим различают волны глубокой и мелкой воды. К волнам глубокой воды, высота которых не зависит от рельефа дна, принято относить волны в тех частях водоемов, где глубины превышают половину длины волны: $h>\frac{1}{2}\lambda$. Если $h<\frac{1}{2}\lambda$, волны мелководные, однако влияние рельефа дна становится практически заметным лишь при глубинах, значительно меньших $0{,}5\lambda$.

Волны глубокой и мелкой воды имеют разные скорости распространения. Скорость распространения волн глубокой воды определяется длиной волн, а волн мелкой воды — глубиной водоема. Простейшей математической моделью ветровых волн служат плоские синусоидальные волны с амплитудой, которая мала по отношению к длине волн. К этой модели в природе близки так называемые волны зыби, т. е. те волны, которые сохраняются некоторое время на поверхности водоема после прекращения ветра. Скорость распространения синусоидальных волн малой амплитуды выражается в общем случае формулой

$$c=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}\operatorname{th}2\pi\frac{h}{\lambda}}, \qquad (55)$$

где λ — длина волн и h — глубина водоема.

Когда аргумент функции гиперболического тангенса неограниченно возрастает, функция стремится к единице, когда аргумент уменьшается, стремясь к нулю, значения функции приближаются к значениям аргумента. Отсюда в качестве двух предельных случаев получаем следующие формулы скорости распространения волн:

на глубокой воде

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}, \qquad (56)$$

и на мелкой

$$c = \sqrt{gh}. \qquad (57)$$

В зоне действия ветра волны не бывают ни плоскими, ни строго периодическими. Мгновенная водная поверхность представляет здесь сложную систему валов различной высоты и длины, имеющих каждый ограниченное простирание по фронту. Вся картина носит неупорядоченный, случайный характер. Столь же случайно и временно́е течение процесса. Этим предопределяется статистический подход к изучению реального ветрового волнения. Заданным внешним условиям: ветру, длине разгона, глубине водоема — отвечает при квазистационарном волнении не одна определенная высота и не одна определенная длина волн, а распределения вероятностей высот и длин волн. Теоретические соображения, подтверждаемые данными наблюдений, показывают, что при квазистационарном волнении обеспеченность высоты ветровых волн выражается показательной функцией следующего вида:

$$P = 100 \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{h_w}{h_{wo}}\right)^m \right], \qquad (58)$$

где h_w — высота волны с искомой обеспеченностью; h_{wo} — средняя высота волн; m — число, которое при переходе от глубокой к мелкой воде возрастает с 2 до 4. Из формулы (58) следует, что в области малых значений обеспеченности изменяемость высоты волн очень велика. Редко повторяющиеся высокие волны (скажем, одна из 1000 волн) очень сильно выделяются среди остальных. Этот факт давно известен морякам — поверье о «девятом вале» является его отражением.

Волнение на водохранилищах принято оценивать по высоте волн с обеспеченностью 1%, т. е. по самой высокой волне в группе из 100 волн. На судоходных трассах больших водохранилищ Волжского каскада высота волн с обеспеченностью 1% при скорости ветра 10 м/с достигает 1,0—1,5 м, а при скорости ветра 20 м/с — 2,5—3,0 м. Для сравнения укажем, что при скорости ветра 20 м/с высота волн с обеспеченностью 1% имеет значения на трассах Онежского озера до 5 м и на трассах Ладожского озера до 6 м.

Средняя высота волн, входящая в виде параметра в уравнение (58), определяется энергетическим балансом ветрового волнения. Составим этот баланс в общем виде. Энергия волн создается за счет работы сил аэродинамического давления и касательных сил трения, развиваемых ветром на взволнованной свободной поверхности. Работу, которая про-

изводится в среднем на единице площади водоема в единицу времени силами давления, обозначим R_p и такую же работу касательных сил — R_τ. Энергия волн состоит, как известно, из потенциальной энергии, обусловленной подъемом жидкости над уровнем покоя и кинетической энергии орбитального движения жидких частиц, причем два эти вида энергии в среднем равны, т. е. составляют каждый половину полной энергии (для плоских синусоидальных волн это верно и в произвольный момент времени). Считая, что на поверхности водоема могут встретиться волны любой длины и поэтому длина волн есть непрерывная переменная, обозначим энергию волн с длинами в интервале от λ до $\lambda+d\lambda$, в расчете на единицу площади водоема, через $E(\lambda)$. Вырежем теперь в жидкости, наполняющей водоем, параллелепипед длиной Δx — в направлении распространения волн, шириной b — в направлении фронта волн и высотой h, равной глубине воды. Энергия волнового движения в объеме параллелепипеда составит

$$b\Delta x \int_0^\infty E(\lambda)d\lambda,$$

где интеграл должен быть взят по волнам всех длин. Распространяясь вдоль оси x с фазовой скоростью c, волны переносят потенциальную энергию. Поток волновой энергии через наветренную грань параллелепипеда напишется

$$\frac{1}{2}b\int_0^\infty E(\lambda)c(\lambda)d\lambda,$$

а изменение потока энергии на пути Δx от наветренной к подветренной грани будет равно

$$\frac{1}{2}b\Delta x\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\infty E(\lambda)c(\lambda)d\lambda.$$

Множитель $\frac{1}{2}$ перед двумя последними выражениями указывает, что переносится половина полной энергии. В случае волн мелкой воды, фазовая скорость которых не зависит от их длин, величину c можно вынести из-под знака интеграла.

Расходная часть баланса энергии состоит из потерь энергии волнового движения на возбуждение турбулентности. В конечном итоге эта часть энергии переходит в тепло и незаметно рассеивается. Обозначим скорость потерь энергии на единице площади через F. Таким образом, энергия волн в выделенном параллелепипеде может меняться: а) за счет работы ветра, б) вследствие изменения потока энергии по длине параллелепипеда и в) за счет рассеяния энергии. Аналитически это записывается в следующем виде:

$$b\Delta x\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\infty E(\lambda)d\lambda = b\Delta x(R_p+R_\tau-F)-\frac{1}{2}b\Delta x\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\infty E(\lambda)c(\lambda)d\lambda.$$

После деления на $b\Delta x$ имеем окончательно:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\infty E(\lambda)d\lambda = R_p + R_\tau - F - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\infty E(\lambda)c(\lambda)d\lambda. \qquad (59)$$

Уравнение баланса волновой энергии было впервые составлено В. М. Маккавеевым (1937 г.).

Если волнение квазистационарное, энергия волн во времени не меняется, и вместо уравнения (59) имеем:

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\infty E(\lambda)c(\lambda)d\lambda + F - R_p - R_\tau = 0. \qquad (60)$$

На участке разгона волн мощность $R_p + R_\tau$, передаваемая воздушным потоком жидкости, превышает скорость рассеяния энергии F и энергия волн растет вдоль оси x. Независимость осредненных параметров волнения от длины разгона достигается там, где разность $(R_p + R_\tau) - F$ становится достаточно малой. Соответствующее расстояние от наветренного берега (это расстояние нельзя, разумеется, определить точно) называется *действующей длиной разгона*. Действующая длина разгона растет вместе со скоростью ветра.

В. М. Маккавеев решил уравнение (60) при следующих упрощающих предположениях: 1) волны плоские синусоидальные; 2) глубина водоема велика; 3) рассеяние энергии пренебрежимо мало. В результате была выведена приближенная формула, выражающая изменение высоты волн глубокой воды по длине разгона. А. П. Браславский получил более общее решение, в котором учтены рассеяние энергии и ограниченность глубин. Использовав данные натурных наблюдений на Рыбинском водохранилище, Браславский построил приближенный способ расчета, позволяющий, при известном рельефе дна водоема, скорости и направлении ветра, находить высоту волн однопроцентной обеспеченности в любой точке водоема. Для облегчения расчетов по довольно громоздким формулам построены номограммы. Каждая номограмма отвечает определенной скорости ветра и состоит из двух семейств кривых зависимости высоты волн от длины разгона и глубины водоема $h_w = f(D, h)$. Одно семейство кривых служит для расчета на участках, где глубина с удалением от наветренного берега растет, другое — на участках, где глубина уменьшается. Номограмма для скорости ветра 20 м/с представлена на рис. 23, *а**. Порядок пользования номограммой показан на рис. 23, *б*. Исходной для расчета является высота волны в начале расчетного участка, ищется глубина в конце участка. Из точки на оси высот волн с значением h_w, равным высоте волны в начале

* Полный набор номограмм приложен к книге Н. Е. Кондратьева «Расчеты береговых переформирований на водохранилищах». Л., Гидрометеоиздат, 1960.

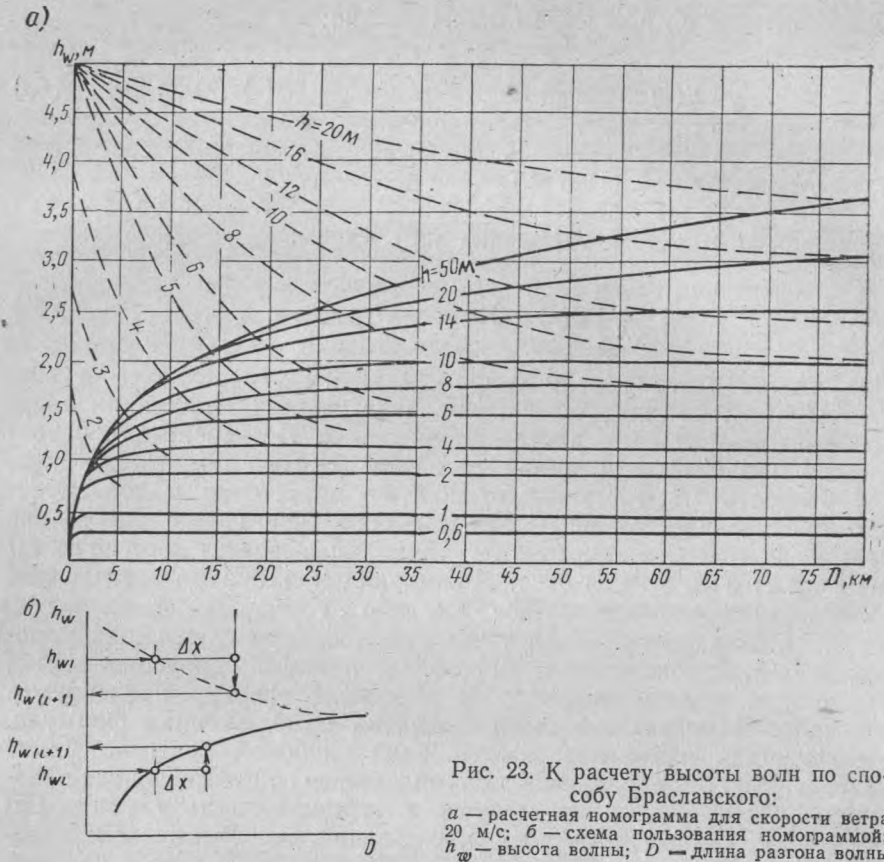


Рис. 23. К расчету высоты волн по способу Браславского:
а — расчетная номограмма для скорости ветра 20 м/с; *б* — схема пользования номограммой; h_w — высота волны; D — длина разгона волны

i-го участка $h_w = h_{wi}$, проводим прямую $h_w = \text{const}$ до пересечения с линией номограммы, отвечающей средней глубине участка $h_w = f(D, h_i)$. От точки пересечения откладываем вправо длину участка Δx_i и через конец отрезка проводим вертикальную прямую до пересечения с той же кривой $h_w = f(D, h_i)$. Ордината этой точки дает высоту волны $h_{w(i+1)}$ в конце участка. Она становится исходной для расчета на следующем $(i+1)$-ом участке.

Если нас интересует высота волны при ветре заданного направления в определенной точке судоходной трассы, общая последовательность расчетов следующая. Проводим на плане водохранилища через эту точку прямую по направлению ветра до наветренного берега и строим вдоль нее профиль дна. Разбив профиль на участки, определяем среднюю глубину на каждом из них. После этого обращаемся к номограмме и, идя от наветренного берега, последовательно находим высоту волн на границах всех участков, пока не дойдем до судоходной трассы. Высота волны на урезе наветренного берега берется равной нулю.

Если продлить линию профиля до подветренного берега и продолжить расчет, то по мере уменьшения глубин высота волн будет уменьшаться, однако с приближением к подветренному берегу она не будет стремиться к нулю. Расчет следует прекращать на глубине, равной высоте волн, так как на такой или несколько большей глубине волны разбиваются. Назначая границы расчетных участков, надо делать участки тем короче, чем больше уклон дна водоема. На крутых склонах подводного рельефа длины участков не должны превышать 0,5—1,0 км.

Выполнив расчеты для ряда направлений и скоростей ветра, можно получить достаточно полное представление о высотах волн однопроцентной обеспеченности в данной точке водоема. Переход к другим обеспеченностям может быть произведен с помощью зависимости (58).

Расчеты ветрового волнения составляют необходимую часть проектов судоходного освоения водохранилищ. Данные этих расчетов используются при выборе типов судов транспортного и технического флота, знаков судоходной обстановки и конструкций причальных и берегоукрепительных сооружений. На их основе выбираются также места расположения портов-убежищ, где суда укрываются при сильных штормах.

Волнение повышает требования к остойчивости судна и к прочности его корпуса. В связи с этим суда, плавающие на водохранилищах и озерах, делятся на три класса: «Р», «О» и «М». Суда класса «Р» рассчитаны на волну высотой 1,2 м, класса «О» — на волну высотой 2 м и класса «М» — на волну высотой 3 м. На всех больших водохранилищах плавают суда класса «О». В открытых частях этих водохранилищ суммарная длительность штормов с высотой волны более 2 м может составлять десятки часов за навигацию. Отсюда видно, что и суда класса «О» нуждаются в укрытиях и должны своевременно предупреждаться о возникновении сильного шторма. Плотовые составы укрываются в убежищах при высоте волн 1 м.

Общая величина энергии, передающейся от ветра к жидкости, заполняющей водоем, больше той энергии $R_д + R_т$, которая идет на развитие волн. Кроме орбитального движения, связанного с колебаниями свободной поверхности, ветер сообщает частицам поверхностного слоя воды прогрессивное движение в сторону своего действия. Распространяясь за счет внутреннего трения в толщу воды, это движение может в мелководных водоемах проникать до самого дна. Течения этого вида называются дрейфовыми. В водоемах ограниченных размеров перемещение водных масс дрейфовым течением приводит к перекосу свободной поверхности. У наветренного берега уровень понижается — возникает ветровой сгон, у подветренного берега уровень повышается — возникает ветровой нагон. Если сила ветра над всей акваторией водохранилища приблизительно одинакова, перекос происходит симметрично по отношению к горизонтальной прямой, перпендикулярной направлению ветра и проходящей че-

рез центр тяжести площади водохранилища. Таким образом, величина нагона приблизительно равна величине сгона. На Цимлянском и Рыбинском водохранилищах зарегистрированы разности уровней у подветренного и наветренного берегов до 1 м и более.

При длительном ветре изменение высот свободной поверхности постепенно прекращается и перекос становится стабильным. Это стабильное состояние достигается в результате того, что под действием градиента давления движение воды в придонном слое водоема принимает обратное направление. Дрейфовое течение сосредоточивается в верхних слоях водоема. Несколько ниже середины вертикали скорость течения переходит через нуль. Придонное течение, отводящее воду от подветренного берега к наветренному, называется градиентным. Скорости дрейфового и градиентного течения малы, мало и создаваемое градиентным течением касательное напряжение на дне. Поэтому приближенно можно считать, что градиент давления при установившемся перекосе уравновешивается силами трения между воздушным потоком и свободной поверхностью. Напряжение трения на свободной поверхности определяется формулой

$$\tau' = k\rho_a W^2, \tag{61}$$

где W — скорость ветра; $\rho_a = 0{,}125 \frac{\text{кгс.с}^2}{\text{м}^4}$ — плотность воздуха; k — коэффициент, который при скоростях ветра выше 10 м/с берется равным 0,0025.

Под напряжением трения τ' в формуле (61) понимается сумма касательного напряжения на поверхности воды и осредненной по площади разности давлений на наветренных и подветренных сторонах волн. Волны, таким образом, рассматриваются как элементы макрошероховатости.

Для уклона свободной поверхности получается формула

$$\frac{\partial z}{\partial x} = k\frac{\rho_a W^2}{g\rho h}, \tag{62}$$

где h — средняя глубина сечения, перпендикулярного направлению ветра.

Величина ветрового нагона учитывается при назначении отметок гребней подпорных сооружений, величина сгона — при назначении отметок дна прорезей и портовых акваторий. Ветровые нагоны на морских побережьях бывают гораздо выше, чем в озерах и водохранилищах, и иногда влекут за собой катастрофические последствия. Ураган в Северном море в 1953 г. вызвал подъем уровня у берегов Голландии на 4 м. Были разрушены оградительные дамбы, затоплена территория площадью 25 тыс. км², свыше 600 тыс. человек покинули свои дома. Печальную известность имеют опустошительные нагоны в вершине мелководного Бенгальского залива.

§ 21. РУСЛОВОЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩ

Для руслового процесса в водохранилищах характерны три основных явления: 1) аккумуляция наносов; 2) деформации берегов и 3) занесение входов в заливы и бухты.

Аккумуляция наносов есть прямое следствие падения скоростей при переходе от речного потока к водоему с малыми, часто близкими к нулю скоростями. Весь сток русловых наносов реки, на которой создано водохранилище, и весь сток русловых наносов рек, впадающих в водохранилище, остаются в чаше водохранилища. Оседает в водохранилище и значительная часть внерусловых наносов, транспортируемых реками во взвешенном состоянии. Таким образом, с течением времени чаша водохранилища неуклонно заполняется наносами. У горной реки объем годового стока наносов может быть соизмеримым с объемом водохранилища, и тогда аккумуляция наносов угрожает самому существованию водоема. Известен ряд случаев, когда водохранилище на горной реке было полностью завалено наносами. Для борьбы с этой угрозой у плотин горных водохранилищ устраиваются донные отверстия и через них периодически производится промывка отложившихся наносов. Для подавляющего большинства водохранилищ на равнинных реках процесс отложения наносов опасности не представляет, так как объем годового стока наносов у них составляет малую долю объема водохранилища. По ориентировочному расчету, для занесения мертвого объема Рыбинского водохранилища (около 8 км^3) потребуется свыше 600 лет.

Производство путевых работ вынуждено, однако, считаться с одним частным проявлением процесса аккумуляции наносов в водохранилищах — с повышением гребней перекатов в верховой зоне водохранилища. На рис. 24 показаны продольные профили свободной поверхности водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ) и уровне навигационной сработки (УНС), а также продольные профили свободной поверхности реки при большом весеннем и при меженном расходах воды в естественном состоянии. При паводочном расходе воды подпор от плотины выклинивается, в зависимости от высоты уровня у плотины, между точками *1* и *2*. С переходом к меженным расходам подпор распространяется значительно выше по реке — участок выклинивания находится между точками *3* и *4*. Зона водохранилища, расположенная между весенним (*1—2*) и меженным (*3—4*) участками выклинивания, представляет собой зону переменного подпора; при больших весенних расходах движение потока здесь такое же, как было до сооружения плотины, а с уменьшением расходов воды эта зона попадает в подпор. Поэтому отложение наносов на перекатах идет здесь в период высоких уровней так же, как при естественном состоянии реки. Размыва отложений однако не происходит, так как при надвижении подпора скорости течения резко уменьшаются. В результате наносы на пере-

катах из года в год накапливаются — гребни перекатов монотонно растут. После нескольких годовых циклов рост гребней затухает — достигается новое состояние равновесия между потоком и руслом, которому отвечают более высокие отметки гребней перекатов, чем при естественном режиме. В верховой зоне Иваньковского водохранилища на р. Волге гребни перекатов наросли в итоге такого процесса на ~ 1,5 м.

Берегами водохранилища, созданного путем затопления участка речной долины, становятся или уступы одной из надпойменных террас или коренные берега долины. И те и другие имеют обычно крутые склоны и при воздействии ветровых волн начинают обрушаться. Разрушение берегов ведет к отступанию береговой линии и к формированию нового, берегового профиля с пологим подводным откосом. Особенно сильные деформации происходят на участках, где берега сложены лессовыми грунтами. В первый год эксплуатации Каховского водохранилища на некоторых таких участках береговая линия отступила на 30—45 м, а по прошествии четырех лет перемещение береговой линии достигло 90—100 м. Отступление береговой линии на несколько десятков метров нередко наблюдается и на участках, где берега сложены песками.

Переработка берегов идет наиболее интенсивно в первые годы эксплуатации, а затем постепенно затухает. Период активной переработки берега занимает обычно от 5 до 10 лет, а для ста-

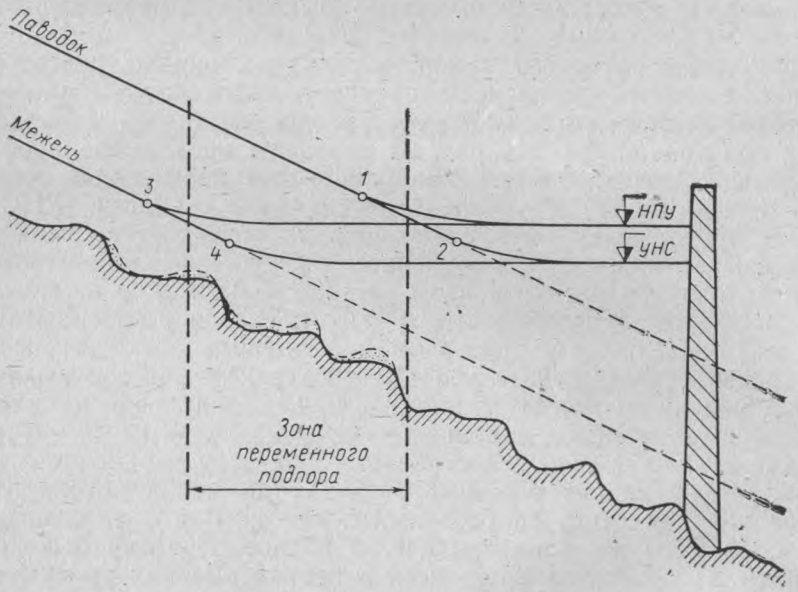


Рис. 24. Отложение наносов на перекатах в зоне переменного подпора:
1, 2 — условные границы участка выклинивания подпора в паводок; *3, 4* — то же, в межень

билизации берега требуется срок в 20—30 лет. Характер переформирований берега можно уяснить из рис. 25. Разбиваясь на береговом склоне, волны подмывают берег примерно на высоте нормального подпорного уровня. Надводный откос обрушивается, часть обрушившегося материала взвешивается в волноприбойной зоне и может быть унесена далеко от места обрушения. Однако бóльшая часть материала остается на месте, формируя подводный пляж. Процессы подмыва и обрушения берега прекращаются тогда, когда ширина пляжа становится настолько большой, что, вкатываясь по пляжу, разбитая волна теряет всю свою кинетическую энергию. Уже упоминалось, что волны разбиваются на глубине, приблизительно равной их высоте. Чем больше высота волн, тем дальше от уреза они разбиваются. Однако энергия волн пропорциональна квадрату их высоты, и поэтому более сильному волнению отвечает бóльшая кинетическая энергия вкатывающегося на пляж потока.

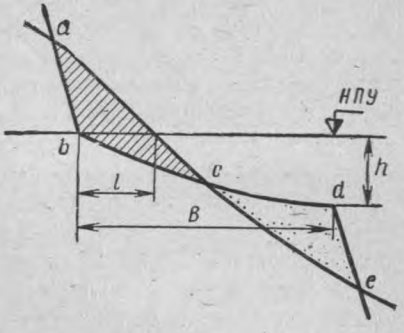


Рис. 25. Переформирование берегового склона:
ace — профиль берега до затопления чаши водохранилища; *abd* — после переработки волнением; *B* — ширина пляжа; *l* — отступление береговой линии

Если гребни волн, движущихся к берегу, не параллельны линии берега, то на береговой отмели скорости распространения волн становятся переменными вдоль гребней. Это прямо следует из формулы скорости волн (57). Скорости ближайших к берегу участков волн уменьшаются в соответствии с уменьшением глубин, и в результате волны разворачиваются, стремясь принять пологое положение по отношению к берегу (рис. 26). Это явление носит название рефракции волн. Рефракция ветровых волн на береговой отмели аналогична рефракции солнечного света в атмосфере при малой высоте солнца над горизонтом. Рефракция проявляется тем сильнее, углы между линиями гребней и береговой линией становятся тем острее, чем шире береговая отмель.

Подходя к берегу под острыми углами и разбиваясь, волны создают вдольбереговое течение воды. Скорости вдольберегового течения в водохранилищах могут иметь порядок скоростей речного потока, т. е. достигать 1 м/с и больше. Эти скорости достаточны для интенсивного перемещения донных частиц, а так как вода в волноприбойной зоне содержит и очень много твердого материала во взвеси, то вдольбереговые течения транспортируют большие объемы наносов. Если на пути вдольберегового течения встречается устье залива, где дно резко понижается, поток теряет скорость и откладывает несомые им наносы.

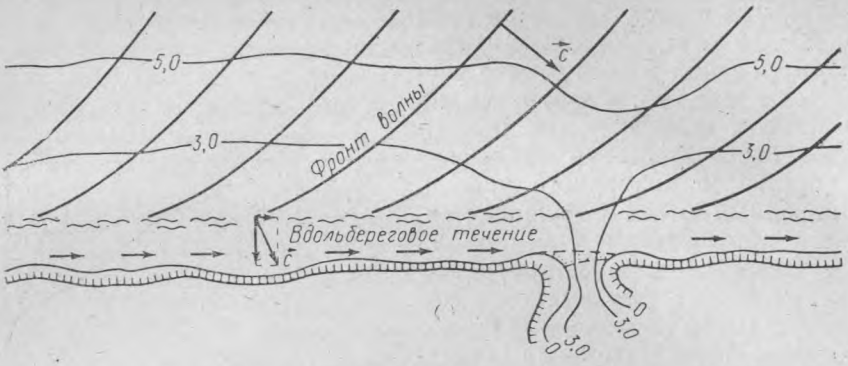


Рис. 26. Рефракция волн на береговой отмели и занесение входа в залив под действием вдольберегового течения (*c*—вектор скорости волн)

Поэтому после каждого сильного шторма в устье залива остается подводный вал наносов, иногда перекрывающий устье по всей его ширине (см. рис. 26). В тех заливах, где размещаются пристани и порты-убежища, эти наносы приходится удалять с помощью дноуглубительных снарядов. В заливах водохранилищ Волги и Днепра ежегодно извлекается более 1 млн. м^3 грунта.

§ 22. ВОДНЫЙ РЕЖИМ РЕК С ЗАРЕГУЛИРОВАННЫМ СТОКОМ

В результате годичного и многолетнего регулирования происходят следующие изменения в режиме стока ниже водохранилищ: уменьшаются или сводятся к нулю объемы паводков, увеличиваются расходы воды в летнюю и зимнюю межень. Водохранилища годичного регулирования, имеющие небольшую емкость, иногда успевают наполниться до наступления максимального притока, и тогда уменьшение объема паводка ниже водохранилища не сопровождается снижением максимальных расходов воды — гидрограф паводка становится короче, но не ниже, чем при естественном режиме. Для участков рек, расположенных ниже водохранилищ многолетнего регулирования, характерно полное отсутствие паводков во многие годы.

Для водного транспорта наибольшее значение имеет увеличение расходов летней межени. Многолетнее регулирование позволяет увеличить эти расходы по сравнению с естественным режимом в два-три раза, а иногда и больше. Так, зарегулированные Цимлянским водохранилищем навигационные (среднесуточные) расходы р. Нижнего Дона составляют 400—580 м^3/с, а при естественном режиме расходы в межень падали до 100—150 м^3/с. Если нижний бьеф водохранилища находится в подпоре от нижерасположенного гидроузла, то требования со стороны судоходства ослабляются, и тогда, в интересах энергетики, зимние расхо-

ды доводятся до величины навигационных или даже превышают их.

Изменения, вносимые в режим речного стока годичным и многолетним регулированием, охватывают протяженные участки рек. Они могут быть усилены нижележащим водохранилищем или ослаблены впадением крупного незарегулированного притока. Если ни того, ни другого нет, влияние годичного и многолетнего регулирования сохраняется почти без искажения до устья реки. Работа Рыбинского водохранилища коренным образом изменила режим стока р. Волги от Рыбинска до устья р. Оки, т. е. на участке длиной 485 км. Цимлянское водохранилище определяет режим стока всего Нижнего Дона, т. е. на протяжении 270 км, хотя ниже плотины в Дон впадает значительный приток — р. Северский Донец.

На участке реки, прилегающем к плотине, на гидрограф зарегулированного стока накладываются колебания расхода воды, вызванные суточным и недельным регулированием. С удалением от плотины эти колебания затухают. Длина участка, на котором заметны суточные колебания, составляет обычно 50—70 км. Недельные колебания распространяются на расстояние 150—200 км.

За нижней границей участка с суточными колебаниями уровень воды следует за навигационными изменениями зарегулированного стока практически однозначно. Повышение меженных уровней по отношению к естественному режиму составляет, в зависимости от степени регулирования, от нескольких дециметров до 1,5 м. Еще сильнее повышаются зимние уровни. Зимние уровни на реках с зарегулированным стоком часто стоят выше летних. Это объясняется тем, что летние и зимние зарегулированные расходы имеют один и тот же порядок, а сопротивление русла, покрытого льдом, больше, чем открытого. Отмеченные особенности уровенного режима рек с зарегулированным стоком хорошо видны на рис. 27, где представлены графики колебания уровней на трех водомерных постах р. Волги ниже Рыбинского водохранилища. На рисунке совмещены осредненные данные за 1916—1940 гг., предшествовавшие началу эксплуатации водохранилища, и осредненные данные за 1941—1953 гг., когда нижний бьеф водохранилища находился в свободном состоянии.

Режим участка с суточными колебаниями расхода очень сложен и требует подробного рассмотрения. Проследим за циклом гидравлических явлений в нижнем бьефе, обусловленных работой гидростанции в пике графика нагрузки. Схематизируем работу станции следующим образом: в течение большей части суток работают n_0 гидроагрегатов, пропускающих вместе расход воды Q_0. В момент времени t_1 пускаются все остальные из общего числа n агрегатов. Число пущенных турбин $n-n_0>n_0$, и пропускаемый ими расход $\Delta Q>Q_0$ (как уже отмечалось, ΔQ может быть во много раз больше Q_0). Полный расход, пропускаемый станцией, становится $Q=Q_0+\Delta Q$. Через несколько часов, в момент времени t_2, то же число $n-n_0$ агрегатов останавливается и

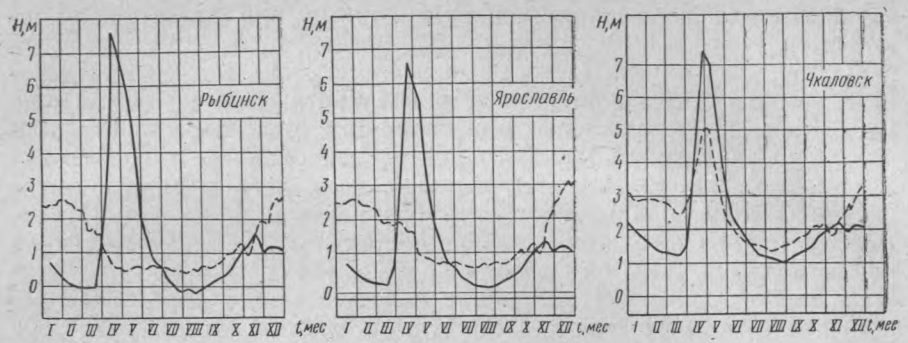


Рис. 27. Совмещенные графики колебания уровней на водомерных постах в нижнем бьефе Рыбинского водохранилища при естественном и зарегулированном режимах:
———— 1916—1940 гг.; — — — — 1941—1953 гг.

станция возвращается к работе n_0 агрегатов с общим расходом Q_0.

Разгон гидроагрегата до полного числа оборотов занимает не более 2—3 мин. В масштабах времени, характерных для движения речного потока, это значит, что увеличение расхода в створе ГЭС происходит практически мгновенно. Начиная с этого момента вниз по бьефу движется приносящая с собой повышение уровней и увеличение расходов волна наполнения. Подвижная граница, отделяющая волну от невозмущенного потока или предшествующей волны, называется фронтом волны. Приращение расхода ΔQ, которым вызвана волна, называется волновым расходом. Скорость перемещения фронта волны относительно берега определяется формулой

$$c_б = v \pm \sqrt{gh}, \tag{63}$$

где $v = \frac{Q}{\omega}$ — средняя скорость потока, и $h = \frac{\omega}{B}$ — средняя глубина в сечении, через которое проходит фронт. Скорость

$$c = \pm\sqrt{gh},$$

совпадающая по своей величине со скоростью распространения на мелководье ветровых волн малой амплитуды, называется волновой скоростью. Общий смысл скорости c состоит в том, что она представляет собой скорость распространения малых возмущений по поверхности тяжелой, покоящейся жидкости в водоеме, глубины которого малы по сравнению с длиной волны возмущения. Возмущение допустимо считать малым, если оно удовлетворяет приближенному неравенству

$$\Delta h = \frac{\Delta Q}{cB} \leqslant 0{,}1h. \tag{64}$$

Величина Δh называется высотой волны. В больших реках условие (64) почти всегда соблюдено.

Часть волны, непосредственно примыкающая к фронту, называется лбом или лобовой частью волны. В пределах лба волны наблюдаются наиболее сильные изменения элементов движения. Так как производная $\frac{\partial v}{\partial t}$ в волне наполнения больше нуля и в лобовой части волны она имеет большие абсолютные значения, то уклоны свободной поверхности здесь значительно превышают уклоны при установившемся движении. Об этом уже пришлось говорить в § 7. Непосредственно ниже ГЭС при пуске (и остановке) турбин величина $\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$ настолько велика в сравнении с остальными членами правой части уравнения движения (3), что справедливо приближенное равенство

$$I \approx \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} . \qquad (65)$$

Если бы станция работала всеми агрегатами длительное время, распространение волны завершилось бы переходом к установившемуся движению. Уровни приняли бы стабильные значения, однозначно отвечающие пропускаемому станцией расходу Q. Однако в условиях суточного регулирования это никогда не происходит. Агрегаты останавливаются значительно раньше возможного перехода к установившемуся движению (рис. 28). В момент t_2 остановки машин по бьефу начинает распространяться переносящая с собой понижение уровней и уменьшение расходов волна отлива. Она накладывается на волну наполнения и вместе с ней образует одну сложную волну, называемую волной попуска. Скорость распространения фронта волны отлива определяется той же формулой (63), что и скорость фронта волны наполнения. Так как производная $\frac{\partial v}{\partial t}$ имеет в волне отлива отрицательные значения, то в тыловой части волны попуска уклоны свободной поверхности значительно меньше уклонов при установившемся движении. Непосредственно ниже станции в момент остановки турбин уклон, в согласии с формулой (65), становится обратным.

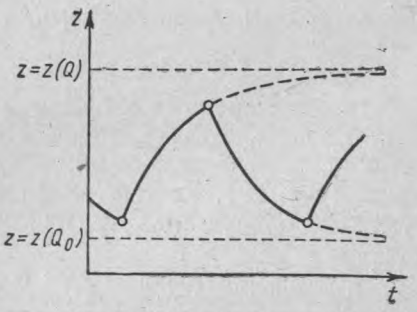


Рис. 28. График колебания уровней при прохождении волны попуска: $z(Q)$ и $z(Q_0)$ — уровни, отвечающие расходам Q и Q_0 при установившемся движении потока

Волны наполнения и отлива, распространяющиеся вниз по течению, называются прямыми. В верхнем бьефе при пуске и остановке турбин возникают волны, движущиеся против тече-

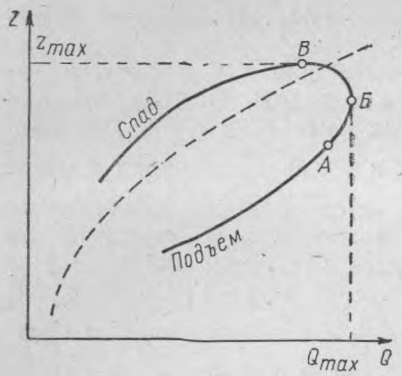


Рис. 29. Петля связи расхода и уровня при прохождении волны попуска (пунктир — кривая расходов при установившемся движении)

ния, — обратные. Так как скорость течения в верхнем бьефе пренебрежимо мала, то скорость распространения фронта обратных волн определяется формулой $c_0 = -\sqrt{gh}$. Абсолютные значения этой скорости вследствие больших глубин верхнего бьефа могут быть очень велики. Так, скорость распространения фронта обратных волн в верхнем бьефе Братской ГЭС при глубинах бьефа около 100 м составляет $\sqrt{9{,}8 \cdot 100} = 31$ м/с ≈ 110 км/ч*. Вследствие больших абсолютных значений волновой скорости c и больших ширин зеркала распространяющиеся в водохранилищах обратные волны имеют очень малую высоту и остаются практически незаметными.

В течение всего промежутка времени $t_2 - t_1$ между пуском и остановкой турбин объем волны попуска равномерно нарастает и в момент t_2 принимает свое наибольшее, далее уже не меняющееся значение $\Delta Q(t_2 - t_1)$. Параллельно с ростом объема идет перераспределение жидкости по длине волны. Благодаря большим скоростям в передней, низкой части волны сюда перетекает вода из тела волны. С момента t_2 это перетекание приводит к постепенному снижению гребня волны. Продвигаясь вниз, волна распластывается — высоты ее точек распределяются все более равномерно. Результатом распластывания волны является затухание колебаний по длине нижнего бьефа.

Большие уклоны и скорости в лобовой части волны, малые в тыловой делают неизбежной неоднозначность связи между расходом и уровнем в пределах волны. При одном и том же уровне расход воды в фазе подъема, т. е. при $\frac{\partial v}{\partial t} > 0$, сильно превосходит расход в фазе спада, когда $\frac{\partial v}{\partial t} < 0$. Расходы, последовательно измеренные в одном и том же створе за время прохождения волны, будучи нанесены на график $Q = Q(z)$, образуют петлю с далеко отстоящими друг от друга ветвями подъема и спада (рис. 29). Рассматривая эту петлю, можно установить следующий порядок наступления максимальных значений элементов

* Волны цунами, возникающие вследствие подводных землетрясений в Тихом океане, перемещаются, при средней глубине океана 4500 м, со скоростью самолета: $\sqrt{9{,}8 \cdot 4500} = 210$ м/с ≈ 760 км/ч. Волна, вызванная землетрясением в Чили в 1960 г., прошла 14000 км от берегов Чили до берегов Японии за 19 ч. Суда в открытом океане не замечают прохождения волны. Войдя на мелководье, волна цунами приобретает разрушительный характер.

движения. Первым наступает максимум скорости (точка *А*, см. рис. 29), затем максимум расхода (точка *Б*) и, наконец, при уже уменьшившемся расходе — максимум уровня (точка *В*). Попуски, отличающиеся друг от друга величиной расхода или длительностью, или и тем и другим, дают каждый свою петлю связи между Q и z. Поэтому говорить, что связь между расходом и уровнем в нижних бьефах гидростанций неоднозначная, не вполне точно — вернее сказать, что она неопределенная.

Размах суточных колебаний уровня в створах гидростанций СССР составляет в навигационное время от 1 до 3 м. Так как этот размах практически сохраняется и в устье нижнего подходного канала к шлюзу и только далее начинает заметно убывать, то судоходство испытывает в нижних бьефах ГЭС серьезные трудности. Они возникают при входе судов в подходной канал и при выходе из него, при проводке крупнотоннажных судов через перекаты и при погрузочно-разгрузочных работах в портах. Дноуглубительные снаряды, работающие в нижнем бьефе, должны через каждые час или два менять глубину опускания рамы. Затруднения встречаются и при производстве изыскательских работ. Измерение расхода воды возможно только при одновременной работе вертушек на всех вертикалях гидроствора.

На рис. 30 показаны суточные гидрографы Иваньковской ГЭС на р. Волге и графики колебания уровней в нескольких створах ее нижнего бьефа за трое суток в сентябре 1939 г. Нижний

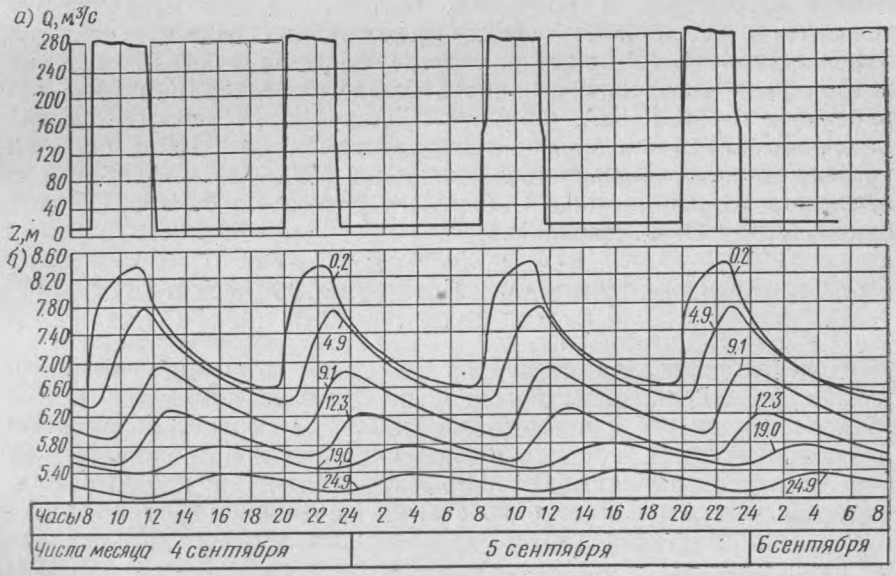


Рис. 30. Графики суточного регулирования Иваньковской ГЭС на р. Волге:
а — расходы воды; *б* — уровни в сечениях нижнего бьефа (цифры при графиках колебания уровней указывают расстояния от ГЭС в километрах)

бьеф Иваньковской ГЭС находился в то время в свободном состоянии. Графики уровней дают наглядную картину затухания колебаний по длине бьефа и смещения их по фазе.

При проектировании энергетического гидроузла выполняются детальные расчеты неустановившегося движения в нижнем бьефе. Они дают основу для выбора графиков суточного и недельного регулирования, включаемых в правила водопользования. Надобность в расчетах неустановившегося движения возникает и при эксплуатации гидроузла, так как обстановка в энергосистеме и потребности водного транспорта нередко заставляют временно (иногда на одни сутки) менять график суточного регулирования.

Расчеты неустановившегося движения состоят в решении системы дифференциальных уравнений (3), (4) при принятых начальных и граничных условиях. Уже указывалось, что решение уравнения ведется в конечных разностях. Так как расчеты очень трудоемки, то в настоящее время они выполняются только на вычислительных машинах. В проектных работах используются цифровые машины, а в оперативной работе бассейновых управлений пути — аналоговые. На аналоговых машинах задача решается упрощенно — без учета инерционных членов уравнения движения.

Как известно, алгоритмы и программы счета на ЭЦВМ должны обеспечивать устойчивость счета, т. е. исключать возможность накопления ошибки при пользовании конечными приращениями аргументов. Ввиду нелинейности системы уравнений (3), (4) создание алгоритмов и программ, обеспечивающих необходимую точность и устойчивость счета, представляло нелегкую задачу, в решении которой приняла участие большая группа советских гидравликов. Аналогичная работа была проведена и в ряде зарубежных стран (США, Франция, Голландия). Наиболее строгий и точный метод численного интегрирования на ЭЦВМ системы уравнений неустановившегося движения (3), (4) разработан в институте гидродинамики Сибирского отделения АН СССР под руководством О. Ф. Васильева.

§ 23. ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА НА РУСЛОВОЙ ПРОЦЕСС И СУДОХОДНЫЕ ГЛУБИНЫ

Перераспределение стока, производимое годичным и многолетним регулированием, вносит существенные изменения в ход руслового процесса и в состояние глубин на перекатах. В пределах ближайших к плотине нескольких десятков километров на эти изменения накладываются эффекты воздействия на русло волн попусков. Здесь же дает о себе знать и с течением времени приобретает доминирующее значение задержка твердого стока реки водохранилищем. В непосредственной близости к гидроузлу значительные массы наносов приводятся в движение за счет избыточной кинетической энергии потока, прошедшего через отверстия плотины или турбины ГЭС.

Начнем с тех общих изменений руслового процесса, которые вызываются перераспределением стока внутри года и за многолетие. Характер и глубина этих изменений определяются прежде всего степенью регулирования стока. Ограниченное годичное регулирование, срезающее лишь верхушки паводков и немного увеличивающее меженные расходы, может оказать некоторое влияние на режим перекатов, но оставляет незатронутым общий ход руслового процесса. Напротив, многолетнее регулирование, при котором сбросы через плотину происходят в немногие многоводные годы, а в большинстве лет поддерживается беспаводочный режим, способно не только вызвать перестройку меженного русла, но может изменить и тип руслового процесса. В дальнейшем ограничимся представляющими наибольший практический интерес случаями высокой степени регулирования стока, т. е. будем иметь в виду многолетнее и полное годичное регулирование стока (под полным годичным регулированием понимается регулирование, производящее полную задержку в водохранилище паводков маловодных лет).

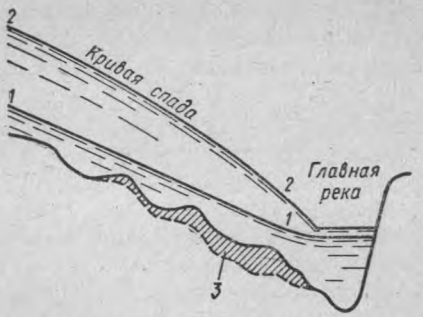


Рис. 31. Размыв дна на приустьевом участке притока зарегулированной реки:
1—1 — профиль свободной поверхности перед началом паводка на притоке; *2—2* — во время паводка; *3* — размыв

Когда паводки становятся редкими, а высота их сильно снижается, то первое следствие такого режима состоит в прекращении пойменных деформаций. Образование и развитие рукавов, характерное для процесса незавершенного меандрирования и для пойменной многорукавности, становится невозможным. Поэтому регулирование стока рек с этими типами руслового процесса приводит к постепенному собиранию их в одно русло, т. е. способствует преобразованию их в свободно меандрирующие, или в реки с побочневым типом руслового процесса. Это преобразование происходит, разумеется, медленно — для его завершения нужны многие десятки лет.

Второе следствие снижения паводков состоит в изменении условий сопряжения реки с ее притоками. Для естественного состояния реки в весеннее время характерны подпор рекой небольших притоков и взаимные подпоры при слиянии с крупными притоками. В § 18 говорилось о той роли, которую играет в образовании перекатных участков подпор реки крупным притоком. Если паводок главной реки задержан водохранилищем, паводки на приустьевых участках всех притоков проходят без подпора. Более того, поскольку уровень на главной реке стоит относительно низко, кривые свободной поверхности на приустьевых участках притоков принимают во время паводка форму кривых спада: глубины в направлении к устью уменьшаются, уклоны и скорости

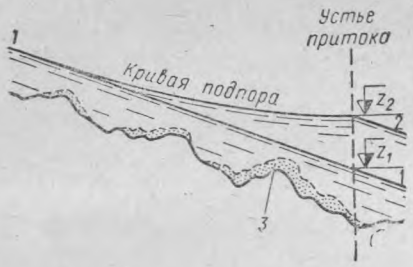


Рис. 32. Отложение наносов на перекатах зарегулированной реки выше устья крупного притока:
1—1 — профиль свободной поверхности перед началом паводка на притоке; *1—2* — во время паводка; *3* — отложения наносов

растут. В особенно резком виде это проявляется у небольших притоков, расходы которых малы по сравнению с зарегулированным расходом главной реки и могут лишь немного повлиять на ее уровень (рис. 31). Увеличение скоростей на приустьевом участке притока приводит к размыву его русла. С течением времени размыв распространяется вверх по течению притока, а интенсивность размыва слабеет. Однако для полного затухания процесса требуются многие годы. Грунт, вымытый на притоках, поступает в главную реку и пополняет ее расход наносов. Такое пополнение происходит в устье каждого притока скачком. Главная река не всегда справляется с транспортом поступающих наносов, и тогда ниже устья притока формируются косы, побочни и осередки.

Крупные притоки не только сбрасывают в главную реку наносы, но во время паводка подпирают ее. Подпор от большого притока может распространяться на несколько десятков километров. На участке подпора скорости течения резко падают, создаются условия для общего заиления русла (рис. 32). Из сказанного видно, что регулирование стока изменяет взаимодействие реки с притоками не в ее пользу.

Повышение меженных уровней и стабильность этих уровней на реке с зарегулированным стоком приводят к тому, что в реке все время поддерживается интенсивное перемещение донных форм, а сами эти формы приобретают устойчивые средние размеры. Если приращение уровней, созданное регулированием стока, таково, что побочни и осередки оказываются затопленными, то регулярный характер приобретает движение и этих крупных форм. Мало имеется сведений о влиянии на русло реки высоких зимних уровней. Эксперименты, выполненные Ф. А. Спецовым, показали, что при одном и том же расходе воды донные гряды под ледяным покровом заметно выше гряд открытого русла, но перемещаются медленнее. При больших расходах воды транспорт донных наносов должен идти под ледяным покровом не менее интенсивно, чем в условиях открытого русла. Если при естественном режиме стока состояние русла в момент вскрытия практически не отличается от его состояния в момент замерзания, то при регулировании стока за зимнее время русло может сильно переформировываться.

Обращаясь к основному для судоходства вопросу о влиянии регулирования стока на состояние перекатов, сразу же можно видеть существование здесь противоположных тенденций. С од-

ной стороны, редкая повторяемость паводков и снижение их высоты сильно уменьшают объем весенних отложений наносов на перекатах. Так как при этом уменьшается и размыв плесовых лощин, то намечается общая тенденция к смягчению различий в высоте дна плесов и перекатов, т. е., как иногда говорят, к канализации русла. С другой стороны, высокие меженные уровни ограничивают размыв перекатов, а ограниченность размыва, вместе с возросшей высотой донных гряд, должны способствовать сохранению гребней перекатов на относительно высоких отметках. На участках с притоками перекаты могут пополняться наносами, выносимыми из притоков. Выше устьев крупных притоков состояние перекатов заведомо должно ухудшаться. Общий вывод может состоять только в том, что между создаваемым за счет регулирования стока приращением меженных уровней Δz и приращением глубин на гребнях перекатов ΔT реальны неравенства обоих знаков:

$$\Delta T \gtrless \Delta z. \qquad (66)$$

Получается ли приращение глубин больше приращения уровней или наоборот, т. е. преобладают явления размыва или намыва,— зависит от конкретных условий на данной реке. Приведем два характерных примера.

В 1940 г. сток р. Волги был зарегулирован Рыбинским водохранилищем. До 1953 г. участок от Рыбинска до устья р. Оки находился в свободном состоянии (в 1954 г. вступило в строй Горьковское водохранилище). На этом участке в Волгу впадают реки Кострома и Унжа. Нижний конец участка после зарегулирования стока ежегодно испытывает подпор от мощного паводка р. Оки. Уровни, отвечающие нормальному навигационному расходу 800 м³/с, превышают уровни 95%-ной обеспеченности естественного режима приблизительно на 1 м. Как видно из рис. 27, зимние уровни при регулировании стока выше летних на 1,5—2,0 м. Статистические данные о глубинах судового хода на перекатах показывают, что приращение глубин получилось здесь меньше приращения уровней. По грубой средней оценке $\Delta T \approx 0{,}7\Delta z$. В наихудшем состоянии оказались перекаты на участке между устьями рек Унжи и Оки. Вверху этого участка перекаты стали пополняться наносами, выносимыми во время паводка р. Унжей; внизу, в период подпора от р. Оки, на перекатах стал задерживаться почти весь объем русловых наносов, транспортируемых р. Волгой. Годовые объемы дноуглубительных работ на группе перекатов, расположенных непосредственно выше устья р. Оки, возросли в 3—4 раза. Анализ результатов регулирования стока р. Волги Рыбинским водохранилищем, произведенный Н. И. Маккавеевым, привел его к выводу, что основными факторами, ограничившими на участке Рыбинск — Горький полезный эффект повышения меженных уровней, явились неблагоприятный характер взаимодействия реки с притоками и высокие зимние расходы воды.

Совсем иную картину дало регулирование стока р. Нижнего Дона Цимлянским водохранилищем. Те факторы, которые играли отрицательную роль на р. Волге, здесь или ослаблены, или отсутствуют. Между Цимлянским гидроузлом и устьем реки в нее впадает только один приток (р. Северский Донец), причем выше его впадения расходы наносов незначительны. Зимние зарегулированные расходы воды лишь в немногие годы достигают величины летних, а часто бывают в два-три раза меньше. Уровни, соответствующие нормальному зарегулированному расходу 580 м³/с, превышают низкие меженные уровни естественного режима приблизительно на 1,5 м. Приращение же гарантированной судоходной глубины составило к настоящему времени около 2 м. Таким образом, соотношение между приращениями глубины и уровня получилось $\Delta T \approx 1{,}3\Delta z$. Большому приросту глубин способствовали проводившиеся на Дону интенсивные дноуглубительные работы, однако характерно, что достигнутые глубины хорошо сохранялись. Разработанные прорези требовали крупных восстановительных работ лишь в годы со сбросами через Цимлянскую плотину. Постепенному понижению гребней перекатов сопутствовало повышение дна плесовых лощин. Тенденция к канализации русла проявилась на Дону с полной отчетливостью.

Перейдем к русловому режиму участка, ближайшего к гидроузлу. Основное направление руслового процесса здесь состоит в размыве русла. Принято различать *общий размыв*, который, начинаясь от гидроузла, постепенно распространяется вниз по течению — иногда на несколько десятков километров, и *местный размыв*, сосредоточенный непосредственно у сооружения. Причиной общего размыва служит задержка стока наносов водохранилищем. В створе гидроузла расход наносов равен нулю, где-то ниже он принимает значение, соответствующее скоростям течения, глубинам и донным грунтам нижнего бьефа. На участке роста расхода наносов дно размывается. Размыв увеличивает глубины русла, а также крупность частиц на поверхности дна — поскольку в процессе размыва первыми уносятся мелкие фракции. В силу двух этих обстоятельств размыв у гидроузла постепенно затухает, скорости приближаются к неразмывающим и следовательно, створ нулевого расхода наносов смещается ниже гидроузла. Вместе с ним смещается вниз по течению и область размыва. Ниже области размыва всегда формируется зона отложений. В своем перемещении вниз она предваряет размыв, вызывая временное ухудшение в состоянии перекатов. Ряд данных свидетельствует о том, что в общем размыве русла ниже гидроузлов играет некоторую роль термический фактор. С апреля по июль вода, выпускаемая из водохранилища, имеет обычно более низкую температуру, чем в реке и, следовательно, гидравлическая крупность донных частиц в нижнем бьефе уменьшается по сравнению с естественным режимом. С уменьшением гидравлической крупности возрастает концентрация, а значит, и расход взвешенных наносов. Увеличение расхода наносов усиливает интенсив-

ность размыва дна. Обратная связь между температурой воды в реке и расходом взвешенных наносов была установлена прямыми измерениями на р. Колорадо ниже водохранилища Боулдер.

Местный размыв дна в непосредственной близости к гидроузлу обусловлен тем, что поток, сходящий с рисбермы плотины, а также поток, выходящий из отсасывающих труб гидростанции, имеют большие осредненные скорости и очень высокую интенсивность турбулентных пульсаций. Добавочным фактором, способствующим размыву, служит так называемая сбойность течения. Под этим названием понимается следующее явление. Если работает часть отверстий плотины (или также часть турбин гидростанции), то поток, создаваемый работой этих отверстий (или турбин), занимает лишь часть ширины нижнего бьефа. С боковых сторон его образуются обширные водоворотные зоны. В этих условиях поток становится неустойчивым — он способен изгибаться в плане и под действием центробежных сил сужаться. На участках сужения удельные сбросные расходы оказываются бо́льшими, чем на рисберме плотины. Хотя при проектировании гидроузлов и в инструкциях по их эксплуатации предусматриваются мероприятия, предотвращающие сбойность, исключить ее полностью удается не всегда.

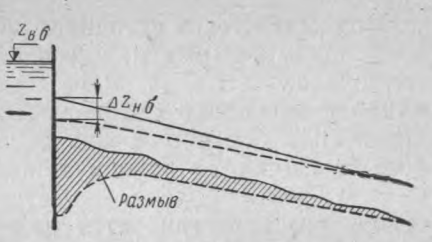


Рис. 33. Размыв дна в нижнем бьефе подпорного гидроузла:
———— профили дна и свободной поверхности в естественном состоянии;
– – – – то же, после размыва

Начальный размыв дна нижнего бьефа обычно происходит еще во время строительства гидроузла — при стеснении потока перемычками и при пропуске строительных расходов через гребенку плотины.

Ямы местного размыва, образующиеся в нижних бьефах, имеют большую глубину. У многих крупных плотин, построенных на нескальных грунтах, глубина размыва достигает 10—15 м от поверхности естественного дна. В нижнем бьефе Куйбышевского гидроузла дно размыто местами на глубину 25—30 м.

Понижение дна нижнего бьефа, вызываемое общим и местным размывом, увеличивает средние глубины живых сечений, уменьшает тем самым русловые сопротивления и в конечном итоге приводит к понижению свободной поверхности потока. При одном и том же расходе воды кривая свободной поверхности в размытом русле располагается ниже кривой свободной поверхности естественного режима (рис. 33). В створе гидроузла понижение уровня может составлять 0,5—1,0 м и более. Отметка нижнего короля шлюза должна назначаться с учетом этого понижения. В состав проекта гидроузла входит расчет деформаций русла в нижнем бьефе и построение кривых свободной поверхности для деформированного русла.

Волны попусков суточного регулирования играют большую роль в русловом режиме нижнего бьефа в первые годы эксплуатации гидроузла. Затем, по мере развития общего размыва русла, их влияние несколько слабеет. Так как скорости течения в лобовой части волн попусков очень велики — они могут быть в 2—3 раза больше скоростей невозмущенного потока, — то вместе с лобовой частью волны попуска движется волна наносов. В фиксированном створе это регистрируется как резкий пик расхода наносов. Несмотря на относительную кратковременность таких пиков, они приводят к общему усилению подвижности донных форм и вызывают интенсивную заносимость судоходных прорезей. По данным В. А. Галкова, после ввода в эксплуатацию гидроузлов на Волге и Днепре объем дноуглубительных работ на первых 10—15 км от плотин возрастал в 4—8 раз.

Большие скорости течения при распространении волн попусков имеют также своим результатом усиление размыва берегов.

§ 24. ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩ И НИЖНИХ БЬЕФОВ

Ледовый режим водохранилищ и нижних бьефов подпорных гидроузлов обладает специфическими особенностями, влияющими на работу речного транспорта. Чтобы уяснить эти особенности, рассмотрим баланс тепла в потоке под ледяным покровом.

В летнее время температура распределена по глубине мелководных водоемов почти равномерно, и к концу лета их дно прогревается до температуры 15—20°С (имеются в виду климатические условия центральных районов европейской территории Союза). Осенью, по мере охлаждения воды, остывает и поверхностный слой донного грунта, однако в толще грунта температура остается довольно высокой и, следовательно, сохраняется большой запас тепла. В момент замерзания температура воды вдоль всей вертикали близка к нулю. Как только ледяной покров установился, он изолирует поток от непосредственного влияния температур воздуха и тепло, выделяющееся из глубинных слоев грунта, повышает температуру поверхности дна. Это повышение невелико — в водохранилищах оно составляет 1—2°С, в реках может измеряться десятыми долями градуса. Поскольку однако температура нижней поверхности льда точно равна нулю, то возникает перепад температур и, как его следствие, поток тепла от дна к ледяному покрову (рис. 34). Тепло, поступающее к нижней поверхности льда, проходит через лед, далее через слой снегового покрова и отдается в атмосферу. Теплоотдача с поверхности снега определяется в основном температурой воздуха. Между отдачей тепла в атмосферу и подводом тепла к нижней поверхности льда равенства в общем случае нет. Если тепла подводится больше, чем отдается, его избыток идет на таяние льда — толщина ледяного покрова уменьшается. Если отдается тепла больше, чем под-

водится, верхние слои воды переохлаждаются и толщина льда нарастает. Когда количество тепла, подводимого к нижней поверхности льда, равно теплоотдаче в атмосферу, толщина льда остается постоянной.

Подвод тепла к нижней поверхности льда осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии. Для плотности диффузионного потока тепла имеем формулу, аналогичную формуле (44) плотности диффузионного потока наносов,

$$(q_{\Theta d})_z = -\rho c_p K_t \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial z}, \quad (67)$$

где Θ — осредненная температура воды; c_p — удельная теплоемкость воды при постоянном давлении. Величина $\rho c_p K_t$ представляет собой коэффициент турбулентной теплопроводности (для воды $\rho c_p \approx 1000 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$).

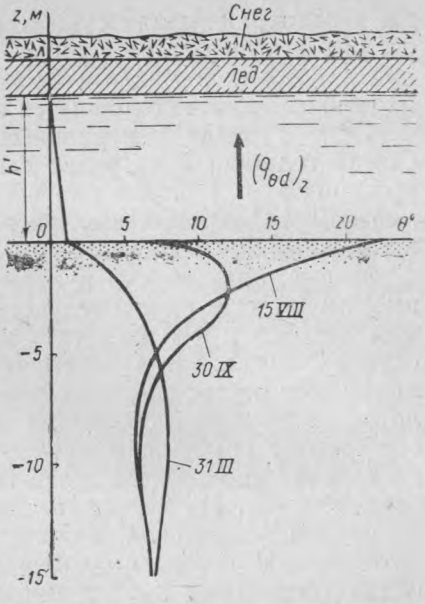


Рис. 34. Температурные разрезы водоема и подстилающего грунта (по К. И. Россинскому)

Так как перепад температур по вертикали мал, то приближенно можно считать распределение температур линейным. Введя некоторое среднее значение коэффициента турбулентной диффузии $K_{t\,\text{ср}}$, получим:

$$(q_{\Theta d})_z = \rho c_p K_{t\,\text{ср}} \frac{\bar{\Theta}_{\text{дон}}}{h'}, \quad (68)$$

где $\bar{\Theta}_{\text{дон}}$ — температура воды у дна и h' — расстояние от дна до нижней поверхности льда.

Таким образом, плотность потока тепла определяется температурой дна, глубиной потока и величиной коэффициента диффузии. Коэффициент диффузии $K_{t\,\text{ср}}$ отражает интенсивность турбулентного перемешивания, а последняя растет вместе со скоростью течения и шероховатостью граничных поверхностей. Отсюда вытекают следующие различия в ледовом и термическом режимах потоков с малыми и большими скоростями течения: 1) в потоках с малыми скоростями и соответственно малой турбулентной теплопроводностью (в частности, в водохранилищах) толщина льда больше, чем в потоках с большими скоростями (в реках); 2) в силу той же малой теплопроводности потоки с малыми скоростями имеют менее равномерное распределение температур по вертикали и температура дна у них выше, чем в потоках с большими скоростями; поэтому зимой и средняя температура во-

ды в водохранилищах существенно выше, чем в реках (разумеется, она всегда остается ниже +4°С); 3) так как отвод тепла от дна в потоках с малыми скоростями ограничен, к концу зимы в их донном грунте сохраняется значительный запас тепла.

Если в реках центральных районов европейской территории Союза толщина льда редко бывает больше 0,5 м, то на водохранилищах этих районов она составляет 0,6—0,8 м. Даже на Цимлянском водохранилище, расположенном южнее, толщина льда в холодные зимы достигает 0,7 м.

Малые, практически нулевые скорости течения в водохранилищах имеют еще одно последствие — на водохранилищах невозможен ледоход и лед там тает на месте. Заметим, что даже в тех случаях, когда ветер подгоняет ледяные поля к плотине, сброс льда через отверстия водослива не производится, так как это было бы сопряжено с большими потерями воды. Таяние льда на месте требует времени, и начало физической навигации сдвигается на водохранилищах на более поздние даты по сравнению со свободной рекой. На водохранилищах европейской территории Союза начало физической навигации запаздывает на 5—10 сут. На этот отрезок времени сокращается и общая длительность навигации (появление льда происходит на реках и водохранилищах практически одновременно).

Для нижних бьефов кардинальное значение имеет выход зимой из водохранилища относительно теплой воды. Так как теплоемкость воды велика, то, прежде чем охладиться до нуля, она проходит значительные расстояния. В нижнем бьефе всех гидростанций в течение всей зимы существует полынья. Длина ее непостоянна — она сокращается при усилении морозов и возрастает при повышении температур воздуха. Средняя длина полыньи определяется температурой воды, поступающей из водохранилища, и степенью суровости зимы. Эта средняя длина составляет ниже крупных водохранилищ 20—30 км. В предвесенний период, в результате усиливающейся солнечной радиации, длина полыньи начинает быстро расти, и перед вскрытием она иногда увеличивается до 100—150 км. Нижняя оконечность полыньи, где температура воды близка к нулю, представляет собой «фабрику шуги» (внутриводного льда). Поступая под лед, шуга в периоды ее интенсивного образования способна забивать живые сечения, т. е. создавать зажоры. Высота зажорных подъемов уровня может составлять несколько метров.

В полыньях ряда нижних бьефов зимой осуществляется местное судоходство. Проводка судов за ледоколами позволяет отодвинуть конец навигации на срок до двух-трех недель на протяженных участках рек и водохранилищ. Этим не только компенсируется задержка в очищении ото льда водохранилищ весной, но создается приращение продолжительности навигации по отношению к естественному режиму.

Глава IV

СУДОХОДНЫЕ ПРОРЕЗИ НА РЕКАХ И СУДОВЫЕ ХОДЫ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ

§ 25. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ ГАБАРИТОВ СУДОВЫХ ХОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТНЫХ СОСТАВОВ СУДОВ И ПЛОТОВ

Гарантированные минимальные габариты судового хода (глубина, ширина и радиус закруглений) на судоходных реках назначаются, как уже упоминалось, на основании технико-экономических расчетов.

При установленных же размерах расчетных судов, плотов или их составов минимальные габариты судового хода на реках определяются в зависимости от условий судовождения по приведенным ниже формулам.

Минимальная глубина судового хода определяется как сумма осадки наибольшего расчетного судна и запаса воды под днищем судна. Этот запас воды зависит от рода грунта, из которого сложено ложе реки, а также от типа и осадки расчетного судна.

При движении по свободным рекам суда и плоты должны иметь запас воды между днищем (для судов) или нижней поверхностью (для плотов) и дном ходовой полосы в размерах, установленных Правилами технической эксплуатации:

а) при глубине до 1,5 м: несамоходные суда с обычным грузом при песчаном и галечном грунте — не менее 5 см, при каменистом — 10 см; несамоходные суда с нефтегрузами или взрывчатыми веществами при песчаном и галечном грунте — не менее 10 см, при каменистом — 15 см; самоходные суда независимо от рода перевозимого груза и рода грунта — не менее 10 см, а плоты — 20 см;

б) при глубине от 1,5 до 3 м все запасы воды под днищем, указанные для глубины до 1,5 м, увеличиваются на 5 см;

в) при глубине более 3 м все запасы воды под днищем, указанные для глубины от 1,5 до 3 м, увеличиваются на 5 см.

Ширину прямолинейного судового хода B_c, где его направление совпадает с направлением течения, можно определить по формулам:

при двустороннем движении

$$B_c = b_1 + b_2 + 2B_3 + B_4; \qquad (69)$$

при одностороннем движении

$$B_c = b + 2B_3. \qquad (70)$$

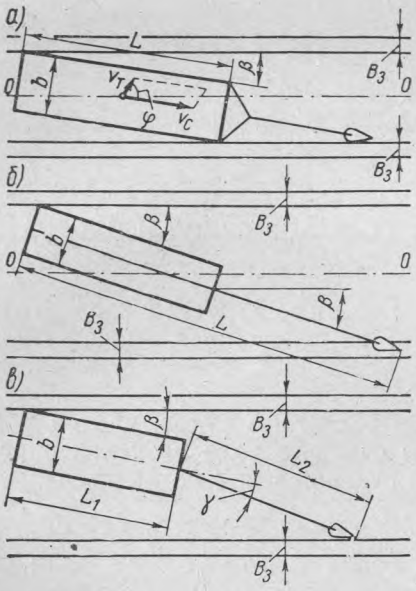


Рис. 35. Схема к определению ширины судового хода с учетом дрейфа

В этих формулах:

b_1 и b_2 — ширина расчетного состава (плота) соответственно низового и верхового направлений;

B_3 и B_4 — запас ширины судового хода на рыскливость и дрейф от бокового ветра соответственно между составом и кромкой судового хода и между встречными составами;

b — наибольшая ширина из ширин составов (плотов) низового или верхового направлений.

Запас B_3 ширины судового хода определяется по данным натурных испытаний или применительно к правилам плавания и составляет примерно половину ширины состава, а запас B_4 принимается примерно вдвое больше запаса B_3.

При одностороннем движении и свальных течениях, где направление судового хода не совпадает с направлениями течения, ширину прямолинейного судового хода (рис. 35, *а*) можно определить по зависимости

$$B_c = L \sin\beta + b \cos\beta + 2B_3, \qquad (71)$$

где L — длина расчетного состава;

β — угол дрейфа, определяющий поправку на снос состава с курса течением.

Углом дрейфа β называется угол между осью судового хода и диаметральной плоскостью движущегося судна или плота (см. рис. 35). Он определяется по соотношению

$$\sin\beta = \frac{v_т}{v_c}\sin\varphi, \qquad (72)$$

где $v_т$ — скорость течения;

v_c — скорость движения состава относительно воды;

φ — угол между направлением течения и осью судового хода.

Зависимость (71) применяется в тех случаях, когда дрейф невелик и длину толкаемого (буксирного) состава в расчетах можно принять без длины толкача (без буксира и буксирного троса).

Расчеты по зависимости (71) ведут отдельно для низового и верхового составов и из полученных величин принимают бо́льшую.

При больших углах дрейфа ширину прямолинейного судового хода можно определять по формулам:

если толкач выступает за ширину судового хода, занимаемую толкаемым составом

$$B_c=(L_т+L_c)\sin\beta+\left(\frac{b_т}{2}+\frac{b_c}{2}\right)\cos\beta+2B_з, \qquad (73)$$

где $L_т$ и $b_т$ — соответственно длина и ширина толкача;

L_c и b_c — соответственно длина (без толкача) и ширина толкаемого состава;

если буксир выступает за ширину судового хода, занимаемую буксируемым составом (рис. 35, *б*),

$$B_c=L\sin\beta+\frac{b}{2}\cos\beta+2B_з, \qquad (74)$$

где L — длина состава с буксировщиком от носа буксира до кормы состава.

Ширину прямолинейного судового хода на участках со свальным течением, где буксир может уклониться от диаметральной плоскости буксируемого состава на угол γ (рис. 35, *в*), определяют по зависимости

$$B_c=L_1\sin\beta+\frac{b}{2}\cos\beta+L_2\sin(\beta+\gamma)+2B_з, \qquad (75)$$

где L_1 — длина буксируемого состава (плота);

L_2 — расстояние от носа буксировщика до головной части буксируемого состава (плота).

При двустороннем движении ширину прямолинейного судового хода можно определить по формуле

$$B_c=B_1+B_2, \qquad (76)$$

где B_1 и B_2 — ширина полосы судового хода, занимаемая соответственно низовым и верховым расчетным составом; определяется в зависимости от конкретных условий по одной из приведенных формул.

Ширину криволинейного судового хода на свободной реке для буксируемых и толкаемых составов судов определяют на основании данных натурных испытаний. При этом следует иметь в виду, что жестко учаленный толкаемый состав занимает на закруглении бо́льшую ширину, чем такой же гибко учаленный буксируемый состав, если на последнем правильно используются рули.

Определить ширину криволинейного судового хода для буксируемых плотов более сложно, так как, кроме сопротивления воды, на их движение оказывают влияние тормозные средства и вспомогательные суда для дополнительной тяги. При небольшой

скорости движения плотов буксир обеспечивает управление головной частью плота, а вспомогательные суда и тормозные средства поддерживают весь плот на оси судового хода. В этом случае уширение судового хода на закруглении определяется длиной секции плота и необходимым отклонением буксировщика от оси судового хода, которое на укороченном буксирном тросе составляет примерно 10—15°.

Испытания буксируемых плотов проводят на характерных закруглениях и определяют: траектории движения отдельных частей плота, скорость движения плота, положение буксировщика относительно оси плота, влияние тормозных средств и вспомогательных судов на положение плота, направление и скорость течения и ветра. По результатам этих испытаний устанавливают величину угла между продольной осью плота и осью судового хода, величину угла между продольной осью плота и буксирным тросом, ширину судового хода, занимаемую плотом и буксировщиком [1].

Радиус кривизны судового хода R_c на свободных реках определяется в зависимости от длины L_c расчетного судна или жестко учаленного состава по соотношению $R_c \geqslant 3L_c$.

В соответствии с Правилами технической эксплуатации для беспрепятственного движения судна или состава по криволинейному судовому ходу требуются соотношения: вниз по течению $R_c \geqslant 4L_c$; вверх по течению $R_c \geqslant 2L_c$.

Габариты рассматриваемых далее судоходных прорезей на свободных реках и размеры судов, плотов или составов, проходящих через эти прорези, должны иметь указанные выше соотношения.

§ 26. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СУДОХОДНЫМ ПРОРЕЗЯМ И ЗНАЧЕНИЕ ОТВАЛОВ ГРУНТА

Судоходные прорези выполняются на транзитном судовом ходу и вне транзита, т. е. на подходах к портам и пристаням, на входах в затоны и т. д. В дальнейшем рассматриваются только прорези на транзитном судовом ходу.

Судоходная прорезь должна отвечать следующим общим требованиям:

1) иметь установленные габариты — ширину и глубину;
2) быть удобной и безопасной для движения судов и плотов;
3) иметь наименьший возможный объем выемки;
4) иметь малый объем заносимости, т. е. вынуждать к минимальному объему повторных работ;
5) способствовать (вместе с отвалом грунта) общему улучшению переката.

[1] Проектирование судовых ходов на свободных реках. Труды ЦНИИЭВТа Под ред. проф. Н. И. Маккавеева. Вып. 36. М., «Транспорт», 1964.

В условиях конкретного переката некоторые из этих условий могут оказаться противоречащими друг другу. Так, требование удобства для движения флота часто не согласуется с требованием наименьшего объема первоначальной выемки. Решающими во всех случаях являются требования судоходства. Ради обеспечения удобства и безопасности плавания следует идти на большие объемы и первоначальной выемки и повторных работ.

Для удобства и безопасности плавания прорези всегда делаются прямыми. Лишь в отдельных случаях длинные прорези допустимо составлять из двух-трех прямых колен с малыми углами между ними. Требования судоходства заставляют, кроме того, заботиться о соблюдении следующих условий: 1) подходы к прорези сверху и снизу должны иметь возможно бо́льшие радиусы кривизны; 2) на прорези и на подходах к ней не должно быть свальных (поперечных) течений; 3) скорость течения при входе в прорезь и выходе из нее должна изменяться плавно. Для создания достаточных радиусов кривизны судового хода производятся подрезки побочней и осередков, а иногда уширяются и концевые участки прорези. Такое уширение делается путем излома одной из кромок прорези. Чтобы смягчить продольную изменяемость скоростей, производят переуглубление концевых участков прорези. Необходимость избежать свальных течений учитывается при выборе направления прорези и местоположения отвала грунта.

Судоходные прорези делятся на два вида: эксплуатационные и капитальные. Эксплуатационные прорези выполняются на существующем судовом ходу. Они, в свою очередь, подразделяются на восстановительные и ремонтные. Восстановительными называются прорези, выполняемые на спаде паводка для удаления с судового хода на перекате наносов, отложенных при высоких уровнях, — они восстанавливают на перекате судоходные глубины. Ремонтными называются прорези, служащие для ликвидации меженной заносимости судового хода. Ремонтные прорези могут выполняться на одном перекате несколько раз за навигацию. Положение последовательно выполняемых ремонтных прорезей может быть различным, так же как оно может несколько отличаться от положения восстановительной прорези, однако во всех случаях работы ведутся примерно в одной и той же полосе судового хода. Объемы восстановительных прорезей всегда существенно больше объемов отдельных ремонтных прорезей, но при сильной меженной заносимости суммарный объем ремонтных работ может стать сравнимым с объемом восстановительной прорези. Ширина восстановительных и ремонтных прорезей назначается равной гарантированной ширине судового хода.

Капитальными называются прорези, выполняемые для переноса судового хода на новое место. Такой перенос может вызываться требованиями судоходства или стремлением обеспечить бо́льшую устойчивость судового хода (снизить объемы эксплуатационного дноуглубления). На участках со скальными грунтами

к капитальным относятся также прорези, выполняемые для увеличения гарантированных габаритов существующего судового хода.

На реках с нескальными грунтами ширина капитальных прорезей назначается больше гарантированной ширины судового хода обычно в 1,2—1,5 раза. Это делается с целью привлечь в прорезь больший расход воды и, тем самым, создать условия для закрепления хода по новому направлению. Длина, средняя толщина снимаемого слоя, а значит, и объем выемки у капитальных прорезей гораздо больше, чем у эксплуатационных. На наших больших реках в настоящее время становятся нередкими объемы капитальных прорезей в 1 млн. $м^3$ и больше.

Создание на перекате (или на группе перекатов) нового судового хода, более удобного для судоходства и менее подверженного заносимости, чем существующий судовой ход, представляет собой сложную инженерную задачу и требует вложения значительных средств. Поэтому капитальные прорези выполняются на основании проектов, содержащих детальные гидравлические расчеты и устанавливающих определенную организацию работ. Исходные данные для проектов доставляются русловыми исследованиями, проводимыми по широкой программе.

Устойчивость прорези (эксплуатационной или капитальной), т. е. меньшая или бо́льшая степень ее заносимости, определяется условиями транспорта наносов на участке прорези. Устройство прорези изменяет эти условия по сравнению с естественным ходом процесса. Если площадь поперечного сечения прорези мала по сравнению с площадью живого сечения реки, влияние прорези будет сказываться только в узкой полосе самой прорези и ее ближайшей окрестности. Если площадь поперечного сечения прорези сравнима с площадью живого сечения реки, прорезь может влиять на общий ход руслового процесса. В первом случае дноуглубление не дает возможности добиться прогрессирующего увеличения глубин. Во втором случае такая возможность имеется. На Верхней Оке, где площадь поперечного сечения прорезей составляет около $^1/_4$ площади живого сечения меженного потока, путем систематического дноуглубления было достигнуто значительное увеличение гарантированной глубины. На нижнем Дону, где площадь поперечного сечения прорезей составляет $^1/_5$—$^1/_4$ площади живого сечения потока, дноуглубительные работы в сильной степени способствовали достижению положительных результатов регулирования стока.

На реках с песчаными и песчано-гравелистыми грунтами дноуглубительные работы ведутся землесосами и отвалы грунта образуют валы, расположенные параллельно прорезям в расстояниях, определяемых длинами рефулеров. Вследствие изгиба рефулера на течении, расстояние от оси прорези до оси отвала составляет от $^1/_2$ до $^2/_3$ длины рефулера. Отвалы образуют положительные формы донного рельефа и влияют на поток сильнее, чем прорези, являющиеся отрицательными формами. Поэтому при

проектировании прорезей расположению отвалов должно уделяться серьезное внимание. Длины рефулеров у существующих крупных землесосов составляют от 400 до 500 м. Для больших рек эти длины следует признать недостаточными. Отвалы в большинстве случаев оказываются уложенными на том наибольшем расстоянии от прорези, какое допускает длина рефулера. Укладывать их ближе к прорези обычно не имеет смысла, а уложить дальше часто желательно, но невозможно. Вопрос о том, за какую кромку прорези укладывать отвал, зависит от условий на перекате, но чаще он решается в пользу верхнего побочня. Систематическая укладка грунта на верхний побочень повышает поверхность побочня и, как следствие этого, замедляет движение побочня вниз по течению. Нижний побочень смещается вниз с более или менее постоянной скоростью, и в результате создается возможность трассировать прорезь по все более пологому направлению, улучшая тем самым условия движения судов. В той мере, в какой позволяет длина рефулера, стремятся примыкать отвалы к берегам или к повышенным частям побочней, с тем чтобы не создавать из отвалов искусственных осередков. На перекатах с затонскими частями, если глубины в затонской части невелики, отвалы с успехом используются для перекрытия затонской части. При больших глубинах в затонской части отвал укладывают на косу, отделяющую затонскую часть от корыта переката (рис. 36).

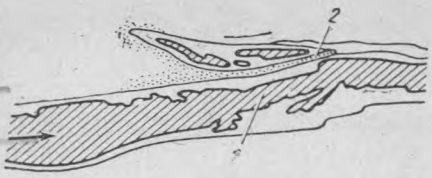


Рис. 36. Перекрытие затонской части отвалом грунта из прорези:
1 — прорезь; *2* — отвал грунта

Повышение поверхности косы ограничивает слив воды в затонскую часть, являющийся главной причиной затруднений на перекатах этого типа (см. § 27).

Грунт, извлекаемый из капитальных прорезей, используется или для заложения емкости старого судового хода или для создания выправительных сооружений длительного действия. Для достижения последней цели поверхность отвалов должна укрепляться.

Встречаются случаи, когда для эффективного использования грунта, извлеченного из капитальной прорези, требуется его перевалка. Недостаточная длина рефулеров ощущается в этих случаях особенно остро.

Шаландовые отвалы грунта, извлекаемого многочерпаковыми снарядами, можно располагать только в глубоких местах русла. Зато расстояние между отвалом и прорезью можно варьировать достаточно широко. Поэтому грунт, извлеченный на одном перекате, иногда используется для улучшения другого — смежного переката. Шаландовые отвалы стремятся располагать в затонских частях, во второстепенных рукавах, а при выполнении капитальной прорези — в емкостях старого судового хода.

§ 27. ТРАССИРОВАНИЕ СУДОХОДНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПРОРЕЗЕЙ

При назначении трассы эксплуатационной восстановительной прорези производитель путевых работ располагает сведениями о ходе руслового процесса на перекате за ряд предшествующих лет и о деформациях, которым подвергались выполнявшиеся в эти годы прорези. Основной материал для назначения прорези дает ему план свежей русловой съемки, по которому он может судить о деформациях, произведенных текущим паводком, и о состоянии переката на данный момент (разрыв во времени между съемкой переката и началом разработки прорези не должен превышать пяти суток). Обычно, если только на перекате не произошло неожиданных крупных деформаций, указанной совокупности данных достаточно для выбора положения прорези. Проверять ее устойчивость расчетом не требуется. Поэтому применительно к эксплуатационным прорезям и пользуются термином трассирование, а не проектирование.

Назначение ремонтных прорезей протекает опять-таки при отсутствии резких непредвиденных деформаций, еще проще — они намечаются в тех местах судового хода, где съемка переката обнаружила отложение наносов.

Внешняя простота процедуры трассирования эксплуатационных прорезей не должна создавать иллюзию легкости этой задачи. Перекат после прохода паводка никогда не бывает таким же, как в предшествующую навигацию. Ранее существовавшая трасса никогда не является абсолютно верным решением — она могла бы быть и несколько иной. Поэтому задача найти лучший вариант трассы встает перед производителем путевых работ каждую навигацию как частично новая. В тех же случаях, когда на перекате произошли сильные изменения, выбор трассы эксплуатационной прорези по своей трудности мало отличается от выбора трассы капитальной прорези, и лишь недостаток времени заставляет обходиться без расчетов. Чтобы избежать ошибок, производитель работ должен понимать законы руслового процесса, отлично знать свои перекаты и иметь инженерную интуицию.

Для трассирования прорезей на некоторых, наиболее распространенных типах перекатов практика дноуглубления выработала определенные рекомендации. Остановимся на них, попутно отмечая особенности различных типов перекатов.

Перекат-перевал. Так принято называть перекаты наиболее простой формы. Они характеризуются плавным переходом линии наибольших глубин от одного берега к другому, не заходящими друг за друга плесовыми лощинами (отсутствием затонской части) и одинаково развитыми побочнями. Эти перекаты встречаются как на меандрирующих реках, так и на реках с побочневым типом руслового процесса. В первом случае они располагаются на переходах между смежными кривыми разных знаков кривизны; их побочни закреплены у выпуклых берегов (не сме-

щаются относительно берега). Во втором случае побочни, а значит и перекат в целом, постепенно сползают вниз по течению. Прорезь на перекате-перевале трассируется по линии наибольших глубин; отвал, по соображениям, приведенным в § 26, располагается на верхнем побочне (рис. 37). Если побочни подвижны и ежегодные отвалы грунта позволяют притормозить верхний побочень, прорези придается более пологое направление (на рис. 37 — пунктир).

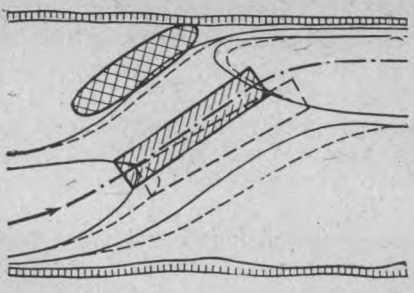


Рис. 37. Прорезь на перекате-перевале

Перекат с затонской частью. Схема переката с затонской частью была приведена на рис. 19. На рис. 38 она дана снова с показанием вариантов прорези. Косое расположение перекатного вала усложняет течение воды на перекатах этого типа и является причиной ряда затруднений для судоходства. При меженных уровнях, когда вал переката работает как затопленный водослив, между верхней плесовой лощиной и затонской частью образуется поперечный перепад уровней, под действием которого течение на валу переката приобретает веерообразный характер. Так как наибольший поперечный перепад имеется вблизи вершины затонской части, то по мере понижения уровней максимум скоростей на валу переката смещается в направлении от нижнего побочня к верхнему. С повышением уровней эти эффекты слабеют и при больших наполнениях меженного русла делаются незаметными — поток движется почти параллельно берегам.

Весенний судовой ход проходит поэтому по пологому направлению, пересекая вал переката вблизи нижнего побочня. В середине спада по этому же направлению делается прорезь (I, см. рис. 38). Однако пользоваться этой прорезью вскоре становится

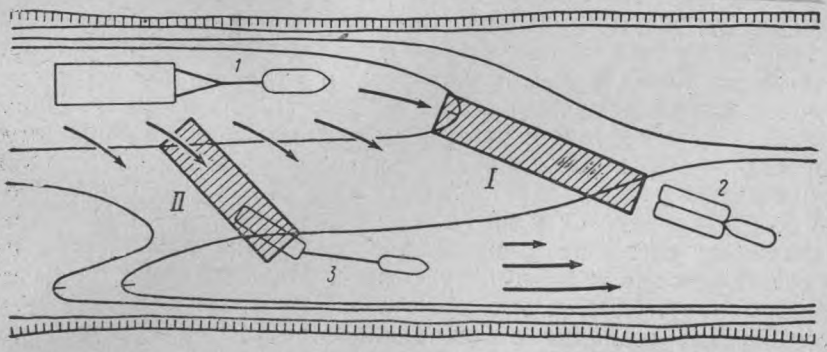


Рис. 38. Весенняя *I* и меженная *II* прорези на перекате с затонской частью: *1* — плотовый состав; *2* — толкаемый состав; *3* — буксирный состав

неудобно. Вследствие растекания потока по перекатному валу удельные расходы воды в прорези резко падают и прорезь начинает заноситься. Одновременно обнаруживаются следующие трудности для судоходства: 1) составы, подходящие к перекату сверху, испытывают действие свального течения, направленного в затонскую часть; это свальное течение особенно опасно для плохо управляемых плотовых составов; 2) толкаемые составы, движущиеся снизу, встречают сильное течение, идущее из затонской части. Так как при заходе в прорезь они становятся к этому течению бортами судов, то состав сносится вниз. Даже опытные капитаны иногда не могут заправить состав в прорезь и бывают вынуждены, расчалив его, проводить суда по отдельности на коротком буксирном тросе. Положение на перекате может стать настолько тяжелым, что для межени приходится трассировать новый судовой ход, пересекающий перекатный вал по крутому направлению вблизи верхнего побочня. Выполненная здесь прорезь (*II*, см. рис. 38) поддерживается течением и обычно не требует ремонтных работ до конца навигации. Единственное затруднение, которое встречает здесь судоходство, состоит в малом радиусе циркуляции при выходе из прорези в затонскую часть. Под действием течения и сил инерции буксируемые баржи получают раскат в сторону берега и нередко наваливаются на него. В следующий весенний паводок крутая прорезь у верхнего побочня полностью закладывается песками, ползущими с побочня, и одновременно создаются благоприятные условия для возобновления пологой прорези нижнего положения. После этого весь цикл изменений повторяется снова.

Улучшить положение так, как это показано на рис. 36, перекрывая отвалом затонскую часть, удается лишь в относительно редких случаях. Чаще приходится наблюдать, что отвал грунта, извлеченного из прорези нижнего положения, превращается в осередок, способствующий не улучшению, а ухудшению переката. Коренное улучшение перекатов с затонской частью на больших реках достигается с помощью капитальных прорезей через нижний побочень, а на средних и малых — с помощью выправительных сооружений, перекрывающих затонскую часть.

Перекат на повороте русла. Перекаты часто располагаются перед крутыми поворотами русла или в их начале. Судовой ход на таких перекатах мало устойчив. Одна из причин неустойчивости состоит в различном положении линии максимума скоростей («стрежня» потока) при высоких и низких уровнях. При высоких уровнях дает о себе знать закон площадей — течение сосредоточивается у выпуклого берега. С переходом к межени начинает сказываться влияние рельефа дна и максимум скоростей переходит к вогнутому берегу. На некоторых перекатах этого типа приходится поддерживать два хода: весенний и меженный. Для создания относительно стабильного судового хода следует сообразовывать положение прорези у выпуклого или у вогнутого берега с расположением перекатного вала на участке

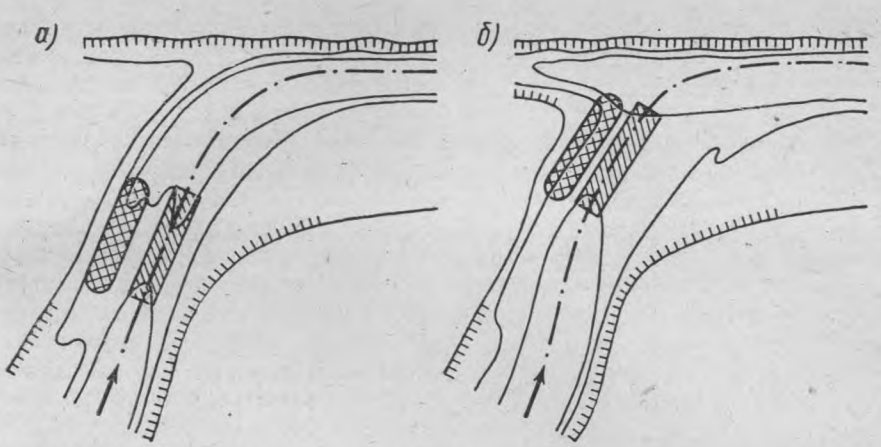


Рис. 39. Перекаты перед поворотом русла:
а — с прорезью у выпуклого и *б* — у вогнутого берега

поворота. Если перекат расположен перед поворотом или в его начале (рис. 39, *а*), предпочтение отдается прорези у выпуклого берега; если перекат спустился вниз и находится недалеко от вершины поворота, прорезь трассируется у вогнутого берега (рис. 39, *б*). Для увеличения радиусов кривизны судового хода часто производится подрезка побочня, прилененного к выпуклому берегу. Такие подрезки однако быстро заносятся, и их приходится возобновлять несколько раз за навигацию.

Перекат у приверха острова. В коротких двухрукавных разветвлениях обычно располагается пара перекатов — у приверха острова в одном рукаве и у ухвостья острова — в другом. Перекаты у приверха острова редко бывают затруднительными. При обтекании потоком приверха острова скорости течения возрастают и в непосредственной близости к острову развиваются явления размыва. Однако трассировать прорезь у островного берега нельзя по условиям судоходства. При заходе в такую прорезь сверху буксируемые суда могут попадать под действие течения, идущего в несудоходный рукав. Поэтому прорези на таких участках всегда трассируются под материковым берегом. Отвал стремятся расположить между прорезью и берегом (рис. 40).

Перекат у ухвостья острова. За ухвостьем острова свободная поверхность потока понижена и донные струи, выходящие из рукавов, направлены в сторону этой ложбины. Они питают ухвостье острова наносами, наращивая его в длину. Таким образом, вся часть русла, расположенная за ухвостьем, является областью интенсивного движения песков. Это создает большие трудности в поддержании здесь трассы судового хода. Чтобы ослабить заносимость прорези, стремятся трассировать ее по возможности полого, ближе к материковому берегу (рис. 41).

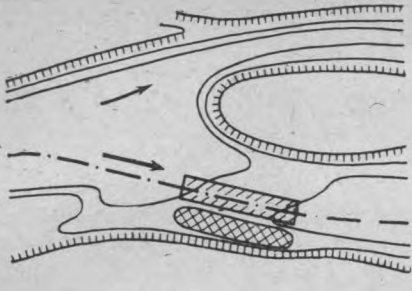


Рис. 40. Прорезь у приверха острова

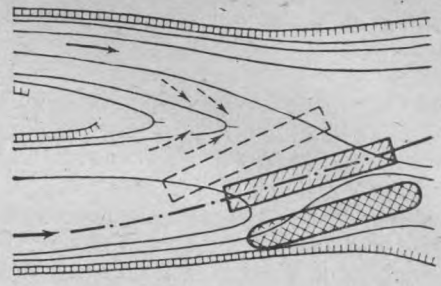


Рис. 41. Варианты прорези под ухвостьем острова

Прорези крутого положения (пунктир на рис. 41) могут быть устойчивы лишь в том случае, когда несудоходный рукав пропускает малые расходы воды. Встречаются разветвления, у которых несудоходный рукав активно работает во время паводка, но сильно мелеет в межень. Тогда условия, которые создаются у ухвостья острова, напоминают условия переката с затонской частью. В межень за ухвостьем образуется поперечный уклон в сторону несудоходного рукава; пологая прорезь начинает заноситься, и приходится открывать ход по более крутому направлению в зоне наибольших поперечных перепадов уровня.

§ 28. СОСТАВ ПРОЕКТА КАПИТАЛЬНОЙ ПРОРЕЗИ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Проект капитальной прорези имеет следующие основные части: 1) анализ русловых процессов на перекате; 2) анализ условий судоходства; 3) выбор трассы капитальной прорези; 4) гидравлические расчеты; 5) подсчеты объемов работ; 6) организация дноуглубительных работ.

В состав исходных данных входят: 1) планы переката за многолетний период; 2) последняя русловая съемка переката с охватом прилегающих участков плесовых лощин и с показанием отметок пойменных бровок (съемка выполняется специально для составления проекта прорези); 3) сведения о глубинах судового хода на перекате за последние 5—10 лет; 4) сведения об объемах дноуглубительных работ за то же время; 5) сведения об авариях транспортного флота на перекате; 6) кривая расходов воды по ближайшему опорному водомерному посту; 7) материалы русловых исследований переката: продольные профили свободной поверхности, планы траекторий поплавков, расходы воды, расходы наносов, пробы донных отложений.

Работа над проектом начинается с анализа планового материала за многолетний период. Обычно для затруднительных пе-

рекатов имеется обширный плановый материал, и первая задача состоит в том, чтобы отобрать съемки, относящиеся к периодам, когда на перекате происходили наиболее сильные деформации. Кроме русловых съемок переката, используются также лоцманские карты. Изучение планового материала дает возможность выявить общую тенденцию руслового процесса на перекате, установить характер и размеры деформаций. Материалы русловых исследований, выполненных к проекту капитальной прорези, помогают понять причинную обусловленность процессов, развивающихся на перекате, т. е. связать деформации русла с кинематикой потока, с интенсивностью транспорта наносов, составом донных грунтов. Русловые исследования должны освещать состояние потока при различных наполнениях русла. С этой целью исследования производятся в составе трех-четырех последовательных серий наблюдений на спаде паводка и в межень.

К разработке капитальной прорези обычно вынуждают большие объемы эксплуатационного дноуглубления. Одна из целей анализа руслового процесса должна состоять в выяснении причин интенсивной заносимости эксплуатационной прорези. Выяснение этих причин должно вестись на основе изучения общей картины аккумуляции наносов на перекате. Следует уделять внимание источнику поступления наносов на перекат и кинематическим особенностям движения потока, способствующим отложению наносов. Если большие объемы дноуглубления на перекате обусловлены поступлением сверху большого расхода наносов (например, из-за интенсивного размыва берега плесовой лощины или в результате выноса наносов из притока), обеспечить устойчивость прорези труднее, чем в тех случаях, когда эти большие объемы объясняются особенностями кинематики потока, т. е. в конечном счете конфигурацией переката и расположением эксплуатационной прорези. Устанавливая причины заносимости существующего судового хода, попутно необходимо фиксировать все признаки, свидетельствующие о тенденции к развитию новых русловых емкостей (промоины на побочнях, углубление несудоходного рукава).

Если перекат затруднителен для судоходства, необходимо с полной ясностью определить характер затруднений (малый радиус кривизны судового хода, его недостаточная просматриваемость, свальное течение). Аварии с судами оформляются документально, и акты судоходной инспекции об авариях, происшедших по вине пути, дают ценный материал для суждения об условиях движения судов на перекате. К счастью однако аварии — редкое событие, и поэтому затруднения для судоходства обычно приходится выяснять путем устного опроса судоводителей.

Выводы, полученные при анализе руслового процесса и условий судоходства, служат основой для выбора трассы капитальной прорези. Так же как и при трассировании эксплуатационных прорезей в первую очередь заботятся о создании наилучших условий для движения судов и далее — об устойчивости за-

проектированной прорези. Устойчивость прорези проверяется расчетом, и эта часть проекта является наиболее трудоемкой. Устойчивость запроектированной капитальной прорези сопоставляется с устойчивостью существующей эксплуатационной прорези. Поэтому расчеты выполняются по меньшей мере дважды: для бытового и для проектного состояний переката. В тех случаях, когда оказываются возможными несколько вариантов капитальной прорези (число вариантов обычно не превышает двух-трех), расчеты выполняются для каждого варианта. Рассчитать устойчивость прорези — это значит рассчитать ее деформации. Невысокая точность расчетов и невозможность предвидеть на значительный срок колебания уровней в реке заставляют в существующей практике расчетов ограничиваться определением лишь начальных деформаций прорези, т. е. деформаций, непосредственно следующих за разработкой прорези. Расчеты ведутся, таким образом, применительно к уровню и расходу воды, ожидаемым при производстве дноуглубительных работ. Как ни скромен такой объем расчетов, он дает незаменимый способ объективной сравнительной оценки устойчивости существующего и проектируемого судовых ходов.

Судоходные прорези, за исключением прорезей, спрямляющих пойменные извилины, обычно не оказывают существенного влияния на высоты свободной поверхности. Поэтому при расчете деформаций глубины на перекате (вне границ прорези и отвала) определяют, складывая с глубинами, показанными на плане переката, превышение ожидаемого уровня дноуглубительных работ над проектным уровнем. В отдельных редких случаях, когда прорезь имеет большую длину и сечение выемки сравнимо с площадью живого сечения реки, ошибка при таком определении глубин может стать ощутимой. Тогда, до расчета устойчивости прорези, делается расчет кривой свободной поверхности с учетом запроектированной прорези и отвала и в глубины на перекате вносятся соответствующие поправки. Так как расчет деформаций делается для короткого периода времени, то влиянием деформаций на положение свободной поверхности всегда пренебрегают.

При выборе окончательного варианта прорези принимаются во внимание удобство прорези для судоходства, степень ее устойчивости и объем работ. Для принятого варианта выбирается дноуглубительный снаряд (или снаряды) и составляется календарный график разработки.

§ 29. ПРИМЕРЫ КАПИТАЛЬНЫХ ПРОРЕЗЕЙ

Один из наиболее распространенных видов капитальных прорезей составляют прорези, отторгающие нижний побочень переката. Отторжение является целесообразным, когда нижний побочень сильно развит и смещается вниз по течению медленнее

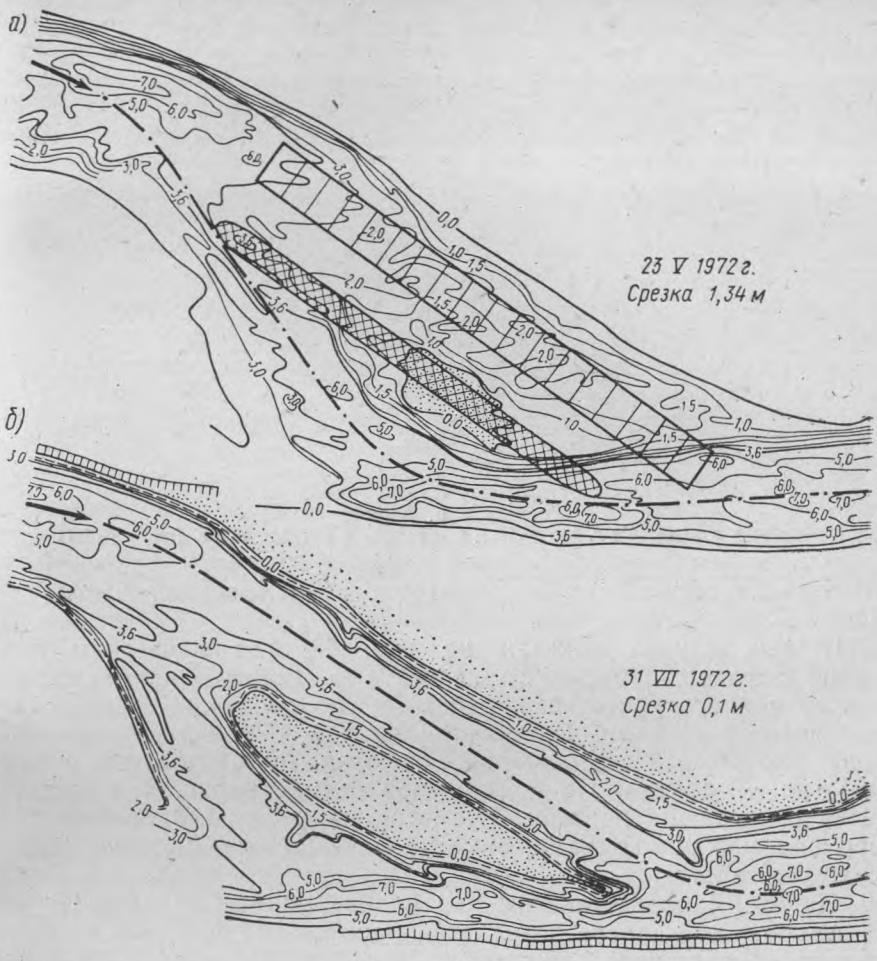


Рис. 42. Капитальная прорезь, отторгающая нижний побочень на Верхнем Просецком перекате р. Волги:
а — съемка до работ; *б* — съемка после работ

верхнего побочня. Вследствие сближения побочней судовой ход на перекате искривляется и становится неудобным для судоходства. Заносимость эксплуатационной прорези, расположенной почти поперек русла, резко возрастает. Поток к этому времени обычно сам уже начинает промывать спрямляющую борозду через нижний побочень, и капитальная прорезь намечается по направлению этой борозды.

Различают два случая отторжения нижнего побочня: полное отторжение, когда капитальная прорезь проходит через корневую часть побочня, и частичное отторжение, когда

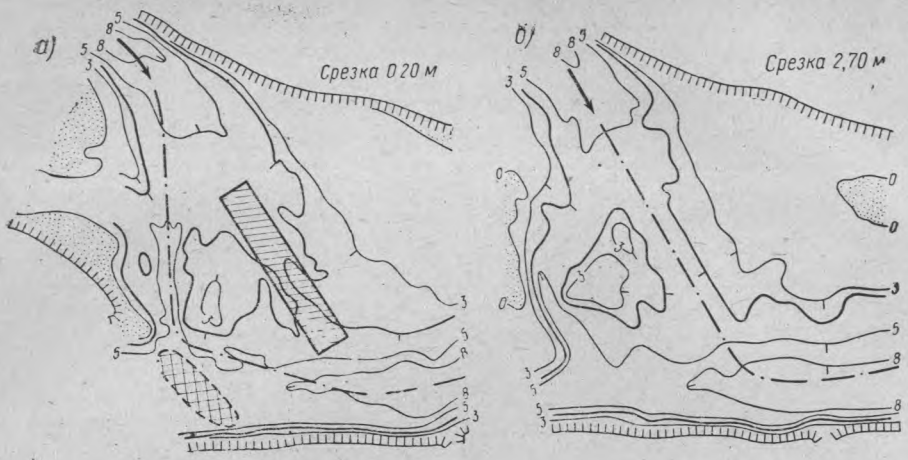


Рис. 43. Частичное отторжение нижнего побочня на Дипинском перекате р. Амура:
а — съемка в июле 1970 г. (до работ); *б* — съемка в октябре 1970 г. (после работ)

капитальная прорезь прокладывается в центральной части побочня.

Первый случай показан на рис. 42, где приведены два плана Верхнего Просецкого переката р. Волги — перед производством дноуглубительных работ и по окончании разработки капитальной прорези. Из прорези длиной 1800 м, проложенной через корневую часть обширного побочня, было извлечено около 950 тыс. м³ грунта. По контрольной съемке видно, что прорезь была поддержана потоком. Несмотря на небольшой промежуток времени между съемками, заметно начавшееся занесение старого судового хода.

На рис. 43 представлены два плана Дипинского переката на р. Амуре — до и после разработки капитальной прорези, которая произвела частичное отторжение нижнего побочня. Новое направление судового хода было уже подготовлено потоком, и пришлось извлечь лишь 90 тыс. м³ грунта. Длина прорези 850 м. Контрольная съемка показывает ту же общую картину, что на Верхнем Просецком перекате: новый судовой ход быстро развивается, на старом судовом ходу идет процесс отложения наносов.

Ход русловых деформаций после отторжения побочня далеко не всегда бывает таким благоприятным, как на Верхнем Просецком и Дипинском перекатах. Если емкость старого судового хода велика, она продолжает отвлекать большой расход воды и капитальная прорезь оказывается неустойчивой. Чтобы закрепить новое положение судового хода, приходится принимать меры по уменьшению пропускной способности старого судового хода. Они состоят или в перекладке туда отвала грунта, или в возведении

специальных намывных сооружений. Чаще всего затруднения возникают в тех случаях, когда капитальная прорезь осуществляется преждевременно, т. е. раньше наступления той стадии развития переката, на которой сопротивление движению потока по направлению существующего судового хода возрастает до величины, близкой к сопротивлению движению через побочень. О достижении этой стадии можно судить по появлению промоин на поверхности побочня, и раньше, чем такие промоины появились, осуществлять капитальную прорезь не следует. Если же осуществление прорези требуется по условиям судоходства, необходимо придавать ей большую ширину (до 2—3 гарантированных ширин судового хода). Появление на наших водных путях новых землесосов большой производительности делает последний путь решения задачи актуальным.

Со своеобразным случаем отторжения побочня приходится встречаться на разветвленных участках рек. Если сползающий вдоль русла побочень подходит к истоку судоходного рукава, он «заклинивает» вход в рукав, т. е. резко увеличивает здесь сопротивление движению потока. Расход воды начинает перераспределяться в пользу второстепенного рукава, скорости течения в судоходном рукаве падают, и в нем откладываются наносы. Кроме того, входная часть рукава становится неудобной для движения составов. Один из возможных путей исправить положение состоит в отторжении побочня. На рис. 44 показан отличный результат отторжения побочня, надвинувшегося на исток судоходного рукава Чермозского разветвления р. Камы. Через 8 лет после выполнения капитальной прорези здесь продолжал существовать созданный ею прямой, удобный судовой ход. Успеху работ способствовал отвал, причлененный к приверху острова и прикрывший вход в несудоходный рукав. Рекомендация укладывать отвал между прорезью и материковым берегом, которая была сделана применительно к эксплуатационным прорезям (см. § 27), в случае капитальных прорезей не является обязательной. Объем грунта, извлекаемого из капитальной прорези, настолько велик, что позволяет использовать отвал для активного воздействия на поток.

Наиболее крупные капитальные прорези выполняются при переносе судового хода из одного в другой рукав разветвленного участка русла. Перенос почти всегда делается из более длинного и искривленного в более короткий, прямой рукав. Этим не только достигается улучшение условий судоходства, но и обеспечивается бо́льшая устойчивость судового хода — в коротком рукаве уклон свободной поверхности, а с ним, при прочих равных условиях, и транспортирующая способность потока больше, чем в длинном. Основанием для переноса судового хода обычно служит установленная при анализе руслового процесса на участке тенденция к обмелению судоходного и размыву несудоходного рукавов. Встречаются случаи, когда прямой и короткий рукав не развивается только в силу того, что в нем залегают правелистые

или глинистые грунты, хорошо сопротивляющиеся размыву. В этих случаях получают удобный и очень устойчивый судовой ход, удалив необходимый слой тяжелых грунтов с помощью многочерпаковых снарядов или землесосов с разрыхлителями.

На рис. 45, *а* показана капитальная прорезь, выполненная в 1953 г. на Алитубском разветвлении р. Нижнего Дона. Правый рукав разветвления, более короткий и широкий, чем левый, долгое время оставался несудоходным вследствие малых глубин. Дно правого рукава слагали крупнозернистые пески, и скорости течения в нем были меньше неразмывающей. Необходимость переноса судового хода в правый рукав была обусловлена большой кривизной левого рукава и существованием на входе в него Алитубского переката, требовавшего ежегодных дноуглубительных работ. При разработке правого рукава было извлечено около 900 тыс. м^3 грунта. Затем в течение шести лет на новом су-

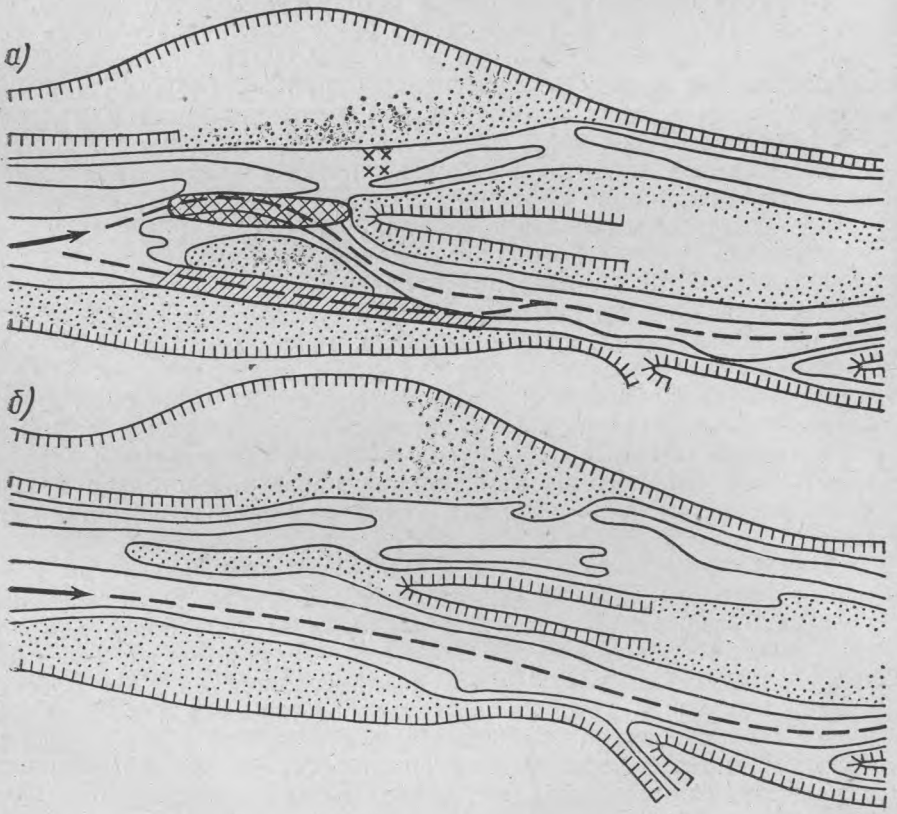


Рис. 44. Отторжение побочня, надвинувшегося на судоходный рукав Чермозского разветвления р. Камы:
а — съемка 1937 г. (до работ); *б* — съемка 1945 г. после стабилизации нового судового хода

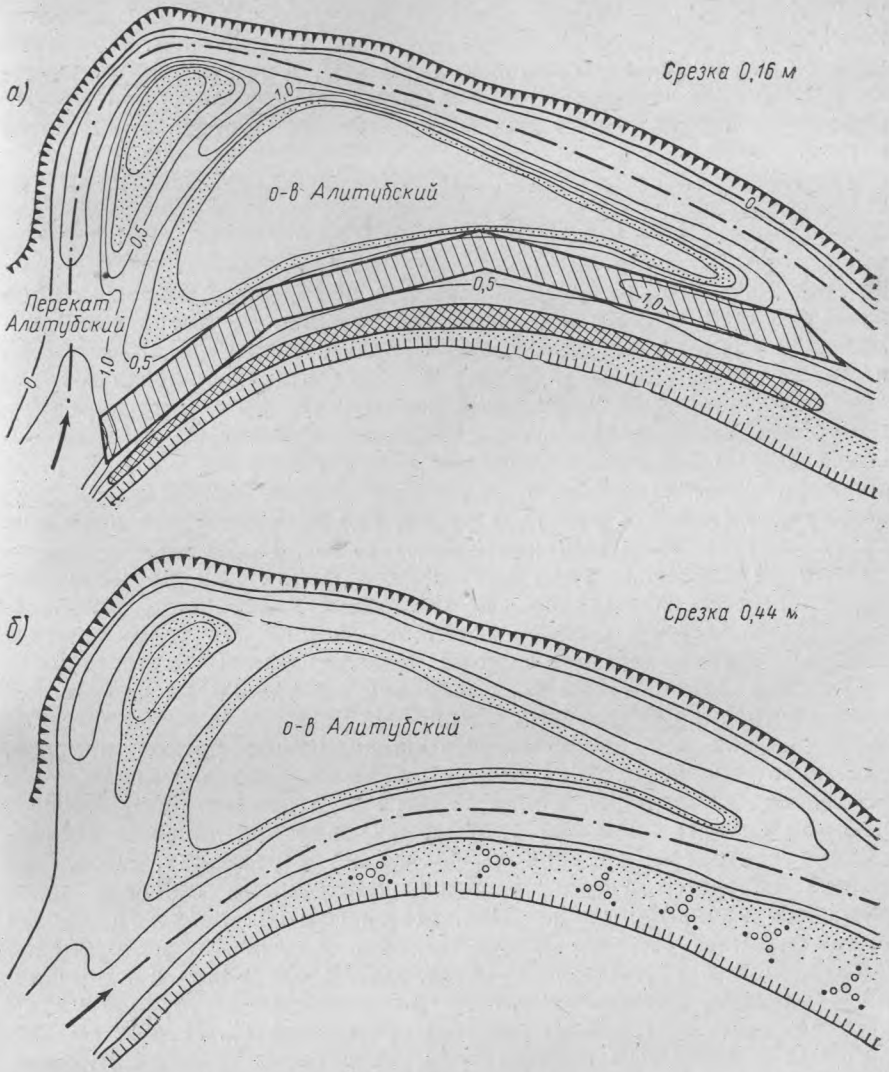


Рис. 45. Перенос судового хода из левого в правый рукав Алитубского разветвления р. Дона:
а — съемка в июне 1953 г. (до работ); *б* — съемка в июне 1960 г. (после стабилизации нового судового хода)

довом ходу велись ремонтные дноуглубительные работы, а левый рукав постепенно мелел. К 1960 г. ход в правом рукаве стабилизировался и перестал требовать дноуглубления (рис. 45, *б*).

Во всех четырех рассмотренных примерах коренное улучшение судового хода на перекатах достигалось с помощью капи-

тальной прорези и отвала грунта, т. е. средствами одного дноуглубления. Чаще, однако, капитальные прорези выполняются в комплексе с возведением выправительных сооружений. При этом удается улучшать не отдельные перекаты, а протяженные участки русла, включающие в себя каждый группу затруднительных перекатов. Принципы таких комплексных работ излагаются в гл. V.

§ 30. ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ ТЕЧЕНИЙ

Для того чтобы составить прогноз деформаций прорези, надо знать распределение в ней скоростей течения. Распределение скоростей в прорези взаимосвязано с полем скоростей за ее бровками, и, таким образом, задача о деформациях прорези заставляет интересоваться скоростным полем всего потока на перекате. Построить такое поле с учетом запроектированных (еще не существующих) прорези и отвала можно либо путем расчета, либо с помощью моделирования. К моделированию прибегают в случаях очень сложных участков русла, где проектируется комплекс дноуглубительных и выправительных работ. Исследования ведутся или на открытых гидравлических моделях или на напорных аэродинамических моделях, где свободная поверхность заменяется плоской твердой стенкой (стеклом) и рабочим телом служит воздух. Принципиальные основы моделирования излагаются в курсе гидравлики. Ниже рассматриваются только расчетные методы построения скоростных полей.

Поскольку все зависимости, определяющие расход наносов, связывают его со средней скоростью течения на вертикали, то и построение скоростных полей ведется в этом же приближении: искомой служит плановая (двумерная) картина течения, составляемая векторами средних скоростей на вертикалях. Движение потока считается установившимся. Векторными линиями поля скоростей являются линии тока. Плановой линией тока будем называть линию горизонтальной плоскости, направление касательной к которой во всех ее точках совпадает с направлением вектора средней скорости на вертикалях (отклонениями этих векторов от горизонта можно пренебрегать). Линии, ортогональные к плановым линиям тока, представляют собой горизонтальные проекции живых сечений. Эти линии называют поэтому криволинейными поперечниками. Совокупность плановых линий тока и криволинейных поперечников называется планом течения (рис. 46). Часть потока, заключенная между двумя смежными линиями тока, называется плановой струей. Полоса между двумя смежными криволинейными поперечниками называется поясом плана течений. Криволинейный прямоугольник, образованный парой смежных линий тока и парой смежных поперечников, представляет клетку плана течения (рис. 47).

Вследствие неправильности и криволинейности плановых очертаний русла пользоваться при построении планов течений декартовыми координатами неудобно. Поэтому (при ручном счете) построения ведутся в системе криволинейных натуральных координат. Координатными линиями такой системы служат линии тока и криволинейные поперечники. Таким образом, в каждой точке плана течений имеется свой локальный координатный базис. Его продольная ось l направлена по касательной к линии тока, его поперечная ось b — ортогонально к линии тока, т. е. по касательной к криволинейному поперечнику. Положительным считается направление оси b в сторону выпуклости линии тока (см. рис. 47).

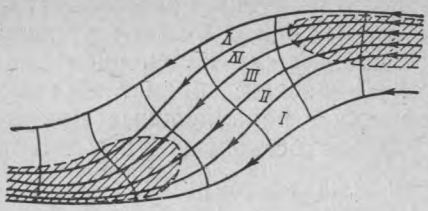


Рис. 46. План течения (римскими цифрами обозначены номера струй)

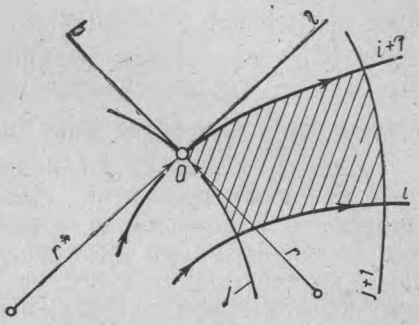


Рис. 47. Клетка плана течения: i — номер линии тока; j — номер криволинейного поперечника

Система дифференциальных уравнений планового движения и неразрывности была впервые составлена выдающимся советским гидравликом Н. М. Бернадским в 1931 г. Она имеет следующий вид:

$$I_l = \frac{v^2}{C^2 h} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial l} ; \qquad (77)$$

$$I_b = \frac{v^2}{gr} ; \qquad (78)$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial l} + \frac{vh}{r^*} = 0. \qquad (79)$$

Здесь v — средняя скорость течения на вертикали; r — радиус кривизны плановой линии тока; r^* — радиус кривизны поперечника, I_l — продольный, а I_b — поперечный уклоны свободной поверхности. Уравнение (77), которое Бернадский называл условием продольного равновесия, по своему виду и физическому смыслу совпадает с уравнением установившегося неравномерного движения (5). Уравнение (78), называемое условием поперечного равновесия, уже встречалось при рассмотрении движения воды на изгибе русла. Оно выражает приближенное равенство поперечного градиента давления центробежной силе инерции. Силы трения в нем отброшены. Так как

произведение vh представляет собой элементарный расход воды на вертикали, то смысл уравнения неразрывности (79) сводится к связи между изменением элементарного расхода вдоль линии тока и расхождением линий тока. Если линии тока представляют собой параллельные прямые, радиус кривизны поперечника r^* равен бесконечности и элементарный расход остается на линии тока постоянным: $\frac{\partial(vh)}{\partial l}=0$ (движение равномерное). Если $+\infty>r^*>0$, криволинейный поперечник обращен своей выпуклостью вниз по течению. Это значит, что плановые линии тока расходятся, плановая струя расширяется и элементарный расход вниз по течению уменьшается: $\frac{\partial(vh)}{\partial l}<0$. Если $-\infty<r^*<0$, криволинейный поперечник обращен выпуклостью против течения. Это значит, что линии тока сходятся, плановая струя сужается и элементарный расход вниз по течению нарастает: $\frac{\partial(vh)}{\partial l}>0$.

Решение уравнений Бернадского можно вести только численно, в конечных разностях. Решение состоит в последовательном построении клеток плана течения начиная с некоторой начальной клетки, размеры которой — продольный Δl и поперечный Δb — назначаются произвольно. Размеры остальных клеток устанавливаются путем подбора, и расчеты оказываются чрезвычайно трудоемкими. В настоящее время предпринимаются попытки перевода решения на машинный счет, но пока что построить соответствующий алгоритм не удалось[1]. Ввиду сказанного метод Бернадского в его полном виде в практике путейских расчетов не применяется. Расчеты ведутся с помощью упрощенного варианта этого метода, известного под названием метода плоских сечений.

Упрощения состоят в пренебрежении силами инерции и замене криволинейных поперечников прямыми. Прямолинейные поперечники не строят, а назначают, и это решающим образом облегчает выполнение расчетов. Метод плоских сечений был предложен М. А. Великановым. Применимость метода ограничивается участками, где соблюдены условия плавной изменяемости движения — малая расходимость и малая кривизна линий тока. На участках со сложным рельефом дна (например на перекатах с затонскими частями) имеются поперечные перекосы свободной поверхности, которые не связаны с действием центробежных сил. На таких участках применяется разновидность метода плоских сечений, называемая методом фрагментов (разработан К. В. Гришаниным).

Метод плоских сечений. Для решения задачи о плановом движении потока по методу плоских сечений достаточно уравнения движения в проекциях на продольную ось l и уравнения не-

[1] При машинном счете оказывается целесообразным перейти от натуральных координат к декартовым, или на крутых изгибах русла — к полярным.

разрывности. Отбросив в уравнении (77) инерционный член, выразим коэффициент Шези по формуле Маннинга и затем умножим числитель и знаменатель члена, выражающего силу трения, на h^2. Обозначая элементарный расход $vh=q$, получим:

$$I_l = \frac{n^2 q^2}{h^{10/3}}$$

или, решая это равенство относительно q и опуская подстрочный индекс у уклона,

$$q = \frac{\sqrt{I}}{n} h^{5/3}. \tag{80}$$

Такой вид получает уравнение движения. Уравнение неразрывности записывается в интегральной форме:

$$Q(b_i) = k_i Q = \int_0^{b_i} q db. \tag{81}$$

Здесь $Q(b_i)$ — расход воды, проходящий в полосе между урезом, принятым за начало отсчета поперечных расстояний и i-й линией тока; k_i — отношение расхода $Q(b_i)$ к полному расходу реки.

Чтобы сделать выбор линий тока определенным, вводят условие, чтобы между любой парой смежных линий тока проходил один и тот же расход воды. Это значит, что речной поток делится на целое число N равнорасходных плановых струй. Отношение k_i при этом записывается в виде $k_i = \frac{i}{N}$.

Подставив величину элементарного расхода по уравнению (80) в уравнение неразрывности (81), будем иметь:

$$Q(b_i) = \frac{i}{N} Q = \int_0^{b_i} \frac{\sqrt{I}}{n} h^{5/3} db. \tag{82}$$

На участках с плавно изменяющимся движением допустимо считать, что продольный уклон не изменяется поперек русла. Такое же допущение можно принять и в отношении коэффициента шероховатости:

$$\frac{\partial I}{\partial b} \approx 0, \quad \frac{\partial n}{\partial b} \approx 0. \tag{83}$$

Это позволяет вынести множитель $\frac{\sqrt{I}}{n}$ из-под знака интеграла в уравнении (82):

$$Q(b_i) = \frac{i}{N} Q = \frac{\sqrt{I}}{n} \int_0^{b_i} h^{5/3} db. \tag{84}$$

Таким образом, в методе плоских сечений распределение расхода по ширине русла предполагается зависящим только от распределения глубин.

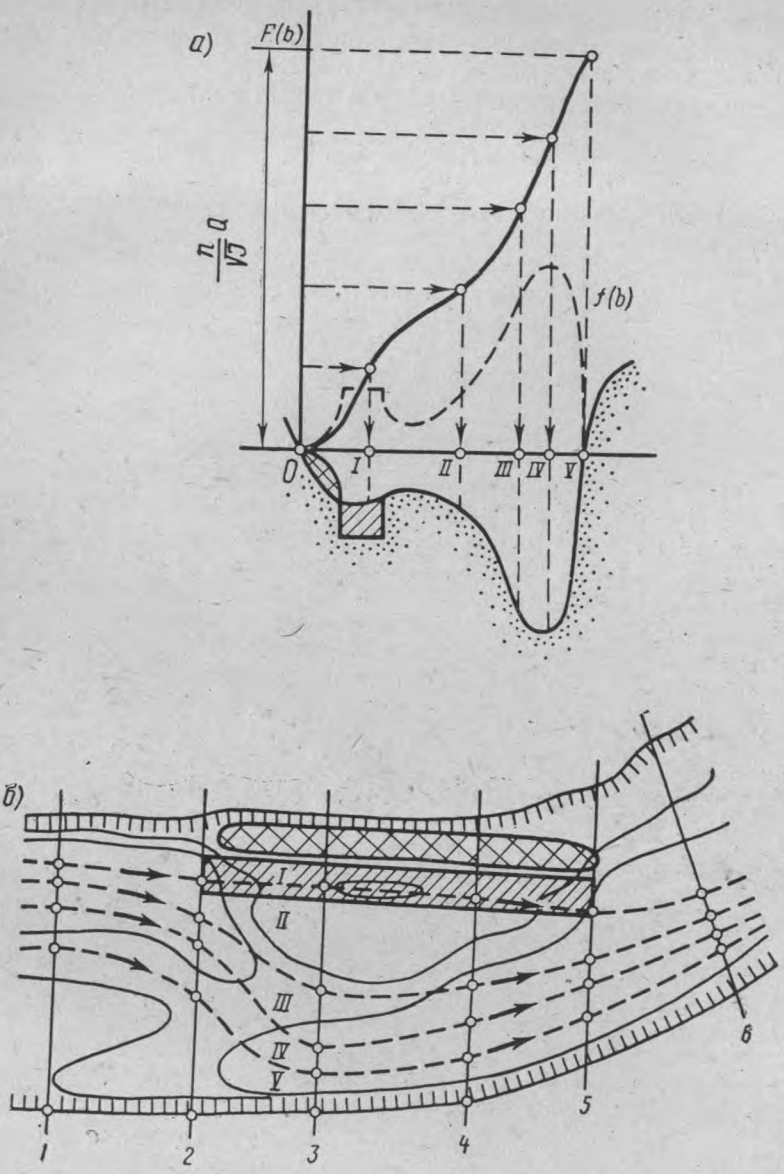


Рис. 48. Построение плана течения по методу плоских сечений:
а — расчет распределения расхода по ширине сечения; *б* — построение границ равнорасходных струй

Уравнение (84) является расчетным. Неизвестной в нем служит координата b_i. Значения координаты b_i, определяющие границы равнорасходных струй, легко найти в каждом поперечном сечении следующим графическим способом (рис. 48). Построив поперечный профиль русла и отвечающий ему график подынтегральной функции $h^{5/3}=f(b)$, производят графическое интегрирование и строят на том же чертеже интегральную кривую

$$\int_0^b h^{5/3}db=F(b).$$

Конечная ордината интегральной кривой равна $\frac{n}{\sqrt{I}}Q$, т. е. пропорциональна полному расходу. Разделив ее на N равных частей, сносят точки деления на интегральную кривую, а затем на ось b, как показано на рис. 48, *а*. Когда такие построения сделаны для всех расчетных сечений, точки, определяющие границы струй, переносят на план переката и соединяют плавными линиями (рис. 48, *б*). Число N плановых струй берется обычно 3—7. Расчетные поперечники должны назначаться через расстояния, в 3—5 раз бо́льшие средней ширины струй, т. е. равные или меньшие ширины русла. В число расчетных сечений обязательно должны входить сечения с экстремальными значениями площади живого сечения и ширины русла. Намеченная прорезь должна пересекаться не менее чем четырьмя-пятью поперечниками, крайние из которых должны проходить через начало и конец прорези. Если расчет производится для больших наполнений русла, поперечники назначаются по нормалям к оси симметрии русла. Если расчет производится для малых наполнений, когда на направлении течения сильно сказывается рельеф дна, поперечники следует ориентировать, сообразуясь с этим рельефом, — так, чтобы они были нормальны к предполагаемому направлению течения.

Метод фрагментов. На участках, где условия плавно изменяющегося движения не соблюдены, уклон свободной поверхности может изменяться по ширине русла. Из затруднения во многих случаях можно выйти, разбив поток в плане на несколько фрагментов, в пределах каждого из которых поперечным изменением уклона допустимо пренебрегать. Тогда в пределах каждого фрагмента можно применять метод плоских сечений, но предварительно необходимо распределить расход между фрагментами. Простейший пример использования этой идеи дает построение плана течений на разветвленном участке русла. Пусть река де-

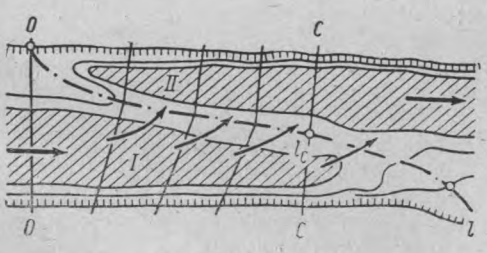


Рис. 49. Фрагменты плана течения на перекате с затонской частью

лится на два рукава. Провести сквозные поперечники через оба рукава и распределять расход в таких составных сечениях в соответствии с одним только изменением глубин было бы неправильно, так как уклоны свободной поверхности в разных рукавах могут сильно различаться. Поэтому следует сначала рассчитать распределение расхода между рукавами, а затем строить планы течений отдельно для каждого рукава.

Метод фрагментов позволяет успешно решить задачу о плане течений для перекатов с затонской частью, где гипотеза однозначного соответствия между глубинами и элементарными расходами при низких уровнях не удовлетворяется. Когда наполнения русла малы, уклоны свободной поверхности в затонской части меньше уклонов в верхней плесовой лощине, и распределяя расходы пропорционально значениям $h^{5/3}$, можно сильно завысить расход, пропускаемый затонской частью.

Деление на фрагменты непосредственно вытекает из общей картины течения: к одному фрагменту относятся верхняя плесовая лощина и напорный скат переката, к другому — затонская часть вместе с тыловым скатом. Граница между фрагментами проходит по гребню перекатного вала (рис. 49). Перелив воды через косой перекатный вал приводит к тому, что расход воды в верхней плесовой лощине вниз по течению уменьшается, а в затонской части нарастает. Изменение расходов воды по длине фрагментов существенно осложняет задачу распределения расхода между фрагментами. Отсчитывая продольные расстояния по криволинейной границе между фрагментами, можем написать следующие условия неразрывности:

$$-\frac{dQ_{\text{I}}}{dl} = \frac{dQ_{\text{II}}}{dl} = q_{\text{г}}; \tag{85}$$

$$Q_{\text{I}} + Q_{\text{II}} = Q. \tag{86}$$

Здесь индексами I и II отмечены, соответственно, расходы воды в верхней плесовой лощине и в затонской части, а $q_{\text{г}} = q_{\text{г}}(l)$ есть удельный расход на гребне перекатного вала. Задача о распределении расхода между фрагментами будет решена, если мы будем знать одну из функций $Q_{\text{I}}(l)$ или $Q_{\text{II}}(l)$, так как другая функция найдется после этого из уравнения (86). Интегрируя второе из равенств (85), имеем:

$$Q_{\text{II}}(l) = \int_0^l q_{\text{г}} dl. \tag{87}$$

Вал переката работает при низких уровнях как косой затопленный водослив, и, принимая приближенно, что разность отметок свободной поверхности в верхней плесовой лощине и в затонской части сосредоточена над гребнем этого водослива, можем написать следующее выражение для удельного расхода на гребне:

$$q_{\text{г}} = \varphi h_{\text{г}} \sqrt{2g(z_{\text{I}} - z^{\text{II}})}, \tag{88}$$

где φ — коэффициент скорости и $h_г = h_г(l)$ — глубина на гребне. За исключением прибрежных частей перекатного вала, перепад уровней на его гребне изменяется мало. В соответствии с соотношением (88) это значит, что удельный расход на гребне можно считать пропорциональным глубине $h_г$. Тогда вместо уравнения (87) будем иметь следующее условие пропорциональности:

$$Q_{II}(l) \sim \int_0^l h_г dl = \omega_г(l), \qquad (89)$$

где функция $\omega_г(l)$ выражает нарастание площади живого сечения вдоль гребня переката.

Вблизи корыта перекатного вала различие между уклонами свободной поверхности в верхней плесовой лощине и в затонской части сглаживается. Поэтому в проведенном здесь поперечном сечении (сечение $C—C$ см. рис. 49) расход можно распределить от одного берега до другого пропорционально значениям $h^{5/3}$. Это значит, что мы легко можем установить здесь долю расхода, пропускаемую затонской частью, $Q_{II}(l_c) = Q_{IIc}$. На основании соотношения (89) получаем следующую расчетную формулу изменения расхода воды вдоль затонской части переката:

$$Q_{II}(l) = \frac{\omega_г(l)}{\omega_г(l_c)} Q_{IIc}, \qquad (90)$$

где $\omega_г(l_c)$ — часть живого сечения на гребне переката, ограниченная координатами $l=0$ и $l=l_c$ (рис. 50).

Последовательность расчетов при построении плана течений на перекате с затонской частью следующая.

1. Делается разбивка расчетных (ломаных) поперечников и проводится линия $0l$ гребня переката (см. рис. 49). В отношении разбивки поперечников сохраняют силу указания, сделанные применительно к методу плоских сечений.

2. Строится сечение русла по линии гребня от точки $l=0$ до точки $l=l_c$, определяются для ряда значений l площади $\omega_г(l)$ и строится безразмерный график нарастания этих площадей (см. рис. 50):

$$\frac{\omega_г(l)}{\omega_г(l_c)} = f(l).$$

3. Вычерчивается конечное поперечное сечение $c—c$ и строится для него интегральная кривая

$$\int_0^b h^{5/3} db = F(b).$$

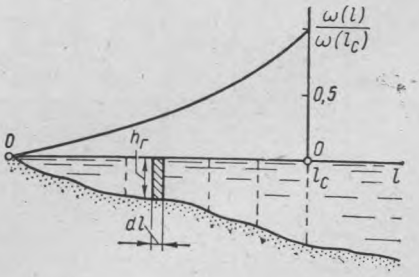


Рис. 50. Профиль живого сечения на гребне переката с затонской частью и безразмерный график нарастания площади сечения вдоль гребня

4. С помощью интегральной кривой по измеренному на плане переката расстоянию $b_{II\,c}$ от уреза затонской части до гребня переката устанавливается расход воды $Q_{II\,c}$ в конечном сечении затонской части.

5. По формуле (90) определяются значения расхода Q_{II} во всех расчетных сечениях затонской части и затем по формуле (86) значения Q_I в расчетных сечениях верхней плесовой лощины.

6. Выбирается число N плановых струй и находится расход одной струи $\frac{Q}{N}$.

7. Вычерчиваются все расчетные поперечники и строятся для двух фрагментов отдельные интегральные кривые $F(b)$. С помощью интегральных кривых по отношениям $\frac{Q}{NQ_{II}}$ и $\frac{Q}{NQ_I}$ находятся границы плановых струй в расчетных сечениях. Полученные точки переносятся на план переката и соединяются плавными линиями.

При большом объеме расчетов целесообразно пользоваться вычислительными машинами. В. М. Селезнев разработал алгоритмы и программы счета на машинах «Минск-22» и «Днепр-21» для обоих применяющихся в проектировании прорезей методов построения планов течений — метода плоских сечений и метода фрагментов.

§ 31. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ КАПИТАЛЬНОЙ ПРОРЕЗИ

Капитальная прорезь обычно оказывается расположенной в границах одной-двух плановых струй. Об устойчивости прорези можно судить, рассчитав начальные деформации дна на площади этих струй. Предварительное качественное заключение об устойчивости прорези можно составить, и не прибегая к расчету деформаций, а основываясь только на сведениях о распределении скоростей течения по длинам струй. Для этой цели расход струи делят на площади ее поперечных сечений (эти площади легко подсчитываются на поперечных сечениях русла с нанесенными на них границами струй). В тех же сечениях вычисляются значения неразмывающей скорости. По результатам расчетов строят совмещенные графики изменения скоростей по длине струи $v_{ср} = v_р\,(l)$ и $v_{нр} = v_{нр}(l)$ (рис. 51, *а*). Если значения скоростей струи всюду больше значений неразмывающей скорости — $v_{ср} > v_{нр}$, это

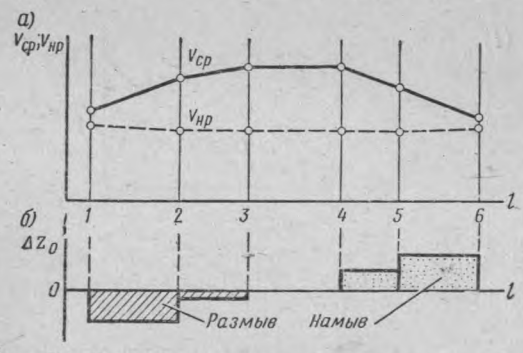


Рис. 51. К расчету начальных деформаций дна в плановой струе:
а — график изменения скоростей по длине струи; *б* — график деформаций

значит, что по всей длине струи происходит перемещение наносов. Тогда на участках, где скорость течения нарастает ($\frac{\partial v_{ср}}{\partial l}>0$), должен происходить размыв дна, а на участках, вдоль которых скорость падает ($\frac{\partial v_{ср}}{\partial l}<0$), должен идти намыв. На участках, где скорость не изменяется, дно должно оставаться стабильным. Интенсивность деформаций будет тем больше, чем больше превышение скорости течения над неразмывающей и чем больше абсолютные значения производной $\frac{\partial v_c}{\partial l}$. Если на отдельных участках струи, или по всей ее длине, скорость течения меньше неразмывающей — $v_{ср}<v_{нр}$, размыв дна невозможен, однако здесь могут откладываться наносы, поступающие с вышележащего участка реки во взвешенном состоянии. Поэтому, получив в зоне расположения прорези скорости меньше неразмывающей, следует рассматривать этот результат как свидетельство неустойчивости прорези. Правильно запроектированная прорезь должна «привлекать» воду.

Расчет деформаций дна производится на основе баланса наносов, т. е. путем применения уравнения деформации (54). Записанное в конечных разностях для участка струи длиной Δl и интервала времени Δt, это уравнение имеет вид

$$\Delta z_{0\,ср}=\frac{Q_{sв}-Q_{sн}}{(1-\varepsilon)\Delta b_{ср}\Delta l}\Delta t. \qquad (91)$$

В числителе правой части стоит разность расходов наносов на верхней и нижней границах участка. Произведение средней на участке ширины струи $\Delta b_{ср}$ на длину Δl дает площадь участка, и таким образом величина $\Delta z_{0\,ср}$ есть среднее приращение высоты дна в пределах участка за время Δt. Расходы наносов предполагаются выраженными в плотном теле. Продолжительность интервала времени Δt берется обычно от 5 до 10 сут. Так как расчет делается при уровне воды, равном рабочему уровню дноуглубления, а обычное время разработки капитальных прорезей — межень, то значения расхода Q_s определяются по формулам расхода влекомых наносов. Верхняя граница применимости этих формул определяется условием, чтобы скорости в струе превосходили неразмывающую не более чем в 2—2,5 раза (при бо́льших скоростях начинается взвешивание наносов). Ввиду малой точности формул расхода наносов, получаемые в результате расчетов приращения высоты дна $\Delta z_{0\,ср}$ носят ориентировочный характер, однако сравнение значений $\Delta z_{0\,ср}$ на двух участках струи дает вполне достоверное представление о соотношении интенсивностей деформаций на этих участках. То же следует сказать и о деформациях, полученных для двух вариантов прорези. Если абсолютные значения деформаций могут быть неточными, то отношения этих значений определяются с достаточной надежностью и, следовательно, мы можем иметь правильную

количественную оценку того, какова скорость размыва или намыва одной прорези по отношению к скорости размыва или намыва другой.

В целях наглядности результаты расчета деформаций показывают на графиках. Графики деформаций удобно помещать на одном рисунке с графиками изменения скоростей (рис. 51, *б*).

§ 32. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВЫХ ХОДОВ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ

На водохранилищах прокладывают следующие судовые ходы: а) транзитный; б) дополнительные; в) на подходах к портам, убежищам и рейдам; г) на притоках — в зоне их подпора.

Транзитный судовой ход, по которому осуществляется основное судоходство вдоль водохранилища (сверху вниз и снизу вверх), должен обеспечивать безопасное плавание расчетных судов и плотов (составов).

Наименьшая гарантированная глубина на транзитном судовом ходу отсчитывается от проектного уровня, который может иметь отметку наинизшего навигационного уровня или выше отметки последнего. Наинизший навигационный уровень на водохранилище наблюдается в конце навигации, осенью, в результате навигационной сработки объема водохранилища, или в начале навигации, весной, когда объем зимней сработки водохранилища еще не заполнен наступившим паводком.

Положение или отметка проектного уровня водохранилища определяется технико-экономическим расчетом, при этом учитываются по возможности интересы всех водопользователей. На свободных реках проектный уровень путевых работ имеет, как уже упоминалось, в зависимости от группы пути среднюю многолетнюю обеспеченность от 99 до 80%. На водных путях, где свободные участки пути чередуются с водохранилищами, целесообразно в целях судоходства устанавливать одинаковую обеспеченность проектных уровней на водохранилищах и на свободных участках, от которых и отсчитывать наименьшую гарантированную глубину.

Дополнительные судовые ходы на водохранилищах прокладывают: а) для сокращения пути при высоких уровнях или при отсутствии волнения и б) для плавания при ветрах, создающих сильное волнение на транзитном судовом ходу.

Судовые ходы на подходах к портам, пристаням, убежищам и рейдам обеспечивают безопасный подход к ним с транзитного судового хода расчетных судов и плотов (составов). Судовые ходы на притоках в зоне их подпора от водохранилища также обеспечивают безопасное плавание расчетных судов и плотов (составов).

Трассирование судовых ходов на водохранилищах выполняют исходя из условий обеспечения наиболее короткого пути и эко-

номической целесообразности затрат, связанных с их спрямлением. При этом учитывают ветроволновой режим водохранилищ и прокладывают транзитный судовой ход так, чтобы он при волнении находился в благоприятных условиях.

Для обеспечения безопасного плавания по водохранилищу при ветрах разных направлений проектируют, при возможности, судовые ходы вдоль обоих его берегов. При трассировании судовых ходов учитывают также возможность удобного расположения знаков судоходной обстановки.

Для транзитного судового хода в качестве расчетного принимают судно, имеющее наибольшую осадку из числа судов, предназначенных для плавания по водохранилищу. Дополнительные судовые ходы, ходы на подходах к пристаням и ходы на притоках можно прокладывать для судов с меньшей осадкой, чем на транзитном ходу, или для плотов.

Наименьшая глубина, необходимая для безопасного плавания по водохранилищу расчетных судов или плотов (составов) при проектном уровне, или проектная навигационная глубина (гарантированная) $T_г$ судового хода, определяется по формуле

$$T_г = T_с + \dot{z}_1 + \dot{z}_2 + \dot{z}_3 + \dot{z}_4, \qquad (92)$$

где $T_с$ — осадка расчетного судна; z_1 — навигационный запас под днищем судна; устанавливается от 0,15 до 0,35 м в зависимости от расчетной осадки судов и характера грунтов; z_2, z_3 и z_4 — запас соответственно на волнение, ветровой сгон воды; увеличение осадки судна при движении (на дифферент).

Запас на волнение в водохранилище определяется по соотношению $z_2 = 0{,}3h_w - z_1$, где h_w — наибольшая высота волны с 1%-ной обеспеченностью, на данном участке судового хода при наибольшем разгоне и скорости ветра с многолетней навигационной 1%-ной обеспеченностью. При отрицательном значении z_2 запас на волнение не учитывается.

Значение высоты волны h_w можно вычислить по способу, предложенному А. Н. Браславским (см. § 20), или по другим зависимостям.

Запас на ветровой сгон воды в водохранилище определяется по соотношению $z_3 = h_с - z_1$. Здесь $h_с$ — наибольшая на участке судового хода высота сгона воды при скорости ветра, принятой для определения z_2; наибольшая высота сгона устанавливается по материалам натурных наблюдений. При получении отрицательного значения z_3 запас на сгон не учитывается.

При определении суммарного запаса глубины на сгон и на волнение учитывается наиболее неблагоприятное сочетание величин сгона и волнения при разных направлениях ветра.

Запас на дифферент рассчитывается по зависимости $z_4 = kv_с$, где $v_с$ — скорость движения судна, определяемая тяговыми расчетами; k — коэффициент, зависящий от длины судна, величина его колеблется от 0,017 при $L_с < 85$ м и до 0,033 при $L_с \geqslant 85$ м.

Ширина B_c судового хода на водохранилище определяется по формуле

$$B_c = B_1 + B_2 + 2B_3 + B_4, \tag{93}$$

где B_1 и B_2 — ширина полосы судового хода, занимаемая расчетным составом (плотом) соответственно низового и верхового направлений; B_3 и B_4 — запас ширины судового хода соответственно между судном и кромкой судового хода и между встречными судами.

Ширина B_1 и B_2 полосы судового хода определяется по формулам:

$$B_1 = L_1 \sin \alpha_1, \tag{94}$$

$$B_2 = L_2 \sin \alpha_2. \tag{95}$$

Здесь L_1 и L_2 — длина наибольшего расчетного состава соответственно низового и верхового направлений; α_1 и α_2 — угол дрейфа состава соответственно низового и верхового направлений.

Запас B_3 ширины судового хода между судном и кромкой судового хода колеблется от 20 до 10 м, и запас B_4 между встречными судами колеблется от 50 до 10 м (в зависимости от назначения судового хода).

Угол α дрейфа состава от дрейфового течения определяется по формуле

$$\alpha = k_6 \operatorname{arc\,sin} \frac{v_т}{v_c}, \tag{96}$$

где k_6 — коэффициент, учитывающий воздействие удара волн на боковую поверхность состава ($k_6 = 1{,}15 \div 1{,}2$); $v_т$ — скорость дрейфового течения; определяется по соотношению $v_т = k_т W$; (здесь $k_т$ — опытный коэффициент, равный 0,025 для водохранилищ; W — скорость ветра); v_c — скорость движения состава.

Ширина судового хода на различных участках водохранилища может быть неодинакова в связи с разными условиями движения состава судов и плотов.

Криволинейные участки судовых ходов очерчивают радиусом R_c, равным не менее чем пяти длинам L_c расчетного судна ($R_c \geqslant 5L_c$). В зоне выклинивания подпора, где при нормальном подпорном уровне меженные бровки не затопляются, на отдельных участках допускается уменьшение радиусов кривизны до трех длин расчетного судна ($R_c \geqslant 3L_c$).

Для улучшения условий движения судов и плотов на водохранилищах предусматривается очистка от деревьев, кустарника и прочих препятствий не только судового хода по всей его ширине, но и дополнительной полосы шириной от 100 до 50 м (в зависимости от назначения судового хода) с каждой стороны судового хода.

Одновременно с проектированием судовых ходов на водохранилищах выбирают места расположения убежищ для укрытия су-

довых составов и плотов во время шторма. Расстояние между убежищами не должно превышать двойной длины пробега расчетного состава за время, истекшее после получения ими штормового предупреждения. При таком расстоянии между убежищами судовой или плотовой состав, получив штормовое предупреждение, успеет до наступления шторма зайти в убежище, расположенное впереди, или вернуться назад к убежищу, которое он прошел.

Расчетное расстояние $L_у$ между убежищами определяют по формуле

$$L_у = 2v_с t, \tag{97}$$

где $v_с$ — скорость движения расчетного состава; t — время от момента предупреждения до момента наступления шторма, принимаемое равным 6 ч.

Убежища располагают по возможности в естественных укрытиях — заливах, затопленных долинах небольших речек, впадающих в водохранилище, затопленных устьевых участках оврагов и других защищенных от волнения акваториях.

При отсутствии естественных укрытий для создания защищенных от волнения акваторий убежищ приходится строить волнозащитные сооружения. В некоторых случаях убежища размещают на акваториях, защищенных от волнения не при всех направлениях ветра, а только при определенных, господствующих направлениях.

Для обеспечения большей безопасности плавания по водохранилищу рекомендуется создавать убежища на всех естественно укрытых акваториях (независимо от величины расчетного расстояния между убежищами), если это не требует значительных затрат. Кроме того, в дополнение к убежищам или для частичной их замены вблизи судового хода под защитой берега, островов или отмелей создают рейды укрытия составов от ветров разных направлений.

Глава V

ВЫПРАВЛЕНИЕ РЕК ДЛЯ СУДОХОДСТВА И ВЫПРАВИТЕЛЬНАЯ ТРАССА

§ 33. ВЫПРАВЛЕНИЕ КАК МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ

Под выправлением рек для судоходства понимается совокупность работ, которые, оставляя речной поток свободным и используя его формирующую деятельность, приводят речное русло в состояние, удовлетворяющее требованиям судоходства. Под формирующей деятельностью речного потока понимается его работа по размыву своего русла, транспортированию наносов и их откладыванию.

При выправлении наиболее затруднительных для судоходства участков речного русла в условиях равнинных рек выполняются следующие работы: 1) ограничение живого сечения русла возведением в нем поперечных и продольных сооружений (полузапруд и струенаправляющих дамб); 2) укрепление и наращивание участков берега и русла береговыми покрытиями, шпорами и рассадками; 3) перекрытие побочных рукавов русла и поймы поперечными сооружениями (запрудами); 4) сопряжение потока реки с потоками рукавов и притоков продольными сооружениями (стрелками) и поперечными (полузапрудами); 5) уменьшение кривизны и длины меженного русла спрямлением пойменных извилин; 6) предварительная разработка в выправляемом русле капитальных прорезей. Под воздействием указанных мероприятий речной поток и формирует в реке с размываемыми грунтами русло, размеры и очертания которого необходимы для судоходных целей.

К выправлению рек относятся также работы по обеспечению водных подходов к населенным пунктам, промышленным предприятиям и затонам, по выправлению порожистых участков и подходов к мостам, по обвалованию пойм и т. д. Эти работы имеют некоторые особенности и могут выполняться как в составе общего комплекса выправительных работ по реке, так и независимо от них.

На наших реках для поддержания и улучшения судоходных условий выправление применяется обычно вместе с дноуглублением и редко, только на малых реках, самостоятельно. В связи с этим под выправлением рек для судоходства будем понимать, в общем случае, комплекс дноуглубительных и выправительных работ: разработку судовых ходов снарядами и их закрепление выправительными сооружениями.

Соотношение между ролью выправления, с одной стороны, и дноуглубления, с другой, в общем их комплексе зависит от раз-

меров реки, ее руслового режима, объема перевозок, наличия тех или иных технических средств и строительных материалов. Исследования показывают, что выправление целесообразно применять на малых реках с меженными расходами менее 100 м³/с, дноуглубление — на больших реках с меженными расходами более 250 м³/с. На средних реках с меженными расходами 100—250 м³/с целесообразность дноуглубления и выправления примерно одинакова.

Выправительные сооружения возводят преимущественно в русле реки (русловые) и редко на ее пойме (пойменные). Различают русловые сооружения низкие и высокие; первые возвышаются над проектным уровнем путевых работ на 1—1,5 м, вторые — на 2—4 м и более. Пойменные сооружения обычно строятся невысокими, но гребни их выше гребней высоких русловых сооружений.

Низкие русловые сооружения воздействуют преимущественно на меженный поток, высокие русловые — на весенний поток до поймы, пойменные — на поток выше поймы, но расположение тех и других сооружений согласовывается с движением потока в половодье. Береговые укрепления должны защищать берег в пределах всей высоты колебаний уровней.

Выправительные сооружения в зависимости от времени их полезной работы делятся на сооружения долговременного и кратковременного действия. Первые рассчитываются на длительный период работы, вторые — на работу в течение одной-двух навигаций. Для коренного улучшения судоходных условий рек применяют сооружения долговременного действия.

По своей конструкции выправительные сооружения могут быть тяжелыми или легкими. Сооружения долговременного действия преимущественно тяжелые, а кратковременного — легкие.

В большинстве случаев с помощью выправительных сооружений изменяется речное русло и течения в нем и неблагоприятные формы русла становятся благоприятными. Назначение выправительных сооружений может заключаться также в обеспечении устойчивости существующих благоприятных форм русла.

С увеличением объема выправительных работ обычно увеличивается прирост транзитных глубин и, кроме того, глубины относительно более равномерно распределяются вдоль судового хода. Однако опыт показывает, что превратить реку с помощью выправительных сооружений в канал с одинаковыми глубинами невозможно, так как, даже при сильном воздействии этих сооружений на речной поток в русле сохраняются как плесы, так и перекаты, правда, с достаточными для судоходства глубинами.

Различают две системы выправления судоходных рек: систему сплошного и систему выборочного выправления русла. При первой системе выправительные сооружения располагают по всей длине реки как на перекатных, так и на плесовых

участках, при второй системе — только на наиболее затруднительных участках реки, преимущественно перекатных.

При сплошном выправлении закрепляется плановое положение русла на всем выправляемом участке, благодаря чему удается обеспечить достаточно устойчивое состояние глубин. Распределение глубин по длине реки при этом становится значительно более равномерным, чем в естественных условиях. Недостаток этой системы выправления — высокая стоимость работ и длительные сроки их выполнения. В связи с высокой стоимостью сплошное выправление целесообразно на реках, имеющих при сравнительно небольшой длине очень большую густоту движения. Кроме того, система сплошного выправления неэффективна на реках с большой амплитудой колебаний уровней. На наших судоходных реках с их большим протяжением и высокими весенними паводками система сплошного выправления не применяется.

При выборочном выправлении формируется и закрепляется русло только на наиболее затруднительных участках и поэтому устойчивость плановых очертаний русла меньше, чем при сплошном выправлении. Однако опыт выборочных выправительных работ на наших судоходных реках показывает, что эта система выправления приводит к значительному улучшению судоходных условий на длительное время, обычно превосходящее сроки амортизации сооружений.

Ярким примером успешного применения системы выборочного выправления могут служить выполненные выправительные работы на р. Белой (приток. р. Камы). Эти работы велись на нижней части р. Белой на протяжении 468 км, где насчитывалось 134 переката, из которых 80 представляли затруднения для судоходства.

В первые годы производства выправительных работ (1932—1939 гг.) после улучшения примерно 20 перекатов гарантированная глубина при постоянном объеме дноуглубительных работ была увеличена до 110 см, примерно в два раза по сравнению с бытовой. В последнее время, преимущественно после 1961 г., в результате производства выправительных работ в комплексе с дноуглубительными примерно на 60 перекатах гарантированная глубина доведена до 200 см и превышает более чем в три раза бытовую. При этом на некоторых перекатах гарантированные глубины обеспечиваются выполненными выправительными работами без эксплуатационных дноуглубительных работ.

§ 34. СХЕМЫ ВЫПРАВЛЕНИЯ (КОРЕННОГО УЛУЧШЕНИЯ) ЗАТРУДНИТЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ

Проектируя выправление или коренное улучшение затруднительного участка реки, необходимо: сначала составить общую схему его улучшения, затем установить габариты выправительной трассы при заданных габаритах судового хода и определить основ-

ные размеры капитальных прорезей и выправительных сооружений.

Одним из основных вопросов общей схемы улучшения затруднительного участка является рациональное расположение капитальных прорезей и выправительных сооружений. Расположение капитальных прорезей уже рассмотрено в гл. IV, и поэтому здесь рассматривается преимущественно расположение выправительных сооружений. При этом необходимо отметить, что при совместном выборе расположения капитальных прорезей и выправительных сооружений расположение прорезей может влиять на расположение сооружений, и наоборот.

В условиях применяющегося у нас выборочного выправления затруднительных участков на реках задача рационального расположения выправительных сооружений, в первую очередь полузапруд, не имеет общего решения. Особенности речных русел и отдельных затруднительных участков (гидрологические и геоморфологические) приводят к большому разнообразию применяющихся схем расположения сооружений. Однако некоторые общие принципы и примеры расстановки сооружений, в дополнение к уже рассмотренному расположению прорезей, могут быть указаны, а на примерах уже улучшенных участков — и показаны.

Для того чтобы правильно расположить выправительные сооружения, надо прежде всего знать особенности их работы и влияние, оказываемое ими на речной поток. Остановимся пока кратко только на работе, выполняемой полузапрудами и продольными дамбами как основными видами сооружений, закрепляющих трассу, прорези и судовой ход.

При меженных уровнях, находясь в незатопленном состоянии, все полузапруды, независимо от их высоты и расположения в плане, работают как водостеснительные сооружения, и их главной функцией является увеличение скорости течения на трассе и судовом ходу.

При высоких весенних уровнях меженные полузапруды не могут оказывать существенного влияния на распределение расхода по ширине русла, но полезно работают как донные струенаправляющие сооружения, отвлекающие придонные струи в межполузапрудные поля, если их оси наклонены в плане против течения. При промежуточной высоте уровней и в частности в период спада паводка меженные полузапруды выполняют обе свои функции, но по мере спада уровней роль их как водостеснительных сооружений становится все более значительной.

Высокие русловые полузапруды при высоких весенних уровнях полезно работают тоже преимущественно как донные струенаправляющие сооружения, но уже при уровнях, близких к высоте поймы, выполняют обе свои функции. Значительная работа их как водостеснительных сооружений наступает при уровнях более высоких, чем такая же работа меженных полузапруд. Высокие русловые продольные дамбы и запруды при более высоких уровнях, чем меженные дамбы и запруды, начинают работать: пер-

вые — как струенаправляющие сооружения, вторые — как перераспределители расхода в пользу судоходного рукава.

Общее требование, которому должна удовлетворять компоновка сооружений и прорезей на затруднительном участке, состоит в том, чтобы добиваться коренного улучшения участка с помощью наиболее эффективного воздействия на руслоформирующие процессы рационально расположенных сооружений и прорезей, требующих наименьших объемов работ и соответственно наименьших приведенных затрат.

Основные задачи работ по выправлению (коренному улучшению) затруднительных участков в слабо криволинейных руслах с побочнями следующие: 1) значительное углубление и расширение судового хода на перекатах, улучшение подходов к ним и ликвидация свальных течений — все это снарядами и с помощью сооружений; 2) закрепление сооружениями благоприятных для судоходства перекатных форм; 3) подведение судового хода к ведущему берегу снарядами и закрепление его сооружениями.

На рис. 52 и 53 приведены схемы коренного улучшения перекатных участков на р. Вычегде путем подведения выправительной трассы и судового хода дноуглублением и выправлением к ведущему правому берегу. При этом выправительные сооружения возведены на первом участке (см. рис. 52) меженного действия, а на втором (см. рис. 53) — весеннего действия.

На первом участке меженное русло по всей длине расположено под коренным берегом, на втором — коренной берег на значительной длине отходит от меженного русла. Длина каждого из этих участков более 10 км.

Оба участка представляли большие затруднения для судоходства из-за наличия на них восьми лимитирующих перекатов,

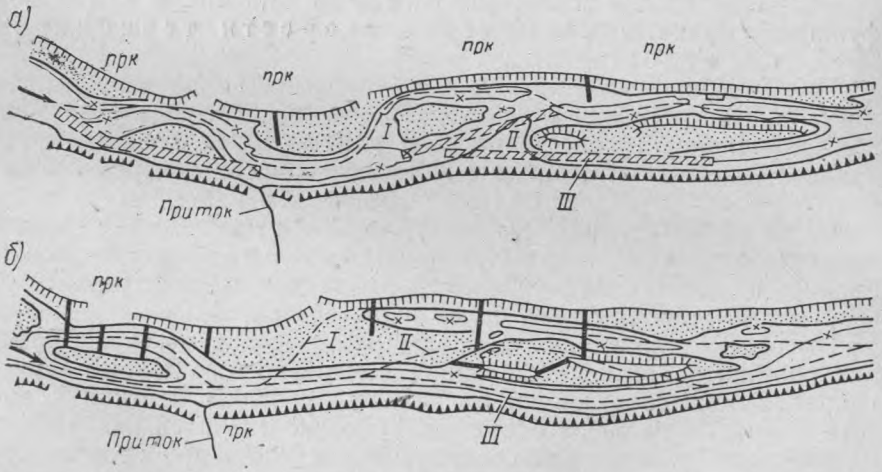


Рис. 52. Схема коренного улучшения дноуглублением и меженными сооружениями участка р. Вычегды:
а — до работ; *б* — после работ; прк — перекат

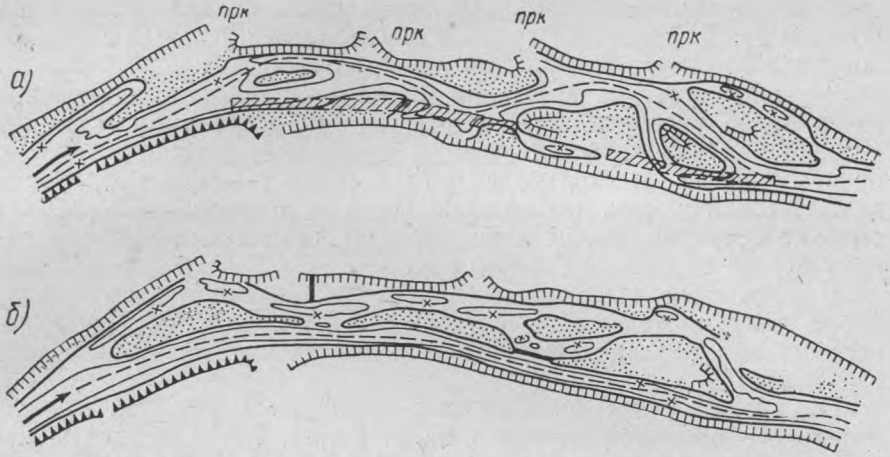


Рис. 53. Схема коренного улучшения дноуглублением и высокими сооружениями участка р. Вычегды:
а — до работ; *б* — после работ; прк — перекат

которые разделялись короткими и неглубокими плесовыми лощинами. Судовой ход, очень извилистый, был проложен по этим перекатам и плесовым лощинам попеременно вдоль коренного и пойменного берегов (показан на рис. 52—53 пунктиром). Для обеспечения нормального движения судов и плотов ежегодно приходилось извлекать на перекатах большие объемы грунта, причем по нескольку раз в навигацию.

В целях коренного улучшения верхней части первого участка (выше притока) была разработана капитальная прорезь, полностью отторгающая правобережный побочень, и в нее переведен судовой ход, а старый судовой ход у левого берега перекрыт сооружениями меженного действия (см. рис. 52).

На нижней части этого участка (ниже притока) работы по его улучшению велись постепенно. Сначала была разработана капитальная прорезь для частичного отторжения большого правобережного побочня по его средней пониженной части и судовой ход переведен из положения *I* в положение *II* (рис. 52, *а*).

Затем, через некоторое время, стало возможным полное отторжение правобережного побочня, так как после улучшения верхней части участка весенний поток стал направляться через этот побочень и высота его заметно уменьшилась. В связи с этим была разработана новая капитальная прорезь для уже полного отторжения этого побочня и судовой ход переведен из положения *II* в положение *III*, т. е. в новую прорезь, а старый судовой ход у левого пойменного берега перекрыт меженными сооружениями.

Второй участок (см. рис. 53) находится за поворотом ведущего коренного берега, где весенний поток отходит от этого берега и занимает неустойчивое положение в зависимости от водности года. Для коренного улучшения этого участка были разработаны

две капитальные прорези, отторгающие два правобережных побочня и в них переведен судовой ход, а также возведены со стороны левого берега сооружения весеннего действия.

В начале участка возведено высокое поперечное сооружение из грунта с укрепленным гребнем, которое перекрывает старый судовой ход под левым берегом и направляет весенний поток к правому берегу. Несколько ниже возведена высокая продольная дамба, соединяющая образовавшиеся при отторжении побочней высокие осередки, чтобы ликвидировать свальные течения к левому берегу на старый судовой ход.

В результате выполненных работ по коренному улучшению обоих затруднительных участков сократилась длина судового хода на них и резко снизились объемы эксплуатационного дноуглубления.

На рис. 54 представлена схема коренного улучшения затруднительного сложного переката на р. Вятке. Такие перекаты нередко встречаются в слабокриволинейных руслах. На этом перекате правый берег — коренной, трудно размываемый; левый — пойменный, поросший кустарником, а побочни — низкие, ниже среднемеженных уровней. Судоходные условия были затруднительными из-за большой кривизны судового хода, недостаточных глубин и наличия свальных течений. Постепенно наметившееся некоторое развитие правобережной протоки, отторгающей средний побочень, происходило очень медленно ввиду наличия в ней гравия. Для

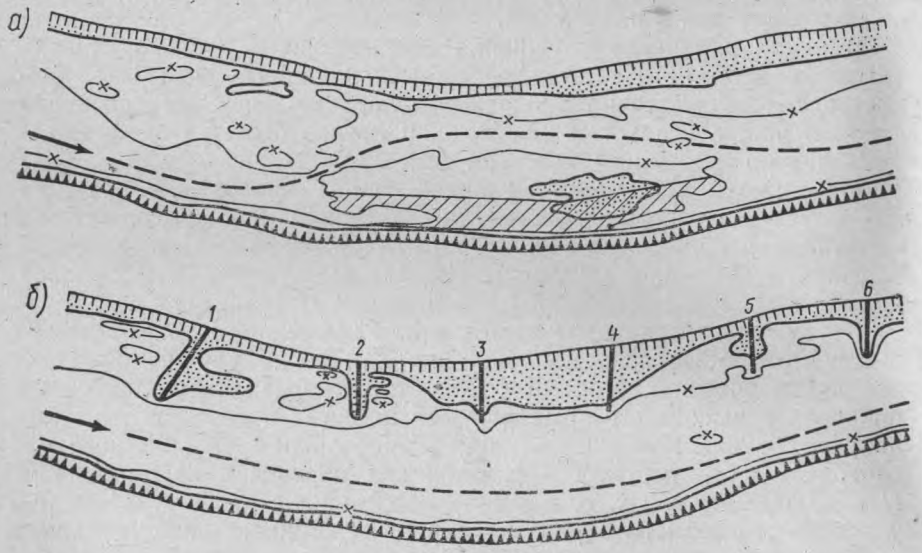


Рис. 54. Схема коренного улучшения сложного переката на р. Вятке:
а — до работ; *б* — после работ

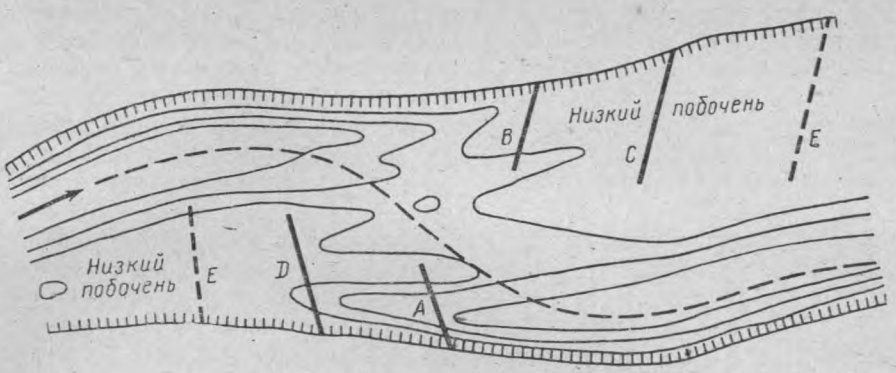


Рис. 55. Полная схема расположения сооружений на перекате с затонской частью р. Белой

поддержания заданных габаритов пути ежегодно проводились дноуглубительные работы в больших объемах.

Коренное улучшение этого сложного переката выполнено разработкой капитальной прорези вдоль правого вогнутого берега и возведением шести (см. рис. 54) меженных полузапруд, повышающих побочни и перекрывающих старый судовой ход у левого выпуклого берега. В результате проведенных работ образовался плавный широкий и глубокий судовой ход без свальных течений, отметки побочней повысились, и дноуглубительные работы были прекращены.

В слабокриволинейных руслах часто встречаются затруднительные перекаты с затонской частью, схемы выправления или коренного улучшения которых были весьма детально разработаны еще в тридцатых годах при составлении проекта выправления р. Белой.

Принятая в этом проекте полная схема расположения сооружений на перекате с затонской частью и низкими побочнями показана на рис. 55. В этой схеме сооружение *A* является основным и предназначается для ликвидации вредного влияния затонской части; сооружение *B* — вспомогательное, его назначение — способствовать продолжению кривизны верхнего ведущего берега; сооружение *C* — тоже вспомогательное и предназначается для облегчения концентрации потока в пределах выправительной трассы и судового хода и наращивания по высоте низкого нижнего побочня; сооружение *D* — также вспомогательное, оно необходимо для закрепления выправительной трассы, наращивания по высоте низкого верхнего побочня и создания препятствия при движении наносов от верхнего побочня к нижнему; наконец, сооружения *E* предусматриваются лишь для повышения отметок побочней и увеличения кривизны противоположных берегов.

В зависимости от местных особенностей переката с затонской частью при расстановке сооружений делались следующие отступ-

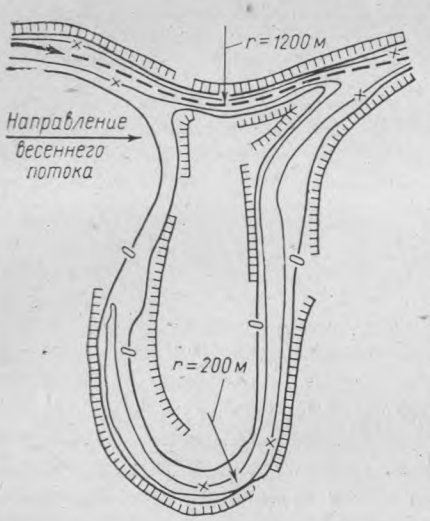


Рис. 56. Спрямление развитой извилины на р. Дону

ления от принятой полной схемы расположения сооружений: 1) в случае, когда верхний побочень сравнительно высокий и закрепления трассы у него поэтому не требуется, а кривизна верхнего ведущего берега достаточна и перемещение наносов с верхнего побочня на нижний невелико, отпадает необходимость в сооружениях *D* и *E* и требуются лишь сооружения *A*, *B* и *C*; 2) при низком и широком верхнем побочне, достаточной кривизне берега против него, малой кривизне нижнего ведущего берега и повышенной средней части нижнего побочня достаточно на последнем поставить только одно сооружение *C* от левого берега ниже по течению сооружения *A* и все сооружения на верхнем побочне; 3) в случае высокого развитого нижнего побочня и низкого верхнего побочня достаточна постановка только сооружений *A*, *D* и *E* на последнем от правого берега; 4) при высоких верхнем и нижнем побочнях достаточно ликвидировать лишь вредное влияние затонской части путем постановки только основного сооружения *A*.

При больших глубинах в затонской части перекрытие ее поперечными сооружениями требует очень больших затрат. В этих случаях прибегают к устройству продольных сооружений на верхней косе, роль которых состоит в том, чтобы при меженных уровнях отгородить затонскую часть от верхней плесовой лощины. Наиболее экономичными в таких случаях являются намывные грунтовые сооружения.

Основные задачи работ по выправлению (коренному улучшению) затруднительных участков в меандрирующих руслах следующие: 1) спрямление развитых пойменных извилин с недостаточными радиусами кривизны судового хода и перекатами, реже — неразвитых извилин с такими же радиусами и перекатами; 2) смягчение крутых поворотов русла; 3) закрепление благоприятных плановых форм русла.

Наиболее ответственным мероприятием является спрямление извилин. На рис. 56 представлена схема спрямления одной из развитых пойменных извилин на р. Дону. Основным затруднением для судоходства здесь являлось прогрессирующее уменьшение радиуса кривизны судового хода в вершине извилины, величина которого составляла 200 м.

При гарантированной величине этого радиуса в 500 м возник-

ла необходимость разработки спрямления, которое и было выполнено с радиусом кривизны в 1200 м. В результате судоходные условия на этом участке улучшились, староречье заполняется наносами и в течение уже двух десятилетий никаких работ на судовом ходу не требовалось.

Единственным видом сооружений, применяемых при спрямлении извилин, являются береговые укрепления. Укрепляют при надобности преимущественно вогнутый берег спрямляющего канала и вогнутые берега на подходах к каналу. Закрепление уже существующих благоприятных русловых форм требует тоже возведения береговых сооружений, но высокая стоимость этих сооружений ограничивает пока их развитие.

Основные задачи работ по выправлению (коренному улучшению) затруднительных разветвленных участков следующие: 1) углубление судоходных рукавов снарядами и перераспределение расходов воды сооружениями в пользу судоходных рукавов — тоже для их углубления и общего развития; 2) отвлечение сооружениями наносов с судового хода в несудоходные рукава и ликвидация сооружениями свальных течений на входах и выходах судоходных рукавов; 3) укрепление побочней для замедления их движения к истокам судоходных рукавов и при надобности размываемых берегов в судоходных рукавах и на подходах к ним; 4) подготовка снарядами и сооружениями развивающихся несудоходных рукавов к переводу в них судовых ходов из ухудшающихся судоходных рукавов; 5) на многорукавных участках сосредоточивание основного расхода воды на судовом ходу путем объединения сооружениями беспорядочных скоплений островов, осередков и побочней в большие пойменные и русловые образования.

В итоге можно коротко сказать, что основная цель работ по коренному улучшению на разветвленных участках — углубление и закрепление судового хода в определенном рукаве. Недостаточные глубины в судоходном рукаве являются прежде всего следствием того, что этот рукав пропускает только часть жидкого расхода реки. Положение бывает особенно тяжелым в тех случаях, когда доля жидкого расхода, пропускаемого судоходным рукавом, бывает меньше доли твердого расхода, проходящего по этому же рукаву. Дополнительные осложнения вносятся тем, что роль отдельных рукавов в пропуске жидкого и твердого расходов меняется с течением времени, т. е. в паводок и в межень. Наконец, периодическое оживление и отмирание рукавов может быть обусловлено поочередным подходом к месту разделения русла побочня то одного, то другого берега.

В тех случаях, когда расходы воды, пропускаемые двумя рукавами, близки друг к другу, встает вопрос о выборе для судоходства одного из них. Выбор судоходного рукава должен основываться на тщательном изучении руслового режима участка разветвления. Особое внимание необходимо при этом уделять выявлению тенденции развития рукавов. В ряде случаев наблюдается такая картина: существующий судоходный рукав пропуска-

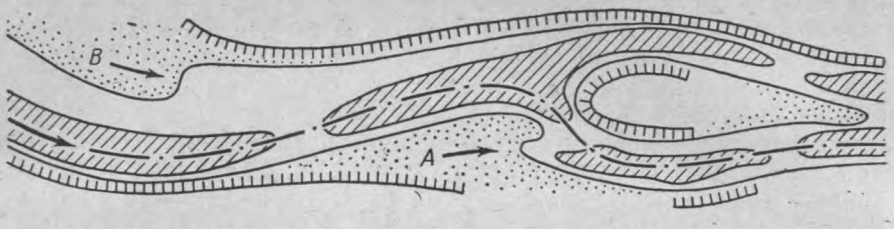


Рис. 57. Ухудшение судоходного рукава при надвижении побочня

ет больше половины меженного расхода воды, однако в течение уже нескольких лет наблюдается ухудшение в нем судоходных условий — падают глубины на перекатах, возрастает извилистость судового хода, растут объемы дноуглубительных работ. С другой стороны, второй рукав, пропускающий меньшие расходы воды, постепенно развивается — становится глубже и шире. Отсюда вытекает, что полезнее перевести судовой ход в развивающийся рукав.

Однако прежде чем принять это решение, необходимо выявить физические причины ухудшения одного рукава и развития другого, чтобы убедиться, что эти причины будут действовать и в ближайшем будущем. Если например ухудшение судоходного рукава обусловлено наползанием побочня на вход в рукав (рис. 57, побочень *А*), следует изучить скорости перемещения побочней на этом участке реки и определить время, которое пройдет до подхода к разветвлению следующего побочня (см. рис. 57, побочень *В*). Мероприятия по переводу судового хода в развивающийся рукав должны окупиться до наступления этого момента, так как подход нового побочня может заставить перевести судовой ход в старое положение.

Закрепление трассы в избранном судоходном рукаве почти всегда требует привлечения в рукав дополнительного расхода воды. Проще всего это можно сделать путем перекрытия несудоходного рукава запрудой, если при этом не будет значительного увеличения и твердого расхода в судоходном рукаве. Увеличение расхода воды в судоходном рукаве имеет своим следствием увеличение транспортирующей способности потока, а значит, и рост глубин. Несудоходный рукав становится благодаря уменьшению расхода воды и скоростей местом аккумуляции наносов.

В тех случаях, когда бóльшая часть твердого расхода идет в несудоходный рукав, можно добиться его отмирания путем установки в рукаве простейших кольматирующих сооружений — ветвистых завес и им подобных легких сооружений. Можно усилить работу второстепенного рукава по отвлечению наносов от основного русла, увеличивая угол, под которым второстепенный рукав отделяется. Для этого в месте отделения рукава строят одну или две полузапруды.

На рис. 58, *а, б* дана схема коренного улучшения двухрукав-

ного участка на р. Дону с примерно одинаковой пропускной способностью рукавов. На этом участке причиной затруднительности для судоходства являлось периодическое перемещение левобережного побочня к входу в судоходный левый рукав и местное расширение русла со свальными течениями на выходе из этого рукава. До выправления ежегодно разрабатывались прорези в судоходном рукаве у приверха и ухвостья острова, а также ниже острова, при этом извлекались значительные объемы грунта. Анализ переформирований русла показал, что здесь происходило постепенное развитие правого несудоходного рукава, но из-за глинистых выступов правого берега выше раздвоения, направляющих поток в левый рукав, и неблагоприятного сопряжения рукавов ниже острова перенос судового хода в правый рукав не являлся целесообразным.

В связи с этим для коренного улучшения судоходных условий были построены у правого берега меженные полузапруды — две выше и три ниже острова. Основной является полузапруда *2* (см. рис. 58, *б*), обеспечивающая увеличение расхода воды в судоходном рукаве, отвлечение наносов в несудоходный рукав и последующую устойчивость судоходного рукава. Полузапруда *1* — вспомогательная, более плавно подводящая транзитный поток к началу раздвоения. Полузапруды ниже острова *3—5* уменьша-

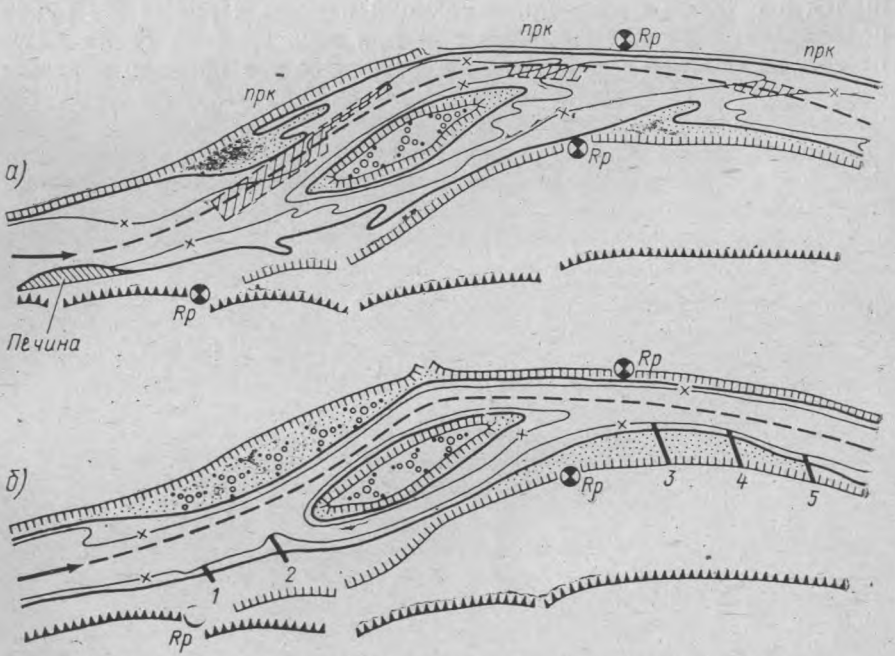


Рис. 58. Схема коренного улучшения двухрукавного участка р. Дона:
а — до работ; *б* — после работ по улучшению; прк — перекат

ют ширину меженного русла до расчетной и способствуют наращиванию высоты правобережного побочня и ликвидации здесь переката.

Планы этого участка, снятые до и после выправления, показывают на хорошую устойчивость судового хода в левом рукаве, при этом даже без производства дноуглубительных работ. Затраты на возведение полузапруд на подходных участках к разветвлению окупились в течение одного года, так как они оказались примерно равными расходам на ежегодные дноуглубительные работы.

На рис. 59, *а, б* приведена схема коренного улучшения разветвленного участка на р. Вычегде с двумя рукавами и протокой по пескам перед приверхом острова. При выправлении этого участка оказалось целесообразным перевести судовой ход из левого судоходного рукава в правый несудоходный, для чего первый перекрыть запрудами, предварительно разработав во втором капитальную прорезь.

Анализ русловых переформирований показал, что здесь расположение судового хода неоднократно менялось по мере надвижения на разветвление побочней правого или левого берега реки. В последнее десятилетие перед выправлением, из-за наступления на приверх острова мощного левобережного побочня, судовой ход в левом рукаве становился извилистым, а сам рукав превращался в боковой отвод, принимающий наносы. Правый же рукав развивался, и расходы воды в нем при всех уровнях стали даже несколько больше, чем в левом рукаве. Все это привело к резкому увеличению (в несколько раз) объема дноуглубительных ра-

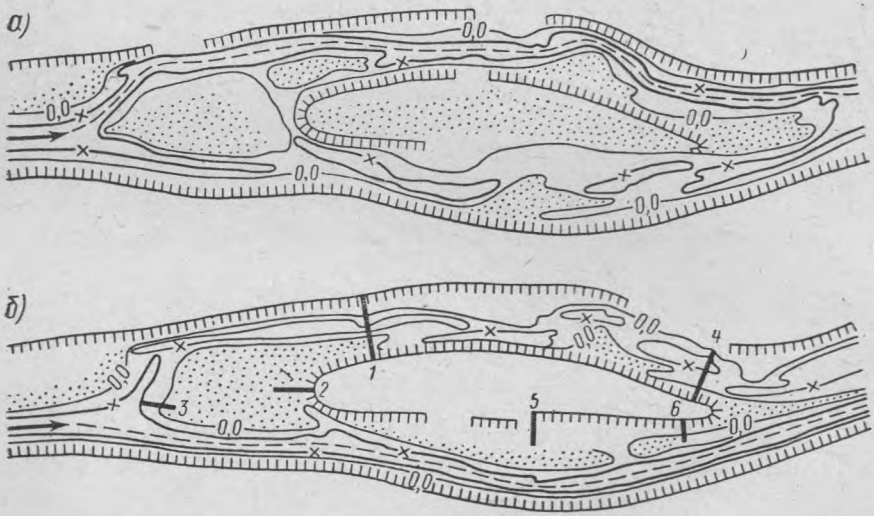


Рис. 59. Схема коренного улучшения разветвленного участка на р. Вычегде:
а — до улучшения; *б* — после улучшения

бот по левому рукаву и заставило осуществить капитальные работы по переводу судового хода в правый рукав и общему улучшению разветвления.

Вдоль всего правого рукава была разработана капитальная прорезь с большим объемом выемки, а в его средней части возведены две меженные полузапруды *5* и *6* (см. рис. 59, *б*), устранявшие вредное влияние боковой емкости. На песках выше острова построено продольное сооружение *3* для отвлечения наносов в левый рукав, протока перед приверхом острова перекрыта продольным сооружением *2*, а левый рукав перекрыт двумя меженными запрудами *1* и *4*.

В результате выполненных работ судоходные условия в разветвлении значительно улучшены: закреплен в правом рукаве глубокий судовой ход с большими радиусами кривизны и на длительное время устранена основная причина затруднительности участка — наступление левобережного побочня на судоходный рукав. Кроме того, уменьшен в несколько раз объем ежегодных дноуглубительных работ [1].

Рассмотренные схемы расположения выправительных сооружений дают лишь общее представление об основных задачах, с которыми приходится встречаться при коренном улучшении судоходных рек, и об основных методах их решения. Отдельные затруднительные участки речных русел представляют бесконечное количество сочетаний русловых форм и процессов и ставят перед проектировщиками самые разнообразные задачи. Однако это разнообразие складывается из сочетания более простых элементов и в нем всегда можно найти следы действия одних и тех же основных сил, следы главных действующих факторов.

Умение находить в частном общее, умение опираться при исследовании конкретных явлений на неизменно действующие основные физические законы составляет важное качество проектировщика. Применение к конкретным явлениям руслового режима законов гидромеханики, гидрологии и геоморфологии, а также учет опыта путевых работ дают основу для расчета мероприятий по коренному улучшению рек.

§ 35. СОСТАВ ПРОЕКТА ВЫПРАВЛЕНИЯ ЗАТРУДНИТЕЛЬНОГО УЧАСТКА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ НЕГО

Проект выправления затруднительного участка состоит из следующих основных частей: 1) анализа руслового режима участка; 2) вариантов схемы его коренного улучшения; 3) расчетной части; 4) выбора конструкции сооружений и определения объемов их и прорезей; 5) подсчета единовременных затрат и ежегодных расходов; 6) технико-экономического сравнения вариантов улучшения и выбора рекомендуемого варианта. Цель расчетной части проекта состоит в назначении размеров выправитель-

[1] Ф. М. Чернышовым в НИИВТе разработаны схемы выправления сложных многорукавных разветвлений.

ной трассы, определении основных размеров прорезей и сооружений и оценке ожидаемого результата работ.

Проект выправления затруднительного участка реки должен опираться на ряд общих сведений о реке и плесе, в пределах которого расположен выправляемый участок, и на материалы русловых исследований этого участка.

К числу материалов и сведений общего характера относятся: 1) лоцманская карта реки; 2) сеть водомерных постов и постоянных гидростворов гидрометслужбы; 3) кривая расходов, отнесенная к ближайшему водомерному посту; 4) характерные уровни и сроки их наступления; 5) характерные расходы воды; 6) твердый сток реки; 7) проектный уровень путевых работ и его обеспеченность; 8) гарантированные габариты судового хода — существующие и в перспективе; 9) наличие технического флота и других средств механизации работ; 10) наличие местных строительных материалов (камня, гравия, леса и т. д.).

По выправляемому затруднительному участку надо иметь следующие материалы или сведения: 1) планы участка за многолетний период для выяснения направленности русловых процессов; 2) продольные профили свободной поверхности на участке[1]; 3) распределение расходов по рукавам; 4) траектории поплавков, векторы поверхностных и донных скоростей на вертикалях, разбитых в характерных местах русла; 5) механический состав донных грунтов; 6) расходы влекомых и взвешенных наносов на нескольких гидростворах; 7) ежедневные глубины и ширины судового хода на участке за 5—10 последних навигаций; 8) объемы производившихся на участке дноуглубительных и выправительных работ; 9) происходившие на участке срывы гарантированных глубин и случаи аварийности; 10) ледовый режим.

Такие гидрологические данные, как профили свободной поверхности, жидкие и твердые расходы и т. д., должны относиться к нескольким (двум-трем) различным фазам колебания уровней — в паводок, на спаде, в межень. Поэтому русловые исследования производятся путем проведения двух-трех циклов измерений.

О некоторых дополнительных материалах и сведениях, которые необходимы только при проектировании запруд, спрямлений или береговых укреплений, будет сказано ниже.

§ 36. ВЫПРАВИТЕЛЬНАЯ ТРАССА И РАСЧЕТ ЕЕ ШИРИНЫ

Проектирование выправления или коренного улучшения затруднительного участка начинается с выбора направления судового хода и выправительной трассы. Этот выбор направления судового хода и трассы выполняется на основании анализа руслового процесса за многолетний период.

[1] Очень важно, чтобы нивелировка делалась по урезам обоих берегов, а на разветвленных участках — также и по островным урезам. Это позволит знать не только продольные, но и поперечные уклоны свободной поверхности.

При выправлении неразветвленных участков рек одна часть живого сечения русла перекрывается сооружениями, а другая его часть, где проложен судовой ход, остается в свободном состоянии. Плановые габариты, ширина и кривизна свободной части русла, называемой, как уже упоминалось, выправительной трассой, больше, чем плановые габариты судового хода, который занимает только часть этой трассы. Выправительная трасса должна иметь такие ширину и кривизну, при которых можно обеспечить на ней устойчивое положение судового хода с заданными для него глубиной, шириной и кривизной.

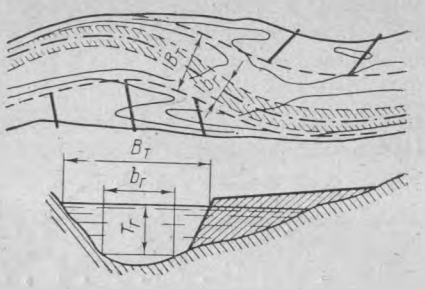


Рис. 60. Выправительная трасса и судовой ход

Ширина выправительной трассы $B_т$ представляет собой ширину выправленного меженного русла при расчетном уровне. На судоходных реках при определении ширины трассы за расчетный уровень принимается проектный уровень путевых работ, от которого обеспечивается на заданной ширине судового хода $b_г$ минимальная гарантированная глубина $T_г$. Гарантированная ширина судового хода всегда меньше ширины выправительной трассы; $b_г < B_т$ (рис. 60).

В условиях выборочного выправления русла ширина выправительной трассы рассчитывается и обеспечивается только на затруднительных участках, где недостаток глубин заставляет ограничить ширину русла с помощью различных выправительных сооружений.

На перекатных участках, как правило, ширина выправительной трассы меньше бытовой ширины русла: $B_т < B_б$.

Нанесенная на план затруднительного участка выправительная трасса определяет расположение, длину и число полузапруд, расположение и длину берегоукрепительных сооружений. Поэтому ширина трассы — одна из основных величин в проекте выправительных работ, и ее определению должно уделяться наиболее серьезное внимание.

В основе методов улучшения судоходных условий свободных рек лежит положение, согласно которому средние уклоны свободной поверхности на выправленных участках достаточно большой длины остаются без изменения по сравнению с бытовыми, хотя внутри таких участков и происходит заметное перераспределение уклонов. Непосредственно после постройки выправительных сооружений в речном русле происходят интенсивные переформирования, распределение уклонов на улучшаемом участке в это время может сильно отличаться от бытового. По мере же разработки новых форм русла различие в распределении уклонов смягчается, хотя полностью не исчезает. После выправления распределение

уклонов в межень становится более равномерным: уклоны на перекатах уменьшаются, а на плесах возрастают.

Из условия равенства расходов, пропускаемых руслом в бытовом и проектном состояниях ($Q_б = Q_п$), для участков, где движение можно считать равномерным, получим с помощью формулы Шези следующее соотношение между гидравлическими элементами потока в бытовых и проектных условиях:

$$\omega_б C_б \sqrt{T_б I_б} = \omega_п C_п \sqrt{T_п I_п}, \tag{98}$$

где $\omega_б$, $\omega_п$, $C_б$, $C_п$, $T_б$, $T_п$, $I_б$, $I_{б_п}$ — соответственно площади живых сечений, коэффициенты Шези, средние глубины и средние уклоны бытового и проектного (выправленного) русла.

Если в уравнении (98) заменить площадь ω живого сечения произведением средней глубины T на ширину поверху B и отнести это уравнение к расчетному уровню, когда проектная ширина русла $B_п$ равна ширине выправительной трассы $B_т$, то получим:

$$B_т = B_б \left(\frac{T_б}{T_п}\right)^{3/2} \frac{C_б}{C_п} \left(\frac{I_б}{I_п}\right)^{1/2}. \tag{99}$$

Полученная формула и представляет собой общее выражение для определения ширины выправительной трассы. Обозначая

$$\left(\frac{T_б}{T_п}\right)^{3/2} \frac{C_б}{C_п} \left(\frac{I_б}{I_п}\right)^{1/2} = \psi, \tag{99а}$$

можем написать сокращенно:

$$B_т = \psi B_б, \tag{100}$$

причем на перекатных участках всегда $\psi < 1$.

Таким образом, задача расчета ширины выправительной трассы сводится к определению численных значений коэффициента ψ. Уравнение (99) содержит четыре неизвестных: $B_т$, $T_п$, $C_п$ и $I_п$, и для его решения необходимо располагать еще тремя уравнениями. Одно из них, которое можно назвать морфометрическим, должно устанавливать связь между искомой средней глубиной выправленного русла $T_п$ и задаваемой минимальной гарантированной глубиной $T_г$ (глубиной на кромках судового хода при проектном уровне), т. е. оно должно иметь вид

$$T_п = f(T_г). \tag{101}$$

Такое уравнение можно составить, задавшись определенной формой живого сечения.

Два других недостающих уравнения должны выражать гидравлические закономерности потока в выправленном русле, в частности учитывать изменение крупности донных отложений, твердого расхода потока и объема путевых работ, влияние на поток ограничивающих трассу сооружений и т. д. В таком полном виде задача расчета ширины трассы остается пока нерешенной. Су-

ществующие способы расчета учитывают лишь часть влияющих факторов и носят поэтому приближенный характер.

Впредь до разработки способа расчета ширины трассы по описанной общей схеме можно рекомендовать для практического применения в основном три разновидности способов приближенного расчета: 1) способы, основанные на суммарной оценке коэффициента ψ; 2) способ, основанный на использовании связи между глубинами и ширинами русла и 3) гидравлико-морфометрический способ.

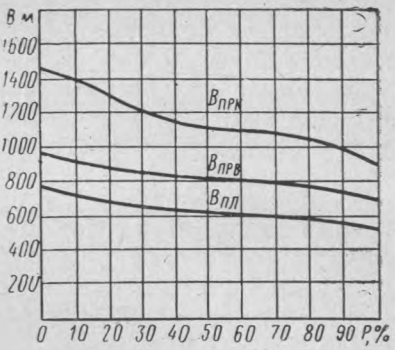


Рис. 61. Кривые обеспеченности ширины перекатов $B_{прк}$; перевалов $B_{прв}$ и плесов $B_{пл}$ на одном из участков р. Волги

Расчет ширины трассы на основе суммарной оценки значений коэффициента ψ ведется по сокращенной формуле (100), т. е. без анализа отдельных влияющих факторов, и расчетные значения коэффициента ψ выбирают на основе эмпирических данных. Недостатком этих способов является то, что величина коэффициента ψ, а с ним и ширина трассы $B_т$ оказываются не связанными в явном виде с заданной судоходной глубиной.

Простой и пригодный для предварительных расчетов способ определения ширины трассы основывается на выполненной на кафедре «Водные пути» ЛИВТа обработке данных лоцманских карт нескольких судоходных рек СССР. Эта обработка состояла в выборе характерных значений ширины меженного русла на плесовых, перевальных и перекатных участках этих рек и в построении соответствующих кривых обеспеченности.

На рис. 61 как пример приводится график обеспеченности ширины перекатов, перевалов и плесовых лощин для одного из участков р. Волги. С построенных кривых обеспеченности были сняты медианные значения ширины плесовых лощин, перевалов и перекатов. Оказалось, что соотношения между этими медианными значениями являются очень устойчивыми — почти одинаковыми для рек различной величины и характера. Отношение медианной ширины русла в плесовых лощинах к медианной ширине русла на перекатах близко в среднем к 0,55 (крайние значения 0,48 и 0,62). Отношение медианной ширины русла на перевалах к медианной ширине русла на перекатах составляет около 0,80 (крайние значения 0,74 и 0,92).

Эти последние соотношения и можно взять в качестве исходных коэффициентов ψ для определения ширины трассы, если не проектируется получение в результате выправительных работ устойчивых глубин, бо́льших, чем глубина естественно-благоприятных перевалов. Учитывая необходимость некоторого запаса в

проектных объемах работ по выправительным сооружениям, целесообразно принять при предварительных расчетах несколько меньшее значение коэффициента ψ, равное 0,75.

Формула для расчета ширины трассы получает при этом следующий вид:

$$B_т = 0{,}75 B_б, \qquad (100а)$$

причем под величиной $B_б$ понимается средняя величина ширины русла на перекатах данного участка реки. Непосредственное пользование этой формулой возможно лишь при первоначальных прикидках, например для ориентировочной оценки числа и суммарной длины полузапруд, необходимых для выправления нескольких групп перекатов.

Дальнейшая конкретизация этого способа расчета приводит к способу аналогий с естественно-благоприятными перевалами данного участка реки. При этом постоянное для всех рек и участков значение $\psi = 0{,}75$ заменяется его значением, определенным на основе данных о ширинах русла на том самом участке реки (плесе), где проектируются выправительные работы. Практически весь расчет сводится к определению средней ширины русла на естественно-благоприятных перевалах, которая и принимается в качестве ширины трассы для данного плеса. С помощью этого способа была определена ширина трассы при больших работах по выправлению р. Белой. Указанный способ аналогий до последних десятилетий являлся основным при расчете ширины трассы в практике проектирования выправительных работ в управлениях пути и каналов.

В соответствии с исходными данными, используемыми в описанных способах расчета, получаемая ширина трассы отвечает средней глубине естественно-благоприятных перевалов при проектном уровне. Во многих случаях заданная судоходная глубина заметно отличается от средней глубины естественно-благоприятных перевалов. Кроме того, на судоходных реках мало осталось благоприятных перевалов в естественном состоянии, т. е. на которых не производились путевые работы. В связи с этим рассмотренные способы расчета можно рекомендовать при выправлении перекатов и вообще затруднительных участков преимущественно на реках, которые еще только осваиваются судоходством, где заданная судоходная глубина близка к средней глубине естественно-благоприятных перевалов, да и такие перевалы имеются в достаточном количестве.

Для того чтобы принятая ширина трассы соответствовала заданной минимальной гарантированной глубине, вместо осреднения ширин всех перевалов прибегают на судоходных реках к способу расчета, основанному на использовании установленной по натурным данным связи между глубинами и ширинами русла. Ввиду небольшого обычно числа благоприятных перевалов на практике строят график связи между ширинами и глубинами русла, охватывающий не только перевалы, но также плесо-

вые лощины и перекаты. Для построения такого графика, если имеется детальная русловая съемка, вычерчивают характерные сечения русла и в них находят сопряженные значения ширин и максимальных глубин при проектном уровне путевых работ. К характерным относятся сечения на гребнях перекатов, в серединах плесовых лощин и на переходе плесовых лощин в перекаты. Выбор сечений производится в пределах бесприточного и морфологически однородного участка реки. Если имеется только лоцманская карта, строят график связи между указанными на ней ширинами и глубинами.

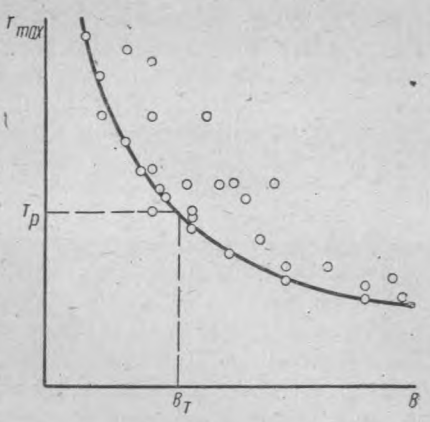


Рис. 62. График зависимости $T_{max} = f(B)$

По полученным парам значений ширин русла B и максимальных глубин T_{max} и строится график связи $T_{max} = f(B)$, на котором проводится нижняя огибающая поля точек (рис. 62). Эта нижняя огибающая и принимается за расчетную линию, так как при существующих состоянии русла и объемах путевых работ она дает уверенность в том, что заданная судоходная глубина может быть обеспечена.

Значение ширины $B_т$ выправительной трассы снимается с проведенной кривой по значению расчетной глубины $T_р = T_г + \Delta T$, где $T_г$ — минимальная гарантированная глубина и ΔT — поправка на неточность планового материала, принимаемая равной 0,3—0,5 м.

Русловые съемки с промерами глубин по поперечникам дают, как правило, завышенные глубины на судовом ходу по сравнению с действительно существующими, что объясняется пропуском при поперечных промерах лимитирующих глубин на песчаных грядах. Для устранения ошибки, вытекающей из завышения глубин при поперечных промерах, и вводится упомянутая поправка ΔT к минимальной гарантийной глубине. Значение этой поправки более надежно можно установить путем сличения выполненных на перекатах данного плеса поперечных и продольных промеров. Вследствие той же неточности промеров глубин в рассматриваемом способе нельзя учесть различие между максимальной глубиной сечения и глубиной на кромках судового хода.

Если линия $T_{max} = T_р$ пересекает график $T_{max} = f(B)$ в его средней части, это указывает на то, что полученная ширина трассы удовлетворяет условиям, встречающимся на перевалах данного плеса реки. Если пересечение приходится на правую часть графика, можно сделать вывод, что заданное значение гарантированной глубины занижено и на этом плесе можно поддерживать бо́ль-

шие глубины. Наконец, если линия $T_{max}=T_p$ пересекает график $T_{max}=f(B)$ в его левой части, это указывает на нереальность назначенной гарантированной глубины, поскольку она приближается к глубине плесовых лощин. В общем случае расчетная глубина T_p должна быть меньше глубины в плесовых лощинах.

При выборе ширины трассы для затруднительного участка реки достаточной протяженности, включающего ряд перекатов, плесовых лощин и перевалов, способ, основанный на применении кривой связи между ширинами и глубинами, может дать наиболее надежные результаты.

В гидравлико-морфометрическом способе расчета ширины выправительной трассы, разработанном К. В. Гришаниным, исходным положением является учет взаимодействия между потоком и руслом. Этот способ предусматривает два варианта расчета: 1) при достаточных натурных данных и 2) при недостаточных таких данных.

В условиях размываемого русла шероховатость его регулируется самим потоком. Это саморегулирование состоит в изменении размеров донных гряд и крупности частиц, слагающих поверхность дна. Так, при увеличении скорости течения в первую очередь вымываются наиболее мелкие частицы из состава донных отложений и средняя крупность частиц, находящихся на поверхности дна, возрастает. Наоборот, при уменьшении скорости часть взвешенных наносов выпадает из потока, в результате чего средняя крупность донных отложений снижается.

Для того чтобы такое регулирование было возможно, относительная шероховатость дна не должна быть большой. Согласно натурным данным, должно при этом соблюдаться неравенство $(d_{50}:T)\leqslant 10^{-3}$, где d_{50} — диаметр частиц, соответствующий 50% по кривой гранулометрического состава. Из этого неравенства следует, что гидравлико-морфометрический способ не следует применять на участках рек с гравелисто-галечными донными отложениями.

Аналитическим выражением связи между шероховатостью размываемого ложа и гидравлическими элементами потока служит полученная В. М. Маккавеевым формула коэффициента шероховатости:

$$n=a(TI)^{1/6}, \tag{102}$$

в которой a — коэффициент пропорциональности, принимаемый в первом приближении постоянным (численное значение a по Маккавееву близко к 0,08—0,09).

Подставляя выражение (102) в формулу Маннинга, получаем:

$$C=\frac{1}{n}T^{1/6}=\frac{1}{a}I^{-1/6}. \tag{103}$$

Пользуясь таким выражением коэффициента Шези и считая коэффициент пропорциональности a в бытовых и проектных усло-

виях одинаковым, можно придать общей формуле (99) для ширины трассы следующий вид:

$$B_т = B_б \left(\frac{T_б}{T_п}\right)^{3/2} \left(\frac{I_б}{I_п}\right)^{1/3}. \qquad (104)$$

Движение потока до и после выправления считаем плавно изменяющимся, поэтому допустимо пренебречь изменением кинетической энергии потока, приравнивая уклон свободной поверхности к уклону трения.

Полагая, что разница поверхностных уклонов потока в бытовом и выправленном состояниях не так уж значительна, и учитывая, что отношение уклонов входит в формулу для ширины трассы под корнем третьей степени, можем приближенно считать отношение

$$(I_б : I_п)^{1/3} \cong 1.$$

Тогда получим для ширины трассы следующее выражение:

$$B_т = B_б \left(\frac{T_б}{T_п}\right)^{3/2}. \qquad (105)$$

По первому варианту расчета для того, чтобы можно было практически пользоваться формулой (105), связываем среднюю глубину выправленного русла $T_п$ с заданной минимальной гарантированной глубиной $T_г$, при этом считаем, что на выправленных перекатах воспроизводятся формы русла (поперечные сечения), свойственные естественно-благоприятным перевалам.

Обозначим на перевалах отношение средней глубины T сечения русла к глубине $T_{сх}$ на кромках судового хода шириной $b_г$ через η, т. е. $(T : T_{сх}) = \eta$. Величина η на перевалах обычно меньше 1, но при очень широком судовом ходе может быть и больше 1. Материалы по морфометрии речных русел показывают, что при заданной постоянной ширине судового хода $b_г$ величина η возрастает с убыванием ширины русла B (рис. 63). При постоянной ширине русла B величина η возрастает с увеличением ширины судового хода $b_г$.

Введя для перевалов безразмерное отношение ширины русла к ширине судового хода $\zeta = B : b_г$, мы можем утверждать, что между величинами η и ζ существует обратная связь. Функциональная зависимость $\eta = f(\zeta)$, отвечающая благоприятным русловым формам перевалов, может быть установлена на основе обработки морфометрических данных по их сечениям. Поскольку на выправленных перекатах воспроизводятся формы русла, свой-

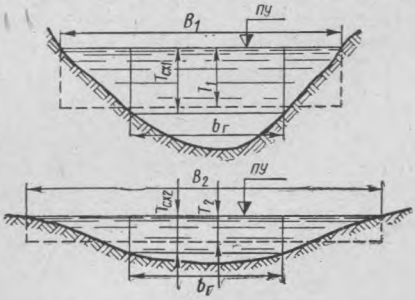


Рис. 63. Узкое и широкое сечения речного русла. Отношение $\eta = T : T_{сх}$ на первом из них больше, чем на втором

ственные естественно-благоприятным перевалам, мы можем и на выправленные перекаты распространить зависимость $\eta=f(\zeta)$ и написать: $(T_п:T_г)=f(B_т:b_г)$, тогда при $T_п:T_г=\eta_п$ и $B_т:b_г=\zeta_п$ получим зависимость $\eta_п=f(\zeta_п)$.

Разделим теперь обе части равенства (105) на $b_г$ и обозначим отношение бытовой ширины русла на перекате к ширине судового хода через $\zeta_б=B_б:b_г$. В том же равенстве вместо $T_п$ в знаменателе выражения, стоящего в скобках, поставим произведение $\eta_п \cdot T_г$ После этого задача расчета ширины трассы сведется к решению системы двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\left.\begin{aligned} \zeta_п&=\zeta_б\left(\frac{T_б}{\eta_п T_г}\right)^{3/2};\\ \eta_п&=f(\zeta_п), \end{aligned}\right\} \qquad (106)$$

из которых первое уравнение гидравлическое, второе — морфометрическое.

Эту систему из двух уравнений удобно решать графически. Как уже было указано, морфометрическую зависимость $\eta=f(\zeta)$ и соответственно $\eta_п=f(\zeta_п)$ устанавливают путем обработки отобранных поперечных сечений естественно-благоприятных перевалов. Для каждого из этих сечений определяют при заданном проектном уровне ширину поверху B, площадь живого сечения ω, среднюю глубину $T=\omega:B$ и глубину $T_{сх}$ на кромках судового хода заданной (одинаковой для всех профилей) ширины $b_г$. Далее для всех сечений вычисляют значения $\eta=T:T_{сх}$ и $\zeta=B:b_г$. Значения η наносят на график в функции от значений ζ. По полученным точкам проводят осредняющую прямую $\eta=f(\zeta)$ (прямая *1-1* на рис. 64), которую и принимают за зависимость $\eta_п=f(\zeta_п)$.

Для построения гидравлической зависимости (кривая *2-2*) на каждом из сечений перекатов, в которых необходимо определить ширину трассы, строят кривую зависимости $\zeta_п$ от $\eta_п$ по первому уравнению (106). При этом величины $B_б$ и $T_б$ являются для данного сечения на перекате при заданном проектном уровне постоянными, величины $T_г$ и $b_г$ постоянны для целого плеса или еще бо́льшего участка реки, значениями $\eta_п$ задаются. Для построения кривой *2-2* достаточно задаться тремя значениями $\eta_п$ (например, 1,0; 0,8; 0,6). Пересечение этой кривой *2-2* с морфометрической зависимостью *1-1* определит расчетное значение безразмер-

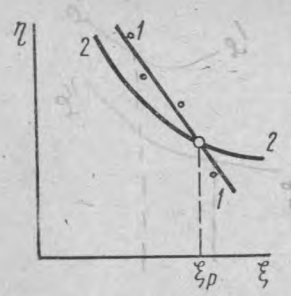


Рис. 64. К расчету ширины выправительной трассы

ной величины $\zeta_р$, как показано на рис. 64. После этого находят ширину трассы в данном сечении переката из выражения

$$B_т = \zeta_р b_г. \qquad (107)$$

Обычно на каждом перекате при определении ширины трассы за расчетное берут сечение по гребню переката. При наличии на выправляемом затруднительном участке нескольких перекатов для каждого из них строится своя гидравлическая кривая. Пересечение нескольких гидравлических кривых с одной морфометрической прямой даст несколько значений безразмерной величины $\zeta_р$ и ширины трассы $B_т$.

При расчете по гидравлико-морфометрическому способу может оказаться, что точек для построения эмпирической связи между величинами η и ζ не хватает или точки этой связи дают настолько большой разброс, что проведение осредняющей прямой становится затруднительным. В этих случаях выправленное русло принимается имеющим параболические поперечные сечения, т. е. применяется второй вариант расчета.

Натурные данные по прямолинейным устойчивым участкам естественного русла показывают, что форма их живых сечений близка к параболе 2-й степени, где отношение $T_{max}:T=3/2$. Выправленное русло имеет обычно более полные сечения, приближающиеся по форме к сегментам эллипсов или к параболам степени выше 2-й.

К. В. Гришанин принял форму сечений выправленного русла удовлетворяющей уравнению параболы 4-й степени и нашел, что при обычных, не очень малых, отношениях ширин $B_т$ и $b_г$, когда $B_т : b_г \geqslant 3$, безразмерная величина η принимает значение, близкое к постоянному, а именно $\eta = 0{,}8$. Такое значение равно среднему отношению медианных ширин перевалов и перекатов. Это приводит к простому выражению для ширины трассы

$$B_т = 1{,}4 B_б \left(\frac{T_б}{T_г}\right)^{3/2}. \qquad (108)$$

Для определения ширины выправительной трассы по этой зависимости надо знать размеры живых сечений только на выправляемых перекатах. Как и при решении системы двух уравнений, по зависимости (108) для нескольких перекатов на затруднительном участке можем получить различные значения $B_т$, если у них различные величины $B_б$ и $T_б$.

На реках с интенсивными дноуглубительными работами площади живых сечений на перекатах несколько увеличены по сравнению с их естественными величинами. При выправлении обычно стремятся эксплуатационное дноуглубление свести к минимуму. Ввиду этого при расчете трассы приводят сечения выправляемых перекатов к их естественному состоянию. Это можно сделать, вычислив величину $T_б$ на перекате из соотношения

$$T_б = \frac{\omega_б - \Delta\omega}{B_б}, \qquad (109)$$

где $\omega_б$ — фактическая площадь живого сечения на гребне переката;

$\Delta\omega$ — приращение площади живого сечения, достигнутое вследствие дноуглубительных работ, определяемое в виде некоторой доли от фактического сечения: $\Delta\omega = m\omega_б$, причем $m \ll 1$ и берется в зависимости от размеров реки и ежегодных выемок на данном перекате.

При проектировании выправления затруднительных участков можно рекомендовать следующий порядок выбора ширины выправительной трассы. Для рассматриваемого бесприточного и морфологически однородного судоходного плеса с рядом затруднительных участков определяется ширина трассы по графику $T_{max} = f(B)$. Затем гидравлико-морфометрическим способом находятся ширины трассы на каждом из перекатов.

Если для перекатов, входящих в один затруднительный участок, значения $B_т$ по гидравлико-морфологическому способу получаются отклоняющимися в пределах не более 20—25% (примерная точность расчетов ширины трассы) от значения $B_т$, снятого с графика $T_{max} = f(B)$, то за расчетное для данного затруднительного участка принимается среднее из полученных значений $B_т$. В случае расхождений, превышающих 20—25%, за расчетное принимается значение $B_т$, снятое с графика $T_{max} = f(B)$.

На участках рек с гравелисто-галечными отложениями, шероховатость дна которых лишь частично регулируется потоком, ширина трассы должна находиться по графикам $T_{max} = f(B)$, так как применение для них гидравлико-морфометрического способа нельзя считать обоснованным.

На разветвленных участках рек ширина отдельных рукавов всегда меньше ширины неразветвленного русла, и поэтому добавочного ограничения ширины судоходных рукавов обычно не требуется. Если же судоходный рукав очень развит и в нем расположены перекаты, для улучшения которых необходимы полузапруды, ширину трассы на них можно определить по гидравлико-морфологическому способу, как для неразветвленного русла.

В отношении выбора постоянного значения ширины выправительной трассы в пределах данного затруднительного участка необходимо в заключение отметить приближенность такого решения. В условиях сплошного выправления, когда глубины почти выравниваются по длине русла, такое решение можно оправдать. При применяемом же у нас выборочном выправлении, когда выравнивание глубин по длине русла не достигается, такое решение является приближенным.

В условиях выборочного выправления более правильным надо считать принятие переменной ширины трассы как от переката к перекату, так и в пределах отдельно взятого переката. В основу определения переменной ширины трассы должен быть положен расчет русловых деформаций. Работа в этом направлении ведется, но для получения надежных расчетных результатов требуются большие исследования.

После выбора ширины трассы подсчитывают средние скорости течения v при проектном уровне путевых работ на гребнях всех перекатов в условиях ограничения их живых сечений (т. е. осуществления запроектированной трассы). Скорости v подсчитывают исходя из существующих глубин русла в пределах трассы, путем деления расхода воды на площадь живого сечения трассы $\omega_т$.

В результате получаем скорость на трассе в начальный период работы выправительных сооружений.

Скорость v не должна значительно превышать бытовую, так как в противном случае могут возникнуть слишком резкие деформации русла.

При расчетах стремятся к тому, чтобы начальное увеличение скоростей потока на трассе не превышало 20—25% их бытовых значений в пределах трассы.

§ 37. РАСЧЕТ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ВЫПРАВИТЕЛЬНОЙ ТРАССЫ И ПРИНЦИПЫ ЕЕ ПРОЛОЖЕНИЯ В РУСЛЕ

К радиусу кривизны выправительной трассы предъявляются следующие требования: во-первых, он должен обеспечивать удобства и безопасность для судоходства; во-вторых, он должен соответствовать наиболее устойчивым плановым формам меженного русла на данном плесе, при которых происходит безотрывное движение потока.

Первое требование почти всегда выполняется без особых затруднений, так как радиус кривизны выправительной трассы обычно значительно превосходит минимальный радиус кривизны судового хода. Второе требование обычно является определяющим при выборе радиуса кривизны трассы, но его аналитическая формулировка встречает большие трудности. Трудности эти связаны с тем, что плановые формы русла неодинаковы у всех рек; неодинаков и определяющий эти плановые формы ход руслового процесса.

Разным типам руслового процесса должны, по-видимому, отвечать и свои нормы радиуса кривизны русла. Однако большинство исследователей изгиба речного потока имели в виду преимущественно одну форму руслового процесса — меандрирование. В целом вопрос о расчете кривизны выправительной трассы еще недостаточно разработан.

Между тем ширину трассы без учета ее кривизны можно рассчитывать лишь в порядке приближения, и то благодаря тому, что этот расчет ведется для перекатов, располагающихся обычно (но не всегда) на перегибах русла. При рассмотрении же подходов к перекатам вопрос о ширине нельзя отделять от вопроса о кривизне трассы.

В проектной практике прошлых десятилетий при назначении радиуса кривизны трассы руководствовались обычно способом

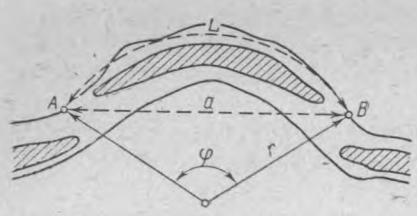


Рис. 65. К расчету радиуса кривизны трассы по аналогии с «образцовыми» участками:
a — длина хорды; L — длина кривой; r — радиус; φ — центральный угол; A и B — точки начала и конца кривой

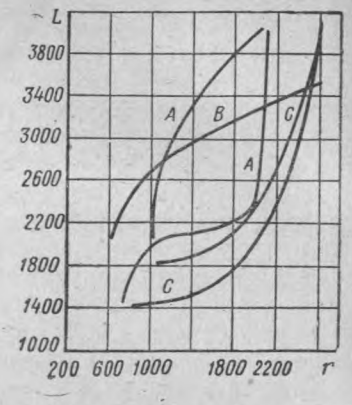


Рис. 66. Графики связи радиуса кривизны трассы с длиной кривых на «образцовых» участках:
A — из перевала в плес; B — из перевала в перевал; C — из плеса в перевал

аналогий с естественно-благоприятными криволинейными участками того плеса, на котором проектировались выправительные сооружения. Наиболее полно он был использован в проекте выправления р. Белой.

При составлении этого проекта на протяжении участка реки от г. Уфы до устья было отобрано 16 «образцовых» криволинейных участков. Отобранные кривые разбивались на три группы: кривые между двумя перевалами, кривые на переходе от плеса к перевалу и кривые на переходе от перевала к плесу. Для каждой из кривых графическим путем находился осредненный радиус r вогнутого ведущего берега, а также длина L и хорда a кривой, проведенной этим радиусом (рис. 65). Далее строились кривые связи между полученными величинами радиусов и длин кривых $r=r(L)$ (рис. 66) и кривые связи между длинами кривых и хордами $L=L(a)$ отдельно для каждой из трех указанных выше групп кривых.

Полученные зависимости при проектировании очертаний ведущих берегов выправительной трассы использовали следующим образом. Предварительно устанавливали точки перегиба трассы, т. е. точки начала и конца кривых, а также принадлежность этих кривых к одному из трех установленных типов. По точкам начала и конца кривой определяли ее хорду, а затем по зависимостям $L=L(a)$ и $r=r(L)$ — длину и радиус кривой. Так как в определении точек начала и конца кривой возможна некоторая неопределенность, то окончательные проектные значения r и L находили подбором, чтобы получить эти значения не слишком отличающимися от средних и не иметь большого различия в длинах и радиусах смежных кривых. Обязательным условием использования способа аналогий является относительно одинаковое геологическое строение берегов на улучшаемом и «образцовом» участках.

Для применения способа аналогий надо предварительно выполнить следующее: во-первых, найти на данном плесе образцо-

вые участки, а они не всегда имеются в достаточном количестве; во-вторых, провести на них съемочные работы и составить их планы; в-третьих, обработать эти планы и построить кривые связи $L=L(a)$ и $r=r(L)$. Выполнение всех этих условий не всегда удается осуществить, так как или мало самих образцовых участков, или геология берегов разная, или не получается связи между длинами кривых и хордами или радиусами кривых и длинами. Вследствие этого способ аналогий в настоящее время используется сравнительно редко.

К способу аналогий примыкает способ расчета кривизны трассы, основанный на связи радиуса кривизны с шириной или площадью поперечного сечения русла. Натурные и экспериментальные данные по движению открытого потока в изогнутом русле привели И. Л. Розовского и Р. И. Гринько к выводу, что наибольшую устойчивость имеют участки с радиусом кривизны и шириной русла, удовлетворяющими соотношению

$$r=(4—5)B. \tag{110}$$

Это соотношение может применяться на участках свободного изгиба меженного русла, т. е. такого изгиба, в формировании которого не участвуют коренные берега. В основе соотношения (110) лежит существование обратной пропорциональности между поперечным уклоном дна размываемого русла и радиусом его кривизны. Радиусы кривизны трассы, определенные из соотношения (110), применялись при коренном улучшении ряда перекатов р. Днепра, причем кривые, очерченные такими радиусами, оказались достаточно устойчивыми. В тех случаях, когда были применены радиусы $r>(4{,}0—5{,}0)B$, обеспечить устойчивость русла не удавалось. Значение численного коэффициента в формуле (110) подтверждается также статистической обработкой сведений о кривизне меженных извилин ряда рек различных размеров, выполненной Н. А. Ржаницыным. По С. Т. Алтунину, радиусы кривизны $r<3{,}5B$ не должны допускаться, так как при таких радиусах возможен отрыв потока от выпуклого берега.

Большой интерес представляют выражения для радиуса кривизны трассы, в которых величина радиуса связывается с гидравлическими элементами потока — его расходом (или скоростью) и уклоном.

Выражения такого рода теоретически основываются на соотношении между радиусом кривизны устойчивых меандр речного русла и гидравлическими элементами потока, полученном В. М. Маккавеевым.

$$r\sim Q^nI^{-m}, \tag{111}$$

где, по Маккавееву, $n={}^4/_7$ и $m={}^6/_7$.

Прямая связь между радиусом кривизны и расходом и обратная связь между радиусом кривизны и уклоном на изгибе русла существуют и при недеформируемом русле. Соответствующие

формулы отличаются лишь численными значениями показателей степени n и m.

Уклон I, входящий в формулу (111), является суммой двух уклонов: уклона трения I_f и уклона местных потерь энергии $I_м$, обусловленных поворотом потока: $I=I_f+I_м$. При больших радиусах величина $I_м$ мала по сравнению с величиной полного уклона I. Поэтому на больших реках со слабо изогнутым и сравнительно устойчивым руслом и мало меняющимися по длине уклонами можно ожидать, что связь между r и Q будет гораздо более явной, чем связь между r и I.

Это подтверждается результатами выполненной Н. В. Разиным обработки данных по 38 криволинейным участкам р. Волги. На основе этих данных им предложена для расчета кривизны трассы следующая формула:

$$r=\frac{100\,Q^{0,5}}{\varphi^2}, \qquad (112)$$

в которой нет уклона свободной поверхности, но отмечена обратная связь, наблюдающаяся между радиусами речных изгибов и их центральными углами φ (см. рис. 65). Расход Q, стоящий в числителе формулы (112), принимается соответствующим уровню бровок меженного русла. Систематической проверки приведенной формулы на материале других рек сделано не было, поэтому ее применение должно ограничиваться Волгой.

Значительно ближе подходит к общей зависимости (111) эмпирическая формула для радиуса кривизны трассы, предложенная Н. И. Маккавеевым:

$$r=0{,}0014\frac{Q_р^{0,5}}{I}. \qquad (113)$$

Приведенная формула получена путем установления связи между кривизной устойчивых извилин русел и гидравлическими элементами потока. Наибольшие затруднения при пользовании этой формулой возникают в связи с недостаточной определенностью величины так называемого *руслоформирующего расхода* $Q_р$, входящего в ее правую часть. Под руслоформирующим понимается такой расход, при котором поток наиболее сильно влияет на формы русла.

Автор формулы (113) предложил считать руслоформирующим расход, отвечающий максимуму произведения величины расхода русловых наносов $Q_т$ на его частоту p за многолетний период (максимуму $Q_тp$). Приняв, что расход наносов пропорционален произведению квадрата расхода воды Q^2 на уклон свободной поверхности I, т. е. $Q_т\sim Q^2I$, можем заменить отыскание максимума произведения $Q_тp$ отысканием максимума величины Q^2pI. Различием между частотой расхода наносов и частотой расхода воды здесь допустимо пренебрегать.

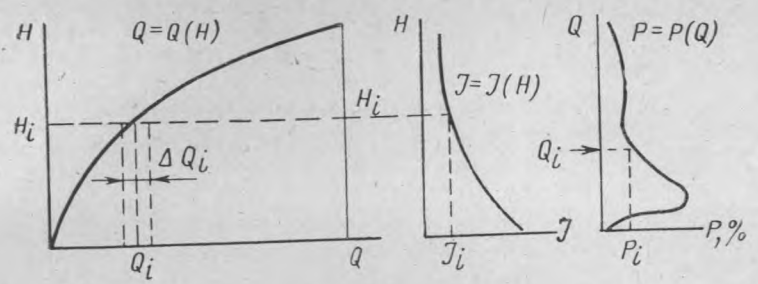


Рис. 67. Графики зависимостей $Q=Q(H)$; $I=I(H)$; $p=p(Q)$

Для расчета руслоформирующего расхода на границах участка, для которого он определяется, должны находиться водомерные посты: один — с многолетними наблюдениями, другой — с наблюдениями за 3—5 лет. К посту с многолетними наблюдениями должна быть привязана кривая расходов (участок между постами не должен иметь притоков). Так как определение руслоформирующего расхода выполняется для достаточно длинных участков рек, то обычно указанный состав исходных данных бывает обеспечен.

Для определения руслоформирующего расхода сначала весь диапазон расходов воды за многолетие, наблюдавшихся в створе опорного водомерного поста, делят на кривой $Q=Q(H)$ на 20—25 равных интервалов ΔQ_i, находят частоту каждого интервала расходов за многолетие и строят график частоты (гистограмму) расходов $p=p(Q)$. Затем строят кривую связи между уровнем воды на опорном водомерном посту и средним уклоном на выправляемом участке $I=I(H)$. Данные о среднем уклоне получают из водомерных наблюдений на постах, между которыми располагается выправляемый участок. После этого по кривой $I=I(H)$ определяют значение уклона I для середины каждого интервала расходов ΔQ_i на кривой расходов $Q=Q(H)$ (рис. 67) и для каждого интервала расходов вычисляют величину произведения $Q^2 \cdot pI$, в котором Q и I — расход и уклон в середине интервала, а p — частота расхода. Наконец, по полученным данным строят кривую $Q^2pI=f(Q)$.

Обычно на равнинных реках в результате описанного расчета выявляют два максимума произведения Q^2pI: верхний с расходом Q_{pI}, отвечающий примерно среднему многолетнему максимуму весеннего паводка, и нижний с расходом Q_{pII}, отвечающий расходу, несколько бо́льшему среднемноголетнего (рис. 68). Уровень воды, соответствующий верхнему из этих расходов, имеет высоту, близкую к высоте бровок меженного русла (началу выхода реки на пойму), а уровень, соответствующий нижнему расходу, близок к середине интервала уровней между отметками побочней и отметками меженных бровок (поймы).



Рис. 68. Графики зависимости $Q^2{}_p\ I=f(Q)$

При верхнем руслоформирующем расходе наблюдаются в русле реки наибольшие скорости течения и интенсивное перемещение наносов, но длительность прохождения таких расходов в многолетнем периоде невелика. Интенсивность перемещения наносов при нижнем руслоформирующем расходе меньше, но частота повторения таких расходов значительна и поэтому их влияние на русло за многолетие оказывается тоже достаточно сильным. Для расчета кривизны выправительной трассы обычно используется нижний руслоформирующий расход, хотя ни он, ни зависимость радиуса кривизны от ширины русла не привязаны к проектному уровню. Такое отступление от проектного уровня обусловлено тем, что в меженном диапазоне колебаний уровней положение геометрической оси русла на криволинейных участках изменяется незначительно.

В случаях, когда нижний максимум на графике отсутствует, а также при отсутствии сведений о повторяемости расходов (короткий ряд наблюдений) или об уклонах в качестве меженного руслоформирующего расхода по предложению Н. И. Маккавеева принимается среднеквадратичный расход за навигационный период расчетного года со стоком и высотой паводка, близким к средним многолетним, т. е.

$$Q_p = \sqrt{(Q^2)_{ср}};\quad (Q^2)_{ср} = \frac{1}{T_н}\int_0^{T_н} Q^2 dt. \qquad (114)$$

Здесь $T_н$ — продолжительность навигации в тех же единицах, что и переменная интегрирования t (время).

Для определения среднеквадратичного расхода, называемого также эквивалентным, гидрограф $Q=Q(t)$ за навигацию расчетного года пересчитывают по основным переломным точкам в графики $Q^2=\varphi(t)$. Планиметрируя графики $Q^2=\varphi(t)$, на рис. 69 находят среднее значение квадрата расхода $(Q^2)_{ср}$ и затем среднеквадратичный или руслоформирующий расход $Q_р$. Среднеквадратичный расход превышает среднегодовой расход у равнинных рек со снеговым половодьем в среднем на 20—40%.

В итоге можно рекомендовать следующий порядок расчета наименьшего радиуса кривизны выправительной трассы: 1) при наличии кривых связи $L=L(a)$ и $r=r(L)$ используются эти кривые; 2) при отсутствии упомянутых кривых связи используется формула (113), но полученное по ней значение радиуса проверяется по соотношению (110), в котором ширина B берется при проектном уровне; если полученное по формуле (113) значение радиуса этому соотношению не удовлетворяет, радиус кривизны трассы принимается равным $(4—5)B$.

Трасса с установленной шириной и радиусом закруглений может по-разному вписываться в естественное русло реки. Поэтому после выбора плановых габаритов выправительной трассы следующей задачей проектирования становится само «трассирование» проектных очертаний русла. Решая эту задачу, учитывают некоторые общие принципы, указываемые ниже, а также принимают во внимание всю совокупность местных условий. К местным условиям относятся как особенности судоходства на данном плесе реки (вид и размеры составов, способы вождения судов), так и особенности самой реки (скорости течения, тип руслового процесса, скорости перемещения побочней и осередков и т. д.).

Главные общие принципы проложения выправительной трассы в русле реки сводятся к следующему.

1. Трасса всюду, где возможно, должна одной кромкой опираться на ведущий берег русла. Если этот берег интенсивно подмывается, он должен быть укреплен. Особенное значение приобретает возможность проложения выправительной трассы у незатопляемого берега, сложенного из трудноразмываемых пород. Наблюдения показывают, что динамическая ось весеннего потока (линия наибольших удельных расходов) пролегает около этого берега и в тех случаях, когда он не имеет заметной кривизны.

Один из основоположников советской русловой гидротехники Н. Н. Жуковский выразил этот результат наблюдений словами «речные воды тяготеют удерживать свое течение у неразмывае-

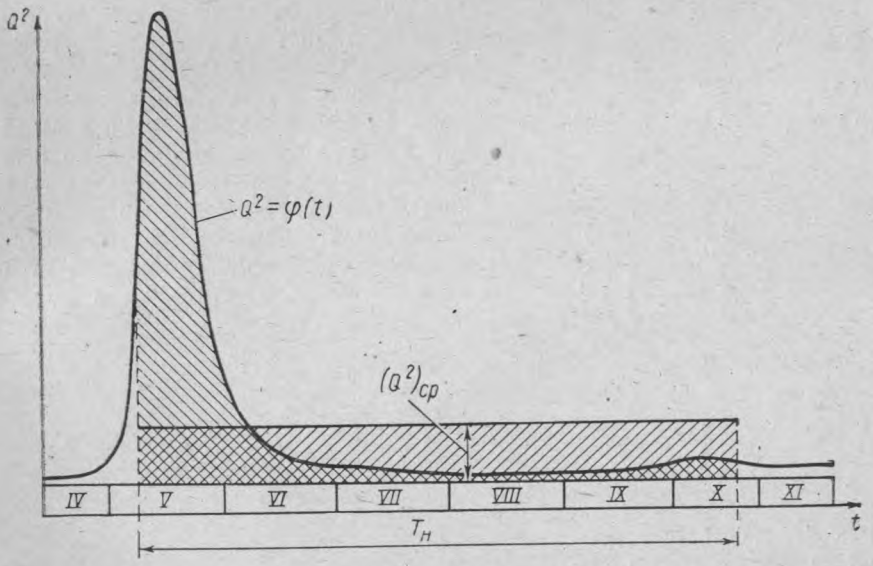


Рис. 69. Определение среднеквадратичного (эквивалентного) расхода воды за навигационный период

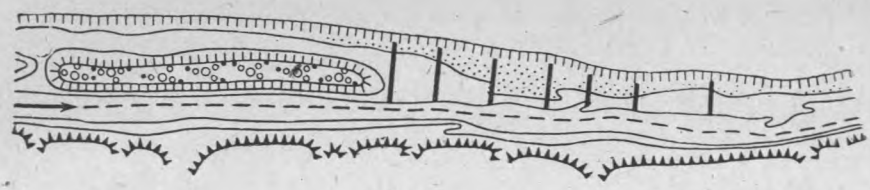


Рис. 70. Выправительная трасса, проложенная под высоким неразмываемым берегом

мых берегов». Так как благодаря многовековой работе кориолисовых сил высоким и неразмываемым бывает в нашем полушарии преимущественно правый берег реки, то такое объяснение направленности речного потока кроется именно в действии кориолисовых сил инерции. В наши дни идея проложения выправительной трассы у высокого трудноразмываемого берега развивается рядом специалистов.

На рис. 70 показан участок реки, выправленный проложением трассы у высокого правого берега и размещением сооружений у низкого левого берега (см. также рис. 52).

2. На участках рек с двусторонней поймой, где приблизить трассу к неразмываемому берегу не удается, следует придавать трассе синусоидальное очертание. Прямые вставки между смежными кривыми допускаются, но они не должны быть значительной длины.

3. Отдельные кривые, входящие в состав трассы, имеют различные длины и радиусы, однако следует заботиться о том, чтобы смежные кривые имели длины и радиусы одного и того же порядка (рис. 71).

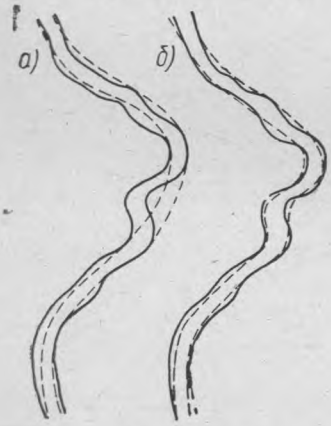


Рис. 71. Проложение трассы на участке реки с крутыми изгибами:
а — правильное; *б* — неправильное

4. Места переходов от кривой одного знака кривизны к кривой другого знака желательно приурочивать к устойчивым участкам берегов. Устойчивые участки пойменных берегов встречаются в местах выхода так называемых печин, т. е. скрытых в толще

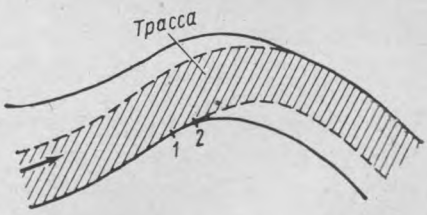
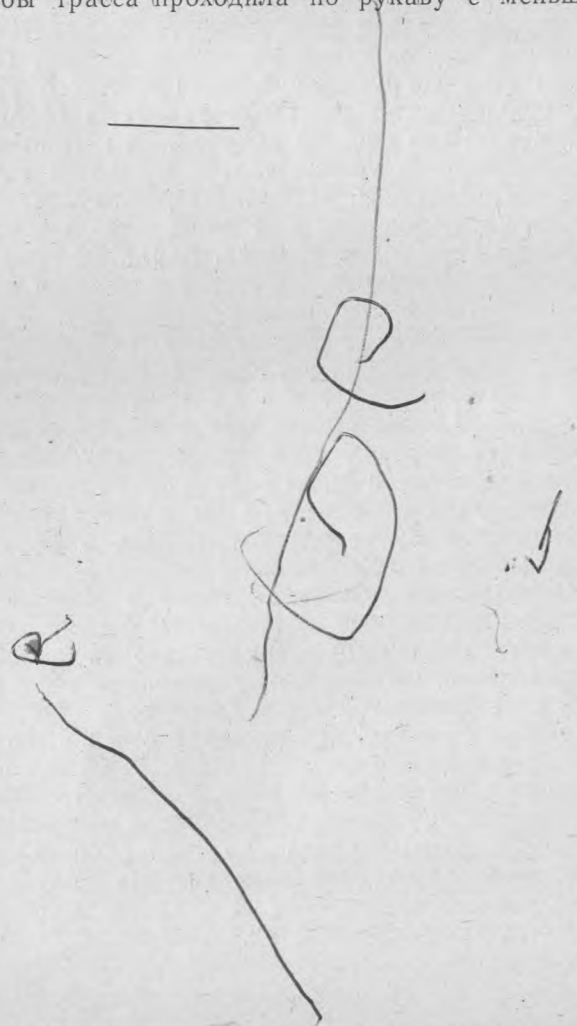


Рис. 72. Переход трассы от одного ведущего берега к другому

аллювиальных отложений линз глинистых или суглинистых грунтов. При выправлении р. Белой точки отхода кромок трассы от одного ведущего берега и точки примыкания к другому берегу фиксировались у выходов печин, и этим была обеспечена устойчивость переходных участков.

5. В начале поворота русла динамическая ось потока бывает прижата к выпуклому берегу, поэтому отход трассы от такого ведущего берега (точка 2 на рис. 72) может несколько «запаздывать» по сравнению с изменением знака кривизны невыправленного русла (точка *1* на рис. 72). Обратное положение, т. е. положение, когда кромка трассы отходит от ведущего берега выше его нулевой кривизны, нежелательно.

6. Необходимо избегать проложения трассы по участкам русла с интенсивным движением наносов. Это особенно важно при выборе судоходного рукава в разветвленном русле — надо стремиться к тому, чтобы трасса проходила по рукаву с меньшим твердым расходом.



Глава VI

РАБОТА ВЫПРАВИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ В РЕЧНОМ ПОТОКЕ И ИХ РАСЧЕТ

§ 38. РАБОТА ПОЛУЗАПРУД В ПОТОКЕ

Полузапруды на наших судоходных реках возводят, как уже упоминалось в гл. V, преимущественно в русле реки и редко на пойме. Полузапруды в русле реки могут быть низкими (меженного действия) и высокими (весеннего действия). Низкие полузапруды возвышаются на 1—1,5 м над проектным уровнем, высокие — на 2—4 м и более.

Встречаются две разновидности высоких полузапруд: а) с небольшими продольными уклонами гребней, от 1 : 100 до 1 : 300; головы этих сооружений выше проектного уровня на 1,5—3 м; б) с большими продольными уклонами гребней — «ныряющие» сооружения; при средней высоте 2—4 м головы таких сооружений выше проектного уровня только на 0,5—1 м, как у сооружений меженного действия. «Ныряющим» полузапрудам следует отдать предпочтение, так как они постепенно стесняют живое сечение потока по мере спада уровней. Корни высоких полузапруд, в особенности «ныряющих», могут располагаться на высоте меженных бровок, т. е. на высоте поймы.

Полезная работа всех полузапруд как низких (меженного действия), так и высоких русловых (весеннего действия) происходит как в незатопленном, так и в затопленном состояниях, вследствие этого надо рассматривать обе фазы их работы. Строительство высоких полузапруд вошло в практику выправительных работ только в последние годы. Работа таких полузапруд в потоке пока не исследована ни в натуре, ни в лаборатории. В связи с этим в дальнейшем будет рассматриваться в основном работа полузапруд меженного действия.

Располагаясь преимущественно в мелких частях русла (на побочнях), меженные полузапруды, пока они не затоплены, уменьшают смоченный периметр сечения больше, чем площадь, и, следовательно, увеличивают гидравлический радиус сечения. Скорость в неперекрытой части русла возрастает, таким образом, не только из-за уменьшения площади сечения, но и вследствие улучшения его гидравлических качеств. Увеличенная скорость течения должна обеспечить перемещение транзитом поступающих сверху наносов, а в начальный период после постройки сооружений, кроме того, и размыв русла до требуемой судоходной глубины. Правильно спроектированная система полузапруд способствует также отвлечению наносов с судового хода и отложению их в межполузапрудных емкостях.

Расчет полузапруд в общем случае должен сводиться к определению следующих их элементов: длины, высоты головы и продольного уклона гребня, расстояния между сооружениями, угла между их осями и потоком, а также ширины гребня, заложения и размеров крепления откосов, длины выпуска расстилочного тюфяка, размеров крепления берега у корня, крупности камня для крепления сооружения и берега. Некоторые из указанных элементов могут быть заданы, и тогда расчет соответственно облегчается.



Рис. 73. Схема движения потока в районе незатопленной полузапруды: *1* — возрастание скоростей; *2* — падение скоростей; *3* — место отрыва струи от берега; *4* — верховая водоворотная область; *5* — малая низовая водоворотная область; *6* — большая водоворотная область

Длина полузапруды определяется выбранной шириной трассы и углом, образуемым полузапрудой с потоком, и находится по формуле

$$D = \frac{B_б - B_т}{\sin \alpha}, \qquad (115)$$

где $B_б$ — бытовая ширина русла;

$B_т$ — ширина трассы;

$\alpha \leqslant 90°$ — угол, образуемый осью сооружения с осью трассы.

Основная задача расчета полузапруд после этого — определение их высоты и расстояния между ними.

Многие годы полузапруды строили без выполнения указанных расчетов в основном по существовавшим практическим нормам, не имеющим расчетного или теоретического обоснования. Хотя создание законченной расчетной методики еще продолжается, тем не менее накопленные экспериментальные и теоретические данные позволяют уже и сейчас внедрять в проектирование полузапруд некоторые расчетные приемы.

Не менее важно, чем расчеты, отчетливое представление о физической картине работы полузапруд в потоке. Общая схема обтекания потоком одиночной незатопленной полузапруды, полученная в лабораторных условиях, показана на рис. 73. Как видно из этой схемы, вся зона возмущения, создаваемая введением в поток поперечного, примыкающего к одному из берегов, сооружения, может быть разбита по длине на три основные части.

Первая часть располагается выше створа полузапруды. Здесь происходит постепенный отжим потока в сторону неперекрытой части русла. По мере приближения к полузапруде с верховой стороны поток сжимается, вследствие чего скорости течения в нем возрастают, однако это возрастание скоростей происходит неравномерно по сечению потока. В некоторых струях скорости даже уменьшаются. Вдоль струй, где скорости возрастают, падение свободной поверхности увеличивается, а в струях, вдоль которых

скорости уменьшаются, падение свободной поверхности тоже уменьшается.

В части потока, примыкающей к берегу, у которого расположена полузапруда, в результате резкого падения скоростей создается обратный уклон свободной поверхности и формируется небольшая верховая водоворотная область с обратным направлением течения вдоль берега.

Вторая, самая короткая, часть зоны возмущения находится между створом полузапруды и наиболее сжатым сечением транзитного потока (*nn*, см. рис. 73), расположенным несколько ниже (по течению) головы сооружения. В пределах этого участка заканчивается сжатие потока и происходит максимальное выравнивание скоростей по его глубине. При значительных скоростях подхода и достаточной длине сооружения ширина b_c наиболее сжатого сечения может быть существенно меньше ширины b отверстия (поперечного сечения) между головой сооружения и противоположным берегом.

Вниз от наиболее сжатого сечения простирается третья часть зоны возмущения — участок расширения потока. Между расширяющимся потоком, низовой гранью сооружения и берегом располагается обширная низовая водоворотная область.

Процесс образования этой водоворотной области сводится к следующему. Пройдя створ полузапруды, транзитный поток вступает во взаимодействие с массами воды, расположенными ниже нее. Это взаимодействие заключается в интенсивном турбулентном обмене, вследствие которого транзитный поток сообщает скорость жидкости, расположенной ниже сооружения. В результате эта жидкость начинает циркулировать и образует большую низовую водоворотную область. По мере развития турбулентного обмена транзитного потока с низовой водоворотной областью скорости в придонном слое падают более интенсивно, чем в поверхностном. Распределение осредненных скоростей в большой низовой водоворотной области изображено на рис. 74.

Максимум обратных скоростей в большой низовой водоворотной области наблюдается у берега, к которому примыкает полузапруда, и расположен на расстоянии $(0{,}5—0{,}6)L$ от створа полузапруды, где L — длина водоворотной области. Вследствие повышения уровня в струях, ближайших к берегу, по мере приближения их к корневой части полузапруды от большой водоворотной области отделяется малая низовая водоворотная область, которая не имеет большого значения в общем движении потока в районе полузапруды.

Турбулентный обмен между транзитным потоком и большой водоворотной областью происходит благодаря возникновению на границе раздела этих областей потока вихрей с вертикальной осью вращения. Вихри зарождаются в основном у головы полузапруды и сносятся далее вниз по течению, взаимодействуя с окружающей их жидкостью и между собой. Указанные вихри диффундируют (рассасываются) сравнительно медленно, вследст-

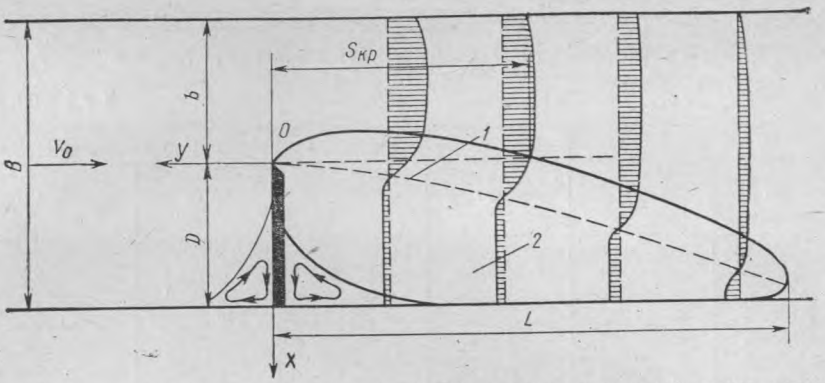


Рис. 74. Распределение осредненных поступательных скоростей ниже полузапруды:
1 — линия нулевых поступательных скоростей; *2* — большая низовая водоворотная область

вие чего скорости вращения частиц жидкости внутри них на значительном расстоянии остаются большими и вихри сохраняют значительную подъемную силу. Вихри на своем пути оставляют серию воронкообразных размывов дна, особенно вблизи головы полузапруды.

Воздействие незатопленной полузапруды на поток может быть определено, если будет известна линия раздела между транзитным потоком и водоворотной зоной. И. М. Коновалов, использовав для участка сжатия потока закономерности плоского потенциального течения идеальной жидкости, а для участка расширения — теорию движения потока реальной жидкости с переменным расходом, просуммировал оба решения и получил уравнение всей кривой растекания (линии раздела), согласующееся с экспериментальными данными. При расположении сооружения нормально к потоку и выборе начала координат в его голове (положительное направление оси x — поперек потока от головы сооружения к его корню, а оси y — навстречу течению) координаты точек кривой растекания, по Коновалову, определяются системой двух уравнений (см. рис. 74):

$$\left.\begin{aligned} x &= BK' \\ \text{и } y &= BK''. \end{aligned}\right\} \qquad (116)$$

Здесь B — полная бытовая ширина потока;
K' и K'' — соответственно безразмерные абсцисса и ордината кривой растекания потока, значения которых в зависимости от отношения ширины отверстия b к полной ширине потока B приведены в табл. 3.

Для построения кривой растекания потока за сооружением задаются значениями ее ординат, т. е. назначают точки по оси y (см. рис. 74), начиная от головы вниз по течению, с учетом их отрицательного значения. При принятом значении B получают величину $K''=y:B$. После этого для такого же отношения $b:B$

в табл. 3 против значения K'' находят величину K', а затем уже по первой из формул (116) вычисляют абсциссы x.

Таблица 3

$b:B=0{,}6$		$b:B=0{,}7$		$b:B=0{,}8$	
K'	K''	K'	K''	K'	K''
—0,0495	—0,0403	—0,0467	—0,0387	—0,0384	—0,0322
—0,0704	—0,0810	—0,0684	—0,0809	—0,0583	—0,0711
—0,1004	—0,2187	—0,0801	—0,1154	—0,0695	—0,105
—0,2025	—0,4000	—0,1017	—0,2352	—0,0925	—0,2314
—0,0945	—0,5100	—0,1042	—0,450	—0,0951	—0,478
—0,0700	—0,7147	—0,0945	—0,583	—0,0835	—0,635
—0,0598	—0,7870	—0,065	—0,830	—0,0679	—0,781
—0,0161	—1,065	—0,053	—0,9165	—0,0480	—0,932
+0,10	—1,752	00,0000	—1,254	—0,0332	—1,036
—	—	+0,0156	—2,171	—0,0103	—1,334
—	—	—	—	+0,0538	—1,588
—	—	—	—	+0,1986	—2,436
—	—	—	—	—	—

При анализе влияния полузапруды на поток представляет интерес расстояние $S_{кр}$ (см. рис. 74), на котором после сжатия и последующего расширения транзитный поток вновь приобретает ширину, равную ширине отверстия b. Это расстояние, называемое критическим, может быть выражено зависимостью

$$S_{кр}=\mu l_{п}, \qquad (117)$$

где $l_{п}$ — проекция длины сооружения на нормаль к потоку;

μ — коэффициент, зависящий от отношения $b:B$.

Значения коэффициента μ установлены с помощью уравнения кривой растекания; при величинах соотношения $b:B$, равных 0,6; 0,7; 0,8, коэффициент μ равен соответственно 2,9; 4,2; 6,3.

В последующее время вопрос об обтекании потоком одиночного поперечного сооружения получил дополнительное освещение в работе В. В. Баланина, посвященной обтеканию потоком перемычек строящихся гидроузлов, а также в исследованиях других авторов. Основные результаты этих исследований сводятся к следующему.

При прямоугольном сечении русла скорости потока имеют максимум у головы полузапруды и уменьшаются в сторону противоположного берега по параболическому закону. В сечениях русла, очерченных по параболе, максимальные скорости наблюдаются в наиболее глубокой части русла, т. е. на его оси, и постепенно уменьшаются в сторону головы полузапруды и противоположного берега примерно по эллиптической зависимости[1].

[1] В. М. Селезневым в ЛИВТе разработаны программы расчета на ЭВМ скоростных полей на участках расширения потока за незатопленной полузапрудой.

Как видно из изложенного, кинематика потока, обтекающего одиночную незатопленную полузапруду, исследована уже со значительной полнотой. Очередной задачей исследовательской работы должно быть установление связи между кинематикой потока и деформациями русла. Из имеющихся данных следует, что водоворотные зоны как низовые, так и верховая при работе полузапруды в незатопленном состоянии являются местами отложения наносов. Зона наибольших размывов начинается от головы сооружения и тянется в косом направлении вниз по течению к противоположному берегу.

При наличии нескольких полузапруд, следующих одна за другой, описанная картина обтекания потоком полузапруды несколько нарушается. Перед первой полузапрудой также образуется верховая водоворотная область. Ниже этой полузапруды картина обтекания зависит от расстояния, на котором располагаются соседние сооружения, и от величины стеснения ими потока.

Опыты показывают, что если расстояние S между полузапрудами меньше критического ($S<S_{кр}$), то транзитный поток проходит мимо их голов, не заходя в межполузапрудные промежутки (рис. 75, *а*). В последних при этом создаются замкнутые водоворотные области, охватывающие почти все межполузапрудное пространство. По мере увеличения расстояния между полузапрудами сверх критического, т. е. при $S>S_{кр}$, транзитный поток начинает заходить в межполузапрудные промежутки.

При дальнейшем увеличении расстояния между полузапрудами водоворотная область между ними деформируется и постепенно распадается на две части: на верховую водоворотную область у полузапруды, расположенной ниже, и на низовую водоворотную область у полузапруды, расположенной выше. При еще большем расстоянии между полузапрудами, когда $S \gg S_{кр}$, водоворотные области разобщаются и между ними образуется учас-

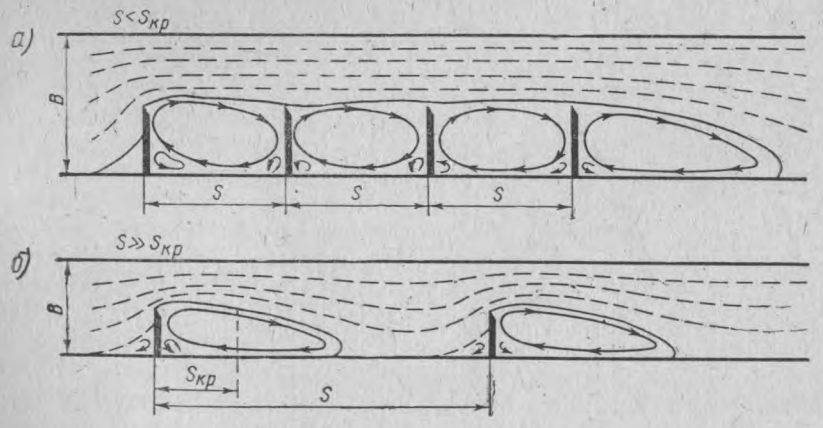


Рис. 75. Схема обтекания потоком системы полузапруд

ток, занятый транзитным потоком (рис. 75, *б*). Дальнейшее увеличение расстояния S приводит к тому, что скорости транзитного потока в поперечном сечении между полузапрудами выравниваются и взаимное влияние полузапруд прекращается.

При расположении полузапруд одна за другой на расстоянии, составляющем одну-две длины полузапруды, сжатие потока между ними, аналогичное сжатию при обтекании одиночного сооружения, наблюдается лишь близ головы верхней полузапруды. Дальше линия раздела между транзитным потоком и водоворотными областями межполузапрудных промежутков проходит параллельно берегу, касаясь голов сооружений.

В опытах Н. А. Задорожченко на размываемой модели изменялись расстояния между незатопленными полузапрудами и высота уровней, при этом наблюдались неодинаковые деформации дна в зоне расположения сооружений. При низких уровнях у головы каждого из сооружений формировалась ограниченная зона размыва в виде овального углубления дна, несколько смещенного относительно головы вниз по течению (рис. 76, *а*). Вымытый грунт откладывался непосредственно ниже вымоины, образуя вал, вытянутый в косом направлении вниз по течению. Этот вал отделял друг от друга зоны размыва, примыкающие к головам сооружений. С повышением уровней до гребней сооружений зоны размыва соединялись в одну общую полосу, протягивающуюся вдоль линии раздела между транзитным потоком и водоворотными областями (рис. 76, *б*). Часть размытого при этом грунта откладывалась в межполузапрудном промежутке с верховой стороны голов сооружений.

Натурные наблюдения над работой систем полузапруд подтверждают правильность картины, полученной в результате лабораторных исследований. Так, на выправленном участке р. Немана скорости течения у голов полузапруд на 5—10% превосходят величины скоростей в средней части потока. В начальный же период работы сооружений, когда дно не было размыто, раз-

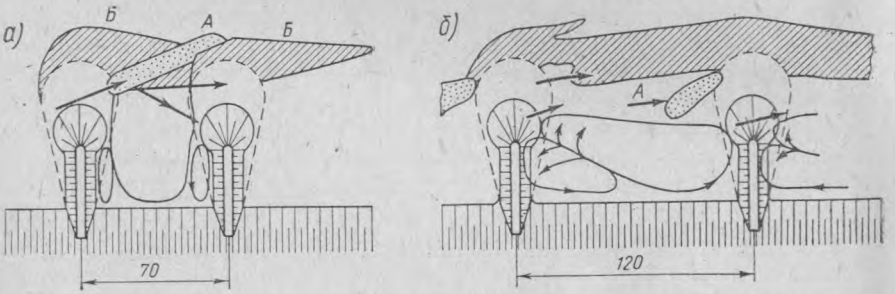


Рис. 76. Схемы размывов (*Б*) и отложений (*А*) у незатопленных полузапруд и планы движения водных струй при уровнях:
а — низком и *б* — более высоком

ница в скоростях была, несомненно, еще больше. В межполузапрудных пространствах скорости циркуляционных течений по абсолютной величине в 2—3 раза меньше, чем у голов сооружений. Вдоль всей линии, соединяющей головы сооружений, протягивается полоса повышенных глубин, а у голов встречаются глубокие вымоины.

Глубокие вымоины встречаются чаще всего у голов полузапруд, расположенных на вогнутых берегах, при повышенных расстояниях между ними. Межполузапрудные пространства у вогнутых берегов р. Немана заилены только частично. Попытки уложить в них грунт успехом не увенчались: во всех случаях он довольно быстро вымывался. Межполузапрудные пространства у выпуклых берегов, напротив, были полностью занесены и сами сооружения скрыты в песках.

Внешняя картина обтекания потоком затопленных полузапруд, как установлено исследованиями, имеет следующий вид. При подъеме уровня выше гребня полузапруд начинается перелив воды через них и уже в начале перелива исчезают водоворотные области, наблюдавшиеся в межполузапрудных промежутках при работе полузапруд в незатопленном состоянии. Вдоль низового откоса полузапруды образуется донный валец с горизонтальной осью вращения, который создает винтовое движение жидкости вдоль ее откоса по направлению от головы к берегу — при расположении полузапруд с наклоном навстречу потоку и от берега к голове — при расположении их с наклоном по течению. Вдоль низовых откосов полузапруд, следующих за головной (первой сверху), также образуются донные вальцы, но с меньшей интенсивностью, чем у головной. В результате работы вальца с низовой стороны полузапруды образуется вымоина.

Влияние на работу затопленных полузапруд угла их наклона к течению подробно освещено в опытах А. И. Лосиевского, проведенных на жесткой модели прямоугольного поперечного сечения при расположении полузапруд: нормально к течению (рис. 77, *а*), с наклоном против течения (рис. 77, *б*) и с наклоном по течению. Полоса русла, занятая сооружениями, была принята равной $^2/_5$ ширины русла, а расстояние между сооружениями и берегом — $^3/_5$ ширины русла. Гребни полузапруд были выполнены горизонтальными. Сооружения испытывались при каждом расположении их относительно направления течения как в незатопленном, так и затопленном состоянии.

В описываемых опытах при изучении работы полузапруд рассматривались: а) действие сооружений по защите судового хода от транзитных наносов, для чего наносы закладывались выше сооружений, в зоне *А*; б) действие сооружений по самостоятельному углублению переката, для чего наносы закладывались равномерно на судовом ходу против сооружений, в зоне *В*. Опыты показали, что при работе незатопленных полузапруд на транзит наносов и размыв русла во всех трех случаях наклона их осей к потоку действие сооружений было почти одинаковым: дости-

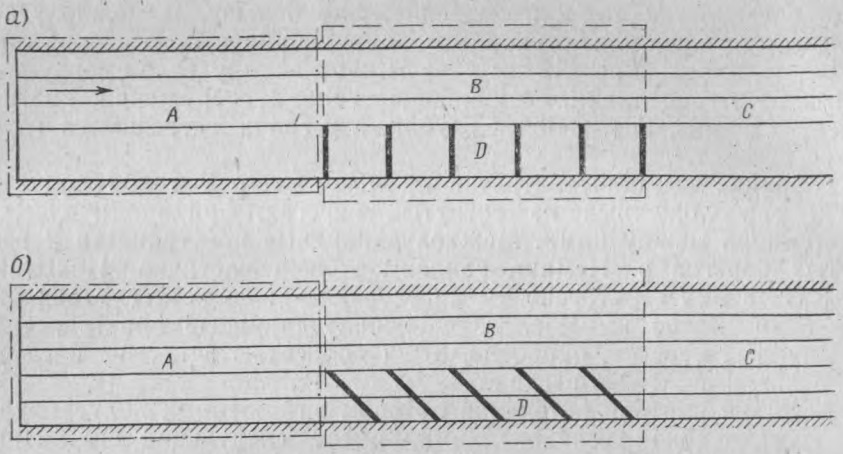


Рис. 77. Схема испытания полузапруд при расположении их: *а* — нормально к течению и *б* — против течения

галась полная чистота судового хода и некоторое количество наносов откладывалось в межполузапрудных промежутках.

При работе в затопленном состоянии, на глубине, в 5 раз большей, чем высота полузапруд, результаты перемещения транзитных наносов оказались совершенно различными. У сооружений с осями, нормальными к направлению потока, полная чистота судового хода достигнута не была, а в межполузапрудных пространствах (зона *D*) отложилось небольшое количество наносов. У сооружений, наклоненных вниз по течению (угол наклона 45°), результаты были еще хуже: значительная часть наносов осела на судовом ходу, межполузапрудные промежутки остались чистыми. Наилучшую работу показали сооружения, наклоненные против течения (угол наклона 45°): судовой ход оказался совершенно чистым от транзитных наносов, в межполузапрудных промежутках отложилось значительное количество наносов, остальные были вынесены за пределы системы сооружений — в зону *C*.

Рассматриваемые опыты позволили установить причину столь различной работы затопленных полузапруд при разных углах их наклона к потоку. Причина состоит в том, что струи, сходящие с гребня сооружений, направлены нормально к нему, следовательно, сооружения, направленные навстречу потоку, отклоняют поверхностные струи на судовой ход и вызывают компенсирующие их донные токи в межполузапрудные промежутки (рис. 78). Сооружения с наклоном по течению, работающие наихудшим образом, заставляют отклоняться поверхностные струи в межполузапрудные промежутки и вызывают отток донных струй из них на судовой ход.

Эти выводы лабораторных исследований полностью подтверждаются данными практики. Отрицательной стороной работы полу-

запруд, имеющих наклон против течения, является то, что, работая в незатопленном состоянии, они вызывают наиболее резкое сжатие потока. У голов сооружений при этом наблюдаются высокие скорости и идет интенсивное вихреобразование, приводящее к глубоким размывам дна.

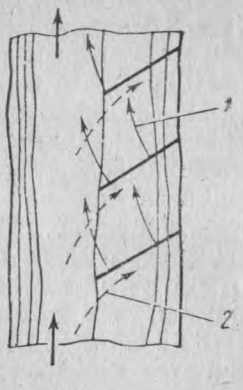


Рис. 78. Схема работы затопленных полузапруд с наклоном против течения:
1 — поверхностные струи;
2 — донные токи

Для дополнительного освещения действия затопленных полузапруд в потоке Ф. М. Чернышовым, В. М. Селезневым и др. в ЛИВТе были выполнены лабораторные исследования их работы в широком лотке. Основная цель эксперимента заключалась в оценке влияния работы затопленных полузапруд на перераспределение расхода воды по ширине русла в зависимости от: 1) степени стеснения потока ($m=l_п:B-0{,}2\div0{,}6$); 2) числа сооружений ($1\div5$); 3) расстояния между ними $S=(0\div3)l_п$; 4) формы поперечного сечения лотка (прямоугольное и трапецеидальное); 5) скоростей движения потока ($v=0{,}1\div0{,}2$ м/с); 6) отношения $K_{сл}$ различных толщин слоя $t_{сл}$ переливающейся через полузапруду воды к высоте $h_с$ полузапруды ($K_{сл}=t_{сл}:h_с=0{,}5\div3{,}0$). Кроме того, исследовался вопрос о возможности постройки облегченной конструкции сооружений, следующих за головной полузапрудой, и др.

Параметром, характеризующим работу затопленных полузапруд по перераспределению расхода поперек русла, служило отношение $K_{св}$ расходов воды в свободной от сооружений части русла (т. е. на трассе) при наличии полузапруд $Q_{св}$ и при их отсутствии $Q_{св.б}$ ($K_{св}=Q_{св}:Q_{св.б}$), которое больше 1.

Исследования состояли в измерении глубин и скоростей в ряде поперечных сечений. Анализ данных этих исследований показал, что с увеличением степени стеснения m потока сооружениями эффект перераспределения расхода воды по ширине русла увеличивается, т. е. $K_{св}$ возрастает. Для одной и той же степени стеснения потока значения $K_{св}$ увеличиваются с увеличением числа сооружений на одном и том же участке реки или с уменьшением расстояния между сооружениями. Кроме того, величина $K_{св}$ увеличивается при уменьшении толщины переливающегося через сооружение слоя воды.

Для системы полузапруд значения $K_{св}$ растут непрерывно по длине участка, застроенного сооружениями; в случае же единичной полузапруды значения $K_{св}$ сначала несколько увеличиваются, а затем, после прохождения потоком сжатого сечения, уменьшаются.

На рис. 79 приводится полученный в результате опытов график связи между отношениями $K_{св}$ и $K_{сл}$, т. е. зависимость вида $K_{св}=K_{св}\ (K_{сл})$ при разных значениях m и S. Этот график пока-

зывает, что с увеличением $K_{сл}$ величина $K_{св}$ резко падает и при $K_{сл}=3{,}0$ практически $K_{св}=1{,}0$, т. е. полузапруды уже не перераспределяют расход по ширине русла.

Полученные кривые зависимости $K_{св}=K_{св}\ (K_{сл})$ могут служить некоторым критерием, определяющим момент начала работы полузапруд по перераспределению расхода поперек русла, а также позволяют определить степень этого перераспределения $K_{св}$ при известной величине относительной толщины слоя воды $K_{сл}$. Если, например, считать, что работа полузапруд по перераспределению расхода по ширине русла делается заметной при значении $K_{св}=1{,}1$, то из графика (см. рис. 79) видно, что заметная работа полузапруд в потоке начинается для степеней стеснения потока $m=0{,}2\div0{,}4$ при $K_{сл}=1{,}0\div1{,}5$ и для $m=0{,}6$ при $K_{сл}=2{,}5\div3{,}0$. При этом нижнее значение величины $K_{сл}$ отвечает работе одиночной полузапруды, а верхнее — работе системы полузапруд.

Соотношения между величинами $K_{св}$ и $K_{сл}$, полученные при исследовании в лотке трапецеидального сечения, мало отличаются от соотношений, полученных в лотке прямоугольного сечения. Заметим, что степень стеснения m потока в русле трапецеидального сечения должна подсчитываться по зависимости $m=\omega_п:\omega_г$, где $\omega_п$ — часть площади живого сечения, перекрытая полузапрудами, а $\omega_г=\omega_п+\omega_{св}$ — полная площадь живого сечения на уровне гребня полузапруд (рис. 80).

Выполненные в ЛИВТе лабораторные исследования позволили также выявить разную роль головных и последующих полузапруд в их системе. Основное влияние на поток оказывают первые сверху (одно-два) сооружения. Роль остальных сооружений в «гребенке» — вспомогательная; они по-

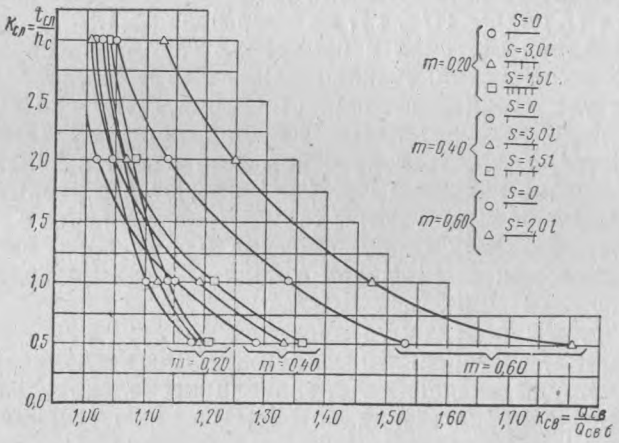


Рис. 79. График зависимости $K_{св}=K_{св}\ (K_{сл}\ ;\ S;\ m)$, лоток прямоугольного сечения (рядом с обозначениями опытных точек схематически показана отвечающая им расстановка сооружений)

зволяют поддержать перераспределение расхода, достигнутое головными сооружениями. Отсюда, в частности, следует вывод о возможности облегчения конструкций последующих сооружений по сравнению с головными. Это, впрочем, известно и из опыта выправительных работ.

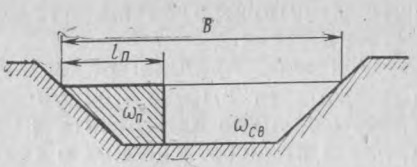


Рис. 80. Схема к вычислению коэффициента m при трапецеидальном поперечном сечении

Другой принципиально важный вывод из проведенных лабораторных исследований состоит в том, что можно изменять расстояние между сооружениями в относительно широких границах, при этом распределение расхода по ширине русла существенно не меняется. Это значит, что в отношении перераспределения расхода между свободной и перекрытой частями русла высота сооружений является гораздо более действенным фактором, чем расстояние между ними. Экстраполировать это положение за пределы соотношений, освещенных в опытах $0 \leqslant S : l_п \leqslant 3$, разумеется, нельзя. Однако возможность устанавливать на прямолинейных участках русла полузапруды на расстоянии порядка $(2—3) l_п$ одно от другого (что на практике редко встречается) выявилась в опытах с большой определенностью.

Опыты не выявили заметного влияния на распределение расхода по ширине русла расположения полузапруд относительно направления потока. Как и более ранние исследования, опыты показали, что от угла, образуемого сооружением с потоком, зависит величина расхождения между поверхностными и донными струями. Различие между направлением поверхностных и донных струй тем больше, чем положе направлена ось сооружений и чем меньше толщина переливающегося слоя. При этом было установлено, что малые отклонения оси сооружений от нормали к потоку (т. е. углы $\alpha = 85—75°$) не вызывают заметного расслоения потока и поэтому мало эффективны. Заметное расслоение потока происходит лишь при угле $\alpha \leqslant 60°$.

§ 39. РАСЧЕТ ПОЛУЗАПРУД

Длина полузапруд определяется по известным ширине трассы $B_т$ и углу α между осью сооружений и осью трассы (о чем уже сказано в предыдущем параграфе). Здесь рассмотрим схему расчета второй важнейшей характеристики системы полузапруд — высоты сооружений или отметки их гребней. При этом необходимо иметь в виду, что расчеты ширины трассы в том или ином виде уже давно применяются в практике проектирования, способы же расчета высоты меженных полузапруд — сравнительно недавно, а расчет высоты полузапруд весеннего действия еще не разработан. В связи с этим сначала изложим расчет полузапруд межен-

ного действия, а затем — подход к проверке полузапруд весеннего действия.

Основной принцип определения высоты полузапруд состоит в том, что эта высота при установленной ширине выправительной трассы должна обеспечить на трассе в течение годового цикла транзит наносов. Так как в сформулированном виде этот принцип носит слишком общий характер и прямое применение его к расчетам затруднительно, то ставится более определенное и конкретное требование, а именно: обеспечение транзита наносов на трассе при руслоформирующем расходе.

Выставленное требование позволяет определить расчетный уровень, исходя из которого и выбирается высота полузапруд. Таким расчетным уровнем на водомерном посту является уровень $H_р$ руслоформирующего расхода, а на месте возведения полузапруд — соответствующий ему уровень $z_р$*. Как уже отмечалось, в большинстве случаев наблюдаются два максимума величины $Q_{d2}I$: один — примерно соответствующий уровню бровок меженного русла (началу выхода реки на пойму), другой, более низкий, — примерно соответствующий середине интервала уровней между отметками поймы и побочней. У разных рек однако высотное положение обоих максимумов, а также соотношение их величин может изменяться в довольно широких пределах.

Полузапруды меженного действия рассчитываются по меженному руслоформирующему расходу, т. е. по нижнему максимуму величины $Q_р^2 I$. В тех случаях, когда нижний максимум слабо выражен или отсутствует совсем, в качестве расчетного расхода принимают эквивалентный расход $Q_э$, определяемый по формуле (114), и соответствующий ему расчетный уровень. Для рек с тяжелым весенним ледоходом высота меженных полузапруд, подсчитанная на основе руслоформирующего расхода, проверяется и, если нужно, корректируется по условиям пропуска ледохода или гребень их укрепляется.

Наибольшие трудности в расчете высоты полузапруд вызываются тем, что необходимо знать величину транзитного твердого расхода, который отвечает расчетному расходу воды. Однако учитывая, что натурные данные о твердых расходах часто весьма ограничены, способы теоретического расчета твердых расходов неточны, а связь между твердыми и жидкими расходами неоднозначна, приходится идти на упрощение расчетной схемы.

Это упрощение состоит в том, что вместо требования обеспечить при расчетном расходе определенную транспортирующую способность потока, ставится требование обеспечить при этом расходе на перекатных участках выправительной трассы определенный минимум скорости течения. Поскольку необходимо, чтобы на спаде паводка гребни всех перекатов размыва-

---

* Перенос высоты уровней H с водомерного поста на выправляемый участок производится по графикам связи уровней или по интерполяции с замыкающих участок водомерных постов.

лись, то таким минимумом является «размывающая» скорость $v_{разм}$, при которой начинается массовое движение донных наносов. Согласно эмпирическому соотношению Г. И. Шамова, эта скорость примерно на 30% превосходит величину «неразмывающей» скорости $v_{нр}$, т. е. $v_{разм}=1{,}3v_{нр}$.

Для определения величины неразмывающей скорости имеется ряд эмпирических и полуэмпирических формул. Например, для частиц гравия крупностью более 1,5 мм можно пользоваться полуэмпирической формулой И. И. Леви, приведенной в гл. II. Для частиц песка и гравия во всем диапазоне их крупностей применима эмпирическая формула В. Н. Гончарова, тоже приведенная в гл. II, которую для конкретных расчетов запишем в следующем виде:

$$v_{нр}=3{,}0\left(T_{сх}\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2}(d_{50}+0{,}0014)^{0,3}. \qquad (118)$$

Глубину T_c^x, входящую в формулу (118), берут равной наибольшей бытовой глубине на судовом ходу переката при расчетном уровне, средний диаметр частиц грунта подставляется в метрах. Определяемая по формуле (118) величина $v_{нр}$ является средней скоростью по вертикали.

Установив величину «размывающей» скорости на судовом ходу, определяют отвечающую ей среднюю скорость в живом сечении, свободном от полузапруд. Для этого можно использовать следующие ориентировочные соотношения, применяемые в гидрометрии: а) отношение средней скорости на вертикали к максимальной (поверхностной) на вертикали: $v_{ср}:v_{max}\approx 0{,}85$; б) отношение средней скорости в живом сечении к максимальной в живом сечении: $v:v_{max}=0{,}7$. В соответствии с этим от средней скорости по вертикали $v_{ср}$, расположенной на оси судового хода, можно перейти к средней скорости v в живом сечении:

$$v=0{,}7v_{max}=0{,}7\frac{v_{ср}}{0{,}85}=0{,}84v_{ср}\approx 0{,}8v_{разм}. \qquad (119)$$

При переходе от v к $v_{разм}$ пренебрегаем различием между средней по вертикали скоростью на оси судового хода и средней скоростью в пределах ширины судового хода.

Этой формулой определяется величина средней скорости в свободном от полузапруд живом сечении, при которой на судовом ходу будет обеспечена размывающая скорость $v_{разм}$. Однако по мере размыва русла и увеличения его живого сечения скорости в нем падают и могут достигнуть величины неразмывающей скорости раньше, чем будет получено необходимое углубление переката. Учет указанного обстоятельства требует введения в расчет коэффициента запаса $K_{зап}$, который должен учесть также и изменение в процессе размыва крупности частиц поверхностного слоя грунта.

Коэффициент запаса для различных рек и их участков должен быть различным. Ориентировочно для средних условий его можно принимать в пределах 1,2—1,3. Умножая на коэффициент запаса

правую часть равенства (119), получим формулу для определения расчетной величины скорости течения $v_р$ в свободной части русла, т. е. в пределах выправительной трассы,

$$v_р = 0{,}8 K_{зап} v_{разм}. \qquad (120)$$

Высота полузапруд выбирается такой, чтобы при прохождении в реке расчетного расхода на перекатных участках выправительной трассы была обеспечена скорость $v_р$. Ход расчета при этом сводится к следующему.

С помощью графиков $Q^2 pI \approx f(Q)$ или $Q^2 = \varphi(t)$ находят меженный руслоформирующий расход $Q_р$ для данного участка реки. По кривой расходов $Q = Q(H)$, отнесенной к опорному водомерному посту, находится уровень $H_р$, отвечающий этому (руслоформирующему) расходу $Q_р$, и определяется разность между расчетным уровнем и проектным уровнем путевых работ: $H_р - H_п$. Эта разность определяется по тем же двум водомерным постам, по которым вычислялся продольный уклон при определении руслоформирующего расхода. Для отдельных сечений выправляемого участка величина разности уровней $z_р - z_п$ находится интерполяцией между значениями этой разности на водомерных постах.

На участке, где проектируется система полузапруд, строится при уровне $z_р$ план течений для бытового состояния русла и на этот план наносятся границы установленной выправительной трассы (рис. 81), а на основании предварительных соображений — оси верхней и нижней полузапруд или расположение всех сооружений. Окончательное количество и расположение сооружений можно установить на последующей стадии проектирования.

С помощью построенного плана течений для расчетного сечения, проведенного примерно в середине проектируемой системы полузапруд, устанавливается величина расхода $Q_{св.б}$, проходящего при бытовом режиме в неперекрытой части русла (на рис. 81 — вся часть русла, расположенная между кромкой трассы $АБ$ и урезом противоположного левого берега). Определение $Q_{св.б}$ далее показано на рис. 82.

В этом же расчетном сечении при уровне $z_р$ находится площадь неперекрытой части живого сечения при бытовом состоянии русла, а по глубине на оси судового хода находится с помощью формулы (118) величина неразмывающей скорости $v_{нр}$, а затем и размывающей скорости $v_{разм}$, после чего по формуле (120) определяется величина расчетной скорости $v_р$. Умножением величины расчетной скорости $v_р$ на свободную от сооружений площадь $\omega_{св}$ находится значение расхода, необходимого для размыва вала переката $Q_{св} = v_р \omega_{св}$, и определяется отношение $K_{св} \approx Q_{св} : Q_{св.б}$.

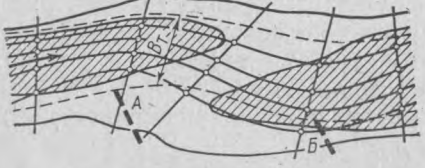


Рис. 81. План течения при бытовом состоянии русла и предварительное расположение полузапруд

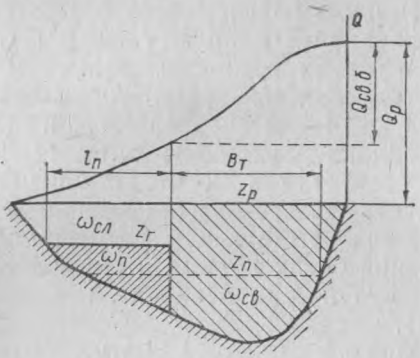


Рис. 82. Расчетный поперечник для полузапруды

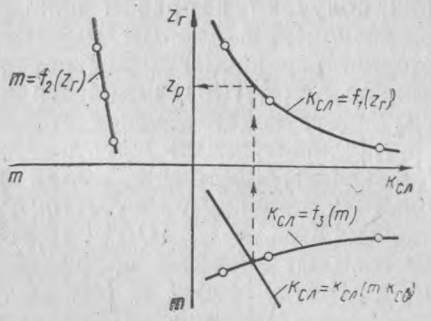


Рис. 83. Графическое определение отметки гребня полузапруды

Заметим, что пользование в описанном расчете бытовыми размерами живых сечений представляет собой условность. Оправданием этой условности служит трудность надежного расчета русловых деформаций, а также то обстоятельство, что поперечные размеры неперекрытой части русла влияют и на величину $Q_{св.б}$ и на величину $Q_{св}$ в одном и том же направлении, ввиду чего можно полагать, что их влияние на отношение $Q_{св} : Q_{св.б}$ должно быть незначительным.

После того как потребная величина $K_{св}$ при уровне $z_р$ установлена, переходят к расчету высоты полузапруды, точнее, отметки ее гребня $z_г$. Для этого на построенный расчетный поперечник наносят проектный уровень путевых работ $z_п$ и расчетный уровень $z_р$. Двумя вертикальными линиями показывают на поперечнике границы выправительной трассы (рис. 82), ширина которой определена ранее при проектном уровне путевых работ. Дальнейший расчет можно выполнять графо-аналитическим способом.

Подготовительная работа состоит в том, что, задавшись тремя-четырьмя произвольными значениями отметки гребня полузапруды $z_г$, находящимися в промежутке между уровнями $z_п$ и $z_р$, и предположив гребень полузапруды горизонтальным, вычисляют следующие, отвечающие взятым значениям $z_г$, величины: $\omega_г$ — полную площадь живого сечения до уровня гребня полузапруды, $\omega_п$ — часть площади живого сечения, перекрываемую полузапрудой, $\omega_{сл}$ — часть площади живого сечения, расположенную над гребнем полузапруды до расчетного уровня. Далее подсчитывают коэффициенты $K_{сл}=\omega_{сл} : \omega_п$ и $m=\omega_п : \omega_г$, причем $K_{сл}$ характеризует степень затопления полузапруды, а m — степень стеснения потока полузапрудами.

На основании сделанных подсчетов в правом и левом верхних квадрантах графика, показанного на рис. 83, строят кривые

$K_{сл}=f_1(z_г)$ и $m=f_2(z_г)$ и путем обычного графического построения получают в правом нижнем квадранте кривую $K_{сл}=f_3(m)$, отвечающую заданным значениям отметки гребня полузапруды. Можно ограничиться построением одной лишь результирующей кривой $K_{сл}=f_3(m)$, используя для этого пары значений $K_{сл}$ и m, соответствующие одной и той же заданной величине $z_г$.

Заключительный этап расчета состоит в том, что с кривой $K_{сл}=f_3(m)$, построенной для расчетного сечения, совмещается опытная кривая $K_{сл}=K_{сл}(m;K_{св})$, соответствующая потребному значению $K_{св}=Q_{св}:Q_{св.б}$. Пересечение обеих кривых и определяет искомые значения коэффициентов m и $K_{сл}$, а значит, и искомую отметку гребня $z_г$ (см. рис. 83).

В качестве опытных кривых $K_{сл}=K_{сл}(m;K_{св})$ могут быть использованы кривые, построенные на основании экспериментов в большом лотке гидротехнической лаборатории ЛИВТа. Эти кривые приведены на рис. 84 и 85 соответственно для случаев: 1) когда расстояние между сооружениями $S=3l_п$, причем величина $K_{св}$ относится к створу верховой полузапруды, и 2) когда расстояния $S=3l_п$ и $S=1{,}5l_п$, причем величина $K_{св}$ относится к створу низовой полузапруды. Как видно из этих рисунков и как это уже отмечалось, влияние отношения $S:l_п$ на величину $K_{св}$ невелико, поэтому при расчете высоты полузапруд можно принимать некоторое предварительное значение этого отношения в пределах от 1,5 до 3,0.

Рассмотренный способ расчета отметки гребня меженной полузапруды предполагает ее расположение под углом $\alpha=90°$ к направлению течения и с отклонениями от этого угла на 10—15°. При бо́льшем отклонении от 90° угла наклона полузапруды к течению расчет отметки ее гребня можно выполнять по экспериментальному графику НИИВТа (рис. 86). На этом графике дана зависимость при разных углах α отношения $Q_{сл}:Q_р$ от отноше-

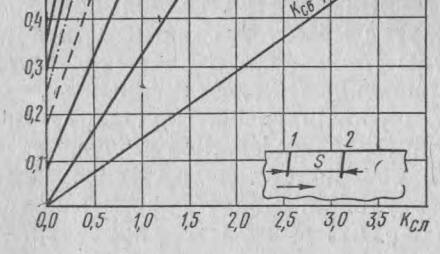


Рис. 84. Экспериментальный график $K_{сл}=K_{сл}(m;K_{св})$ для створа *1* при $S=3l_п$

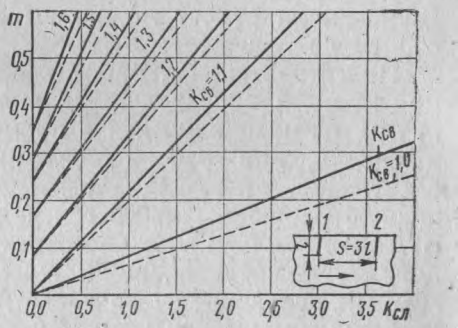


Рис. 85. Экспериментальный график $K_{сл}=K_{сл}(m;K_{св})$ для створа *2* при $S=3l_п$ (сплошные линии) и $S=1{,}5l_п$ (пунктирные)

ния $\omega_{сл}:(\omega-\omega_п)=A$. Здесь $Q_р$ — общий расход воды при расчетном уровне; $Q_{сл}$ — расход воды, сливающийся через гребень полузапруды; $Q_{сл}=Q_р-Q_{св}$, $\omega_{сл}$ и $\omega_п$ — проекции на живое сечение соответственно площади потока, сливающегося через гребень полузапруды, и площади полузапруды; ω — полная площадь живого сечения; $\omega=\omega_{св}+\omega_п+\omega_{сл}$ (см. рис. 86).

Если в равенство $\omega_{сл}:(\omega-\omega_п)=A$ вместо площади ω подставить ее слагаемые $\omega_{сл}+\omega_п+\omega_{св}$, затем сократить площадь $\omega_п$, то для площади $\omega_{сл}$, определяющей отметку гребня полузапруды, получим зависимость

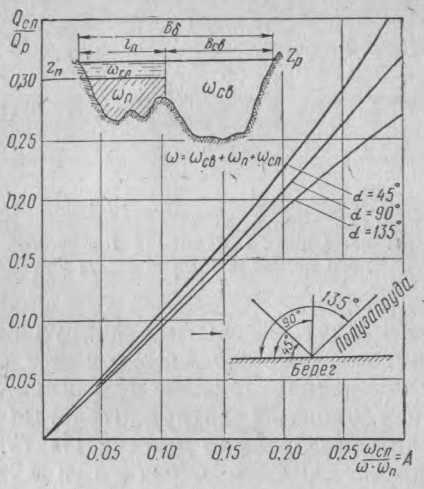


Рис. 86. График зависимости $Q_{сл}:Q_р=f(A;\ \alpha)$

$$\omega_{сл}=\frac{\omega_{св}A}{1-A}\ . \qquad (121)$$

Расчет отметки гребня полузапруды с использованием экспериментального графика НИИВТа и последней зависимости для $\omega_{сл}$ ведется в следующем порядке. Сначала строится, как и в предыдущем способе, при расчетном уровне живое сечение для полузапруды; определяется свободная от полузапруды площадь $\omega_{св}$ и потребный расход на ней $Q_{св}$. Затем: а) подсчитывается расход воды $Q_{сл}=Q_р-Q_{св}$; б) определяется отношение $Q_{сл}:Q_р$; в) находится по графику при известном угле α необходимая величина отношения $\omega_{сл}:(\omega-\omega_п)=A$; г) определяется по зависимости (121) потребная величина площади слива $\omega_{сл}$ и д) находится отметка гребня $z_г$ полузапруды по формуле

$$z_г=z_р-\frac{\omega_{сл}}{l_п}\ . \qquad (122)$$

В этой формуле все обозначения известны.

Полученную в итоге расчетов отметку гребня полузапруды рассматривают как среднюю вдоль оси сооружения. Так как гребням полузапруд придается уклон от берега к стержню потока, голова сооружения будет иметь отметку меньшую, а корень — бóльшую, чем $z_г$. Для построения окончательного продольного профиля сооружения принимают по данным практики величину продольного уклона гребня и затем подбором на поперечном сечении находят такую отметку головы, при которой площадь, занимаемая сооружением с наклонным гребнем, несколько больше площади сооружения с горизонтальным гребнем на отметке $z_г$

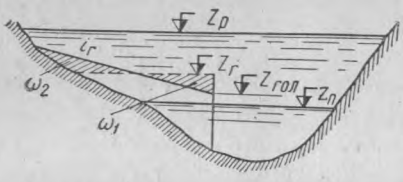


Рис. 87. Схема построения продольного профиля полузапруды

(рис. 87). Для этого на рис. 87 надо иметь заштрихованные площади $\omega_2 > \omega_1$. При этом, варьируя величиной уклона гребня, следят, чтобы отметка головы сооружения не оказалась ниже проектного уровня. Рекомендуется подбирать продольный уклон полузапруд подобным поперечному уклону побочней, находящихся в аналогичных условиях.

Расчет высоты полузапруд по примерно среднему между ними живому сечению можно вести только на отдельных перекатах и для предварительных прикидок. При проектировании же коренного улучшения затруднительных участков с несколькими перекатами необходимо рассчитывать высоту каждой полузапруды по длине каждого переката и затруднительного участка в целом. Если в результате такого дифференцированного расчета получатся отметки гребней полузапруд по длине отдельных перекатов или на всем участке близкими друг к другу, то среднее их значение принимают за отметку для всех гребней полузапруд соответственно на отдельных перекатах или по всему участку. Если же полученные расчетом отметки гребней полузапруд существенно отличаются друг от друга по длине каждого переката или по длине участка в целом, то эти разные расчетные отметки и принимают за отметки гребней соответствующих полузапруд.

В некоторых случаях отметки полузапруд, расположенных на подходе к гребню переката, получаются ниже, чем у полузапруд на гребне переката. Такие отметки меженных полузапруд целесообразны, так как по мере приближения к гребню переката последующие полузапруды будут усиливать работу предыдущих, обеспечивая размыв дна на судовом ходу. В конце переката воздействие полузапруд на поток ослабляется, создавая обычный переход к нижней плесовой лощине. В этом случае полузапруды создают как бы искусственный побочень с повышенными отметками в средней части, что должно благоприятно сказаться на углублении судового хода на перекате.

На реках с тяжелым весенним ледоходом гребень меженных сооружений должен располагаться ниже низкого уровня ледохода $z_{лдх}$ на величину, не меньшую средней толщины h льда:

$$z_г(D) \leqslant z_{лдх} - h_л. \qquad (123)$$

Для определения расчетного низкого уровня ледохода строят за многолетний период кривую обеспеченности ежегодных минимальных уровней ледохода и за расчетный принимают уровень с обеспеченностью 90%.

При проектировании меженных полузапруд может оказаться, что отметка гребня, подсчитанная из условия обеспечения на трассе размывающей скорости, не будет удовлетворять условию (123),

и тогда придется уменьшить высоту сооружений. При этом потребуется уменьшить и ширину выправительной трассы, т. е. увеличить длину полузапруд, чтобы обеспечить на трассе расчетные скорости $v_р$.

В тех случаях, когда целесообразно сохранить расчетную отметку гребня меженной полузапруды и не выполнять условие (123) для пропуска ледохода, необходимо укрепить полузапруду для защиты от ледохода или обеспечивать своевременный ремонт после повреждения ледоходом.

Для расчета расстояния S между полузапрудами пока не имеется достаточно надежного способа, поэтому его назначают преимущественно по данным практики, но сопоставляют и с результатами расчета. Расстояние между незатопленными полузапрудами можно определять по кривой растекания в зависимости от их назначения. Для полузапруд, направляющих поток на углубление судового хода, это расстояние не должно быть больше критического ($S \leqslant S_{кр}$), при котором кривая растекания не заходит в межполузапрудные промежутки, а только касается голов полузапруд. При соблюдении этого условия и обычно встречающихся степенях стеснения потока получим расстояние между полузапрудами $S \leqslant (3—5) l_п$.

Гидравлический эффект от работы системы затопленных полузапруд приближенно можно свести к плоской задаче перераспределения по ширине русла средних скоростей на вертикалях. Нетрудно также приближенно установить связь между изменением скоростей в перекрываемой части русла и основными элементами системы полузапруд — их высотой и частотой расположения. Исходя из этого, А. И. Победоносцев предложил расстояние между затопленными полузапрудами ориентировочно определять при расчетном уровне по зависимости

$$S = h_с \frac{C^2 \zeta}{K^2_{пер} - 1}, \qquad (124)$$

где $h_с$ — высота полузапруд; C — коэффициент Шези для перекрываемой сооружениями части бытового русла, определяемый по Маннингу; ζ — коэффициент сопротивления полузапруд движению потока (берется по графику, показанному на рис. 88, где β — угол наклона передней грани); $K_{пер}$ — коэффициент для перекрываемой части русла, зависящий от отношения в ней средней бытовой скорости потока к средней скорости при наличии полузапруд высотой $h_с$ (берется по графику на рис. 89, где он дан в зависимости от $K_{сл}$ и m).

Практика возведения меженных полузапруд рекомендует расстояния между ними принимать исходя из их работы в затопленном состоянии, следующими: на прямолинейных участках $S = (2—3) l_п$; у выпуклых берегов $S = (3—4) l_п$, у вогнутых $S = (1—2) l_п$. Этими данными практики пользуются обычно при первоначальном расположении полузапруд и для предварительных расчетов, а затем стремятся подтвердить их расчетом.

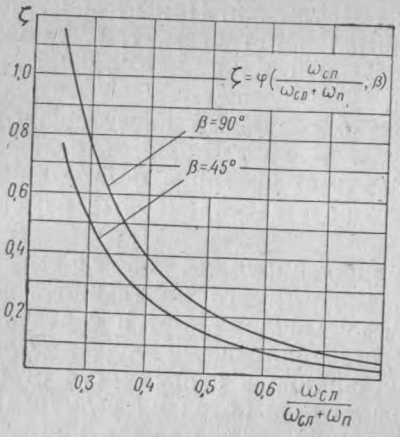


Рис. 88. График зависимости

$$\zeta = \varphi\left(\frac{\omega_{сл}}{\omega_{сл}+\omega_{п}}, \beta\right)$$

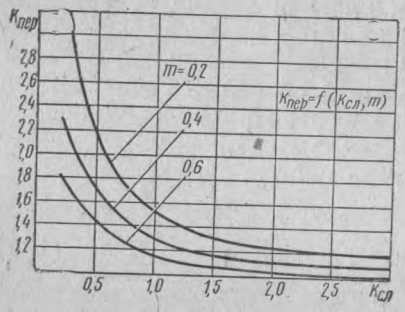


Рис. 89. График зависимости $K_{пер} = f(K_{сл}, m)$

Способ расчета полузапруд весеннего действия (высоких) пока не разработан. Применение высоких полузапруд, вероятно, не потребует пересмотра расчета выправительной трассы, но для определения высоты таких сооружений и расстояния между ними потребуется, видимо, несколько другой подход, чем при расчете меженных сооружений. Расчет высоких полузапруд придется вести не менее чем при двух уровнях: 1) при уровне выхода потока на пойму (вровень с меженными бровками) и 2) при среднем наполнении русла, т. е. при уровне, среднем между уровнем выхода на пойму и проектным.

Проверку запроектированных высоких полузапруд до разработки способа их расчета можно выполнять по величинам скоростей течения. При этом для двух указанных уровней средние скорости в створах сооружений при стесненном состоянии не должны превосходить бытовые средние скорости более чем на 10—15%; в противном случае возможны ненужные сильные размывы русла. Надо иметь в виду, что средние скорости в свободной части сечения возрастают сильнее, чем средние скорости по всему затопленному сечению.

§ 40. РАБОТА ЗАПРУДЫ В РАЗВЕТВЛЕНИИ РУСЛА И ВЫБОР СТВОРА ДЛЯ НЕЕ

Цель устройства запруд в несудоходных рукавах речного русла — перераспределение расходов воды в пользу судоходных рукавов. В большинстве случаев запруды, как и полузапруды, являются сооружениями меженного действия (т. е. активно регулируют поток в конце спада паводка и в межень). Отсюда, устройство запруд направлено обычно на увеличение меженных расходов в судоходных рукавах для усиле-

ния размыва гребней расположенных там перекатов. В некоторых случаях запруды устраивают для общего развития судоходных рукавов, т. е. для размыва их не только по глубине, но и по ширине. В последние годы на некоторых реках стали возводить высокие запруды, влияющие на перераспределение и весеннего расхода, но работа таких запруд пока не исследована.

Перераспределяя расходы воды запруды, перераспределяют также и твердые расходы. Так как постройка запруд в результате уменьшает уклоны в несудоходных рукавах и увеличивает уклоны в судоходных, то твердые расходы обычно перераспределяются, как и жидкие, т. е. в пользу судоходных рукавов, что является отрицательной стороной работы запруд. Однако основная часть твердого стока равнинных рек проходит при высоких уровнях, когда влияние меженных запруд на поток почти не сказывается. Наиболее сильное влияние на распределение расходов между рукавами такие запруды оказывают при меженных уровнях, когда транзитный твердый сток очень мал. Этим и объясняется, что устройство меженных запруд в несудоходных рукавах ведет к улучшению судоходных рукавов.

Отрицательные последствия в виде увеличения стока наносов в судоходных рукавах могут быть в бóльшей степени при высоких запрудах, а также при наличии выше разветвления местного источника наносов, который не прекращает своего действия и в период стояния меженных уровней. Источником наносов может быть небольшой приток, иногда овраг, выносящий много твердого материала при дождевых паводках. В таких случаях проектная схема улучшения разветвления должна базироваться на тщательном изучении режима твердого стока.

При детальной разработке проектов крупных запруд работа их должна быть проанализирована в широком диапазоне уровней. Однако основные размеры запруд, в частности их высоту, выбирают применительно к одному определенному уровню, называемому расчетным. Меженные запруды, предназначенные для усиления размыва гребней перекатов в конце спада паводка и в межень, а также для общего развития судоходных рукавов, рассчитываются при уровне, отвечающем меженному руслоформирующему расходу, т. е. нижнему максимуму величины Q^2pI.

В большинстве случаев запруды возводятся в двухрукавных разветвлениях, которые преобладают на наших судоходных реках. Только в последние годы стали возводить запруды в многорукавных разветвлениях, но работа запруд в них пока не исследована. В связи с этим дальше рассматривается работа меженных полузапруд преимущественно в двухрукавных разветвлениях.

Приступая к проектированию запруды, необходимо знать не только полную величину расхода реки при расчетном уровне, но и бытовое распределение этого расхода между рукавами. Это распределение устанавливают или на основе гидрометрических измерений, или путем гидравлического расчета. Если измерения расходов производились при уровнях, отличных от расчетного,

то их используют для определения коэффициентов шероховатости русла.

При расчете бытового распределения расчетного расхода в двухрукавном разветвлении обычно бывает известно наполнение русла, так как задается план русла в изобатах и превышение расчетного уровня над проектным. Это превышение часто принимается одним и тем же для всего затруднительного участка.

Для распределения общего расхода Q между судоходным и несудоходным рукавами при известном их наполнении можно использовать следующие два уравнения:

$$Q = Q_с + Q_{нс}; \tag{125}$$

$$\sum_{с} \Delta z = \sum_{нс} \Delta z. \tag{126}$$

В этих формулах $Q_с$ и $Q_{нс}$ — бытовые расходы воды соответственно в судоходном и несудоходном рукавах; $\sum_{с} \Delta z$, $\sum_{нс} \Delta z$ — суммы падений уровней по расчетным участкам соответственно в судоходном и несудоходном рукавах.

Падение Δz на каждом расчетном участке, пренебрегая силами инерции, можно определить по формуле (21), приведенной в гл. II. Если учесть, что в этой формуле $\Delta l : K^2_{ср} = F$, где F — модуль сопротивления одного расчетного участка, то уравнение (126) получим в таком виде:

$$Q_с^2 \sum_{с} F = Q_{нс}^2 \sum_{нс} F. \tag{127}$$

Если в уравнении (127) расход $Q_{нс}$ заменить разностью расходов $Q - Q_с$ и произвести несложные преобразования, то для определения расходов в рукавах получим две зависимости:

$$\left.\begin{aligned} Q_с &= \frac{Q}{1 + \sqrt{\sum_{с} F : \sum_{нс} F}}; \\ Q_{нс} &= Q - Q_с. \end{aligned}\right\} \tag{128}$$

В некоторых случаях приходится встречаться с резкими изменениями площади живого сечения одного или обоих рукавов. В частности, это бывает в тех случаях, когда в истоке или устье рукава располагается перекат с очень малыми глубинами, вся же остальная часть рукава глубокая. В этих случаях для определения падения Δz на каждом расчетном участке надо учитывать силы инерции, т. е. пользоваться уравнением (20), приведенным тоже в гл. II.

Наиболее трудная задача в расчете запруд — назначение проектного распределения расходов, которое обеспечит размыв гребней перекатов в судоходном рукаве. Речь здесь идет о довольно сложном случае расчета русловых деформаций, но пока еще нет удовлетворительного решения этой задачи.

Один из возможных приемов определения проектного распределения расходов между рукавами состоит в том, что в основу расчета кладется требование получить на перекатах судоходного рукава при расчетном уровне (т. е. для меженных запруд в конце спада паводка) скорости не меньше «размывающих». Поставив такое требование, можно для определения проектного расхода в судоходном рукаве сначала найти для каждого переката расчетную скорость $v_р$ по формуле (120), а затем и проектный расход.

В этой формуле коэффициент запаса $K_{зап}$ при расчете полузапруд учитывал затухание размыва по мере увеличения глубины, а также увеличение при размыве крупности частиц поверхностного слоя грунта. В случае расчета высоты запруд этот коэффициент должен учитывать, кроме того, повышение свободной поверхности в судоходном рукаве. Благодаря такому повышению глубина живых сечений возрастает, а с ней возрастает и величина размывающей скорости.

Ориентировочные значения коэффициента запаса при расчете высоты запруд могут быть приняты равными 1,2—1,3. Бо́льшие значения $K_{зап}$ соответствуют расположению перекатов в верхней части судоходного рукава и резко неоднородным грунтам, меньшие значения — расположению перекатов в нижней части рукава и относительно однородным грунтам.

Приняв коэффициент запаса и подсчитав расчетную скорость $v_р$, можно найти величину расчетного расхода $Q_р$, необходимую для размыва каждого переката в судоходном рукаве при расчетном уровне

$$Q_р = \omega_с v_р, \tag{129}$$

где $\omega_с$ — площадь живого сечения на гребне переката при расчетном уровне и бытовом распределении расходов между рукавами.

Подсчет расхода $Q_р$ выполняется для всех перекатов судоходного рукава. В качестве проектного расхода $Q_{п.с}$ в судоходном рукаве принимают: при двух-трех перекатах — наибольшую полученную величину $Q_р$, т. е. $Q_{п.с} = \max Q_р$; при бо́льшем числе перекатов — среднее значение $Q_р$ из двух-трех полученных наибольших значений.

Во избежание развития в судоходном рукаве чрезмерно интенсивных переформирований необходимо, чтобы при установленном проектном расходе $Q_{п.с}$ скорости на перекатах не превосходили некоторой предельной величины $v_{пред}$. Для средних и крупных песков при меженных глубинах 1—3 м предельная скорость может быть принята равной 1,0—1,3 м/с (имеется в виду средняя скорость в живом сечении), а для мелких песков — 0,5—0,8 м/с. Если скорости в живых сечениях перекатов превосходят указанные величины, проектный расход $Q_{п.с}$ соответственно уменьшают.

Получив величину проектного расхода в судоходном рукаве,

сравнивают ее с полным расходом реки Q и бытовым расходом рукава $Q_{б.с}$. При этом могут встретиться три случая:

$$1)\ Q_{п.с} < Q_{б.с} < Q;\ 2)\ Q_{б.с} < Q_{п.с} < Q;\ 3)\ Q_{б.с} < Q_{п.с} > Q.$$

Первое соотношение показывает, что скорости на перекатах судоходного рукава достаточны для их размыва. Неудовлетворительное состояние таких перекатов может быть объяснено поступлением в этот рукав большого количества наносов с вышележащего участка реки. Надобности в постройке запруды в этом случае нет, но желательно проведение мероприятий по отвлечению в несудоходный рукав наносов, поступающих сверху.

Во втором случае в несудоходном рукаве должна быть построена запруда, пропускающая при расчетном уровне расход

$$Q_{п.нс} = Q - Q_{п.с}. \qquad (130)$$

В третьем случае, который может встретиться при малоразвитом несудоходном рукаве, гребень запруды должен быть выше расчетного уровня. Однако одна запруда в этом случае не решает вопроса улучшения судоходного рукава — в судоходном рукаве требуются дополнительные мероприятия, например постройка полузапруд.

Выбрав проектное распределение расходов между рукавами, приступают к проектированию запруды. В состав проекта запруды входят выбор створа для нее, гидравлический расчет и конструктивная разработка.

Основной частью проекта является гидравлический расчет. Путем гидравлического расчета определяют следующие элементы запруды: высоту (отметку гребня), продольные уклоны гребня и выпуск расстилочного тюфяка. Результаты гидравлического расчета влияют также на выбор заложения низового откоса запруды.

Заложение верхового откоса и ширина гребня запруды назначаются конструктивно. Остаются неразработанными вопросы расчета заглубления корня и длины прикорневого крепления берега, а поэтому они пока назначаются по данным практики.

Минимальный объем исходных данных, необходимых для составления проекта запруды, включает[1]:

а) план участка разветвления русла по последней меженной съемке с показанием рельефа береговой полосы до отметок поймы;

б) данные о распределении расхода между рукавами на спаде паводка и в межень при бытовом состоянии потока и данные мгновенной связки уровней по обоим рукавам;

в) связь между расходом и уровнем для створа, лежащего непосредственно ниже острова, с охватом амплитуды колебаний уровней до выхода реки на пойму;

---

[1] Сверх того более обширного планового и гидрологического материала, который должен лежать в основе общей схемы выправления данного участка реки.

г) сведения о характере грунтов на участке разветвления русла и данные о ледовом режиме.

Перейдем к выбору створа для меженной запруды, при этом рассмотрим три возможных варианта расположения запруды в несудоходном рукаве: *1* — вблизи приверха острова; *2* — в средней части рукава; *3* — вблизи ухвостья острова (рис. 90). При выборе первого варианта запруда располагается непосредственно на входе в рукав, так что при прекращении перелива через нее она играет роль струенаправляющей дамбы для потока в судоходном рукаве.



Рис. 90. Схема возможного расположения запруды в несудоходном рукаве

Основное достоинство расположения запруды по варианту *1* состоит в том, что место производства работ доступно для судов и дноуглубительного снаряда. Однако этот вариант имеет недостатки: а) весь твердый расход потока в межень направляется по судоходному рукаву; б) запруда в истоке рукава может привести не к заносимости рукава, а к его разработке, так как ниже запруд русло обычно размывается; в) островной корень сооружения через некоторое время может быть обойден потоком, так как наблюдается размыв приверха островов.

При выборе варианта *2* в верхнем бьефе запруды образуется значительная емкость для аккумуляции наносов и удается создать надежный островной корень. Эти два обстоятельства и являются достоинствами этого варианта. Вместе с тем вариант *2* имеет тоже недостатки: а) доступ для судов в межень затруднен из-за мелей в истоке или устье рукава, и рефулировать в тело сооружения грунт, взятый с судового хода, можно в редких случаях; б) нижняя часть несудоходного рукава может подвергаться размыву из-за повышенной турбулентности потока, прошедшего через сооружение.

Достоинства расположения запруды по варианту *3* заключаются в следующем: а) весь несудоходный рукав является зоной аккумуляции наносов; б) повышенная турбулентность потока, прошедшего через сооружение, может несколько способствовать поддержанию глубин на судовом ходу ниже соединения рукавов; в) место производства работ доступно для судов и дноуглубительного снаряда. Единственным недостатком этого варианта являются низкие пески, слагающие ухвостье острова, которые не представляют надежной опоры для островного корня.

Влияние места расположения запруды на ее высоту различно на разных участках несудоходного рукава. Если близ приверха острова находится перекат и в устьевой части повышенные глубины, сооружение лучше располагать близ приверха острова, чтобы высота его была наименьшей. Напротив, если перекат нахо-

дится в устьевой части несудоходного рукава, предпочтительнее располагать сооружение вблизи ухвостья острова.

Из изложенного следует, что расположение запруды в верхней части рукава наименее целесообразно, так как чем ниже расположена запруда, тем больше она способствует отмиранию несудоходного рукава. Ограничения в смещении створа сооружения к ухвостью острова связаны лишь с необходимостью надежно устроить островной корень и с желанием иметь сооружение минимальной высоты. Если в нижней части рукава глубины небольшие, последний фактор не имеет значения. При значительных длине несудоходного рукава и падении уровней воды между его началом и концом рукав перекрывают не менее чем в двух местах, обычно в средней и нижней частях.

§ 41. РАБОТА ЗАПРУДЫ КАК ВОДОСЛИВА И ЕЕ РАСЧЕТ

По конструкции и условиям работы меженные запруды подобны низконапорным плотинам из местных материалов. Отличительными особенностями запруд являются: малый перепад, преимущественно не более 1 м, продольный уклон гребня от берегов к середине сооружения; значительная водопроницаемость тела сооружения; отсутствие подготовки основания и производство работ по возведению сооружения непосредственно в текущей воде. Наибольшая разность бьефов запруды наблюдается обычно в осушенном ее состоянии, при уровне верхнего бьефа, близком к наинизшей отметке гребня. Наибольший напор на гребне запруды — при пропуске максимального расхода.

Перелив воды через запруду по мере увеличения напора на гребне проходит через три последовательные стадии: 1) стадию короткого лотка с горизонтальным дном, соответствующую весьма малым толщинам переливающегося слоя; 2) стадию водослива с широким порогом, наблюдающуюся при напорах, не превосходящих половины ширины гребня, и 3) стадию водослива практического профиля, устанавливающуюся после увеличения напора до величины более половины ширины гребня.

Первая стадия ввиду малости удельного расхода не представляет интереса при расчете сооружения. При пропуске меженного расхода запруды работают в качестве незатопленных или затопленных водосливов с широким порогом. С переходом к большим расходам воды вероятность работы запруды как незатопленного водослива быстро уменьшается. Большие расходы пропускаются запрудами, как правило, при работе их в качестве затопленных водосливов с широким порогом и практического профиля. Для большинства запруд на реках с обычными для наших условий колебаниями уровней наибольшие расходы проходят через меженную запруду при работе ее в качестве затопленного водослива практического профиля.

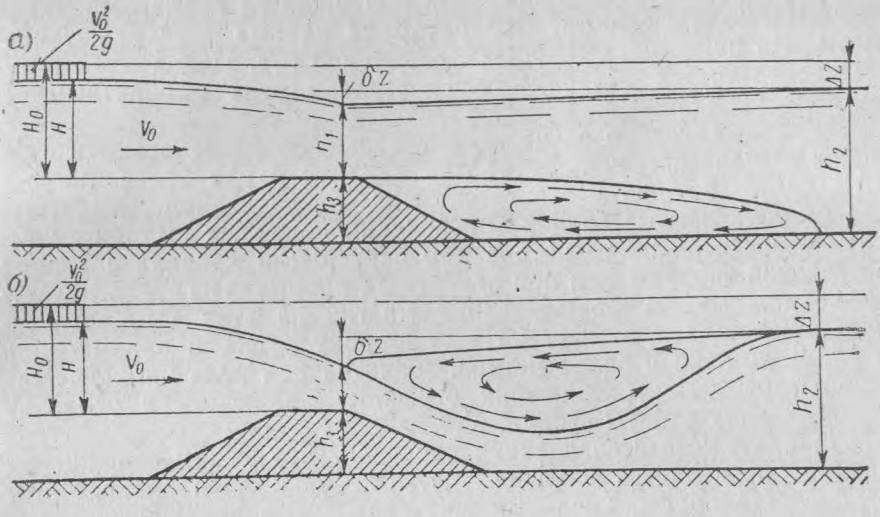


Рис. 91. Схема режимов сопряжения бьефов запруды:
а — поверхностного; *б* — донного

Как показали наблюдения в натуре, а также эксперименты, выполненные в гидравлической лаборатории ЛИВТа, возможны два режима сопряжения потока, сходящего с гребня запруды, с потоком в нижнем бьефе: поверхностный и донный (рис. 91).

При поверхностном режиме (рис. 91, *а*) струя, сходящая с гребня сооружения, продолжает двигаться в верхнем слое потока, медленно расширяясь за счет своей нижней границы. Между расширяющейся струей — с одной стороны, низовой гранью сооружения и дном нижнего бьефа — с другой располагается вихревая зона с преобладанием обратных и восходящих токов. Придонные скорости, имеющие направление, обратное направлению основного потока, по абсолютной величине невелики. Величина их, так же как и интенсивность вихревого движения, прямо пропорциональна скорости потока на гребне сооружения.

Согласно лабораторным исследованиям запруд, при поверхностном режиме максимальные обратные скорости у дна при скоростях на гребне в 2,0—4,5 м/с примерно равны 0,6—1,5 м/с. При ориентировочных подсчетах можно принимать, что при поверхностном режиме сопряжения наибольшая обратная придонная скорость в вихревой зоне составляет около $^1/_3$ скорости на гребне. Такие скорости движения воды в вихревой зоне под поверхностной струей транзитного потока достаточно безопасны для дна нижнего бьефа, и для его защиты от размыва можно применять покрытия простейшего типа.

Совсем иначе обстоит дело с донным режимом сопряжения (рис. 91, *б*). Струя, сходящая с гребня запруды, устремляется

при этом по низовому откосу на дно нижнего бьефа, сохраняя очень высокие скорости. Лабораторные данные показывают возможность придонных скоростей порядка 3 м/с. Над донной струей располагается поверхностная вихревая зона с обратными и нисходящими токами.

За большинством существующих запруд располагаются глубокие вымоины, понижающие дно нижнего бьефа иногда на 5—15 м по сравнению с его естественным положением. Объяснить все многочисленные случаи образования подобных вымоин действием сосредоточенного потока при перекрытии прорана в период возведения запруды или при аварийных прорывах не представляется возможным. В формировании многих из этих вымоин, распространяющихся обычно на всю ширину русла и занимающих в длину десятки и более метров, значительная роль принадлежит донным режимам сопряжения бьефа, возникающим в условиях «нормальной» работы сооружений.

Лабораторные исследования показали, что режим сопряжения бьефов определяется влиянием четырех факторов: поперечным профилем запруды, удельным расходом через запруду, уровнем нижнего бьефа и фазами колебаний уровня (спада или подъема).

При одном и том же поперечном профиле сооружения и удельном расходе низким уровням нижнего бьефа отвечает донный режим сопряжения бьефов, высоким — поверхностный. Переход от донного режима к поверхностному (в процессе подъема уровней) происходит при более высоком уровне нижнего бьефа, чем обратный переход от поверхностного режима к донному (при спаде). Таким образом, каждый режим сопряжения бьефов при изменении уровней имеет тенденцию сохраняться.

В гидротехнической лаборатории ЛИВТа были исследованы четыре поперечных профиля запруды: с двойным низовым откосом, с одиночным низовым откосом, с вертикальной низовой гранью и с низовой гранью в виде «носка» (рис. 92). Верховой откос во всех случаях был принят двойным. Эти опыты дали возможность выразить условия перехода от одного режима сопряжения бьефов к другому в виде кривых, связывающих две переменные: удельный расход и уровень нижнего бьефа при разных низовых откосах.

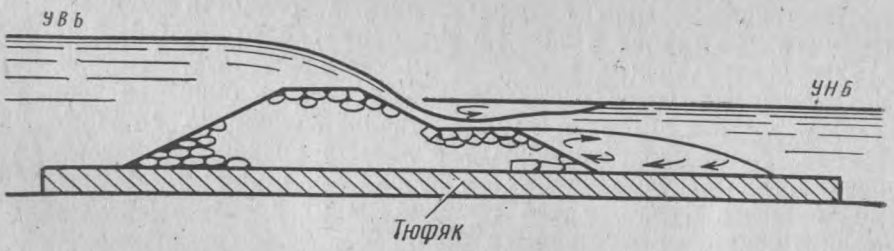


Рис. 92. Запруда с «носком»

На рис. 93 показаны эти кривые для всех четырех исследованных поперечных профилей запруд. Кривые построены для запруды высотой 1 м, при этом по оси абсцисс отложены удельные расходы q', а по оси ординат — высоты подтопления $h'_п$.

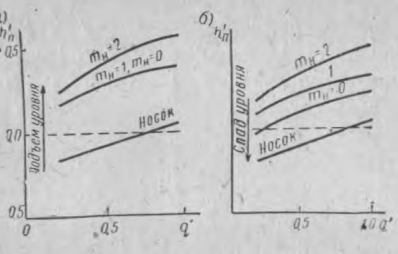


Рис. 93. График для определения режима сопряжения бьефов запруды высотой 1 м:
а — верхние границы переходных режимов; *б* — нижние границы

В левой части рисунка собраны кривые, определяющие переход от донного режима сопряжения бьефов к поверхностному при подъеме уровней, в правой части — кривые, определяющие обратный переход — при спаде.

Как можно видеть из рис. 93, поверхностный режим у запруды с носком обеспечивается при небольших удельных расходах без подтопления запруды, т. е. при уровне нижнего бьефа ниже гребня запруды. Только при значительных расходах для обеспечения поверхностного режима необходимо небольшое подтопление. У остальных исследованных профилей для обеспечения поверхностного режима при подъеме уровней требуется подтопление запруды на высоту $h_п$, составляющую для запруд с одиночным низовым откосом или вертикальной гранью $h_п \approx (0{,}2—0{,}4)h_з$ и для запруды с двойным низовым откосом $h_п \approx (0{,}2—0{,}6)h_з$, где $h_з$ — высота сооружения.

Таким образом, профиль запруды с носком для обеспечения поверхностного режима сопряжения бьефов имеет значительное преимущество перед другими профилями.

Профиль с одиночным низовым откосом в отношении обеспечения поверхностного режима может считаться равноценным профилю с вертикальной низовой гранью. Наименее удовлетворительным из исследованных профилей является профиль с двойным низовым откосом. Таким образом, для создания поверхностного режима сопряжения бьефов поперечный профиль запруд следовало бы проектировать с крутым низовым откосом, однако условия устойчивости и возведения сооружений обычно не позволяют делать низовой откос круче двойного-полуторного.

Значительно осложняется сопряжение бьефов запруд тем, что дно нижнего бьефа в поперечном сечении и гребень запруды в ее прикорневых частях негоризонтальны. Эти осложнения в основном наблюдаются на начальной стадии перелива воды через запруду. На рис. 94 схематически показано сопряжение бьефов для случая, когда подъем гребня запруды к берегам настолько велик или расход, проходящий через запруду, настолько мал, что прикорневые части сооружения не работают и весь расход пропускается его средней пониженной частью. При этом в углах между прикорневыми частями сооружения и берегами нижнего бьефа образуются водоворотные зоны, которые способствуют раз-

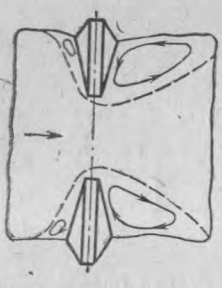


Рис. 94. Начальная стадия перелива воды через запруду

мыву берегов и дна нижнего бьефа. Подобные зоны, но значительно меньших размеров, наблюдаются и в верхнем бьефе.

Общая схема определения высоты запруды состоит в том, что сначала, путем расчета кривых свободной поверхности в рукавах, находят отметки уровней верхнего и нижнего бьефов запруды ($z_{в.б}$ и $z_{н.б}$). Затем определяют напор H на гребне запруды, необходимый для пропуска проектного расхода несудоходного рукава. Полученную величину напора вычитают из отметки верхнего бьефа запруды. Разница представляет собой отметку гребня запруды $z_з$. Весь расчет ведется для бытового состояния русла и отвечает, таким образом, условиям, создающимся в русле непосредственно после постройки запруды.

Последовательность расчетов может быть следующая. Оба рукава разбивают на расчетные участки (рис. 95). Граничные сечения назначают на гребнях перекатов и в глубоких местах плесовых лощин. Самое верхнее сечение, расположенное у приверха острова, и самое нижнее, расположенное у его ухвостья, делят на две части. Одна часть, рассматриваемая как самостоятельное сечение, относится к судоходному рукаву, другая — к несудоходному. Сами эти сечения назначаются несколько выше и несколько ниже острова — там, где в соответствии с донным рельефом отметки свободной поверхности в правой и левой частях русла можно предполагать одинаковыми.

Для каждого из граничных живых сечений находят их площади ω и ширины B для трех отметок уровня: для отметки расчетного уровня бытового режима и двух отметок, назначаемых в судоходном рукаве и в верхней (подпертой) части несудоходного рукава, выше расчетной отметки. Разницу между соответственными отметками берут одинаковой во всех граничных сечениях, хотя строгое соблюдение этого правила и не обязательно. Верхнюю из трех отметок выбирают с таким расчетом, чтобы уровень при проектном распределении расходов заведомо ее не превосходил. В той части несудоходного рукава, которая служит нижним бьефом запруды, вторую и третью отметки назначают ниже первой, поскольку проектная свободная поверхность здесь располагается ниже бытовой.

Дальнейший ход расчетов зависит от того, какой способ принимается для определения отметок проектных кривых свободной поверхности в рукавах.

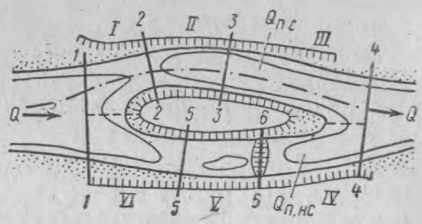


Рис. 95. Разбивка двухрукавного разветвления на расчетные участки (римскими цифрами пронумерованы расчетные участки, арабскими — граничные сечения)

При расчете падений по уравнению (20), т. е. с учетом сил инерции, целесообразно вести этот расчет способом подбора, используя построенные для каждого граничного живого сечения кривые зависимости модуля расхода и площади живого сечения от уровня воды в сечении. При расчете же падений по уравнению (21), т. е. без учета сил инерции, наиболее быстро приводит к цели графический способ Н. Н. Павловского.

Для расчета по этому графическому способу, после нахождения величин ω и B, для тех же трех значений уровня выполняют в каждом граничном сечении подсчет средних значений глубин T и значений модулей расходов $K=\omega C\sqrt{T}$, затем на каждом расчетном участке определяют значения средних модулей расхода $K_{ср}$ и значения модулей сопротивлений $F=\Delta l : K^2_{ср}$. После этого строят по расчетным участкам кривые $F=F(z_{ср})$, где $z_{ср}$ — средние значения уровней на участке, по которым и определяют отметки свободной поверхности в рукавах.

При вычислении величин модулей расходов желательно пользоваться значениями коэффициента шероховатости n, установленными на основе натурных наблюдений. При отсутствии таких данных пользуются литературными источниками. Детализация значений коэффициента шероховатости по расчетным участкам в этом случае не может быть обоснована, однако различие в степени шероховатости двух рукавов всегда может быть учтено. Рукаву со стесненным входом и неправильным рельефом дна придают значение n несколько бо́льшее, чем рукаву с плавными очертаниями в плане и постепенном изменением глубин.

С помощью графического приема в первую очередь рассчитывают отметки свободной поверхности при проектном расходе $Q_{пс}$ в судоходном рукаве. Построение кривой свободной поверхности ведется от сечения с отметкой $z_н$, лежащего непосредственно ниже острова. Отметка уровня в этом сечении при расчетном уровне на опорном водомерном посту должна быть известна. Итогом этого этапа расчетов является получение отметки уровня $z_в$ для сечения, лежащего выше острова.

Далее строят кривые свободной поверхности в несудоходном рукаве: в верхнем бьефе запруды — исходя из полученной отметки уровня $z_в$ для створа выше острова, и в нижнем бьефе — исходя из известной отметки уровня $z_н$ в створе ниже острова. Итогом этого этапа расчетов является получение отметок верх-

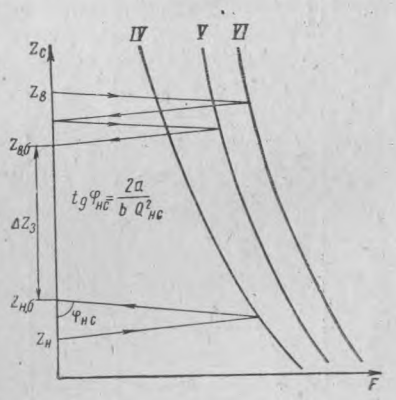


Рис. 96. Определение отметок бьефов запруды:
a и b — масштабы по осям уровней и модулей сопротивления (римские цифры у кривых соответствуют номерам участков на рис. 95).

него и нижнего бьефов запруды $z_{в.б}$ и $z_{н.б}$ и перепада уровня на запруде:

$$\Delta z_з = z_{в.б} - z_{н.б}. \qquad (131)$$

На рис. 96 показано графическое определение отметок бьефов запруды по кривым $F = F(z_c)$, а на рис. 97 — кривые свободной поверхности в рукавах в бытовом и проектном состояниях.

По заданному расходу через запруду $Q_{п.нс}$ определяют напор на запруде. Исходной здесь является общая формула расхода воды через водослив

$$Q = \sigma_п m b \sqrt{2g}\, H_0^{3/2}, \qquad (132)$$

где $\sigma_п$ — коэффициент подтопления;

m — коэффициент расхода;

b — ширина водослива по длине запруды;

H_0 — полный напор (с учетом скорости подхода).

Решая равенство (132) относительно полного напора и исключая из него скоростной напор, получим расчетную формулу для пьезометрического напора на запруде

$$H = \left(\frac{Q}{\sigma_п m b \sqrt{2g}}\right)^{2/3} - \frac{v_0^2}{2g}. \qquad (133)$$

Ширину водослива при подсчете по формуле (133) принимают равной $0{,}7B$, где B — ширина несудоходного рукава в створе запруды, при уровне верхнего бьефа (этим соотношением учитывается, что при меженных уровнях прикорневые части запруды обсушены).

Расчет по формуле (133) ведут подбором, задаваясь сначала значениями пьезометрического напора H и добиваясь затем получения по формуле (133) той же его величины. Коэффициент

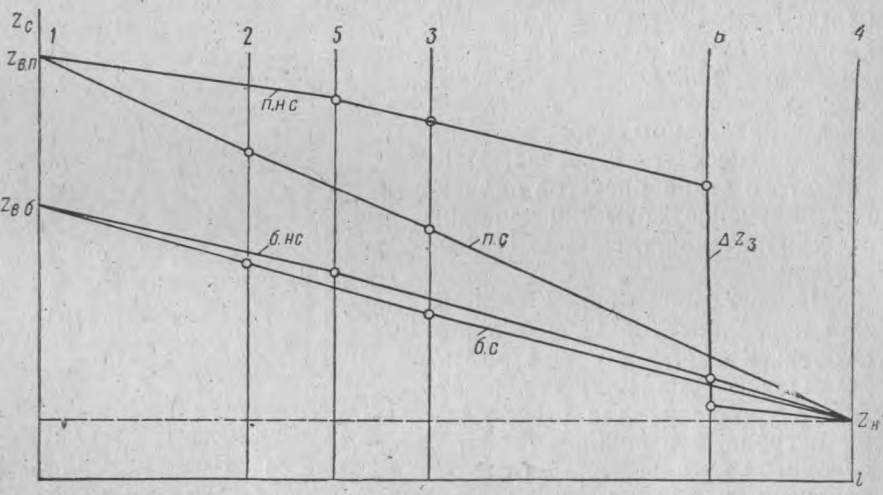


Рис. 97. Кривые свободной поверхности в двухрукавном разветвлении в бытовом и проектном состояниях (номера сечений соответствуют схеме разбивки на рис. 95)

расхода m находят с помощью кривых, показанных на рис. 98, в зависимости от отношения напора H к ширине $\delta_г$ гребня водослива $(H:\delta_г)$ и от пологости $m_н$ низового откоса запруды. Верховой откос может при этом быть одиночным или двойным, а шириной гребня задаются из конструктивных соображений.

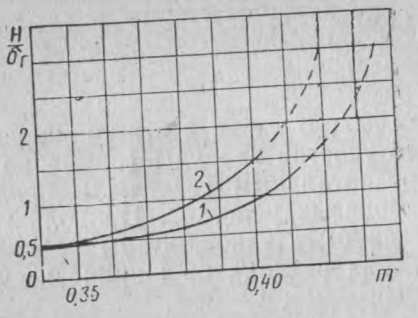


Рис. 98. Кривые зависимости коэффициента расхода водосливов трапецеидальных профилей (по Павловскому):
1 — вертикальная низовая грань и одиночный откос; *2* — двойной низовой откос

Отношения $(H:\delta_г)>0{,}5$ отвечают случаям работы запруды в качестве водослива практического профиля, отношения $H:\delta_г \leqslant 0{,}5$ — случаю работы запруды в качестве водослива с широким порогом, для которого величина коэффициента расхода m, равная 0,34, принимается постоянной и не зависящей от наклона низовой грани запруды.

Для определения коэффициента подтопления вычисляют высоту подтопления: $h_п = H - \Delta z_з$, и затем пользуются графиками (рис. 99) зависимости величины коэффициента подтопления $\sigma_п$ от величины отношения высоты подтопления к полному напору $(h_п:H_0)$.

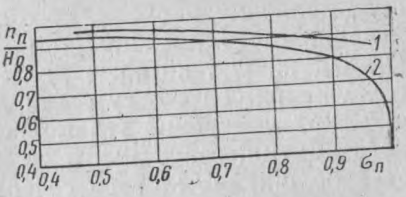


Рис. 99. Коэффициент подтопления для водосливов (по Березинскому):
1 — с широким порогом; *2* — практического профиля

Подбор величины H по формуле (133) удобнее начинать с предположения, что запруда работает как незатопленный водослив с широким порогом. В этом случае $m=0{,}34$ и $\sigma_п=1{,}0$. Если в результате подсчета по формуле окажется, что $H \leqslant 0{,}5\delta_г$ и при этом $(h_п:H_0) \leqslant 0{,}8$, то полученное значение пьезометрического напора H является окончательным. В противном случае возобновляют расчет, задавшись для определения m и $\sigma_п$ новыми значениями напора. После того как величина напора окончательно установлена, находят отметку гребня запруды:

$$z_з = z_{в.б} - H. \qquad (134)$$

При проектировании высоких запруд, пропускающих большие расходы и работающих как незатопленные водосливы, уклоны прикорневых частей назначают путем расчета.

Подъем гребня к берегам необходим, как уже отмечалось, для предотвращения в мелких прибрежных частях русла размывов, которые неизбежно возникали бы при пропуске по всей ши-

рине запруды одного и того же удельного расхода. С другой стороны, практика эксплуатации запруд показывает, что отсутствие горизонтального участка в средней части запруды способствует нежелательному размыву стрежневой части русла нижнего бьефа. В связи с этим наиболее рационально устройство среднего участка запруды (примерно на $^1/_2$ или $^2/_3$ ширины реки) с горизонтальным гребнем и придание уклона только гребню прикорневых участков. Продольный профиль запруды в целом должен быть таков, чтобы не вызвать существенного перераспределения расхода по ширине несудоходного рукава по сравнению с бытовым режимом.

Общий прием расчета подобного профиля сводится к разбивке запруды по ее длине на 3—5 отсеков, на протяжении каждого из которых отметка гребня условно считается постоянной,— равной средней отметке в пределах отсека. Ввиду пологости уклона гребней запруд влиянием формы водослива на коэффициент расхода при этом расчете пренебрегают.

Для выполнения расчета необходимо знать уже не только общую величину расхода, проходящего через запруду, но и распределение этого расхода по ширине русла, т. е. частные расходы Q_1, Q_2, ..., Q_n, которые должны пройти через отдельные отсеки сооружения. При отсутствии данных непосредственных гидрометрических измерений это может быть сделано при помощи известного приема, основанного на применении к распределению скоростей по ширине живого сечения формулы Шези—Маннинга. Графическая схема такого расчета для запруды показана на рис. 100.

Когда это сделано, вычисляют напор отдельно для каждого из отсеков сооружения, условно рассматриваемых как отдельные водосливы. В итоге расчета получают для каждого из них среднюю отметку гребня $z_{з.1}$, $z_{з.2}$,...$z_{з.n}$.

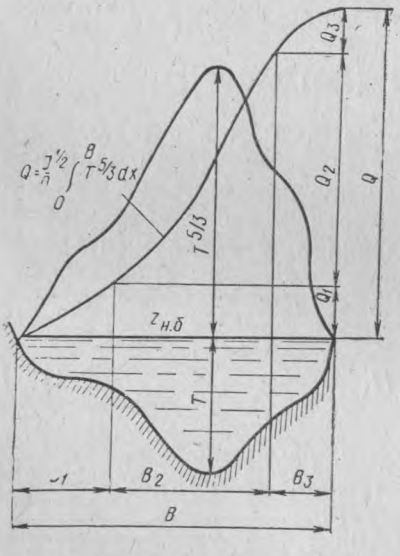


Рис. 100. Распределение расхода по ширине русла в створе запруды

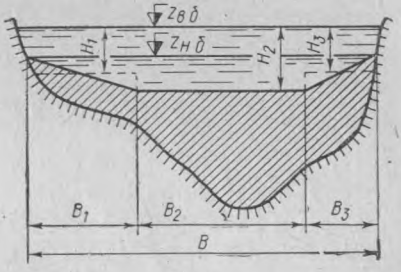


Рис. 101. Схема построения профиля высокой запруды

Построение продольного профиля сооружения по этим отметкам схематически изображено на рис. 101 *.

Затем приступают к расчету выпуска расстилочного тюфяка в нижнем бьефе запруды. Расстилочный тюфяк (или покрытие другой конструкции) служит для защиты от размыва участка дна нижнего бьефа; непосредственно прилегающего к сооружению. Длина выпуска тюфяка в нижнем бьефе, а также конструкция тюфяка различны в зависимости от того, какой принят режим сопряжения бьефов — донный или поверхностный.

Полностью избежать донного сопряжения бьефов можно только для очень низких, всегда затопленных сооружений. Имея в виду практически пропускаемые запрудами расходы и учитывая результаты лабораторных исследований ЛИВТа, можно считать, что у запруд с двойным низовым откосом полностью избежать донного режима сопряжения бьефов можно лишь в том случае, если высота сооружения не превосходит $^2/_3$ глубины нижнего бьефа при самом низком уровне. Запруда с одиночным низовым откосом или вертикальной низовой гранью может не иметь донного режима сопряжения бьефов лишь в том случае, если ее высота не превосходит $^3/_4$ глубины нижнего бьефа при самом низком уровне. Только запруда с носком может иметь поверхностный режим сопряжения бьефов при высоте, равной глубине нижнего бьефа. Однако надо иметь в виду, что наличие донного режима сопряжения в начальной стадии перелива не грозит большими опасностями дну нижнего бьефа ввиду малости проходящих в это время через запруду удельных расходов.

Представляется целесообразным в связи с этим разбить запруды на четыре категории: 1) очень низкие, всегда затопленные сооружения, у которых донного режима сопряжения бьефов никогда не бывает; 2) низкие, полузатопленные сооружения, имеющие донный режим сопряжения бьефов в начальной стадии перелива, но уже при среднемеженном уровне переходящий к поверхностному режиму; 3) сооружения средней высоты, у которых донный режим сопряжения бьефов бывает при среднем меженном уровне; 4) высокие сооружения, остающиеся при среднем меженном уровне с сухим гребнем.

При определении длины выпуска расстилочного тюфяка для двух первых категорий предусматривают в основном защиту дна нижнего бьефа от восходящих токов близ подошвы сооружения при поверхностном режиме сопряжения бьефов. При определении длины выпуска расстилочного тюфяка для сооружений третьей и четвертой категорий ориентируются на защиту дна нижнего бьефа от высоких скоростей транзитного потока при донном режиме сопряжения. Отнесение сооружений ко второй или третьей категории выполняется с помощью графиков смены режимов (рис. 93). Порядок расчетов может быть при этом следующий.

---

* В. В. Дегтяревым в НИИВТе разработаны программы расчета на ЭВМ запруд в разветвлениях речного русла.

Высота подтопления $h_п$, полученная по расчету при пропуске через запруду проектного расхода несудоходного рукава, пересчитывается для запруды высотой 1 м по формуле

$$h'_п = \frac{h_п}{h_з}, \qquad (135)$$

где $h'_п$ — высота подтопления для запруды высотой 1 м;

$h_з$ — наибольшая высота запроектированной запруды (возвышение гребня над наинизшей точкой дна в створе сооружения).

Удельный расход q, проходящий через часть запруды с горизонтальным гребнем, при пропуске проектного расхода несудоходного рукава пересчитывается на запруду высотой 1 м. Формула пересчета, основанная на правилах гравитационного подобия, имеет вид

$$q' = \frac{q}{h_з^{1,5}}, \qquad (136)$$

где q' — удельный расход для запруды высотой 1 м. Фактический удельный расход q, если продольный профиль запруды строится без расчета, находят из выражения $q = Q_{п.нс} : b$, где $b = 0{,}7B$.

По найденным значениям $h'_п$ и q' и известному поперечному профилю сооружения с помощью графиков на рис. 93 устанавливается, какой режим сопряжения бьефов у запроектированной запруды при пропуске через нее расхода $Q_{п.нс}$ (т. е. при расчетном уровне).

Опыты, проводившиеся в гидротехнической лаборатории ЛИВТа, показали, что длина водоворотной зоны $L_в$ при донном и поверхностном режимах сопряжения бьефов может быть подчинена одной общей зависимости. На основе метода В. М. Маккавеева К. В. Гришанин получил приближенную формулу для длины водоворотной зоны

$$L_в = \frac{1}{2\varepsilon}(h_2 - h_1), \qquad (137)$$

где h_2 — глубина нижнего бьефа; h_1 — глубина на гребне сооружения; ε — эмпирический коэффициент, незначительно зависящий от степени пологости низового откоса. В среднем величина $1 : 2\varepsilon$ может быть, согласно опытным данным, принята равной 6.

Так как разность $h_2 - h_1$ мало отличается от высоты запруды $h_з$, то с учетом приближенности всего расчета можно определять длину водоворотной зоны в нижнем бьефе из простого соотношения: $L_в = 6h_з$.

При поверхностном режиме сопряжения бьефов опасные для дна нижнего бьефа восходящие токи развиваются лишь в ближайшей к сооружению половине длины водоворотной зоны. Исходя из этого для запруд первой категории можно рекомендовать длину выпуска расстилочного тюфяка $l_т = 3h_з$. Для запруд второй

категории достаточно осторожным будет принимать $l_т = (5—6)h_з$.

Что касается сооружений третьей и особенно четвертой категорий, то необходимо учитывать, что при пропуске в условиях донного режима значительных удельных расходов поток и в конце водоворотной зоны сохраняет очень большие придонные скорости. Ориентировочно можно считать, что получающаяся здесь эпюра скоростей преобразуется в эпюру равномерного движения на участке длиной не менее половины длины водоворотной зоны. Отсюда для сооружений третьей и четвертой категорий получаем рекомендацию: $l_т = 10h_з$.

При перекрытии меженными запрудами несудоходных рукавов со значительным падением уровней, преимущественно длинных, целесообразно проектировать в них несколько запруд, обычно двух, с перепадом уровней на каждой из них более 0,5 м, чтобы избежать донного режима сопряжения их бьефов.

Для расчета в несудоходном рукаве отметок гребней двух запруд сначала определяют отметку уровня верхнего бьефа у верхней запруды $z^{в}_{в.б}$ и нижнего бьефа у нижней запруды $z^{н}_{н.б.}$ Затем задаются перепадом на одной из запруд, например на верхней, примерно равным половине общего падения уровня между двумя запрудами $\Delta z^{в}_{з} \cong 0{,}5\,(z^{в}_{в.б} - z^{н}_{н.б})$, и находят отметку нижнего бьефа верхней запруды $z^{в}_{н.б}$. Далее, исходя из этой отметки $z^{в}_{н.б}$, по кривым $F = F(z_с)$ проходят участок между запрудами и получают отметку уровня верхнего бьефа нижней запруды $z^{н}_{в.б}$ и перепад на ней $\Delta z^{н}_{з} = z^{н}_{в.б} - z^{н}_{н.б}$.

Порядок расчета остается подобным описанному, если задаться перепадом сначала на нижней запруде и находить затем перепад на верхней запруде. При надобности можно изменять перепад на одной запруде и получать соответствующий перепад на другой запруде, добиваясь более благоприятного режима сопряжения бьефов[1]. После этого, как и при расчете одиночной запруды, подбором определяют напоры $H_в$ и $H_н$ на гребнях верхней и нижней запруд, отметки их гребней $z_{з.в}$ и $z_{з.н}$, высоту каждой запруды и длину крепления дна ниже запруд.

§ 42. ПРОДОЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ИЗ ГРУНТА И ИХ РАСЧЕТ

Выправительные сооружения из грунта по их расположению относительно направления течения делятся на продольные и поперечные, причем под направлением течения в этом случае понимается направление весеннего потока, наиболее опасного для сохранности этих сооружений. Грунтовые выправительные

[1] В. М. Селезнев. Особенности гидравлического расчета нескольких запруд, перекрывающих несудоходные рукава. Труды ЛИВТа, вып. 93, Л. «Транспорт», 1967.

сооружения, продольные и поперечные, могут быть намывные и насыпные; первые возводятся путем намыва их землесосами, вторые — путем насыпки их из шаланд или непосредственно многочерпаковыми снарядами, плавучими кранами и береговыми землеройными машинами. Намывные сооружения возводятся преимущественно из песчаных грунтов, насыпные — из песчано-гравелистых грунтов. На наших судоходных реках при их выправлении наибольшее распространение получили продольные намывные сооружения из песков; эти сооружения здесь и рассматриваются. По высоте в русле грунтовые сооружения могут быть низкими, меженного действия, и высокими, весеннего действия.

Продольные грунтовые сооружения по своему назначению могут быть разделены на следующие виды: а) дамбы, изолирующие выправительную трассу и судовой ход от влияния вредных боковых емкостей русла, в частности от влияния затонской части на перекатах; б) сооружения, регулирующие движение воды и наносов в местах деления и соединения потока, в частности на приверхе и в ухвостье островов; в) дамбы, перекрывающие несудоходные рукава, побочневые протоки и протоки между осередками; г) сооружения, выравнивающие или выправляющие очертания русла, в частности перекрывающие выбоины в расширениях русла и в нижней части плесовых лощин; д) дамбы, соединяющие острова, побочни и осередки в большие пойменные или русловые массивы; е) сооружения специального назначения, пойменные и русловые, для обвалования меженного русла, создания затонов, защиты территорий и др.

Основным недостатком намывных, но неукрепленных выправительных сооружений, является их неспособность противостоять размывающей деятельности потока. Укрепление же пологих откосов и широкого гребня этих сооружений в несколько раз удорожает их возведение. В последние годы изыскиваются механизированные, дешевые и быстрые способы укрепления поверхности намывных сооружений. Однако уже и сейчас намывные сооружения являются одним из наиболее прогрессивных и широко применяемых видов выправительных сооружений.

Для широкого внедрения и развития укрепленных сооружений из грунта, как уже было указано, нужна в первую очередь разработка нетрудоемкого, дешевого, но эффективного способа защиты их от размыва потоком. Кроме того, для возведения грунтовых сооружений в условиях интенсивного воздействия на них речного потока необходимо применять специальные приспособления, уменьшающие унос грунта, который в отдельных случаях может быть весьма большим (до 75% профильного объема). Применение намывных сооружений в ряде случаев ограничивается недостаточной длиной и гибкостью плавучего грунтопровода (рефулера), а также низкой консистенцией грунтовой смеси.

Примером продольного намывного сооружения может служить дамба, изолирующая (но не перекрывающая) затонскую емкость от судового хода на корыте переката. При правильном проекти-

ровании сохранность такого сооружения обеспечивается минимальным объемом работ по укреплению его головной части, а при определенной конфигурации верхнего побочня укрепления может и совсем не потребоваться. Грунтовые же сооружения, ориентированные под значительным углом по отношению к направлению весеннего потока, близким к прямому, требуют для своей сохранности более надежного укрепления. Практика показала, что без надежного укрепления сохраняются лишь продольные намывные сооружения. Поэтому независимо от назначения намывного сооружения его стремятся располагать вдоль или под незначительным углом к направлению весеннего потока.

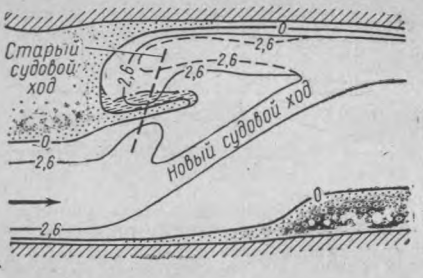


Рис. 102. Намывное неукрепленное сооружение после деформации: —.—. нулевая изобата после деформации сооружения; — — — проектная изобата после деформации сооружения

Особенности проектирования и расчета грунтовых сооружений определяются малой сопротивляемостью их тела размыву. Размыв потоком неукрепленных сооружений, в особенности поперечных, может происходить быстро, зачастую в течение одного паводка. Для большинства из них характерны огромные деформации, начинающиеся еще в процессе постройки. Вместе с тем практика возведения неукрепленных грунтовых сооружений выявила следующие их особенности, позволяющие применять такие сооружения в отдельных случаях с большим эффектом.

Намывное сооружение в ряде случаев удается возвести непосредственно из грунта, извлекаемого землесосом в процессе разработки судоходной прорези на перекате. В этом случае на намыв сооружения, если его не укреплять, не затрачивается дополнительных средств и оно, по существу, представляет собой рационально уложенный отвал грунта. Намыв такого сооружения всегда целесообразен и обязателен вне зависимости от срока его службы.

Намывное неукрепленное сооружение во многих случаях и после его деформации потоком продолжает оказывать положительное влияние на перекат. Примером может служить перекрытие таким намывным сооружением старого судового хода, превращающегося в затонскую емкость после разработки прорези через нижний побочень (рис. 102). Если намывное неукрепленное сооружение примыкает к побочню, более высокому, чем само сооружение, то оно деформируется потоком, переливающимся через его гребень, причем ширина сооружения по основанию увеличивается за счет его высоты. Такое деформированное сооружение продолжает препятствовать отвлечению меженного потока на старый судовой ход и способствует отмиранию последнего.

Процесс размыва неукрепленного намывного сооружения в си-

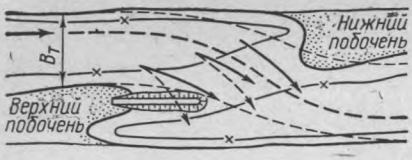


Рис. 103. Примыкание продольного сооружения к верхнему побочню:
— — — направление течения при бытовом режиме; → направление течения при проектном режиме

лу его массивного профиля может длиться такой отрезок времени, за который на данном перекате под воздействием этого сооружения успеют произойти запроектированные переформирования. В ряде случаев значительная часть продуктов размыва неукрепленного намывного сооружения отлагается там, где это полезно для улучшения судоходных условий. Иногда этот процесс усиливают с помощью наносозадерживающих сооружений, специально устанавливаемых в местах желаемого отложения наносов.

В силу незначительной трудоемкости и относительной дешевизны намыва сооружения по сравнению с его надежным укреплением в ряде случаев экономически целесообразно проводить периодический ремонт (намыв в размытую часть) сооружения, оставляя его неукрепленным.

Если намывное сооружение возводится в воде с помощью плавучего грунтопровода без специального разливного понтона, то отметка его гребня ограничена уровнем воды во время рефулирования. Практика показала, что при рефулировании до рабочего уровня воды гребень сооружения обычно превышает этот уровень лишь на 10—15 см. Продольный профиль сооружения оказывается зависящим (в этих условиях) от колебаний рабочего уровня воды и получается, как правило, неровным.

В тех же условиях рефулирования в воду ширина гребней намывных сооружений обычно получается очень большой (свыше 10 м), а коэффициенты заложения откосов достигают значений: низового $m_н = 10—30$ и более, верхового $m_в = 5—10$. При этом надводные откосы формируются более пологими, чем подводные. Разрушение намывных сооружений почти всегда начинается с участков понижения их гребней, где в начале перелива возникает сосредоточенное быстрое течение. Неправильность очертаний и легкая деформируемость намывных сооружений заставляют ограничиться в части их расчета лишь самыми приближенными способами.

Приводимая ниже схема расчета относится к наиболее часто встречающемуся виду намывных сооружений — продольной дамбе, устраиваемой по гребню верхней косы для изоляции затонской части переката (рис. 103). Голова такого сооружения выводится к кромке выправительной трассы, а корень — к высокой части верхнего побочня, и, следовательно, его длина определяется расчетом ширины трассы. При таком расположении сооружение наклонено в плане под небольшим углом к весеннему потоку, что способствует его сохранности от размыва.

Отметку гребня сооружения находят на основании построенных или полученных из натурных исследований (например, пуском поплавков) при двух-трех уровнях воды планов течения на участке переката. По этим планам течения устанавливают уровень начала отвлечения расхода воды в затонскую часть. Поскольку назначение продольного сооружения на перекате — свести до минимума отвлечение расхода воды из верхней плесовой лощины в затонскую часть в период конца спада паводка и в межень, то отметку его гребня обычно назначают вровень с уровнем начала этого отвлечения потока или несколько выше такого уровня. Отметка гребня корневой части сооружения не должна быть выше поверхности побочня, к которому оно примыкает, чтобы избежать образования протоки в затонскую часть.

В этих условиях при невысоком верхнем побочне в период работы сооружения в затопленном состоянии поперечный перелив через него бывает незначительным и сооружение оказывается устойчивым даже без крепления гребня. При высоком верхнем побочне перелив воды через гребень сооружения при спаде паводка может быть весьма интенсивным, и поэтому его гребень и часть откосов необходимо укреплять. В период же работы сооружения в незатопленном состоянии имеется опасность размыва его верхового откоса продольным течением, идущим вдоль сооружения.

В соответствии с изложенными условиями работы продольных намывных сооружений, располагаемых на верхних косах перекатов, ниже излагаются два вопроса их расчетного обоснования: а) проверка верхового откоса на размываемость при незатопленном состоянии сооружения, которая дает качественную оценку сохранности сооружения при работе его в этом состоянии; б) обоснование необходимости крепления и выбор типа крепления гребня сооружения, примыкающего к высокому верхнему побочню, в соответствии с условиями его работы в затопленном состоянии.

Для проверки размываемости верхового откоса продольного грунтового сооружения строят план течений для уровня, равного высоте его гребня. Построив план течений и зная частный расход одной струи $Q_i = Q : n$ (где Q — полный расход реки при упомянутом уровне и n — число струй), подсчитывают средние скорости v_i в ряде сечений крайней струи, обтекающей верховой откос (рис. 104, *а*), и строят график изменения этих скоростей вдоль сооружения (рис. 104, *б*). Если число струй невелико, то ширина крайней струи может получиться большой, и ее средние скорости будут не характерны для потока, непосредственно обтекающего сооружение. В этих случаях разбивают крайнюю струю на несколько (2—4) подструй, определяя средние скорости в сечениях крайней подструи, омывающей сооружение.

В тех же сечениях подсчитывают значения неразмывающей скорости $v_{нр}$ и скорости начала размыва $v_{разм} = 1{,}3v_{нр}$, а затем наносят эти скорости на график их изменения по длине сооруже-

ния (см. рис. 104, *б*). На тех участках продольного профиля скоростей, где скорость струи оказывается больше или равна размывающей, т. е. $v_i \geqslant v_{\text{разм}}$, можно ожидать размыва сооружения. Обычно это наблюдается близ головы сооружения; на рис. 104 наиболее опасным для сооружения является сечение *5*. Для сохранения сооружения либо укрепляют на этих участках верховой откос, либо предусматривают работы по периодическому подрефулированию сооружения.

Подробный расчет может быть выполнен и при другом уровне воды, например при проектном уровне путевых работ, чтобы оценить возможность деформаций верхового откоса при низком, но более продолжительном стоянии уровня.

При описанном расчетном приеме допускают, что скорости течения на откосе равны средним скоростям струи, граница которой может отстоять на десятки метров от подошвы откоса, и что устойчивость частиц на откосе такая же, как и на горизонтальной поверхности. Так как ошибки, вызываемые этими допущениями, имеют разные знаки, то расчет в целом должен соответствовать действительности.

Для установления необходимости и выбора типа крепления гребня продольного намывного сооружения необходимо знать скорости потока, переливающегося через его гребень. На перекате с затонской частью поток разделяется на два потока с переменным по пути расходом: поток с убывающим расходом в верхней плесовой лощине и поток с нарастающим расходом — в затонской части.

Введем следующие обозначения: q — элементарный расход на гребне сооружения; Q — полный расход реки при переливе; $Q_1 = Q_1(l)$ — расход верхней плесовой лощины; $Q_2 = Q_2(l)$ — расход затонской части; $h_г$ — глубина на гребне сооружения; z_1 — отметка свободной поверхности верхней плесовой лощины или верхнего бьефа сооружения; z_2 — отметка свободной поверхности затонской части или нижнего бьефа сооружения; $z_г$ — отметка поверхности гребня сооружения; K_1 и K_2 — расходные характеристики соответственно верхней плесовой лощины и затонской части; φ — коэффициент скорости; L — длина сооружения.

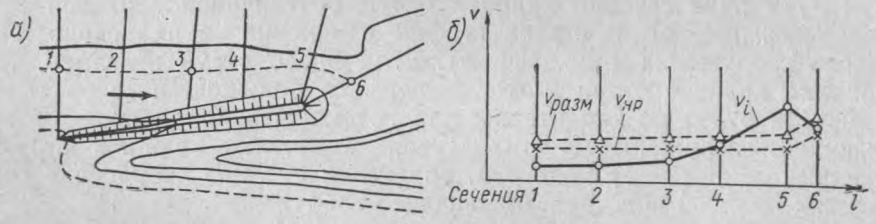


Рис. 104. Проверка верхового откоса продольной дамбы на размываемость: *а* — фрагмент плана течений (цифры — номера сечений); *б* — графики изменения скоростей течения по длине струи

Продольное грунтовое сооружение будет работать в этой расчетной схеме как боковой водослив, передающий расход из верхней плесовой лощины в затонскую часть. В общем случае для определения расходов $Q_1(l)$ и $Q_2(l)$ можно воспользоваться способом фрагментов (изложенным в гл. IV), если нельзя принять вводимые ниже допущения.

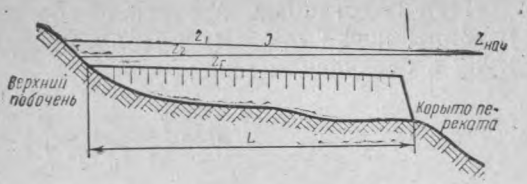


Рис. 105. Схема к расчету затопленного намывного сооружения

Для большинства же грунтовых сооружений на перекатах с затонской частью достаточно ограничиться простым расчетом, относящимся к начальной стадии перелива. На начальной стадии перелива расход, переливающийся через сооружение, мал по сравнению с расходом в верхней плесовой лощине. Поэтому для этой стадии автор способа фрагментов принимает два допущения, облегчающие решение задачи:

а) свободная поверхность в затонской части (в нижнем бьефе сооружения) горизонтальна (рис. 105), или

$$\frac{dz_2}{dl}=0;\ z_2=z_{нач}=\text{const};$$

б) кривую свободной поверхности в верхней плесовой лощине (верхнем бьефе сооружения) можно строить без учета расхода, отходящего в затонскую часть,— по полному расходу реки, или

$$\frac{dz_1}{dl}=\frac{Q^2}{K_1^2}.$$

Далее должны быть рассмотрены два случая.

1. Боковой водослив не затоплен:

$$z_2-z_г<h_{кр}=\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}, \qquad (138)$$

где $h_{кр}$ — критическая глубина.

2. Боковой водослив затоплен:

$$z_2-z_г>h_{кр}. \qquad (139)$$

В первом случае, обозначая $z_1-z_г=H$, можем написать:

$$q=\varphi h_{кр}\sqrt{2g(H-h_{кр})}. \qquad (140)$$

При подстановке в эту формулу выражения для критической глубины после простых преобразований получим расчетную формулу в следующем виде:

$$q=\left(\frac{\varphi}{\sqrt{1+2\varphi^2}}\right)^3\sqrt{8g}H^{3/2}. \qquad (141)$$

Расчет в этом случае состоит из следующих этапов.

По полному расходу Q, исходя из известной отметки $z_{нач}$, строят кривую свободной поверхности в верхней плесовой лощине и определяют таким образом в ряде сечений значения отметок z_1. Затем определяют в тех же сечениях напор $H=z_1-z_г$ (продольный профиль сооружения известен).

По формуле (141) вычисляют для тех же сечений значения элементарных расходов q и строят их эпюру по длине сооружения. Измерение площади этой эпюры позволяет судить о приемлемости допущения $Q_1\approx Q$.

Подсчитывают скорости переливающегося потока, нормальные к оси сооружения:

$$v_н=\frac{q}{h_{кр}}=\sqrt[3]{gq}. \qquad (142)$$

Во втором случае имеем:

$$q=\varphi(z_{нач}-z_г)\sqrt{2g(z_1-z_{нач})}. \qquad (143)$$

Общий ход расчетов аналогичен ходу расчетов для первого случая, с той лишь разницей, что вместо напора H вычисляют значения перепада $z_1-z_{нач}$ и глубины на гребне $z_{нач}-z_г$. Нормальные к оси сооружения составляющие скоростей вычисляют по формуле

$$v_н=\frac{q}{z_{нач}-z_г}. \qquad (144)$$

У некоторых сооружений условия перелива могут быть таковы, что часть соружения работает в затопленном состоянии и часть в незатопленном. Приступая к расчету, нельзя знать заранее, является ли водослив затопленным или нет. Поэтому, выполнив расчет по формуле (141) или (143), проверяют по полученной величине q соответствие взятой формулы соотношению между $h_{кр}$ и $z_2-z_г$.

В отношении коэффициента скорости φ следует отметить, что пренебрежение падением свободной поверхности в затонской части и подсчет отметок z_1 по полному расходу Q увеличивают запас расчета, поэтому вводить еще дополнительный запас, полагая $\varphi=1$, вряд ли целесообразно. Для сооружений с нешироким гребнем и крутым верховым откосом можно полагать просто $\varphi=0{,}9$.

Для сооружений распластанного профиля правильнее учитывать потери по длине, т. е. пользоваться формулой

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_д}} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{2g\delta_г}{C^2 h_г}}}, \qquad (145)$$

в которой $\zeta_д$ — коэффициент сопротивления по ширине гребня или длине водослива; $\delta_г$ — ширина гребня; C — коэффициент Шези для потока, переливающегося через гребень; $h_г$ — глубина на гребне.

Для оценки воздействия потока на сооружение важно знать абсолютные величины скоростей $v_г$ на гребне, а также их направление относительно оси сооружения. Для вычисления абсолютных величин скоростей можно воспользоваться формулой

$$v_г = \sqrt{v_н^2 + v_0^2}, \qquad (146)$$

в которой v_0 — направленная вдоль оси сооружения скорость потока в верхней плесовой лощине (скорость подхода).

Для определения скорости v_0 рекомендуется следующий прием. Зная скорость v_i струи, омывающей верховой откос сооружения при отсутствии перелива через гребень, можно определить отношение этой скорости к средней скорости v в живом сечении тоже при отсутствии перелива. Если средняя скорость в живом сечении верхней плесовой лощины при переливе через гребень будет $v_{пер} \neq v$, то скорость подхода найдется из выражения

$$v_0 = \frac{v_i}{v} v_{пер}. \qquad (147)$$

Угол α, образуемый скоростью $v_г$ с осью сооружения, можно найти по формуле

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v_н}{v_0}. \qquad (148)$$

Расчет скоростей потока на гребне сооружения выполняют по меньшей мере для двух расходов воды в реке (двух отметок $z_{нач}$). Одна расчетная кривая свободной поверхности в верхней плесовой лощине должна быть выше гребня сооружения на 0,2—0,3 м, другая — на 0,5—0,6 м.

Описанный расчет скоростей потока на гребне продольного грунтового сооружения является приближенным и требует еще проверки на материале натурных наблюдений.

Полученные данные о величинах абсолютных скоростей на гребне сооружения позволяют установить наиболее опасные участки и выбрать для них подходящие способы крепления. Одним из наиболее простых и дешевых способов крепления является покрытие гребня сооружения наброской из крупного гравия, гальки или щебня. Располагая данными о скоростях, можно оце-

нить потребную крупность материала наброски с помощью одной из формул неразмывающих скоростей. Обозначив в формуле Гончарова отношение $d_{50}:d_{90}$ через ε и решая ее относительно d_{50}, получим:

$$d_{50}=\left[\frac{v_г}{3{,}0(\varepsilon h_г)^{0{,}2}}\right]^{\frac{10}{3}}. \qquad (149)$$

Численным слагаемым 0,0014 в этой записи пренебрегаем как малым по сравнению с диаметром материала наброски.

По данным о гранулометрическом составе песка на перекатах судоходных рек европейской территории Советского Союза величина коэффициента ε лежит в пределах 0,4—0,8. Поскольку формулы неразмывающих скоростей основаны на экспериментальных данных по равномерному движению, а на гребне сооружения благодаря сжатию потока эпюра скоростей не отвечает этому условию (скорости по вертикали выравнены), целесообразно ввести в расчет запас. Это можно сделать, приняв в качестве расчетного нижний предел значений ε, т. е. $\varepsilon=0{,}4$. Тогда расчетная формула для определения крупности наброски будет иметь вид

$$d_{50}=0{,}04\sqrt[3]{\frac{v_г^{10}}{h_г^2}}. \qquad (150)$$

При определении крупности материала для крепления откосов продольных сооружений, когда они работают в незатопленном состоянии, в приведенную формулу надо вместо $v_г$ и $h_г$ подставлять соответственно скорость течения v_i в струе, прилегающей к откосу, и глубину потока на откосе T_i.

В случаях расчета продольных грунтовых сооружений, расположенных в районе ухвостья или приверха островов и на перекатах с побочневой протокой, а также соединяющих острова и осередки в крупные массивы, состав расчетов остается в основном таким же, как указано выше, но предварительно требуется распределять расход воды между рукавами или между основным руслом и протокой и строить по ним кривые свободной поверхности. В этих случаях сооружения при работе в незатопленном состоянии обтекаются с двух сторон и проверке на размываемость подлежат оба откоса. Для таких сооружений при их работе в затопленном состоянии в большинстве случаев нельзя принять допущения, что свободная поверхность в нижнем бьефе горизонтальна и что кривую свободной поверхности в верхнем бьефе можно строить по полному расходу реки.

Практика проектирования и возведения продольных грунтовых сооружений в русле показывает, что в большинстве случаев отметка их гребня принимается на 2—4 м выше проектного уровня, т. е. по высоте они относятся к сооружениям весеннего действия. Такие сооружения не должны сильно стеснять движение речного потока, в особенности в половодье, а при более низких уровнях значительно перераспределять расход воды в пользу основного русла во избежание ненужных размывов в последнем.

§ 43. СПРЯМЛЕНИЯ ПОЙМЕННЫХ ИЗВИЛИН И ИХ РАСЧЕТ

Спрямление развитой пойменной извилины, т. е. достигшей последней стадии своего развития, сильно меняет режим потока на всем прилегающем к извилине участке. В результате создания короткого спрямляющего канала (рис. 106) русловые сопротивления резко уменьшаются и уровень воды в сечении, из которого берет начало спрямляющий канал, падает. На вышележащем участке образуется кривая спада. Если здесь расположены перекаты, возникает угроза срыва судоходных глубин. Так как в пределах кривой спада уклоны свободной поверхности, а следовательно, и скорости течения оказываются повышенными, то на участке реки, расположенном выше спрямления, развиваются явления размыва русла.

Размытый грунт выносится потоком вниз. Часть его оседает на начальном участке извилины, ускоряя ее отмирание. Остальная часть проходит транзитом через спрямляющий канал, скорости течения в котором обычно бывают достаточно большими. Эта часть наносов откладывается на перекатах, расположенных ниже спрямления. С течением времени процессы размыва на участке, расположенном выше спрямления, затухают, происходит выравнивание уклонов, извилина отмирает, канал развивается в ширину и глубину — русловой режим спрямленного участка приобретает черты, свойственные естественному состоянию русла.

Существующие способы расчета не позволяют охватить описанную картину во всей ее сложности, поэтому при составлении проекта спрямления ограничиваются гидравлическим расчетом потока на момент, непосредственно следующий за выполнением спрямления. Искомыми данными при этом являются: 1) распределение расхода между извилиной и каналом; 2) отметка свободной поверхности выше спрямления. На основании этих данных устанавливается уклон дна канала и скорость течения в канале, а также может быть построена кривая свободной поверхности на участке, расположенном выше спрямления, и определены глубины на расположенных здесь перекатах. Русло реки принимается в расчетах недеформированным (т. е. таким, каким оно было в период, предшествующий спрямлению).

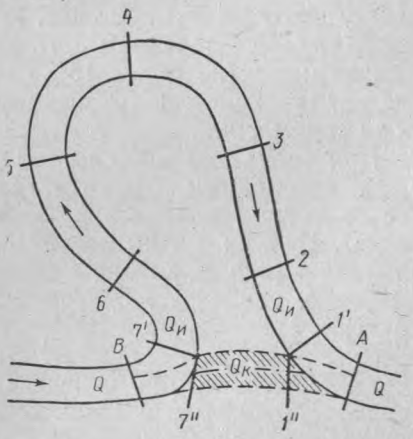


Рис. 106. Разбивка расчетных участков при расчете спрямления

Для выполнения расчетов необходимо иметь заданными сечения канала. Наименьшая допустимая ширина спрямляющего канала по дну равна гарантированной ширине судового хода $b_г$. Неукрепленным откосам берегов придают уклон от 1:2 до 1:4. Таким образом, наименьшая допустимая площадь живого сечения канала в его нижнем сечении при расчетном уровне равна

$$\omega_к=[b_г+m(T_г+\Delta z)](T_г+\Delta z), \qquad (151)$$

где m — коэффициент берегового откоса;
$T_г$ — гарантированная глубина;
Δz — превышение расчетного уровня $z_р$ над проектным $z_п$, причем $\Delta z=z_р-z_п$.

В верхнем сечении извилины (сечение B на рис. 106), где ожидается некоторое понижение $\Delta z_в$ отметки бытового уровня воды после разработки спрямления, для определения наименьшей допустимой площади живого сечения канала надо вместо глубины $T_г$ подставлять несколько большую глубину, равную $T_г+\Delta z_в$. Но величину понижения $\Delta z_в$ до расчета спрямления мы не знаем и ею надо задаваться. Учитывая сравнительно небольшое значение полного бытового падения уровня воды $\Delta z_б$ в пределах извилин, измеряемое обычно сантиметрами, можно приближенно принять $\Delta z_в\cong\Delta z_б$ и для определения в верхнем сечении наименьшей площади канала подставлять глубину $T_г+\Delta z_б$ вместо $T_г+\Delta z_в$.

Практически для того, чтобы привлечь в канал достаточный расход воды и не получить там в то же время слишком большой скорости течения, берут сечения канала несколько больше, чем по формуле (151), увеличивая ширину по дну на 20—30% против гарантированной ширины судового хода. Полученная таким путем предварительная величина площади живого сечения канала корректируется после выполнения расчета распределения расхода между извилиной и каналом. Узнав расход воды в канале $Q_к$, находят скорость течения $v_к$ в нем; $v_к=Q_к:\omega_к$. Скорость $v_к$ не должна намного (не более 15%) превосходить размывающую скорость, чтобы не перегрузить продуктами размыва речной поток ниже спрямления.

При более высокой скорости течения в канале, когда $v_к>1{,}15$, $v_{разм}$, необходимо изменить трассу спрямляющего канала на более пологую (более длинную) и вновь выполнить гидравлический расчет. Наряду с этим нельзя принимать к осуществлению спрямляющий канал, в котором скорость окажется менее размывающей, т. е. $v_к<v_{разм}$. В этом случае надо проектировать более крутую трассу канала (более короткую) или предусмотреть возведение запруды в извилине для увеличения расхода воды в спрямлении. Если дно и берега спрямляющего канала сложены трудноразмываемыми грунтами (глина, суглинок), то величина скорости $v_к$ ограничивается требованиями судоходства — она должна быть такой, чтобы не возникало затруднений для движения груженых составов против течения.

Расчет спрямления следует выполнять для трех уровней, определяемых для створа ниже спрямления (створ A на рис. 106): 1) проектного уровня путевых работ, т. е. принимая $z_р = z_п$; 2) уровня меженных бровок (вровень с поймой), когда $z_р = z_{бр}$, или уровня верхнего руслоформирующего расхода; 3) промежуточного уровня, например $z_р = 0{,}5(z_п + z_{бр})$, или уровня нижнего руслоформирующего расхода. При недостатке исходных данных можно ограничиться расчетом лишь для одного уровня, стараясь, чтобы этот уровень был близок к уровню, ожидаемому в конце производства работ.

Исходные данные для проекта спрямления сводятся к следующему: план участка извилины с показанием рельефа поймы; геологический разрез по трассе спрямляющего канала; значения расходов воды в реке, отвечающие принятым расчетным уровням; сведения о коэффициентах шероховатости извилины.

Расчет распределения полного расхода реки между извилиной и каналом и отыскание отметки уровня в сечении, расположенном выше спрямления, производятся совместно, путем решения системы уравнений (125)—(126), которая здесь будет иметь следующий вид:

$$Q_и + Q_к = Q; \tag{152}$$

$$\sum_и \Delta z = \sum_к \Delta z. \tag{153}$$

Первое уравнение указывает на равенство суммы расходов воды в извилине $Q_и$ и $Q_к$ в канале полному расходу реки, второе — на равенство падений свободной поверхности по извилине и каналу. Для вычисления падений свободной поверхности по расчетным участкам можно использовать, пренебрегая силами инерции, уравнение неравномерного движения (21) и по аналогии с уравнением (127) записать:

$$Q_и^2 \sum_и F = Q_к^2 \sum_к F. \tag{154}$$

Так как значения модуля сопротивления F зависят от уровня свободной поверхности, а последний до выполнения расчетов неизвестен, то решать систему (152) и (153) приходится подбором. Расчет начинается с разбивки извилины и канала на расчетные участки (см. рис. 106). На всех расчетных участках строятся кривые зависимости модулей сопротивлений от средних уровней $F = F(z_{ср})$.

Для данного значения расхода воды в реке Q расчет выполняется в такой последовательности.

1. Задаются двумя произвольными значениями расхода воды в извилине $Q_и < Q$ и для каждого из этих расходов строят кривую свободной поверхности в извилине — от нижнего сечения A до верхнего сечения B (см. рис. 106).

2. Задаются двумя произвольными значениями расхода воды в канале $Q_к < Q$ и строят две кривые свободной поверхности по трассе спрямления.

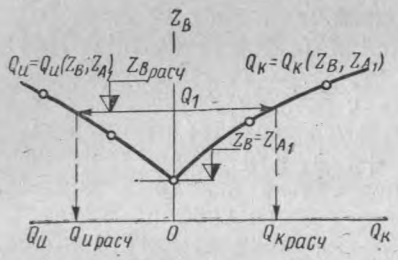


Рис. 107. Графическое решение системы уравнений (152) и (153)

3. По полученным значениям отметок в сечении B строят кривые зависимости расходов воды в извилине $Q_и$ и канале $Q_к$ от отметок z, как показано на рис. 107. Каждая кривая проводится по трем точкам: две из них получены в результате построения кривых свободной поверхности, а третья (нижняя) является общей для обеих кривых расхода и устанавливается из условия

$$Q_и=Q_к=0; \quad z_A=z_B. \qquad (155)$$

Это условие означает, что при расходе воды, равном нулю, свободная поверхность в извилине и канале горизонтальна.

4. Графически на построенных кривых (см. рис. 107) отыскивается тот единственный уровень z_B, при котором удовлетворяется равенство (152). Тем самым устанавливаются и окончательные значения расходов воды в извилине и канале ($Q_и$ и $Q_к$).

Необходимо подчеркнуть еще раз, что полученное решение действительно только для одного определенного значения полного расхода реки Q и отвечающей ему единственной отметки уровня в нижнем сечении A и только для одного заданного сечения канала.

Если такой расчет сделать не для одного, а для трех значений полного расхода (трех отметок z), то можно построить кривые, связывающие расходы воды в извилине и канале с уровнями в сечении B, которые будут действительны во всем использованном диапазоне значений полного расхода (отметок z_A). Это построение показано на рис. 108. Наметив выполнение спрямления при некотором определенном уровне z и соответствующем ему некотором определенном значении полного расхода Q, с помощью кривых, показанных на рис. 108, можно найти распределение этого полного расхода Q между каналом и извилиной на момент,

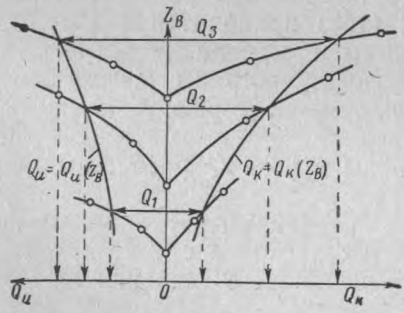


Рис. 108. Построение кривых зависимости расходов в извилине и канале от уровня воды в сечении выше спрямления

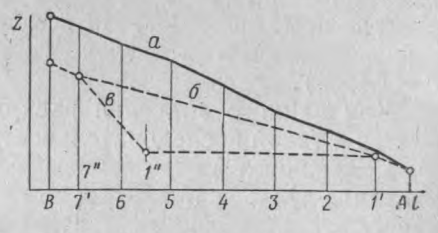


Рис. 109. Профили свободной поверхности при спрямлении извилины: *а* — в извилине при бытовом режиме; *б* — то же, после спрямления; *в* — в спрямляющем канале (номера сечений соответствуют рис. 106)

непосредственно следующий за спрямлением русла. По полученным значениям расходов $Q_к$ и $Q_и$ можно построить профили свободной поверхности в канале и извилине (рис. 109) и получить, таким образом, полное представление о режиме потока в первое время после работ по спрямлению. В заключительной стадии расчетов определяются скорости течения в канале и извилине и делается качественная оценка ожидаемых деформаций русла.

При сравнительно коротком спрямляющем канале, когда его длина $L_к$ значительно короче длины $L_и$ извилины, необходимо, кроме потерь энергии по его длине, учитывать еще местные потери энергии в канале, главным образом на входе в него, и пользоваться следующим, более полным уравнением для оценки падения в канале:

$$\Delta z_к = Q_к^2 \Sigma F_i + \zeta \frac{v_к^2}{2g}, \qquad (156)$$

где ζ — коэффициент местных сопротивлений, величина которого зависит от условий входа в канал и соотношения скоростей в канале и русле.

§ 44. БЕРЕГОВЫЕ УКРЕПЛЕНИЯ НА РЕКАХ И ИХ РАСЧЕТ

На наших судоходных реках при их выправлении размываемые берега укрепляются *береговыми покрытиями* и *берегозащитными шпорами*. Для береговых покрытий используются преимущественно каменная наброска или укладка, гравий или щебень, хворостяные тюфяки, посадки кустарника и посев трав. Береговые покрытия могут также быть бетонные и железобетонные, асфальтобетонные и грунтобетонные, но пока такие покрытия не получили широкого применения при выправлении. Берегозащитные шпоры возводятся преимущественно из грунта с частичным креплением гребня и откосов.

Для выбора того или иного укрепления размываемого берегового откоса его прежде всего проверяют на *устойчивость против воздействия скоростей течения* воды. Результаты этой проверки позволяют также установить необходимую длину и ширину укрепления берега. Устойчивость берегового укрепления должна быть затем проверена на *воздействие волны и льда*.

Скорости течения в струе у берега могут быть определены в результате построения на укрепляемом участке реки натурного или теоретического плана течений при двух-трех расчетных уровнях воды: уровне выхода реки на пойму (или уровне верхнего руслоформирующего расхода), уровне нижнего руслоформирующего расхода (или уровне среднем между поймой и побочнями) и проектном уровне путевых работ. Наибольшие скорости течения в русле обычно наблюдаются при уровне выхода реки на пойму.

Сравнение скоростей течения в струе у берега с допускаемыми позволяет оценить устойчивость берегового откоса при воздействии на него течения воды. При скоростях в береговой струе больше допускаемых для грунта берега выбирается береговое укрепление, для которого допускаемые скорости течения не меньше скоростей течения у берега.

Допускаемые средние скорости течения воды для несвязных грунтов зависят от их крупности и глубины потока и колеблются от 0,3—0,5 м/с для мелкого песка при глубине 1 м и до 1—1,2 м/с для крупного песка при глубине 10 м и более. Допускаемые средние скорости течения для связных грунтов зависят от процентного содержания в них частиц менее 0,005 мм и частиц до 0,05 мм, порозности и объемного веса грунта и колеблются от 0,4—1,2 м/с для суглинков, малоплотных и плотных глин при глубине 1 м и до 0,5—1,5 м/с при глубине 3 м.

Допускаемые средние скорости течения для береговых укреплений (точнее, покрытий) зависят от их типа и глубины потока и колеблются: а) для каменной наброски из булыжника разной крупности от 2,1—3,4 м/с при глубине 1 м и до 3,2—4,8 м/с при глубине 10 м и более; б) для каменной укладки крупностью 15—25 см на щебне толщиной 10 см от 3—4 м/с при глубине 1 м и до 4—5 м/с при глубине 3 м; в) для хворостяного тюфяка толщиной ~50 см от 3 м/с при глубине 1 м и до 4 м/с при глубине 3 м.

Допускаемые скорости для грунтов и креплений даются в специальных таблицах, помещаемых в соответствующих технических условиях, нормах и правилах проектирования береговых укреплений. Для несвязных грунтов и укреплений из каменной наброски допускаемую скорость течения можно также определять по формулам неразмывающей скорости. При окончательном выборе берегового укрепления принимают во внимание также наличие строительных материалов и средств механизации, позволяющих выполнить работы в короткий срок и с наименьшими затратами.

Длина укрепления берегового откоса устанавливается на основе анализа совмещенных планов участка реки за ряд лет и планов течения при характерных уровнях. Для определения ширины берегового укрепления откос можно разбить на следующие четыре зоны: зона *I* подводного откоса (ниже низких меженных уровней) с шириной b_1; зона *II* переменных уровней (в пределах высоты весеннего и летне-осеннего паводков) с шириной b_2; зона *III* наката волн и ветрового нагона воды над уровнем весеннего паводка с шириной b_3 и зона *IV* надводного откоса с шириной b_4 (рис. 110).

Ширина крепления b_i в каждой зоне определяется по зависимости

$$b_i = H_i \sqrt{m_i^2 + 1}, \qquad (157)$$

где H_i — высота зоны; m_i — заложение (пологость) откоса в зоне.

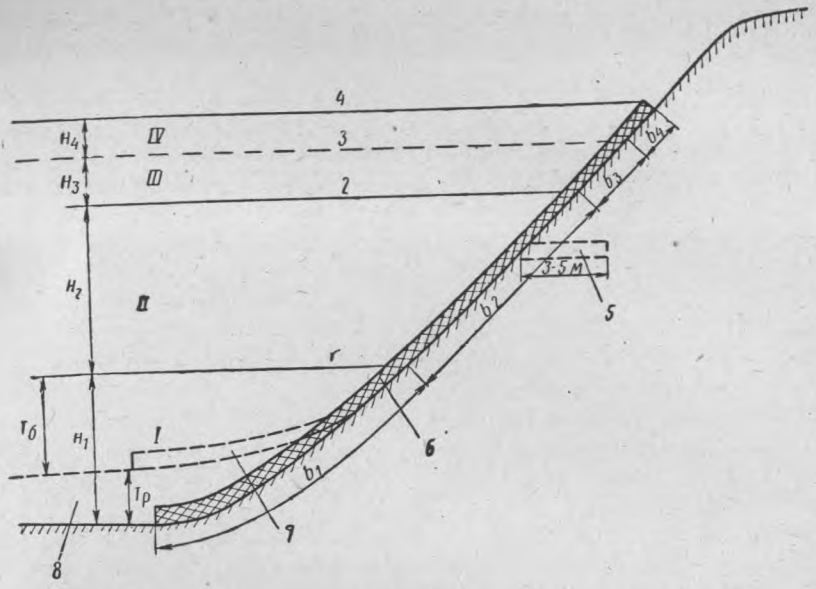


Рис. 110. Поперечный профиль берегового укрепления:
1 — низкий меженный уровень; *2* — наивысший уровень паводка; *3* — уровень наката волны и нагона воды; *4* — верхняя граница крепления; *5* — крепление горизонтального участка низкого берега; *6* — крепление откоса; *7* — первоначальное положение крепления; *8* — размыв русла

Высоту четвертой зоны H_4 (см. рис. 110), которая является запасом в креплении надводного откоса над высотой наката волн на берег с учетом высоты ветрового нагона воды у берега, принимают согласно строительным нормам и правилам, как для сооружений III—V класса соответственно не менее 0,5—0,3 м.

Высота третьей зоны H_3 равняется сумме высот наката $h_н$ волны на откос и ветрового нагона Δh, т. е. $H_3 = h_н + \Delta h$, которые рассчитываются в соответствии с техническими условиями определения волнового воздействия на берега.

При этом высоту наката $h_н$ волны можно вычислить по формуле

$$h_н = \frac{2K_ш h_в}{m} \sqrt[3]{\frac{\lambda_в}{h_в}}, \qquad (158)$$

где $K_ш$ — коэффициент шероховатости и проницаемости откоса или крепления;

$h_в$ — высота ветровой или судовой волны;

$\lambda_в$ — длина волны.

Расчетную высоту ветровой волны можно определить по способу, приведенному в гл. III; она колеблется примерно от 0,6 м при длине разгона 2 км и глубине потока 5 м и до 1,5 м при длине разгона 10 км и глубине потока 8 м. Высота судовой волны за-

висит преимущественно от скорости хода судна и колеблется примерно от 0,1 м при скорости хода 3 м/с и до 1,3 м при скорости хода 6 м/с.

Расчетную длину ветровой волны $\lambda_в$ можно принять примерно равной (8—12) $h_в$, а коэффициент $K_ш$ — равным для каменной укладки 0,75—0,8, для каменной наброски 0,55—0,6.

Высота ветрового нагона Δh воды у берега рассчитывается по формуле

$$\Delta h = K \frac{W_{10}^2 D}{2gT} \cos \alpha, \qquad (159)$$

где коэффициент $K = (6—12) \cdot 10^{-3}$;

W_{10} — расчетная скорость ветра, м/с, на высоте 10 м от поверхности воды;

D — длина разгона волны, км;

T — средняя глубина водоема вдоль линии разгона, м;

α — угол между нормалью к линии берега и направлением ветра, град.

Расчет на ветровые волну и нагон выполняется только при укреплении берегов в широких устьевых участках больших рек, а на судовую волну — только на нешироких реках и в узких судоходных рукавах разветвлений, а также на участках, где судовой ход проложен под берегом.

Высота второй зоны H_2 (см. рис. 110) определяется по данным многолетних наблюдений за уровнями воды и равняется разности среднего из наибольших уровней весеннего паводка и низкого меженного уровня. Когда средний из наибольших уровней паводка выше пойменного берега, высота H_2 равняется разности высот поймы и низкого меженного уровня. Следует также заметить, что при такой низкой пойме величины H_3 и b_3 равны нулю, а ширина крепления b_4 заходит на пойму примерно на 3—5 м.

Высота первой зоны H_1 (см. рис. 10) равняется сумме бытовой глубины $T_б$ у подошвы откоса при низком меженном уровне и глубины возможного местного размыва $T_р$ неукрепленного дна там же после берегоукрепления, т. е. $H_1 = T_б + T_р$.

Глубину размыва дна у конца подводного крепления можно приближенно определить по формуле И. А. Ярославцева

$$T_р = \frac{23 v_{ср}^2}{g\sqrt{1+m^2}} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - 30d, \qquad (160)$$

где $v_{ср}$ — средняя скорость течения в струе у берега;

m — заложение подводной части откоса берега;

β — угол между направлением течения при расчетном паводке и направлением откоса (принимается не менее 30°);

d — крупность грунта на дне 85%-ной вероятности по кривой гранулометрического состава; при $d < 1$ мм последний член в этой формуле можно не учитывать.

В итоге полная ширина берегового крепления $B_{кр}$ получается равной

$$B_{кр}=\Sigma b_i=\Sigma(H_i\sqrt{m_i^2+1}). \qquad (161)$$

При отсутствии данных для расчета глубины $T_р$ ширина крепления у интенсивно размываемых крутых берегов доводится до линии наибольших глубин, а при заметно уполаживающемся в своей нижней части подводном откосе — до подошвы откоса плюс запас 10—15 м.

Величины заложения для надводного откоса при всех видах креплений, кроме каменной наброски, принимаются не круче 1:2 во избежание оползания крепления. Для подводных и надводных откосов, сложенных из мелкозернистого песка, можно назначать величину заложения $m=3$—4; из среднего и крупного песка 2,5—3, из супеси 2—2,5.

Толщина $t_к$ — слоя каменной пригрузки хворостяного тюфяка в подводной части берегового укрепления — определяется из условия отрицательной плавучести тюфяка по формуле

$$t_к=\frac{\eta(1-\gamma_т)h_т}{(\gamma_к-1)}, \qquad (162)$$

где η — коэффициент запаса, равный 1,2—1,5;

$\gamma_т$ — объемный вес тюфяка (примерно 0,8 т/м³);

$h_т$ — толщина тюфяка, обычно 0,35 м;

$\gamma_к$ — объемный вес каменной пригрузки (примерно 2 т/м³).

Наименьшая допустимая крупность каменной пригрузки $d_{пр}$ в тюфяке определяется в зависимости от скорости течения и глубины потока в паводок у берега, исходя из формул для неразмывающей скорости. При глубине на тюфяке 5 м и скорости течения 1,5 м/с потребная крупность пригрузки равна 6 см; при глубине 10 м и скорости течения 2,4 м/с нужна крупность $d_{пр}=30$ см.

На устьевых участках больших рек и в узких речных руслах, где на надводную часть берегового укрепления воздействуют волны (ветровые или судовые), крупность каменного крепления $d_к$ определяется из расчета на взвешивающее давление P при скате волны с откоса по формуле

$$d_к=\frac{\eta P}{\gamma_к-1}\cdot\frac{\sqrt{m^2+1}}{m}, \qquad (163)$$

где m — коэффициент заложения откоса;

$\gamma_к$ — объемный вес крепления (2 т/м³).

Взвешивающее давление (в тс/м²) для каменной укладки и наброски можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$P=(0{,}18-0{,}21)h_в, \qquad (164)$$

где коэффициенты 0,18 — для укладки и 0,21 — для наброски; $h_в$ — высота ветровой или судовой волны.

Следует однако отметить, что для береговых укреплений из каменной наброски с их более шероховатой поверхностью наиболее опасными будут скорости течения, возникающие при накате и скате волны. Наибольшие значения этих волновых скоростей течения для наброски можно определить по формуле

$$v_{max} = 2{,}4\sqrt{h_в}. \qquad (165)$$

В этом случае для устойчивости крепления из наброски необходимо соблюдение неравенства $v_{max} \leqslant v_{нр}$, что достигается подбором крупности наброски.

При расчете берегозащитных шпор сначала определяют их длину, высоту, уклон гребня и расстояние между ними, а затем проверяют устойчивость крепления голов грунтовых шпор при обтекании их потоком и при воздействии на них ледовых нагрузок.

Длина шпор определяется очертанием создаваемой береговой полосы, т. е. расстоянием между существующей линией берега и кромкой выправительной трассы или судового хода, и составляет обычно 20—50 м. Отметка головы грунтовых шпор с креплением гребня и откосов головы принимается выше проектного уровня на 2—3 м и более, при этом гребню придается продольный подъем от 1:10 до 1:25 к берегу.

Речному откосу головы шпор назначают заложение от 2,5 до 3, а заложение напорного и сливного откосов тела шпор зависит от технологии возведения и грунта, из которого шпоры намываются или отсыпаются. При намыве шпор из песка в поток со скоростью течения от 0,5 до 1,5 м/с заложение напорного откоса составляет 3—5 и сливного 5—15.

Расстояние S между шпорами у вогнутого берега назначают равным критическому $S_{кр}$, при этом крепят только их голову и гребень. Укрепляемая поверхность грунтовых шпор при таком расстоянии между ними составляет примерно только 15—20% всей их поверхности. Для шпор у вогнутого берега критическое расстояние сокращают в 1,5—2 раза по сравнению с расстоянием у прямолинейного берега. Шпоры в плане обычно располагают нормально к течению, что обеспечивает максимальную их длину.

При обтекании потоком незатопленных шпор их головы и дно реки у голов подвержены воздействию скорости течения и подъемной силы, возникающей вследствие наличия вертикальных вихрей. Эта сила взвешивает элементы крепления голов и уменьшает их сопротивляемость размыву.

Допустимую крупность $d_к$ каменного крепления в районе голов шпор с учетом вихрей можно приближенно определить по формуле В. В. Баланина

$$d_к = 0{,}15\frac{0{,}44v_г^2 + \beta v_г^2 \cos\alpha}{(\gamma_к - 1)\cos\alpha}, \qquad (166)$$

где $v_г$ — скорость течения у головы, м/с;
β — коэффициент, 0,2—0,3;
α — угол наклона откоса к горизонтали дна, град;
$\gamma_к$ — объемный вес крепления, т/м^3.

Скорость течения $v_г$ у голов шпор оказывается наиболее высокой при расходе и уровне, соответствующим отметке их гребней, и приближенно ее можно определить по следующей формуле НИИВТа:

$$v_г = v_б\left[1+\left(0{,}2+\frac{\omega_ш}{\omega_б}\right)^2\right], \qquad (167)$$

где $v_б$ — средняя бытовая скорость в живом сечении створа шпоры при уровне на высоте ее головы;
$\omega_ш$ — площадь в этом живом сечении, занятая при том же уровне шпорой;
$\omega_б$ — бытовая площадь живого сечения в створе шпоры при том же уровне.

Если скорость $v_г$, определенная по этой формуле, получится меньше скорости в береговой струе при том же уровне, то в формулу для $d_к$ следует подставлять скорость в береговой струе.

§ 45. РАСЧЕТ ВЫПРАВИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ

Характер силового воздействия льда на выправительные сооружения определяется главным образом высотным положением их гребней по отношению к уровням ледохода и, кроме того, зависит от планового размещения сооружений в потоке, их формы, размеров и степени затопляемости.

Полностью затопляемые при ледоходах сооружения динамических нагрузок льда обычно не воспринимают. Динамические нагрузки на гребень, верхнюю часть верхового откоса и поверхность низового откоса сооружения, могущие привести к их повреждению, возможны при превышениях над гребнем уровней ледохода, меньших 1,5 толщины льда. В этом случае будут неблагоприятными условия работы преимущественно низового откоса ввиду действия на него льда при переливе воды через сооружения.

Особенно неблагоприятные условия работы сооружений возникают при уровнях ледохода, превышающих их гребни на величину, несколько мéньшую или равную толщине льда. В этом случае при интенсивном ледоходе почти неизбежно повреждение льдом гребней и верхних частей откосов.

На сооружения, гребни которых при ледоходе остаются незатопленными, возможно действие динамических нагрузок движущихся масс льда и статических нагрузок, возникающих от навала

на их откосы ледяных полей и крупных льдин под действием ветра. Навалы же льда под действием течения воды бывают значительно реже ветровых и действуют главным образом на головные части полузапруд (одиночных и верховых в их системах).

Для определения возможного силового действия льда на выправительные сооружения следует на основе наблюдений за ледовой обстановкой и составления карт ледяного покрова предварительно устанавливать направления перемещения ледовых образований при характерных уровнях ледохода, а также защитное действие отдельных участков ледяного покрова.

Значительную защитную роль могут играть неподвижные участки ледяного покрова, примыкающие к берегам и верховым откосам сооружений, а также участки ледяного покрова между сооружениями в их системах. Кромки таких участков льда отводят плывущий лед в русло от откосов сооружений. Надежно защищают сооружения от плывущего льда и его скопления в виде торосистых гряд, нередко образующихся на мелководьях. Если створ запруды находится ниже истока перекрываемого ею рукава на расстоянии более трехкратной ширины его русла, то можно считать, что динамических ледовых нагрузок на запруду не возникает.

Статические нагрузки от температурного расширения ледяного покрова опасности для выправительных сооружений не представляют ввиду достаточной податливости материала их откосов и возникающих при этом допустимых деформаций.

Возведение выправительных сооружений на разветвленных участках в большинстве случаев, видимо, не будет дополнительно способствовать образованию заторов льда в главном русле (судоходном рукаве). Забивка битым льдом второстепенных рукавов в начале ледохода обычно способствует транзиту льда в главном русле, т. е. в судоходном рукаве. Очевидно, аналогичным образом будет влиять на движение льда и перекрытие запрудами несудоходных рукавов. Как показал опыт работ, увеличение уклонов и скоростей течения в местах искусственных сужений русел ускоряет разрушение и вынос через них льда на низовые участки.

Определение возможных значений ледовых нагрузок производится обычно в соответствии с рекомендациями норм Госстроя СССР (СН 76—66). НИИВТом с целью уточнения и в отдельных случаях облегчения выполняемых расчетов в эти рекомендации внесены учитываемые ниже дополнения применительно к особенностям конструкций и работы выправительных сооружений [1].

За расчетную величину динамической нагрузки льда на откос сооружения принимается меньшее из усилий, необходимых для разрушения ледяного поля от деформации изгиба и раздавливания при ударе его кромкой об откос сооружения (учитывая, что бóльшее усилие не возникнет).

[1] И. П. Бутягин и др. Расчет выправительных сооружений на ледовые нагрузки. Труды НИИВТа, вып. 65. Новосибирск, 1971.

Горизонтальную составляющую нагрузки, разрушающей лед при изгибе, $P_{ги}$, в тс/м, отнесенную к длине сооружения по урезу воды, можно определить по формуле

$$P_{ги} = R_и h_л^2 K_л \frac{1}{m_в}, \qquad (168)$$

где $R_и$ — предел прочности льда при изгибе, тс/м^2, принимаемый в зависимости от климатического района при подвижке льда от 28 до 85 и при ледоходе от 17 до 50;

$h_л$ — толщина льда, м;

$K_л$ — коэффициент, принимаемый в зависимости от $h_л$ (от 0,08 при $h_л$ =0,4 м и до 0,04 при $h_л$ = 1,3 м);

$m_в$ — заложение верхового откоса сооружения.

При действии льда на неукрепленный откос сооружения или на его крепление из каменной наброски возникает дополнительное сопротивление движению льда, а следовательно, и дополнительное усилие, которое вызывает появление во льду напряжений сжатия, повышающих его сопротивление разрушению при изгибе. В этом случае в приведенную формулу для $P_{ги}$ вводится дополнительный коэффициент K_0 для каменной наброски с размерами камня $>$0,2 м, равный 1,5, для щебня и песка — соответственно 1,2 и 1,1.

Горизонтальную нагрузку, разрушающую лед при раздавливании $P_{гр}$ (в тс/м), можно определить по формуле

$$P_{гр} = R_с K_н h_л, \qquad (169)$$

где $R_с$ — предел прочности льда при сжатии, тс/м^2, принимаемый в зависимости от климатического района от 34 до 100.

$K_н$ — коэффициент неплотности соприкасания льдины и сооружения, принимаемый равным 0,6 при подвижках льда и 0,8 при ледоходах.

За расчетное горизонтальное усилие от динамической нагрузки $P_{гд}$ принимается меньшее из полученных значений $P_{гр}$ и $P_{ги}$.

В некоторых случаях, например при действии льда на запруды или низовые полузапруды (в их системе), динамических нагрузок от него не возникает, но возможно появление статической нагрузки от навала ледяного поля (крупной льдины) на откос под действием ветра.

Эту горизонтальную статическую нагрузку от навала льда $P_{гн}$ (в тс) можно определить по формуле

$$P_{гн} = p_в \Omega, \qquad (170)$$

где $p_в$ — сила трения воздуха о верхнюю поверхность ледяного поля, отнесенная к его площади, тс/м^2, вычисляемая по формуле

$$p_в = 2 \cdot 10^{-6} W^2. \qquad (171)$$

Здесь W — максимальная скорость ветра, м/с, в период ледохода в направлении, нормальном к продольной оси расчетного участка сооружения;

Ω — площадь поверхности ледяного поля, м^2, принимаемая по данным полевых наблюдений или по аналогии с другими объектами; при отсутствии фактических данных значение Ω приближенно определяется по формуле

$$\Omega = 1{,}75\alpha D_c^2. \qquad (172)$$

В этой формуле:

D_c — длина сооружения по урезу воды, м;

α — коэффициент, учитывающий влияние отношения длины сооружения к ширине русла; колеблется от 1 при $D{:}B = 0{,}5$ и до 2,5 при $D{:}B = 0{,}1$.

Последняя зависимость получена на основе данных картирования ледовой обстановки на участках искусственных сужений русел крупных сибирских рек.

Величина расчетного горизонтального статического усилия от навала $P_{гн}$, отнесенная к длине линии контакта ледяного поля с откосом по его фронту, не принимается аналогично предыдущему больше расчетного горизонтального усилия от динамической нагрузки $P_{гд}$, т. е. должно быть соблюдено условие $P_{гн} l_к \leqslant P_{гд}$, где $l_к$ — длина участка контакта ледяного поля с откосом, м, определяемая плановым размещением сооружения.

Усилие, направленное нормально к поверхности откоса P_N, тс/м, определяется по величине горизонтальной нагрузки $P_г$, принятой за расчетную,— $P_{гд}$ или $P_{гн} : l_к$. Для этого можно использовать следующую формулу:

$$P_N = P_г \sqrt{1 + m_в^2}. \qquad (173)$$

В некоторых случаях не исключается вероятность возникновения динамической и статической нагрузок от зажорных и заторных масс льда, продольной нагрузки при движении ледяного поля вдоль сооружений, вызывающей истирающее воздействие на откосы, а также статической нагрузки изгибающего момента при примерзании льда к откосам. При необходимости перечисленные ледовые нагрузки могут быть определены по указаниям норм (СН 76—66).

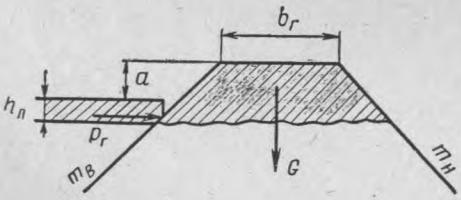


Рис. 111. Схема к проверке устойчивости гребня сооружений на действие льда

Расчет верхних частей откосов и гребней высоких русловых сооружений на динамическое воздействие льда при наличии в период ледохода небольшого слоя перелива воды через гребень не-

целесообразен. В этом случае частичное восстановление поврежденных льдом сооружений экономически более оправдано, чем устройство тяжелых креплений достаточной прочности. В связи с этим далее рассматриваются только способы расчета на ледовые нагрузки ширины гребня сооружений и толщины слоя крепления откосов при уровнях ниже гребня сооружений.

Необходимая ширина сооружения по гребню определяется из условий устойчивости на сдвиг (срез) его верхней части под воздействием горизонтальной нагрузки по схеме на рис. 111. Условие равновесия для сдвигаемого участка сооружения длиной 1 м, с весом G выражается следующим равенством:

$$\eta P_г = fG, \tag{174}$$

где η — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,2—1,5;
$P_г$ — горизонтальная составляющая расчетного давления льда на 1 пог. м длины сооружения, тс/м;
f — коэффициент внутреннего трения материала сооружения; колеблется от 0,5 для мелкого песка и до 0,7—0,85 для щебня и камня.

При выражении веса G через геометрические элементы сечения и вес материала необходимая ширина гребня (в м) определяется формулой

$$b_г = \frac{\eta P_г}{f\gamma(h_л + a)} - 0{,}5(m_в + m_н)(h_л + a), \tag{175}$$

где γ — объемный вес материала сооружения, т/м³ (для песков — 2,0, для гравия, камня — 1,9);
$h_л$ — расчетная толщина льда, м;
a — превышение гребня над верхней поверхностью льда при расчетном уровне воды, м;
$m_в$ и $m_н$ — заложения соответственно верхового и низового откосов сооружения.

Необходимая толщина слоя крепления откосов камнем (включая толщину слоя обратного фильтра или подготовки) определяется из условий сохранения допускаемых величин напряжений, передаваемых креплением на материал тела сооружения.

При этом принимается, что нагрузка распространяется в слое крепления под углом, близким к 45°, во все стороны, а ширина поверхности контакта ледяного поля или льдины с отко-

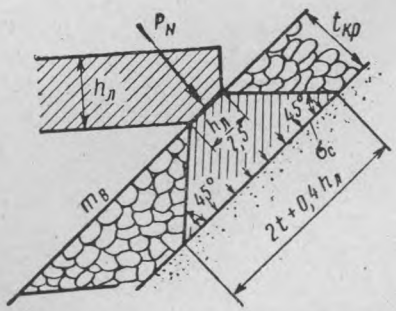


Рис. 112. Схема к расчету толщины слоя крепления откосов сооружений на действие льда

сом будет не меньше 1 м по длине сооружения и не меньше 0,4 толщины льда в вертикальной плоскости по поверхности откоса. Такая схема (рис. 112) приближенно учитывает деформацию кромки льда при контакте с сооружением, внедрение этой кромки в грунтовый материал откоса и некоторое распределение усилия, передаваемого материалу сооружения верхними камнями крепления. По этой схеме пренебрегаем увеличением площади распределения напряжений по длине сооружения и собственным весом материала крепления.

Тогда нормальное к откосу усилие P_N (в тс/м) составит

$$P_N = \sigma_c(2t_{кр} + 0{,}4h_л), \tag{176}$$

а необходимая толщина $t_{кр}$ слоя крепления (в м), включая толщину слоя обратного фильтра или подготовки, определяется выражением

$$t_{кр} = \frac{P_N}{2\sigma_c} - 0{,}2h_л, \tag{177}$$

где σ_c — допускаемое напряжение сжатия для грунта тела сооружения, тс/м² (колеблется от 15 для мелкого песка и до 30 — для крупного).

Глава VII

ГРУНТЫ ПРИ ДНОУГЛУБЛЕНИИ, ЗАДАНИЕ СНАРЯДАМ И СПОСОБЫ ИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ПРОРЕЗИ

§ 46. ГРУНТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДНОУГЛУБЛЕНИЕ

Различают грунты связные, несвязные и малосвязные. В связных грунтах между частицами существует сцепление, которое может достигать значительной величины. В несвязных грунтах между частицами нет сцепления; во влажном состоянии связь между частицами таких грунтов обусловливается капиллярной водой, влияние которой увеличивается с уменьшением крупности частиц. Малосвязные грунты занимают промежуточное положение.

Трудность разработки различных грунтов дноуглубительными снарядами зависит главным образом от их гранулометрического состава, плотности залегания несвязных грунтов (песков, супесей) и консистенции и прилипаемости связных грунтов (глин, суглинков). Гранулометрический состав, характеризующий физическое строение грунта, определяется процентным содержанием в грунте (по весу) частиц или зерен различной крупности. Гранулометрический состав является основной характеристикой грунта; от него в значительной мере зависят и другие его характеристики.

В дноуглублении грунты по гранулометрическому составу делятся на семь классов: 1) булыжник и галька (щебень); 2) гравий; 3) песок крупный, средний, мелкий и пылеватый; 4) супесь непылеватая и пылеватая; 5) суглинок непылеватый и пылеватый; 6) глина легкая и тяжелая; 7) скала.

Определением гранулометрического состава грунтов и других их характеристик должны заниматься специальные грунтовые лаборатории. Для этого необходимо брать пробы грунта в пределах прорезей, разрабатываемых дноуглубительными снарядами. Пробы грунта извлекаются при помощи специальных щупов в объеме не менее 150—200 см³ и хранятся в специальной посуде. Гранулометрический состав грунтов (кроме скалы) определяется ситовым анализом или отмучиванием в спокойной воде.

Плотность несвязного или непластичного грунта (песчаного, супесчаного) зависит от взаимного расположения его зерен или частиц и от количества находящейся в порах грунта воды; при дноуглубительных работах учитывают естественную плотность грунта, слагающего русло водоема. Плотность несвязного грунта характеризуется коэффициентом плотности D, который вычисляется в зависимости от объемных весов скелета грунта в естественном, предельно рыхлом и предельно плотном состояниях (γ_e, $\gamma_р$, $\gamma_п$).

По величине коэффициента плотности различают три степени плотности несвязных или непластичных грунтов: а) рыхлое сложение при $0<D<1/3$; б) сложение средней плотности при $1/3<D<2/3$; в) плотное сложение при $2/3<D<1$.

Для определения коэффициента плотности образцы грунтов должны быть с ненарушенной структурой. Плотные грунты встречаются преимущественно на устойчивых перекатах, требующих повторных разработок через несколько лет, а также на капитальных прорезях, разрабатываемых впервые.

Консистенцию связных грунтов устанавливают на основании лабораторных исследований их естественной весовой влажности w, а также весовых влажностей при верхнем пределе пластичности (нижнем пределе текучести) F, при нижнем пределе пластичности (пределе раскатывания) A, при пределе усадки $w_у$.

Консистенция связных грунтов характеризуется коэффициентом консистенции $K_к$, который определяется в зависимости от величин естественной весовой влажности w, нижнего предела пластичности A и числа пластичности $Ф$.

Различают следующие консистенции связных грунтов в зависимости от величины коэффициента $K_к$: 1) текучая ($K_к>1$; 2) пластичная — $K_к=1—0$; 3) полутвердая — $K_к=0—(—0{,}2)$; 4) твердая — $K_к<(—0{,}2)$. Пластичная консистенция разделяется на мягкопластичную—$K_к=1—0{,}26$ и тугопластичную—$K_к=0{,}25—0$.

Очень текучий ил, суглинки и глины имеют коэффициент консистенции $K_к>1{,}3$; суглинки, или глины от текучих до мягкопластичных — от 1,3 до 0,26; суглинки, ил и глины тягопластичные и плотные твердые — от +0,25 до —0,2; суглинки, ил и глины в твердом слабосцементированном состоянии — от —0,21 до —0,50.

Если отсутствуют приспособления для взятия проб грунта с ненарушенной структурой или нельзя отослать пробу в лабораторию, приближенную оценку грунтов выполняют по признакам, изложенным в «Технической инструкции по производству землечерпательных работ».

Прилипание связных грунтов к стенкам черпаков, грунтовым лоткам, ножам разрыхлителя и стенкам грунтовых шаланд уменьшает производительность дноуглубительных снарядов и шаланд. В основном прилипаемость зависит от гранулометрического состава, влажности грунта и от свойств материала, с которым соприкасается грунт. Пробы грунта для определения прилипаемости выбирают из кусков с ненарушенной структурой и хранят их так, чтобы не изменялась естественная влажность грунта.

По прилипаемости грунты можно разделить на четыре категории:

1) неприлипаемые, прилипаемость которых менее 50 тс/см^2,— чистые песчано-гравелистые, рыхлые илы и супеси, текучие суглинки;

2) слабоприлипаемые, прилипаемость 50—100 тс/см^2 — илы и супеси средней плотности, мягкопластичные суглинки и текучие глины;

3) среднеприлипаемые, прилипаемость 100—250 тс/см² — тугопластичные суглинки и мягкопластичные глины;

4) сильноприлипаемые, прилипаемость 250—400 тс/см² — тугопластичные глины.

На разработку грунтов дноуглубительными снарядами, кроме гранулометрического состава, плотности, консистенции и прилипаемости, влияют сопротивление резанию, сливаемость и разрыхляемость грунтов.

На сопротивление грунта резанию черпаком или ножом разрыхлителя наиболее сильно влияет плотность грунта. Грунты разного гранулометрического состава и разной влажности оказывают различное сопротивление резанию, причем при соответствующем подборе плотности разнородные грунты могут иметь одинаковые удельные сопротивления резанию. Чем плотнее грунт при данном гранулометрическом составе или чем меньше содержится в нем воды, тем бо́льшее усилие надо приложить для его резания.

Сливаемость грунтов ограничивает наполнение черпаков снарядов, так как при работе черпаками с негоризонтальным зевом сливаемые грунты переливаются через спинку или козырек черпаков. Разрыхляемость определяется процентом увеличения объема грунта после отделения его от дна водоема по отношению к объему грунта естественной плотности и может доходить до 25% и более. Разрыхляемость грунтов влияет на производительность многочерпаковых снарядов из-за уменьшения полезной емкости черпаков.

Основной производственной характеристикой дноуглубительного снаряда является его техническая производительность, т. е. производительность, достигаемая им при оптимальных условиях извлечения грунта и проектных условиях рефулирования (у землесосов). По мере конструктивных усовершенствований снарядов, оснащения средствами новой техники и улучшения технологии работы техническая производительность снарядов периодически пересматривается.

Влияние различных характеристик грунтов на трудность их разработки и транспортирование дноуглубительными снарядами учитывается коэффициентами $K_г$ использования технической производительности в зависимости от рода грунта. Эти коэффициенты для типовых снарядов устанавливаются на основании анализа отчетных данных о производительности однотипных снарядов в предыдущие годы. Численные значения коэффициентов использования технической производительности в зависимости от рода грунта для разных типов снарядов даны в «Технической инструкции по производству землечерпательных работ» и колеблются: для гальки и гравия — от 0,2 до 1,0; для песков — от 0,75 до 1,0; для супесей и суглинков — от 0,5 до 1,0; для глин — от 0,3 до 1,0.

Управления пути и каналов утверждают пообъектные коэффициенты производительности по грунту для разных снарядов в зависимости от класса грунта, плотности или консистенции, рас-

пределения грунтов по площади и глубине разработки, засоренности и прилипаемости. Эти коэффициенты подлежат уточнению по мере проведения лабораторных исследований грунтов на отдельных объектах работы.

§ 47. ЗАДАНИЕ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНОМУ СНАРЯДУ НА РАБОТУ

Все дноуглубительные работы выполняются снарядами на основании нарядов-заданий. Дноуглубительный снаряд получает наряд-задание на каждую транзитную и внетранзитную работу независимо от ее объема. Наряд-задание до начала буксировки снаряда выдает прораб путевых работ или его помощник. Допускается выдача нарядов-заданий начальниками изыскательских партий с последующим утверждением их прорабом путевых работ или его помощником.

В состав наряда-задания входят текстовая часть, план переката или участка реки с нанесенными прорезью и отвалом грунта и укрупненный план прорези.

В текстовой части наряда-задания указывают: плановые габариты прорези, глубину ее разработки от проектного уровня, объем выемки или намываемого сооружения и расчетную производительность снаряда; планируемое рабочее время, время на плановые остановки, а также валовое (общее) время, потребное для выполнения работы. Кроме того, указывают следующую очередную работу снаряда.

Расчетная производительность снарядов определяется умножением технической производительности $Q_т$ на расчетный коэффициент ее использования $K_р$ для данных условий.

Для установления расчетного коэффициента технической производительности сначала определяют коэффициенты ее использования по роду грунта, глубине опускания рамы, толщине снимаемого слоя, дальности и высоте рефулирования, а затем по ним назначают расчетный коэффициент. Коэффициент технической производительности по роду грунта определяется по перечню пообъектных коэффициентов или по таблице, приведенной в «Технической инструкции по производству землечерпательных работ». Установление остальных коэффициентов и выбор расчетного коэффициента рассматриваются ниже.

Рабочее время снаряда находят делением объема выемки грунта (включая запас на неровность выработки) на расчетную производительность. Время на плановые остановки для вспомогательных работ определяется по соответствующим нормам.

К вспомогательным работам, связанным с остановкой снаряда, относятся: установка каравана на месте работы и сборка его по окончании работы; перестановки снаряда на месте работы с одной прорези на другую и по длине и ширине одной прорези; перекладки рабочих якорей; переводы плавучего и берегового грунтопроводов; смена и ожидание шаланд; наращивание и укорачивание плавучего грунтопровода, всасывающей трубы и грунтового

лотка; очистка грунтовых путей; осмотр и смазка механизмов и тросов рабочих лебедок; смена грунтозаборных и разрыхляющих устройств у землесосов; смена деталей и профилактический ремонт, прием топлива.

В зависимости от конкретных условий некоторые из вспомогательных работ могут быть частично или полностью выполнены без остановки снаряда; в этом случае планируемое на них время соответственно уменьшается. Время на пропуск судов и плотов тоже планируется в наряде-задании.

Время на производственно-теплотехнические испытания снарядов и исследования средств новой техники, связанные с остановкой снаряда, планируется в наряде-задании по согласованию с управлением пути или канала.

Время на буксировки дноуглубительного каравана продолжительностью до одних суток включают в наряд-задание на очередную работу, на которую буксируется снаряд, а более продолжительные буксировки выполняют по отдельным нарядам-заданиям; скорость буксировки берут из справочных таблиц.

Окончательное валовое время определяется как сумма рабочего времени и времени на планируемые вспомогательные работы, буксировку каравана, пропуск судов и плотов. По валовому времени и дате начала работы определяется задаваемая дата ее окончания и планируемый коэффициент эксплуатации $K_э$ снаряда.

Коэффициент эксплуатации $K_э$ вычисляется по одной из следующих зависимостей:

$$K_э = K_п K_в$$

или

$$K_э = \frac{V}{T_в Q_т} . \qquad (178)$$

В этих формулах: $K_п$ — коэффициент использования технической производительности; $K_в$ — коэффициент использования снаряда по времени, равный отношению рабочего времени $T_{раб}$ к валовому $T_в$; V — объем грунта по наряду-заданию; $Q_т$ — техническая производительность снаряда.

Отношением заданного по наряду-заданию валового времени к фактически затраченному определяется коэффициент выполнения норм времени. Корректировка заданного валового времени разрешается только в особых случаях.

План переката или участка реки (рис. 113) при ширине русла до 100 м вычерчивают в масштабе 1:2000, при ширине 100—300 м — в масштабе 1:5000 и при ширине более 300 м — в масштабе 1:10 000. Давность плана для работ на перекатах с неустойчивым состоянием русла не должна превышать 5 сут со дня промеров глубин, для остальных работ — 15 сут.

На план переката или участка реки наносят: знаки судоходной обстановки; водомерные свайки; контуры прорези и места от-

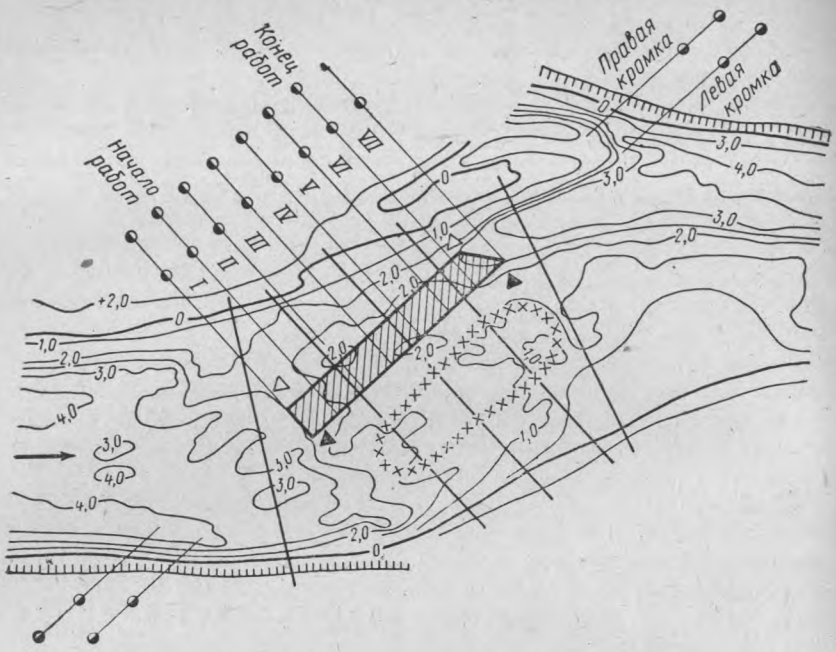


Рис. 113. План переката для работы снаряда с разбитыми створами:
×××× — отвал грунта; *I—VII* — серии

вала грунта; продольные створы по кромкам прорези, гребням траншей и осям намываемых сооружений; поперечные — у начала и конца прорези и через 50—100 м по ее длине, а также контуры гидросооружений и основных береговых строений.

На плане и в таблицах плана указывают: название объекта работы и партии, выполнившей съемку; даты съемки и промеров глубин; срезки уровней за каждый день; отметки реперов и превышение их над рабочим и проектным уровнями воды; срезку в день забивки водомерных свай; сведения о глубине и ширине судового хода при съемке и др.

Укрупненный план прорези вычерчивают в масштабе 1:1000 или 1:2000 на основании специально выполняемых продольных промеров глубин. Он служит для подсчета объема грунта, подлежащего удалению, и для назначения правильной технологии работы. Продольные промеры глубин выполняют по створам через 10—15 м по ширине прорези и обязательно по ее кромкам и оси. Продольные промерные профили располагают также за пределами прорези (на $^1/_4$—$^1/_2$ ее ширины от каждой кромки прорези) на случай, если придется изменить положение прорези.

Для подсчета по укрупненному плану объема выемки всю прорезь по длине разбивают на расчетные участки. При работе тран-

шеями расчетным участком является каждая траншея в пределах длины одной серии, а при работе папильонированием — каждые 20 м длины прорези по всей ее ширине. Для каждого расчетного участка определяют: а) площадь; б) среднюю толщину снимаемого слоя грунта над проектным дном как среднеарифметическую величину всех толщин, найденных по промерам; в) объем выемки выше проектного дна; г) объем запаса глубины на неровность выработки; д) объем грунта в оползающих на кромках прорези откосах, если толщина снимаемого слоя больше 1 м; е) полный объем выемки. Общий объем выемки по всей прорези определяется как сумма объемов выемки по расчетным участкам. Подсчет объема выемки по участкам выполняют в табличной форме и помещают на укрупненном плане прорези.

Выданный наряд-задание является приказом и подлежит точному исполнению командиром снаряда. Отступить от наряда-задания и изменить направление прорези без согласования с прорабом или его помощником командир снаряда может только: а) при резком изменении состояния переката, угрожающем срывом гарантийных глубин; б) при необходимости срочной разработки на перекате нового судового хода вследствие прекращения движения из-за посадки на мель судов или плотов на основном ходу; в) при встрече на прорези с грунтами, не поддающимися разработке или угрожающими сохранности снаряда.

По окончании работ командир снаряда заполняет в наряде-задании раздел о его выполнении. Валовое время, затраченное на работу снарядом, записывается по данным рабочего журнала. Время остановок по метеорологическим причинам и для оказания помощи судам, терпящим аварии, подтверждается актами.

Объем выполненных по наряду-заданию работ выражается в условных ценах как произведение заданного количества нормо-кубометро-часов на условную стоимость кубометра-часа. Заданное же количество нормо-кубометро-часов равно произведению заданного валового времени на техническую производительность снаряда. За выполненный объем выемки принимают объем, заданный в наряде-задании, если обеспечены заданные габариты прорези по глубине, ширине и длине. За выполненный объем намывного сооружения принимается заданный его объем при условии обеспечения проектных габаритов сооружения.

Разработанную прорезь командир снаряда сдает по акту прорабу путевых работ, его помощнику или путевому мастеру. В акте отмечают: установленные контрольными промерами наименьшие глубины в пределах прорези и за ее пределами по судовому ходу на перекате; ширину прорези и особые условия. Во время работы снаряда на прорези командир снаряда несет полную ответственность за состояние и правильность обстановки на перекате. Если прораб или его помощник не участвовали в приемке работы, то не позднее 5 дней после окончания работы они дают на основании акта сдачи заключение о приемке и качестве выполненной работы.



Рис. 114. Водомерная свайка на перекате:
1 — сторожок; *2* — свайка

Капитальные работы с большим объемом работ при необходимости принимает специальная комиссия. Внетранзитные работы принимают представители организации, для которой они выполнены.

Для правильного определения глубины разработки прорези от рабочего уровня изыскательская партия при съемке переката забивает одну или две водомерные свайки (рис. 114). Водомерные свайки устанавливают вровень с уровнем воды, причем в нарядезадании указывают их превышение над проектным уровнем. Глубину разработки $T_р$ (см. рис. 114) прорези от рабочего уровня съемки до проектного дна без запаса на заносимость находят по формуле

$$T_р = H + T_п \pm \Delta H, \qquad (179)$$

где H — превышение водомерной свайки над проектным уровнем;

$T_п$ — проектная глубина, отсчитываемая от проектного уровня;

ΔH — разница между отметкой водомерной свайки и уровнем воды при работе снаряда (см. рис. 114); знак минус ставят, если уровень воды при работе снаряда ниже уровня воды при работе изыскательской партии; в обратном случае берут знак плюс.

На время работы снаряда водомерная свайка и установленная рядом с ней рейка с делениями служат временным водомерным постом на перекате. По рейке ведут ежедневные трехразовые наблюдения за уровнем воды и корректируют глубину разработки прорези от рабочего уровня.

Очертания прорези в натуре определяют выставляемыми продольными и поперечными створами из вех (см. рис. 113).

Продольные створы служат для обозначения кромок прорези, границ подрезок, осей или гребней траншей и осей грунтовых сооружений. Эти створы выставляют по направлению кромок прорези, причем если прорезь имеет изломы, соответственно увеличивается и число створов. Целесообразно продольные створы ставить перед снарядом, но их можно поставить и позади снаряда, если это удобно по береговым условиям. Когда односторонними створами нельзя добиться необходимой точности управления снарядом, выставляют передние и задние створы; задние створы обычно выставляют, когда передние расположены на расстоянии более 1 км от снаряда.

При выставлении продольных створов учитывают возможность обвала грунта у бровок, поэтому прорезь разрабатывают на не-

сколько бóльшую ширину, чем проектная. Рабочая ширина прорези $b_р$ определяется по соотношению $b_р = b_п + 2mh$, где: $b_п$ — проектная ширина прорези; m — пологость естественного подводного откоса грунта; h — толщина снимаемого слоя у кромок. Для песчаных грунтов под водой можно принимать $m = 2—3$ и более.

Поперечные створы предназначаются для обозначения начала и конца прорези и границ серий, проверки длины разработанной прорези, нахождения на плане положения снаряда в данный момент и для обозначения переломов прорези, т. е. точек перехода с одних продольных створов на другие. Расстояние между поперечными створами принимают равным 50—100 м.

После того как на плане переката протрассируют прорезь, на продольных и поперечных створных линиях выбирают точки, в которых должны быть выставлены створные вехи. Эти точки изыскательская партия переносит в натуру и закрепляет прочными кольями с соответствующими надписями.

По прибытии снаряда на место работы по готовым кольям выставляются створные вехи. Причем для того, чтобы не задерживать завозку якорей и не увеличивать продолжительность установки снаряда, продольные створы и поперечный створ начала работы выставляют до прихода снаряда на перекат. Для этого заранее направляют на новое место работы бригаду из состава команды снаряда, которой и поручают проведение этой работы. Для землесосов, работающих траншеями, в первую очередь выставляются створы первой траншеи (на рис. 113 створы траншей не показаны).

При наличии на землесосе действующей аппаратуры «Автоствор» для работы траншеями ограничиваются установкой одного продольного створа по кромке или по оси крайней траншеи. Кроме того, выставляют поперечные створы через 200 м по длине прорези для установки береговых радиостанций «Автоствор».

§ 48. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЗЕМЛЕСОСОВ И МНОГОЧЕРПАКОВЫХ СНАРЯДОВ ПО ПРОРЕЗИ

При работе дноуглубительных снарядов на реках и водохранилищах применяют в основном три способа их перемещения по прорези: 1) продольный, обычно называемый траншейным, 2) поперечный, называемый папильонажным, и 3) продольно-поперечный, или траншейно-папильонажный. Траншейным способом работают только землесосы без механического разрыхлителя, папильонажным — многочерпаковые снаряды (редко землесосы), продольно-поперечным — землесосы с механическим разрыхлителем. Сначала рассмотрим перемещение траншеями землесосов без механического разрыхлителя и перемещение папильонированием многочерпаковых снарядов.

При траншейном способе прорезь по длине предварительно делят на ряд серий, а серии по ширине прорези — на ряд траншей (рис. 115). Ширина прорези $b_п$ равна или больше гарантирован-

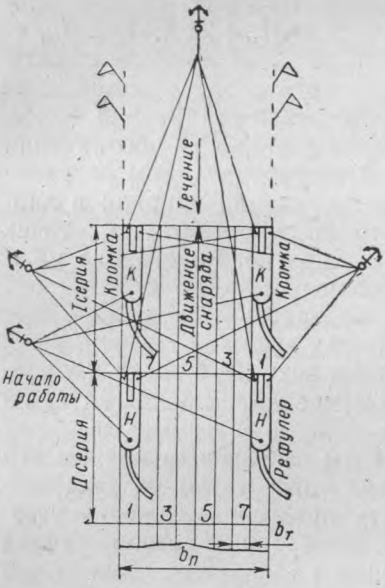


Рис. 115. Перемещение землесоса по прорези сериями траншей по течению

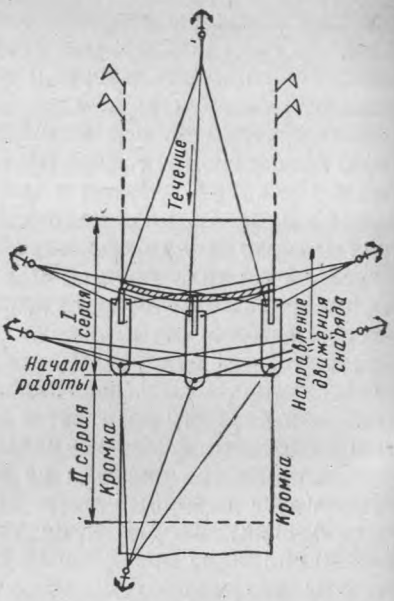


Рис. 116. Перемещение снаряда по прорези папильонированием сериями по течению

ной ширины судового хода. Ширина траншеи $b_т$ принимается равной ширине корпуса снаряда. В пределах каждой серии землесос движется вдоль траншей против течения и разрабатывает последовательно траншеи *1, 2, 3* и т. д. (*1—7* на рис. 115). Землесосы, работающие траншейным способом, имеют обычно всасывающие приемники, позволяющие делать рабочий ход (с забором грунта) только в одну сторону. Такие землесосы, дойдя по траншее рабочим ходом до конца серии, спускаются к ее началу холостым ходом (без забора грунта) и затем переходят на соседнюю траншею для ее разработки и т. д. Длина каждой траншеи равна длине серии.

После разработки всех траншей в пределах одной серии землесос переходит на следующую серию и начинает ее разработку с первой от кромки траншеи. Короткие прорези можно разрабатывать сквозными траншеями, идущими по всей длине прорези.

При папильонажном способе (рис. 116) многочерпаковый снаряд перемещается поперек прорези — попеременно от одной ее кромки к другой — и срезает последовательно папильонажные ленты *1, 2, 3* и т. д. Дойдя по ленте до кромки прорези, снаряд делает подачу вперед (против течения), т. е. переходит с разработанной ленты на неразработанную, и возобновляет движение поперек прорези.

По отношению к течению землесосы могут перемещаться по прорези сериями траншей против течения и сериями траншей по

течению, но обычно работают сериями по течению. На рис. 115 показана траншейная работа сериями по течению, причем разработка прорези начинается с верхней по течению серии траншей и кончается нижней серией.

При папильонажном способе перемещения снарядов различают в основном папильонирование против течения и папильонирование сериями по течению, но обычно работают сериями по течению. При папильонировании сериями по течению прорезь предварительно разбивают по длине на серии (см. рис. 116). Снаряд начинает работу папильонированием на верхней серии и кончает на нижней серии. В пределах каждой серии снаряд перемещается против течения.

Для работы на прорези по течению папильонажными или траншейными сериями необходимо иметь глубину на перекате, превышающую осадку снаряда; при глубине на перекате меньше осадки снаряда работают только сериями против течения.

Обычно при работе траншейными и папильонажными сериями по течению значительно снижаются (по сравнению с работой сериями против течения) затраты времени на перекладку якорей, перевод рефулера, переход с серии на серию и, следовательно, повышается использование рабочего времени снаряда. Кроме того, если работают сериями по течению, особенно сериями траншей, представляется возможным отвал грунта оформлять в виде непрерывного вала, что улучшает его устойчивость и облегчает крепление. Такой отвал грунта может работать как выправительное сооружение.

При работе траншеями диаметральная плоскость землесоса сохраняет положение почти параллельное оси траншей. На рис. 115 показаны начальные *H* и конечные *K* положения землесоса на крайних траншеях верхней (первой) серии (перемещение плавучего грунтопровода не показано). Для работы папильонированием диаметральная плоскость снаряда может быть параллельна оси прорези или наклонена к ней под углом. По этому признаку различают два основных способа папильонирования: параллельный и багермейстерский.

При параллельном папильонировании диаметральная плоскость снаряда занимает положение, почти параллельное оси прорези. На рис. 116 показано перемещение землесоса параллельным папильонированием по лентам верхней (первой) серии. Параллельным папильонированием по всей ширине прорези можно работать в том случае, если глубина на ее кромках больше осадки снаряда (на кромке может помещаться не менее половины ширины корпуса снаряда).

При багермейстерском папильонировании диаметральная плоскость снаряда при его перемещении поперек прорези все время наклонена к оси прорези под одним и тем же острым углом β (рис. 117). Снаряд перемещается поперек прорези из положения *I* от левой кромки в положение *II* к правой кромке и подходит к последней под углом β. Если на правой кромке глубина превы-

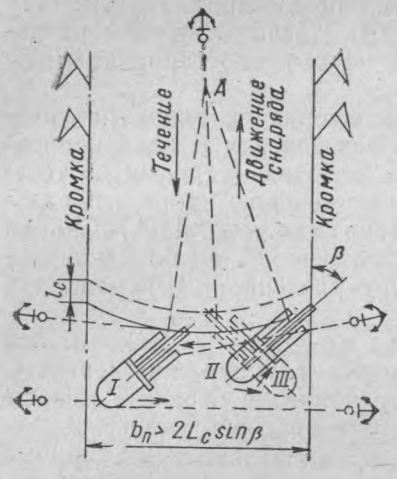


Рис. 117. Перемещение по прорези многочерпакового снаряда багермейстерским способом

шает осадку снаряда, последний сначала разворачивается параллельно кромке прорези и делает подачу вперед, затем отводит корму за кромку, пока его диаметральная плоскость не будет под углом β к левой кромке, и начинает перемещаться к последней.

Если на правой кромке глубина меньше осадки снаряда, последний разрабатывает ее, не выдвигаясь за кромку, и при этом делает подачу вперед. После этого снаряд постепенно разворачивает нос в сторону левой кромки, пока не займет положения *III*, при котором диаметральная плоскость будет наклонена под углом β к левой кромке. От правой кромки снаряд перемещается поперек прорези к левой кромке, сохраняя угол β по возможности постоянным.

Багермейстерский способ по сравнению с параллельным имеет некоторые преимущества: уменьшает возможность сбрасывания черпаковой цепи с нижнего барабана, поскольку его диаметральная плоскость наклонена к папильонажной ленте под углом меньше 90°; облегчает продвижение снаряда по ленте, так как текущая вода давит на боковую поверхность корпуса; позволяет уверенно работать без задних боковых якорей, даже если ветер дует в корму, так как вследствие давления текущей воды снаряд не забрасывает на неразработанную ленту. Недостатком этого способа является увеличение реакции грунта резанию его черпаком.

Для использования багермейстерского способа требуются сравнительно широкие прорези, удовлетворяющие неравенству $b_п > 2L_c \sin\beta$, где $b_п$ — ширина прорези; L_c — длина снаряда вместе с выступающей из корпуса черпаковой рамой.

Перемещение землесосов и многочерпаковых снарядов по прорези осуществляется главным образом при помощи лебедок, выбирающих закрепленные за якоря тросы. Для правильного перемещения снаряда по прорези траншеями и папильонированием достаточно иметь 5 барабанов на лебедках, 5 тросов и 5 якорей: передний (носовой) становой, 2 передних боковых, 2 задних боковых.

При работе траншеями на течении передние становые трос и якорь служат для продвижения землесоса вдоль траншеи вперед (рабочий ход) путем выбирания станового троса. Поскольку при рабочем ходе землесос перемещается по траншее против течения, спуск его к началу соседней неразработанной траншеи (холостой ход) осуществляется за счет течения. При работе траншейными

сериями по течению землесос перемещается с верхней серии на нижнюю тоже за счет течения; холостому спуску землесоса по траншее и переходу с верхней серии на нижнюю способствует еще давление на плавучий грунтопровод текущей воды (см. рис. 115).

При работе папильонированием передние становые трос и якорь используются для поддержания снаряда при его движении по папильонажной ленте рабочим ходом (см. рис. 116, 117). Для папильонирования против течения с помощью этих же троса и якоря снаряд делает подачи вперед на кромках прорези.

Боковые тросы и якоря при работе землесоса траншеями служат для удержания его на оси траншеи и для перемещения с одной траншеи на другую. Задний боковой якорь со стороны отвала грунта обычно не кладут, так как его заменяет плавучий грунтопровод (см. рис. 115); давление текущей воды на плавучий грунтопровод, если потравливать трос другого заднего бокового якоря, заставляет корму землесоса двигаться в сторону отвала.

При работе снаряда папильонированием боковые тросы и якоря используются для его рабочего перемещения по папильонажной ленте от одной кромки к другой (см. рис. 116, 117). Если лебедкой выбирают правые боковые тросы и потравливают левые боковые, то снаряд перемещается поперек прорези от левой кромки к правой, и наоборот. Однако нередко многочерпаковые снаряды при папильонировании на течении работают только с одним задним боковым тросом и якорем и даже совсем без задних боковых и якорей и тросов, если условия работы это позволяют.

Землесосы с механическими разрыхлителями работают только папильонированием против течения. Для работы землесосов с механическими разрыхлителями прорезь разбивается по ширине на полосы (широкие траншеи) и по длине каждой такой траншеи землесос папильонирует при помощи двух передних (носовых) лебедок, выбирающих закрепленные за якоря тросы, и свайно-папильонажного устройства, расположенного на корме. Сваи предназначены для удержания на месте кормы землесоса, когда нос перемещается по папильонажной ленте, и для подачи землесоса вперед на следующую папильонажную ленту. Перемещение таких землесосов по траншеям папильонированием на одних тросах, без свай, встречается редко.

В настоящее время на землесосах разного назначения имеются три вида свайно-папильонажных устройств: 1) две сваи (шагающие) на корме снаряда; 2) две сваи на корме снаряда, одна из которых — на тележке в направляющем колодце; 3) две сваи на корме во вращающемся барабане. Наиболее простым является свайно-папильонажное устройство первого вида; таким устройством оборудованы строительные землесосы. Для дноуглубительных работ используют землесосы только со свайно-папильонажным устройством второго вида, так как при нем между папильонажными лентами не остается неразработанных гребней грунта.

На рис. 118 показано перемещение по прорези землесоса со свайно-папильонажным устройством второго вида. Здесь рабочая

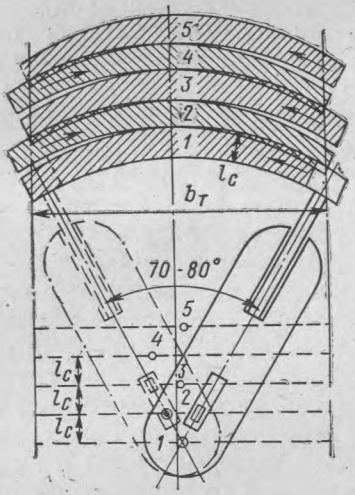


Рис. 118. Папильонирование с двумя сваями, расположенными в колодце и на корме:
l_c — подача вперед

свая, на которой землесос поворачивается при папильонировании, только одна — задняя. Передняя свая, расположенная в колодце, служит для подачи вперед на кромках траншеи и при папильонировании поднята. Цифрами *1—5* на рис. 118 показаны последовательные положения рабочей сваи и соответствующие им папильонажные ленты. Ширина ленты равна величине подачи l_c.

Когда нос землесоса подходит к одной из кромок траншеи, передняя свая должна находиться в верхнем конце колодца, на кромке же траншеи переднюю сваю опускают, а заднюю поднимают. Затем подтягиванием землесоса на передних тросах делают подачу вперед, после чего передняя свая окажется в нижней части колодца. Когда подачу вперед закончат, заднюю сваю опускают, а переднюю поднимают, и на задней свае землесос поворачивается к другой кромке траншеи.

Работающие на наших реках землесосы с фрезерным разрыхлителем имеют тоже свайно-папильонажное устройство второго вида, но рабочей сваей у них является передняя, расположенная в колодце, а вспомогательной — задняя — у кормы землесоса. В этом случае как поворачивания землесоса от одной кромки траншеи к другой для разработки папильонажных лент, так и подачи его вперед на тех же кромках осуществляются при опущенной рабочей свае в колодце.

В начале траншеи рабочая свая находится в верхнем конце колодца; при каждой подаче вперед землесос передвигается относительно этой сваи вперед на долю длины колодца; когда через несколько подач рабочая свая окажется в нижнем конце колодца, опускается вспомогательная свая, поднимается рабочая свая и она переводится снова в верхний конец колодца; затем опускается рабочая свая, поднимается вспомогательная, и работа продолжается.

§ 49. СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ ЗЕМЛЕСОСОВ НА ПРОРЕЗИ И ИХ ДЕЙСТВИЕ

В НИИВТе под руководством В. Г. Власова разработаны системы «Автоствор», предназначенные для ориентации дноуглубительных снарядов при разработке судоходных прорезей на реках. Они могут применяться как при траншейном, так и при

папильонажном способах работы, но пока применяются преимущественно при траншейном способе и позволяют автоматизировать процесс управления боковыми лебедками.

В настоящее время эксплуатируются две такие системы: гиперболическая «Автоствор-1» (с одной сеткой линий положения снаряда) и эллипсо-гиперболическая «Автоствор-2» (с двумя взаимно пересекающимися сетками линий положений снаряда). В основу действия этих систем положен радиофазовый способ измерения расстояний.

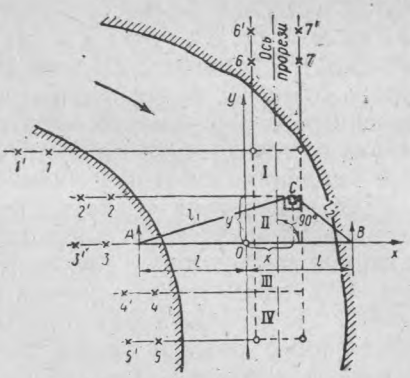


Рис. 119. Схема работы систем «Автоствор»:
A, *B* — береговые радиостанции; *C* — судовая радиостанция; *oy*, *ox* — координатные оси; *AB* — базовая линия; *1'—1* ÷ *5'—5* — поперечные створы; *6'—6* и *7'—7* — продольные створы кромок прорези; *I*—*IV* — номера серий траншей

Гиперболическая система «Автоствор-1», как и система «Автоствор-2», включает в себя две радиостанции *A* и *B*, которые устанавливаются на берегах или на плавучих средствах по обе стороны разрабатываемой прорези, приблизительно на одинаковом расстоянии от ее оси, но обычно не равном (рис. 119). Радиопередатчики этих станций излучают взаимосвязанные по частоте колебания. На снаряде (в пункте *C*) устанавливается двухканальный радиоприемник, принимающий сигналы береговых радиостанций. Антенна радиоприемника располагается на специальной мачте над грунтозаборным устройством снаряда. На выходе радиоприемника включено фазоизмерительное устройство со стрелочным индикатором, измеряющее разность расстояний от снаряда до береговых радиостанций (l_1—l_2). Шкала индикатора разности расстояний проградуирована в метрах.

При разработке прорези траншейным способом землесос устанавливают в начальную точку по береговым створам (привязка). После этого стрелки индикатора ставят на цифру, соответствующую номеру разрабатываемой траншеи. В процессе разработки траншеи землесос нужно перемещать так, чтобы показания индикатора оставались неизменными. При смещении землесоса с разрабатываемой траншеи величина и знак смещения могут быть определены по показаниям индикатора. Для перехода с траншеи на траншею землесос перемещают поперек прорези до тех пор, пока показания индикатора не изменятся на величину, соответствующую заданной ширине траншеи.

При таком способе ориентации землесос перемещается вдоль траншеи по прямолинейной траектории только в том случае, когда ось траншеи совпадает с перпендикуляром *oy* к середине базовой линии *AB*, т. е. с осью *y* (см. рис. 119). При разработке

других траншей землесос будет перемещаться по гиперболическим траекториям (поэтому система названа гиперболической). Траектории перемещения по траншеям, расположенным справа от оси y, будут отклоняться от прямой вправо, а по расположенным слева — влево. (На рис. 119 вся прорезь расположена справа от оси y). Это приводит к тому, что траншеи и прорезь по мере удаления от базовой линии расширяются.

Для повышения точности перемещения по траншеям и меньшего расширения их и прорези береговые радиостанции устанавливаются на возможно большем расстоянии друг от друга. Кроме того, при одном расположении береговых радиостанций разрабатывают только две серии траншей, расположенных одна выше, а другая ниже базовой линии, после чего береговые радиостанции переносят в другие поперечные контрольные створы и разрабатывают следующие две серии траншей. При таком способе ориентации землесос не удаляется от базовой линии на расстояние больше 100—200 м (длина серии), благодаря чему и повышается точность перемещения по траншеям.

Для ориентации снарядов высокой производительности целесообразно использовать эллипсо-гиперболическую систему «Автоствор-2», с помощью которой определяется местоположение снаряда по двум линиям положения и можно перемещать снаряд по прямолинейным траекториям и при неравенстве плеч между станциями A и B.

В системе «Автоствор-2» измеряются сумма и разность расстояний l_1 и l_2 от землесоса до двух фиксированных точек, в которых устанавливаются приемо-передающие радиостанции A и B. Местоположение землесоса определяется по точке пересечения эллиптической (сумма расстояний) и гиперболической (разность расстояний) линий положения. Ошибка σ_c в определении местоположения землесоса C зависит от ошибок σ_1 и σ_2 линий положения и от угла θ, под которыми эти линии положения пересекаются. Ошибка места положения землесоса минимальна при угле $\theta=90°$. Эллипс и гипербола, имеющие общие фокусы, в любой точке пересекаются под прямым углом. Благодаря этому с помощью эллипсо-гиперболической системы достигается высокая точность в определении местоположения землесоса.

Другое достоинство системы «Автоствор-2» состоит в том, что с помощью ее можно перемещать землесос по прямолинейным траекториям независимо от равенства расстояний от оси траншеи до береговых приемо-передающих радиостанций A и B. Это достигается подключением к выходу судового блока специального корректирующего устройства.

Корректирующее устройство должно поддерживать постоянное значение координаты x положения землесоса при движении последнего по длине траншеи, т. е. $x=\text{const}$. Координата x отсчитывается от оси y, параллельной оси прорези и проведенной через середину базовой линии AB.

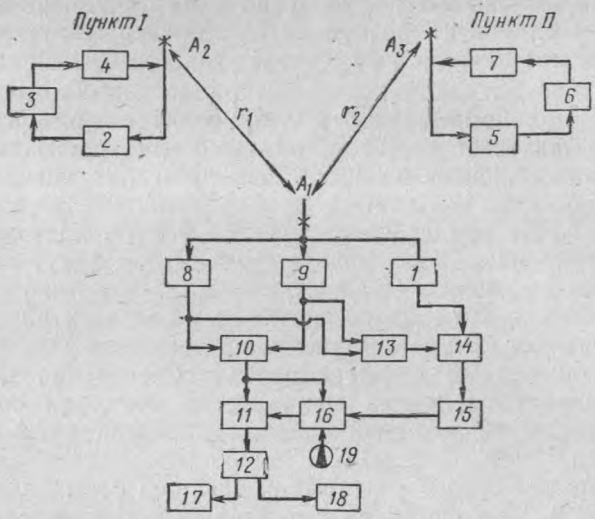


Рис. 120. Блок-схема системы «Автоствор-2»:

1, 4, 7 — передатчики; *2, 5, 8, 9* — приемники; *3, 6* — блоки изменения частоты; *10* — индикатор разности расстояний; *11* — сельсин; *12* — стрелочный индикатор; *13* — смеситель; *14* — фазовый детектор; *15* — индикатор суммы расстояний; *16* — блок вычислений; *17, 18* — электроприводы лебедок; *19* — задатчик расстояния $2l$

Координату x можно записать в следующем виде:

$$x = \frac{\kappa}{2} + \frac{a\kappa}{4l} = \text{const}, \qquad (180)$$

где $\kappa = l_1 - l_2$ — разность расстояний от землесоса до береговых станций;

a — приращение суммы расстояний $(l_1 + l_2)$ по длине траншеи;

l — половина базового расстояния (между береговыми станциями ($l = 0{,}5\ AB$).

Величина $\frac{a\kappa}{4l}$ — это отклонение гиперболической траектории от прямой $x = \text{const}$. В системе «Автоствор-2» координата x определяется путем добавления корректирующим устройством к измеренной величине $\kappa/2$ поправки или корреляции $\frac{a\kappa}{4l}$.

На рис. 120 показана упрощенная блок-схема системы «Автоствор-2». Аппаратура включает в себя две приемо-передающие радиостанции, устанавливаемые в пунктах *I* и *II*, и приемо-передатчик с индикаторами, устанавливаемый в рубке землесоса.

Судовой радиопередатчик *1* излучает незатухающие колебания через антенну A_1, помещенную на специальной мачте над грунтозаборным устройством землесоса. Эти колебания принимаются радиоприемником *2* радиостанции пункта *I*, изменяются по частоте блоком *3* и вновь излучаются радиопередатчиком *4*. Одновре-

менно сигналы судового радиопередатчика принимаются радиоприемником *5* радиостанции пункта *II*, трансформируются по частоте блоком *6* и излучаются радиопередатчиком *7*.

Сигналы передатчиков береговых радиостанций принимаются судовыми радиоприемниками *8* и *9*, приводятся к одной частоте и подаются на фазовый детектор, на выходе которого образуются токи, пропорциональные разности фаз принятых сигналов. Разность фаз принятых колебаний пропорциональна разности расстояний $(l_1—l_2)$ от землесоса до пунктов *I* и *II*. Нетрудно доказать, что и токи на выходе фазового детектора будут пропорциональны этой же разности $(l_1—l_2)$.

После усиления эти токи подаются на индикатор разности расстояний *10*, выход которого через сельсин-датчик соединяется со статорными обмотками дифференциального сельсина *11*. Ротор дифференциального сельсина механически соединен со стрелочным индикатором *12*, который показывает координату x положения землесоса.

Для измерения суммы расстояний сигналы с выходов судовых приемников *8* и *9* подаются на смеситель *13*, где выделяются колебания суммарной частоты. Они подаются на фазовый детектор *14*, на который одновременно подаются колебания от судового радиопередатчика *1*. Разность фаз, подаваемых на детектор *14* колебаний, пропорциональна сумме расстояний от землесоса до береговых радиостанций.

На выходе фазового детектора *14* образуются токи, величина которых пропорциональна разности фаз колебаний, подаваемых на его вход. После усиления эти токи подаются на индикатор суммы расстояний *15*.

Величина коррекции $\frac{ak}{4l}$ определяется аналоговым вычислительным устройством *16*. На вход этого блока подаются напряжения, пропорциональные сумме и разности расстояний. Задатчиком *19* устанавливается расстояние $2l$, равное расстоянию между береговыми радиостанциями.

В результате вычислений блок *16* вырабатывает токи, пропорциональные величине коррекции. Выход корректирующего блока через сельсин-датчик соединяется с роторными обмотками дифференциального сельсина *11*. В результате угол поворота ротора дифференциального сельсина будет пропорционален разности расстояний $\frac{k}{2}$ плюс коррекции $\frac{ak}{4l}$. Таким образом, стрелочный индикатор укажет координату x для любой точки нахождения снаряда по длине траншеи.

В индикаторе *12* установлен сельсин-датчик, с помощью которого вырабатываются электрические сигналы, используемые для автоматического управления электроприводами боковых лебедок *17* и *18*. На вход схемы управления электроприводами боковых лебедок подается напряжение, пропорциональное величине и знаку смещения землесоса с оси траншеи. Благодаря этому напряже-

ние одного бокового троса увеличивается, а другого соответственно уменьшается, и землесос возвращается на ось траншеи.

Система «Автоствор-2» имеет следующие технические данные. Дальность действия 3 км. Точность определения места ±1 м. Система обеспечивает высокую точность перехода с одной траншеи на другую. Суммарная ошибка не превышает 1 м на 10 траншей. На работу системы практически не влияют погодные условия, рельеф и электрические характеристики местности, а также проходящие мимо земснаряда суда.

Система работает на трех частотах в диапазоне от 16 до 40 МГц. Береговые радиостанции питаются от щелочных аккумуляторов или сухих батарей напряжением 12 В, потребляемый ток около 0,5 А. Судовая аппаратура питается от судовой сети переменного тока.

Глава VIII

ИЗВЛЕЧЕНИЕ И УДАЛЕНИЕ ГРУНТА ЗЕМЛЕСОСАМИ

§ 50. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ. ПРОЦЕСС РАБОТЫ ЗЕМЛЕСОСА

Грунт, извлеченный землесосом со дна реки, отводится в отвал в смеси с водой. Смесь твердых частиц с водой называется гидросмесью или пульпой. Путь, по которому движется гидросмесь, состоит из приемника землесоса, всасывающего трубопровода, насоса и напорного трубопровода. Совокупность этих элементов образует грунтовый тракт землесоса. Расходом гидросмеси, или производительностью землесоса по смеси, называется суммарный объем воды и твердых частиц, проходящий через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. Так как вода и твердые частицы практически несжимаемы, то мгновенный расход гидросмеси один и тот же по всей длине грунтового тракта. Расход гидросмеси равен сумме расходов воды и твердых частиц [1]:

$$Q_{см}=Q+Q_{тв}. \tag{181}$$

В связи с тем что вода и твердые частицы могут двигаться с различными скоростями, различают действительную и расходную консистенцию гидросмеси, а также ее действительный и расходный объемный вес. Действительная объемная консистенция гидросмеси имеет тот же физический смысл, что объемное содержание взвешенных наносов, которое рассматривалось в гл. II,— это отношение объема, занимаемого твердыми частицами, к объему смеси при стремлении последнего к нулю. Чтобы аналитически выразить действительную объемную консистенцию, осредненную по площади поперечного сечения трубы, поступим следующим образом. Пусть в данный момент времени консистенция меняется каким-то образом по длине трубы. Двигаясь от некоторого сечения, принятого за начальное, будем суммировать объем твердого материала. Тогда этот объем выразится возрастающей функцией $V_{тв} = V_{тв}\,(l)$. Обозначив площадь поперечного сечения трубы ω, среднюю в сечении консистенцию определим формулой

$$S=\frac{1}{\omega}\cdot\frac{\partial V_{тв}}{\partial l}\,. \tag{182}$$

[1] В соответствии с установившейся традицией элементы движения твердых частиц отмечаются в теории гидротранспорта русским подстрочным индексом «тв» вместо латинского «s», принятого в теории движения наносов. Обозначения элементов движения воды пишутся без индекса.

В связи с неравномерностью грунтозабора консистенция гидросмеси сильно колеблется, и, чтобы перейти к квази-установившемуся режиму, необходимо осреднять ее по времени. При таком осреднении круглые значки дифференциалов в формуле (182) заменятся на прямые. В дальнейших формулах, если нет специальной оговорки, имеется в виду квази-установившийся режим работы землесоса — все вводимые величины осреднены во времени. При таком осреднении предполагается, что как внешние факторы — толщина снимаемого слоя грунта и крупность донных частиц, так и параметры работы самого снаряда — число оборотов двигателя, скорость движения по траншее, глубина опускания рамы — остаются неизменными.

Для действительного объемного веса смеси имеем выражение

$$\gamma_{см}=\gamma(1-S)+\gamma_{тв}S. \tag{183}$$

Если объемный вес смеси известен, эта формула позволяет найти консистенцию:

$$S=\frac{\gamma_{см}-\gamma}{\gamma_{тв}-\gamma}. \tag{184}$$

Подставив сюда численное значение $\frac{\gamma_{тв}}{\gamma}=2{,}65$, получим

$$S=0{,}61\left(\frac{\gamma_{см}}{\gamma}-1\right). \tag{184а}$$

Объемные расходы воды и твердого материала можно записать в таком виде:

$$Q=v(1-S)\omega; \tag{185}$$

$$Q_{тв}=v_{тв}S\omega. \tag{186}$$

В этих формулах v и $v_{тв}$ — соответственно средние в поперечном сечении скорости воды и твердых частиц. Отсюда объемный расход гидросмеси

$$Q_{см}=[v(1-S)+v_{тв}S]\omega. \tag{187}$$

Весовой расход получим, умножив слагаемые объемного расхода на соответствующие объемные веса,

$$G_{см}=[\gamma v(1-S)+\gamma_{тв}v_{тв}S]\omega. \tag{188}$$

Расходной объемной консистенцией называется отношение объемного расхода твердого материала к объемному расходу гидросмеси:

$$S_р=\frac{Q_{тв}}{Q_{см}}=\frac{S}{\frac{v}{v_{тв}}(1-S)+S}. \tag{189}$$

Средняя по сечению трубы скорость твердых частиц может быть равна средней скорости движения воды при совместном соблюдении двух условий: 1) осредненные по времени скорости твердых частиц во всех точках сечения таковы же, как у несущей жидкости; 2) твердые частицы распределены в сечении совершенно равномерно. Так как плотность частиц грунта более чем в 2,5 раза превышает плотность воды, то второе условие практически никогда не соблюдается — бóльшая часть твердого материала перемещается вблизи нижней стенки трубы. Поэтому независимо от того, имеется или нет местное отставание частиц грунта от окружающей жидкости, средняя по сечению скорость грунтовых частиц всегда меньше средней скорости воды и, следовательно, расходная консистенция всегда меньше действительной:

$$S_р < S. \tag{190}$$

Разность этих двух величин растет с увеличением неравномерности распределения взвешенного материала и становится еще больше, когда твердые частицы начинают отставать от окружающей их жидкости (см. ниже § 52).

Расходный объемный вес получим, разделив весовой расход гидросмеси на объемный:

$$\gamma_{см.\ р} = \frac{G_{см}}{Q_{см}} = \frac{\gamma\frac{v}{v_{тв}}(1-S)+\gamma_{тв}S}{\frac{v}{v_{тв}}(1-S)+S}. \tag{191}$$

Легко видеть, что если $v_{тв} < v$, то $\gamma_{см.\ р} < \gamma_{см}$.

Производительность землесоса по грунту определяется обычно одним из двух способов: на основании промеров дна, т. е. по объему грунта, удаленного со дна за определенное время, или по объему грунта, поступившего за определенное время из выходного отверстия напорного трубопровода в мерную емкость (глухую шаланду). И в том и в другом случае мы в состоянии найти только расходную консистенцию гидросмеси. Действительная консистенция измеряется с помощью консистомеров, устанавливаемых на напорном трубопроводе землесоса. Поскольку полезная работа землесоса определяется объемом грунта, удаленного со дна реки, во всех практических задачах используются только значения расходной консистенции, причем принято характеризовать ее объемом грунта вместе с порами и выражать в процентах. Обозначая консистенцию пористого грунта P, имеем:

$$P = \frac{S_р}{1-\varepsilon}\,100\%, \tag{192}$$

где ε — коэффициент пористости.

Основной производственной характеристикой землесоса служит его производительность по пористому грунту

$$Q_г = \frac{P}{100} Q_{см} = \frac{S_р}{1-\varepsilon} Q_{см}. \qquad (193)$$

Работа землесоса складывается из двух параллельно протекающих процессов: *забора грунта* со дна водоема и *отвода грунта*. Основная часть мощности грунтового насоса расходуется на грунтоотвод. В зависимости от интенсивности грунтозабора количество грунта, поступающего в единицу времени в приемник всасывающей трубы и проходящего далее по грунтовому тракту, может изменяться в широких пределах. Интенсивность грунтозабора определяется следующими факторами: родом грунта, заглублением приемника всасывающей трубы в грунт и скоростью рабочих перемещений землесоса (вдоль траншеи или по папильонажной ленте). Движение гидросмеси по грунтовому тракту испытывает влияние рода грунта, длин и диаметров всасывающего и напорного трубопроводов, конструкции грунтового насоса и числа оборотов его рабочего колеса. Таким образом, за исключением рода грунта, факторы, влияющие на грунтозабор и грунтоотвод, различны, причем первые могут в известных пределах регулироваться, а вторые практически постоянны — не зависят от управления землесосом [1]. В связи с этим целесообразно различать *производительность по грунтоотводу*, за которой сохраним обозначение $Q_г$, и *производительность в грунтозаборе*, которую обозначим $Q_з$. Мгновенные значения этих производительностей всегда несколько различны, поскольку содержание грунта в грунтовом тракте колеблется.

Так как, кроме рода грунта, все факторы, определяющие грунтоотвод, практически неизменны, то для каждого рода грунта должно существовать некоторое предельное значение производительности $Q_г$. Если это предельное значение установлено, задачей технологии грунтозабора становится назначение таких параметров работы (заглубления приемника в грунт и скорости перемещения), при которых обеспечивается равенство осредненных величин двух производительностей:

$$Q_з = Q_г. \qquad (194)$$

Два указанных вопроса — установление расчетной (наибольшей возможной) производительности землесоса по грунтоотводу и назначение соответствующих параметров грунтозабора и составляют основное содержание этой главы. Расчетная производительность устанавливается путем рассмотрения совместной работы насоса, напорного и всасывающего грунтопроводов. В ближайших параграфах анализируются процессы, происходящие в каждом из этих трех звеньев грунтового тракта.

---

[1] Технически легко осуществимое уменьшение длины плавучего трубопровода оказывается полезным лишь в исключительных случаях.

§ 51. РАБОТА ГРУНТОВОГО НАСОСА

Для правильной эксплуатации всякого центробежного насоса необходимо знать следующие его параметры: производительность Q, выражаемую в метрах кубических в секунду или метрах кубических в час, напор H, выражаемый в метрах водяного столба, и нормальное число n_0 оборотов рабочего колеса в минуту. Зная производительность и напор, можем подсчитать полезную мощность насоса:

$$N_{\text{п}}=\gamma QH,$$

где γ — объемный вес перекачиваемой жидкости. Паспортные данные по насосам указывают производительность в метрах кубических в час, а мощность (при паровом и дизельном двигателях) — в лошадиных силах. При этих единицах измерения, формула полезной мощности принимает вид

$$N_{\text{п}}=\frac{\gamma QH}{3600\cdot 75}=\frac{\gamma QH}{270\cdot 10^3}. \qquad (195)$$

Отношение полезной мощности насоса к потребляемой мощности, т. е. к эффективной мощности двигателя представляет к. п. д. насоса:

$$\eta=\frac{N_{\text{п}}}{N}=\frac{\gamma QH}{270\cdot 10^3 N}. \qquad (196)$$

Значения к. п. д. грунтовых насосов лежат обычно в пределах 0,6—0,7. Они меньше значений к. п. д. водяных насосов вследствие худших гидравлических качеств рабочих колес [1].

Вал грунтового насоса чаще всего бывает непосредственно соединен с валом двигателя, и поэтому числа оборотов у насоса и двигателя одни и те же. На большинстве современных речных землесосов двигателями служат дизели, снабженные автоматическими регуляторами числа оборотов. Практически можно считать, что такие двигатели работают на постоянном числе оборотов: $n=n_0$. При этом вращающий момент на валу двигателя $M=\frac{60\cdot 75N}{2\pi n_0}=716\frac{N}{n_0}$ может меняться только за счет изменений давления на поршни. При возрастании нагрузки регулятор числа оборотов увеличивает подачу топлива в цилиндры, при снижении нагрузки — уменьшает. На землесосах, применяемых для гидромеханизации строительных работ, насосы обычно приводятся в движение синхронными электродвигателями, которые также работают на постоянном числе оборотов. Таким образом,

---

[1] Необходимость пропускать крупные включения (камни) заставляет, во-первых, ограничиваться небольшим числом лопастей (3—6), а во-вторых, делать внутреннюю поверхность переднего диска параллельной внутренней поверхности заднего диска. Обе эти конструктивные особенности грунтовых насосов усиливают вихреобразование, а значит, и потери энергии в каналах рабочего колеса.

постоянство числа оборотов при сильно колеблющейся мощности представляет характерную особенность большинства грунтовых насосов. Как известно, грунтовые насосы — тихоходные; для пропуска включений их рабочим колесам приходится придавать большие абсолютные размеры. Числа оборотов в минуту составляют: на речных землесосах небольшой производительности 500—800, на крупных 300—500.

При проектировании насосов их основные размеры устанавливаются исходя из заданных определенных значений производительности и напора. В процессе эксплуатации однако производительность может меняться в широких пределах. Вместе с производительностью, но более слабо, изменяется напор. Если число оборотов постоянно, то в области малых значений производительности Q напор H растет по мере роста Q. Достигнув максимума, напор при дальнейшем росте Q понижается. Для практики представляет интерес только область относительно больших значений производительности, где связь между Q и H обратная. В области прямой связи между Q и H работа насоса неустойчива и насосы в этой области не эксплуатируются. Вместе с Q и H меняется потребляемая мощность к. п. д. насоса. Совокупность связей

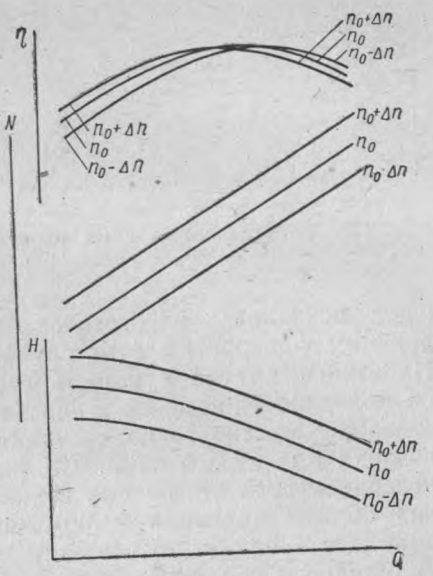


Рис. 121. Рабочая характеристика центробежного насоса

$$H=H(Q,\ n),\ N=N(Q,\ n),\ \eta=\eta(Q,\ n) \qquad (197)$$

называется рабочей характеристикой насоса (рис. 121).

Рабочую характеристику насоса получают на заводе-изготовителе в результате стендовых испытаний. Характеристики грунтовых насосов могут заметно меняться в процессе эксплуатации вследствие абразивного износа рабочего колеса и улитки корпуса. Они меняются также при смене облицовок колеса и улитки и при замене изношенного колеса новым. Чтобы иметь характеристики, отражающие действительное состояние насосов, периодически проводят натурные испытания при работе грунтовых насосов на воде. Число оборотов варьируется в небольших пределах путем перестройки регулятора.

В тех редко встречающихся случаях, когда насос работает в подпоре, т. е. давление на входе в рабочее колесо больше атмо-

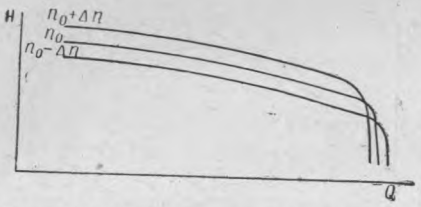


Рис. 122. Кавитационный срыв работы насоса

сферного, предел увеличению производительности кладется предельной мощностью двигателя (наибольшей возможной подачей топлива в цилиндры дизеля). В тех же обычных случаях, когда перед входом в рабочее колесо имеется вакуум, рост производительности прекращается, как правило, раньше, чем бывают исчерпаны энергетические ресурсы двигателя. Ограничивающим фактором в этих случаях служит явление кавитации. Напомним кратко сущность этого явления. Вода, находящаяся на поверхности земного шара (а также и грунтовая вода), всегда содержит мелкие (с поперечниками порядка микронов) пузырьки воздуха и водяного пара. Так как у столь малых пузырьков силы поверхностного натяжения велики, то внутреннее давление газа в них больше давления в окружающей жидкости. Когда давление в жидкости падает, пузырьки начинают расти. При давлении в воде около 1 м вод. ст. (т. е. при вакууме около 9 м) пузырьки могут быть видны невооруженным глазом — их поперечники достигают 0,05—0,5 мм. Еще раньше, т. е. при меньшем вакууме, развитие кавитации визуально проявляется в том, что вода становится непрозрачной, приобретает молочный цвет. Таким образом, при больших вакуумах вода постепенно превращается из практически сплошной среды в эмульсию — смесь воды с пузырьками воздуха и водяного пара.

Поскольку увеличению производительности насоса отвечает такое же увеличение скорости потока во всасывающей трубе, а вакуум растет как квадрат скорости, то при попытке неограниченно увеличивать производительность развитие кавитации перед входом в насос неизбежно. Когда насыщение воды пузырьками воздуха и пара достигает некоторого критического значения, напор насоса резко падает и работа насоса прекращается (рис. 122). Помимо этого прямого ограничения производительности насоса, кавитация ограничивает рост производительности косвенно — через кавитационную эрозию рабочего колеса и улитки. Процесс кавитационной эрозии развивается следующим образом. Попав в канал рабочего колеса, расширившийся пузырек воздуха очень быстро переходит из области низкого давления в область высокого и под его действием сжимается. Очень сложный и до конца еще не раскрытый механизм сжатия таков, что сжатие имеет характер мгновенного «схлопывания», при котором импульс жидких частиц, смыкающих воздушную полость, достигает огромных значений. Если в момент схлопывания пузырек находится на твердой поверхности, то здесь возникает мгновенное точечное давление порядка тысяч атмосфер. Под действием этих ударных давлений металлические поверхности разрушаются. Сначала на них

появляются небольшие выбоины, затем выбоины углубляются и сливаются друг с другом и эрозия проникает в толщу металла. В практике работы грунтовых насосов известны случаи, когда в результате кавитационной эрозии в лопастях рабочего колеса образовывались сквозные дыры. Небольшие повреждения рабочих колес, вызванные работой в кавитационных режимах, представляют довольно частое явление. Эти повреждения свидетельствуют о том, что кавитационная эрозия развивается и принимает опасный характер при значениях вакуума, существенно меньших того предельного значения, при котором происходит срыв работы насоса. К сожалению, фиксировать вакуум, отвечающий началу кавитационных разрушений, очень трудно. Поэтому, чтобы по возможности исключить работу насоса в кавитационном режиме, поступают следующим образом. Путем испытаний, заставляя насос пропускать большие расходы воды и меняя сопротивление всасывающего трубопровода, добиваются срыва работы насоса. Каждому наблюденному значению предельного вакуума отвечает свое значение расхода. По сопряженным значениям этих величин строится кавитационная характеристика насоса (рис. 123):

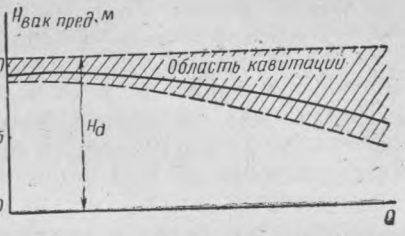


Рис. 123. Кавитационная характеристика насоса при работе на воде: —— линия срыва работы; — — — линия начала кавитационной эрозии

$$H_{вак.\ пред} = f(Q). \qquad (198)$$

При эксплуатации насоса стремятся поддерживать значения вакуума ниже определяемых кавитационной характеристикой. При отсутствии измерений ориентировочное значение предельного вакуума на входе в насос можно найти по эмпирической формуле С. С. Руднева

$$H_{вак.\ пред} = 10\left[1 - \left(\frac{n\sqrt{Q}}{C}\right)^{4/3}\right], \qquad (199)$$

где Q — производительность, м³/с; C — размерный коэффициент, который для тихоходных насосов принимается в пределах 600—800.

Если насос работает на однородной жидкости, то его рабочая характеристика (197) и кавитационная характеристика (198) дают все сведения, которые могут понадобиться при эксплуатации насоса в различных условиях. С грунтовыми насосами дело обстоит гораздо сложнее — все параметры их работы существенно меняются с изменением содержания твердых частиц в гидросмеси. Для того чтобы рационально эксплуатировать грунтовой насос,

необходимо располагать его характеристиками для ряда выбранных значений консистенции или объемного веса гидросмеси. Получить эти характеристики тем же путем, каким получают характеристики при работе на воде, т. е. путем натурных испытаний, крайне трудно как из-за большого объема измерений, так и ввиду практической невозможности поддерживать в течение цикла испытаний постоянную консистенцию смеси. Поэтому характеристики насосов при работе на гидросмеси строят расчетным путем, исходя из имеющихся характеристик при работе на воде[1]. Рабочая характеристика насоса на гидросмеси строится для нормального числа оборотов $n=n_0=\text{const}$ и представляет собой два семейства кривых:

$$H_{см}=f_1\left(Q_{см},\ \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right),\quad N_{см}=f_2\left(Q_{см},\ \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right). \tag{200}$$

(Пересчет к. п. д. обычно не делается). Кавитационная характеристика выражается семейством кривых

$$H_{\text{вак. пред. см}}=f_3\left(Q_{см},\ \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right). \tag{201}$$

Если бы насос перекачивал однородную жидкость с удельным весом, равным $\frac{\gamma_{см}}{\gamma}$, напор, выраженный в метрах водяного столба, был бы равен $\frac{\gamma_{см}}{\gamma}H$, где H — напор, развиваемый насосом при работе на воде. Теоретические соображения и опыт показывают, что при перекачке гидросмеси напор возрастает несколько медленнее, чем отношение $\frac{\gamma_{см}}{\gamma}$. Это означает, что работа насоса на гидросмеси менее эффективна, чем работа на однородной жидкости,— один килограмм гидросмеси способен заимствовать от рабочего колеса меньше энергии, чем один килограмм однородной жидкости. Объясняется это в основном эффектом центрифугирования, т. е. тем, что частицы грунта сходят с рабочего колеса с бо́льшими относительными скоростями, чем частицы окружающей жидкости. При увеличении относительной скорости окружная составляющая абсолютной скорости уменьшается, а именно эта окружная составляющая определяет при данном числе оборотов колеса величину передаваемой энергии. (Согласно известной из курса гидравлики формуле Эйлера, теоретический напор насоса тем больше, чем ближе направление абсолютной скорости частицы при сходе ее с колеса к направлению окружной скорости в точке схода.) В начале 40-х годов, на основе испытаний землесосов ЗГМ-1 и ЗГМ-2, имевших на воде расчетную производительность 1200 м³/ч и рас-

[1] Испытания насосов при работе на смеси выполняются научно-исследовательскими организациями в лабораторных и натурных условиях. Объем данных, полученных при испытаниях, еще невелик и ограничивает возможность теоретических обобщений.

четный напор 43 м, при числе оборотов рабочего колеса $n_0 = 730$ об/мин была получена следующая эмпирическая формула для пересчета напора с воды на смесь:

$$H_{см} = \left(1 - 0{,}25 \frac{\gamma_{тв}}{\gamma_{см}} S\right) \frac{\gamma_{см}}{\gamma} H. \qquad (202)$$

Использовав для действительной консистенции смеси S выражение (184), получим после тождественных преобразований

$$H_{см} = \left(\frac{\gamma_{см}}{\gamma} - 0{,}25 \frac{\frac{\gamma_{см}}{\gamma} - 1}{1 - \frac{\gamma}{\gamma_{тв}}} \right) H$$

и после подстановки численного значения $\frac{\gamma_{тв}}{\gamma} = 2{,}65$

$$H_{см} = \left(0{,}4 + 0{,}6 \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right) H. \qquad (203)$$

Л. С. Животовский показал, что общий вид формулы (202) может быть обоснован с помощью закона изменения момента количества движения, примененного к жидким и твердым частицам, движущимся в каналах рабочего колеса. В 50-х годах в Институте гидромеханики АН УССР (ИГ АН УССР) под руководством Н. А. Силина на основе натурных испытаний землесоса марки 1000—80 с насосом производительностью 10000 м³/ч и напором при работе на воде 80 м, при $n_0 = 297$ об/мин была получена эмпирическая формула

$$H_{см} = 0{,}5 \left(1 + \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right) H. \qquad (204)$$

Она по своему виду совпадает с формулой (203) и дает близкие [немного меньшие, чем (203)] значения напора $H_{см}$. В практических расчетах в настоящее время чаще применяется формула (204). Поскольку напор $H_{см}$ выражается в формулах (203) и (204) высотой столба воды, для полезной мощности насоса действительно соотношение

$$N_{п.\,см} = N_п \frac{H_{см}}{H} \qquad (205)$$

— полезная мощность, при переходе с воды на смесь, растет так же, как напор. Если воспользоваться формулой (204), то

$$N_{п.\,см} = 0{,}5 \left(1 + \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right) N_п. \qquad (206)$$

Исследования ИГ АН УССР показали, что переход с воды на смесь приводит к некоторому понижению к. п. д. насоса и поэтому потребляемая насосом мощность возрастает сильнее чем полез-

ная мощность. Для пересчета потребляемой мощности получено эмпирическое соотношение

$$N_{см}=\left(0{,}2+0{,}8\frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right)N. \qquad (207)$$

Влияние взвешенных в перекачиваемой жидкости твердых частиц на кавитационную характеристику насоса проявляется в снижении срывных значений вакуума. Это снижение тем сильнее, чем больше консистенция. Физически оно объясняется тем, что мелкие трещины, всегда имеющиеся в твердых частицах, содержат пузырьки воздуха и число ядер кавитации в смеси воды и твердых частиц оказывается бо́льшим, чем в чистой воде. Для пересчета кавитационной характеристики можно пользоваться эмпирической формулой А. Н. Машина

$$H_{вак.\ пред.\ см}=\frac{\gamma_{см}}{\gamma}H_{вак.\ пред}-(H_a-H_t)\left(\frac{\gamma_{см}}{\gamma}-1\right), \qquad (208)$$

где $H_{вак.\ пред}$ — предельный (срывной) вакуум при работе на воде; H_a — атмосферное давление и H_t — упругость насыщенного водяного пара, выраженные в метрах водяного столба. Так как при обычных температурах речной воды H_t — малая величина (при 15°С $H_t \approx 0{,}2$ м), то без существенной погрешности можно считать разность $H_a - H_t$ постоянной и равной 10 м.

§ 52. ДВИЖЕНИЕ ГИДРОСМЕСИ В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Для дноуглубления важны две стороны движения гидросмеси в напорном трубопроводе: потери энергии потока (расходуемый напор) и способность потока транспортировать твердый материал. Обе стороны связаны между собой и должны рассматриваться совместно.

При работе на чистой воде величина суммарных затрат энергии в напорном трубопроводе записывается в следующем общем виде:

$$H_н=h_д+\sum_н h_м+h_к. \qquad (209)$$

Здесь $h_д$ — потери энергии по длине; $h_м$ — местные потери; $h_к$ — возвышение центра выходного отверстия трубопровода над осью насоса (геодезический подъем).

Воспользовавшись для потерь по длине и местных известными зависимостями гидравлики, можем переписать уравнение (209) в виде

$$H_н=\frac{v_н^2}{2g}\left(\lambda\frac{L_н}{D_н}+\sum_н\zeta\right)+h_к, \qquad (209а)$$

где $v_н$ — средняя скорость течения в напорном трубопроводе; λ — коэффициент гидравлического трения; ζ — коэффициент ме-

стного сопротивления; $L_н$ и $D_н$ — соответственно длина и диаметр трубопровода.

Полезно сравнить соотношения между членами правой части уравнения (209) у землесосов, работающих на дноуглублении, с соотношениями между теми же членами у землесосов, обслуживающих гидромеханизацию строительных работ. Напорные трубопроводы гидромеханизации обычно имеют значительную длину (до нескольких километров), причем длина магистральной (сухопутной) части может быть в несколько раз больше длины плавучей части. Магистральный трубопровод состоит из небольшого числа прямолинейных участков, в том числе наклонных, с общим подъемом, измеряемым иногда десятками метров. В соответствии с этим наибольшую величину имеют потери по длине, местные потери невелики, а геодезический подъем составляет весьма заметную долю общих затрат энергии. Длины напорных трубопроводов у речных дноуглубительных снарядов производительностью по грунту от 200 до 1000 м³/ч составляют соответственно от 140 до 550 м, и только у землесоса ЗРС-0-2500 производительностью 2500 м³/ч длина напорного трубопровода достигает 700 м. Из общей длины напорного трубопровода $L_н$ около $0{,}9\,L_н$ составляет длина плавучего рефулера и около $0{,}1\,L_н$ — длина корпусной части. Отвалы грунта, как правило, подводные, и ввиду этого геодезический подъем $h_к$ очень мал: 1—2 м. По своей величине он является наименьшим, практически малозначащим членом правой части уравнения (209). Что касается суммы местных потерь, то она сравнима с величиной потерь по длине. Основная часть местных потерь энергии сосредоточена в шаровых шарнирных соединениях плавучего трубопровода. Напомним, что звенья плавучего трубопровода имеют длину от 6 до 10 м и число шаровых соединений составляет от 20 у землесосов небольшой производительности до 50—60 у крупных. Так как напор, расходуемый рефулерами малых и крупных дноуглубительных снарядов, почти один и тот же (20—25 м вод. ст.), а число соединений с ростом производительности растет, то растет и доля напора, теряемая на местные сопротивления. У крупных землесосов местные потери могут составлять 30—40% общего теряемого напора.

Зависимость суммарных затрат энергии в трубопроводе от расхода воды (или средней скорости течения) называется *характеристикой трубопровода*. При натурных испытаниях землесосов характеристику напорного трубопровода получают, измеряя производительность землесоса и снимая показания манометра, подсоединенного к началу трубопровода, при различных числах оборотов двигателя. Характеристику трубопровода можно построить менее точно расчетным путем — с помощью формул для коэффициента трения λ и значений коэффициентов ζ, приводимых в гидравлических справочниках. При расчете потерь по длине необходимо иметь в виду, что в результате абразивного действия песка внутренняя поверхность трубопровода уже после первых 100—150 ч его эксплуатации оказывается сильно сглаженной. При

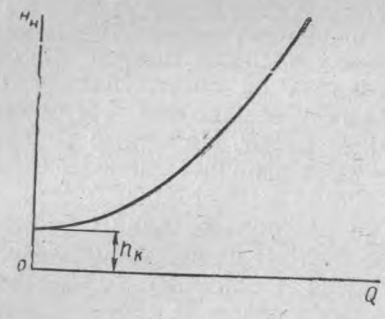


Рис. 124. Характеристика напорного трубопровода при работе на воде

перекачке воды такие отшлифованные трубопроводы работают в переходном или гладкостенном режимах сопротивления — величина их коэффициента трения λ меняется с изменением вязкости (температуры) воды. Ввиду ограниченного диапазона колебания температуры речной воды эти изменения коэффициента λ, впрочем, невелики. При перекачке гидросмеси связь сопротивления с вязкостью не ощущается. Коэффициенты местных сопротивлений для поворотов корпусной части трубопровода могут быть установлены по данным гидравлических справочников, в зависимости от соотношения между диаметром трубы и радиусом поворота. Коэффициент сопротивления одного шарового соединения принимается в среднем $\zeta_ш = 0{,}1$.

Общий вид характеристики напорного трубопровода, работающего на воде, $H_н = H_н(Q)$ показан на рис. 124. Начальной ординатой характеристики служит величина геодезического подъема $h_к$. При изменении $h_к$ на величину $\Delta h_к$ все ординаты характеристики получают такое же приращение.

С переходом от работы на воде к работе на гидросмеси структура потока в напорном трубопроводе претерпевает глубокие изменения. Сложным образом изменяется и закон сопротивления. Имеющаяся в этом отношении резкая разница между потоком гидросмеси и естественным взвесенесущим потоком объясняется различием в порядке величин содержания твердых частиц. В то время как для обычных равнинных рек характерно объемное содержание взвешенных частиц порядка 10^{-5}—10^{-4} и лишь у крайне мутных рек типа Амударьи, Сырдарьи и Куры оно достигает порядка 10^{-3}, объемная консистенция гидросмеси имеет порядок 10^{-2}—10^{-1}. Поэтому у обычных равнинных рек наличие взвеси практически не влияет ни на распределение осредненных скоростей, ни на турбулентную пульсацию. У рек с высоким содержанием взвешенных наносов такое влияние заметно, но все же является второстепенным фактором. В потоке гидросмеси распределение осредненных скоростей, интенсивность турбулентности, а отсюда и потери энергии существенно иные, чем в потоке чистой воды. Ведущую роль в перестройке потока играет различие между местными осредненными скоростями твердой и жидкой компоненты. В связи с этим принято различать три режима движения гидросмеси: *режим больших скоростей*, когда местные осредненные скорости воды и твердых частиц приблизительно равны; *переходный режим*, при котором твердые частицы отстают от частиц воды, но продолжают находиться во взвешенном

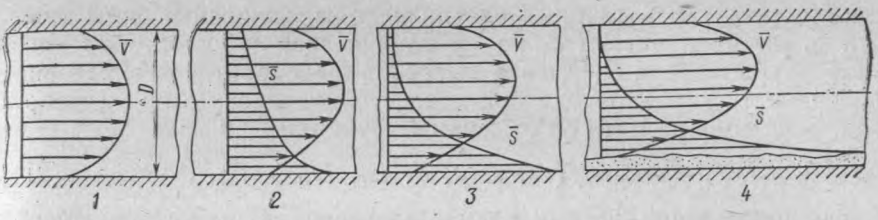


Рис. 125. Распределение осредненных скоростей $\bar{v}$ и консистенции $\bar{s}$ гидросмеси по вертикальному диаметру трубы:

1 — при движении чистой воды; *2* — при движении гидросмеси с большой сверхкритической скоростью; *3* — то же, с умеренной сверхкритической скоростью; *4* — то же, с докритической скоростью

состоянии, и р е ж и м м а л ы х с к о р о с т е й, или р е ж и м з а и л е н и я, когда часть твердых частиц выпадает из потока и образует в нижней части трубы слой отложений (осадок). Напорные трубопроводы землесосов обычно работают или в переходном режиме или с небольшим слоем отложений.

Верхняя граница переходного режима, отделяющая его от режима больших скоростей, имеет размытый характер и не может быть установлена непосредственными наблюдениями. Имеющая гораздо большее принципиальное и практическое значение граница между переходным режимом и режимом заиления фиксируется, хотя и не очень точно, непосредственными наблюдениями[1]. Эту границу удобно связывать с величиной средней по сечению скорости гидросмеси. Средняя скорость гидросмеси, при которой начинается выпадение твердых частиц, называется к р и т и ч е с к о й с к о р о с т ь ю г и д р о т р а н с п о р т а. Очевидно, величина критической скорости в одном и том же трубопроводе будет разной для разных консистенций гидросмеси и разной крупности частиц грунта. При фиксированной консистенции смеси и крупности частиц критическая скорость образует естественный масштаб скоростей гидросмеси. Поэтому режим больших скоростей и переходный режим более точно определяются как режимы больших и умеренных с в е р х к р и т и ч е с к и х с к о р о с т е й, а режим заиления — как режим д о к р и т и ч е с к и х с к о р о с т е й.

Распределения осредненных скоростей воды и консистенции смеси по вертикальному диаметру трубопровода при трех режимах движения показаны на рис. 125. Рисунок показывает, что чем меньше скорость гидросмеси по отношению к критической, тем сильнее расслоение потока по вертикали. При скорости меньше критической поток воды сосредоточивается в верхней половине трубы, а поток твердых частиц — в нижней.

Критическая скорость гидротранспорта представляет собой сложную функцию многих факторов, влияющих на движение гидросмеси. В наиболее общем случае такими факторами являются:

[1] Для такой фиксации в лабораторном трубопроводе делают вставку из оргстекла.

плотности $\rho_{тв}$ и ρ твердых частиц и воды, ускорение силы тяжести g, диаметр частиц d, их гидравлическая крупность w_0, диаметр трубопровода D, высота выступов шероховатости внутренней поверхности трубопровода Δ и консистенция смеси S. Таким образом, речь должна идти об отыскании функции

$$v_{кр}=f(\rho_{тв},\ \rho,\ g,\ d,\ w_0,\ D,\ \Delta,\ S). \qquad (210)$$

Среди написанных восьми размерных величин имеются величины с тремя независимыми размерностями: плотности, скорости и длины. Согласно известной в теории размерности теореме Букингема, из N размерных величин с κ независимыми размерностями можно образовать $N-\kappa$ независимых безразмерных комбинаций. Переход к безразмерным величинам, сокращая число переменных, облегчает анализ явления. В нашем случае $N=8$ и $\kappa=3$. Таким образом, мы можем образовать пять независимых безразмерных комбинаций. Присоединяя к ним безразмерную величину объемной консистенции S, будем иметь всего шесть безразмерных переменных. Удобно пользоваться следующими безразмерными переменными:

$$\frac{\rho_{тв}-\rho}{\rho},\quad \frac{v_{кр}}{w_0},\quad \frac{v_{кр}}{\sqrt{gD}},\quad \frac{w_0}{\sqrt{gd}},\quad \frac{\Delta}{D},\quad S. \qquad (211)$$

Путем проб легко убедиться, что любые другие безразмерные комбинации величин, входящих в уравнение (210), могут быть получены из безразмерных комбинаций (211) и что в то же время ни одну из шести величин (211) нельзя получить, перемножая или деля друг на друга остальные пять. В этом и заключается независимость выбранных комбинаций.

Если взять в качестве зависимой переменной комбинацию $\frac{v_{кр}}{\sqrt{gD}}$, то теперь задача должна состоять в построении безразмерной функциональной зависимости

$$\frac{v_{кр}}{\sqrt{gD}}=f\left(\frac{\rho_{тв}-\rho}{\rho},\ \frac{v_{кр}}{w_0},\ \frac{w_0}{\sqrt{gd}},\ \frac{\Delta}{D},\ S\right). \qquad (212)$$

Состояние наших знаний не позволяет решить эту задачу теоретическим путем, и единственный способ найти аналитическое выражение функции (212) — это обратиться к экспериментальным данным. Такая работа была выполнена в ИГ АН УССР под руководством Н. А. Силина. Произведя обширные эксперименты и представив их результаты в безразмерном виде, Силин получил формулу критической скорости, которая хорошо соответствует опыту и служит в настоящее время одним из основных расчетных средств теории гидротранспорта.

К сожалению, анализ экспериментов был выполнен в ИГ АН УССР с недостаточной последовательностью. Не повлияв заметно на конечные результаты, т. е. на численные значения $v_{кр}$, пробелы анализа сделали структуру формулы Силина в физическом отно-

шении шаткой. Оставив без внимания параметры $\frac{v_{кр}}{w_0}$ и $\frac{\Delta}{D}$, Силин ввел в число исходных размерных переменных вязкость воды. Между тем, в условиях развитого гидротранспорта, влияние вязкости на сопротивление трубопровода пренебрежимо мало и вся роль вязкости сводится к ее влиянию на гидравлическую крупность твердых частиц. Это же последнее полностью учитывается параметром $\frac{w_0}{\sqrt{gd}}$. Таким образом, учет вязкости как отдельного фактора является излишним. Выяснить роль параметра $\frac{v_{кр}}{w_0}$ без анализа исходных экспериментальных данных невозможно. Что касается исключения вязкости и учета относительной шероховатости стенок трубопровода $\frac{\Delta}{D}$, это может быть сделано без труда. Исправленная таким путем формула Силина имеет следующий вид:

$$\frac{v_{кр}}{\sqrt{gD}}=13{,}8\sqrt[6]{\left(\frac{\rho_{тв}-\rho}{\rho}\right)^2 S\frac{w_0}{\sqrt{gd}}\frac{\Delta}{D}}, \qquad (213)$$

где 13,8 — эмпирический коэффициент пропорциональности.

При транспорте грунта $\frac{\rho_{тв}-\rho}{\rho}=1{,}65$. Введя это число в величину коэффициента пропорциональности и умножив обе части уравнения (213) на $\sqrt{gD}$, получим формулу критической скорости в следующем расчетном виде:

$$v_{кр}=16\sqrt[6]{S\frac{w_0}{\sqrt{gd}}\frac{\Delta}{D}}\sqrt{gD}. \qquad (214)$$

Формула (214) показывает, что консистенция смеси, крупность твердых частиц и относительная шероховатость стенок трубопровода влияют на величину критической скорости слабее, чем диаметр трубопровода.

Рекомендованные ИГ АН УССР расчетные значения параметра $\frac{w_0}{\sqrt{gd}}$ для основных фракций песчаных и песчано-гравелистых грунтов приведены в табл. 4. Следует иметь в виду, что эти значения отвечают не средним диаметрам фракций, а скорее, их нижним пределам. Так, например, для фракции 0,5—1,0 мм рекомендуется расчетное значение $\frac{w_0}{\sqrt{gd}}$, равное 0,8. Воспользовавшись таблицей гидравлической крупности, можно найти, что такое значение при температуре воды от 5 до 15°С дает диаметр около 0,6 мм. Высота выступов шероховатости Δ у стальных трубопроводов практически постоянна. После шлифовки песком она составляет около 0,02 мм. Таким образом, относительная шероховатость трубопроводов меняется только с изменением диаметра D. Значения $\frac{\Delta}{D}$ при $\Delta=0{,}02$ мм приведены в табл. 5.

Таблица 4

Фракция грунта, мм	0,05—0,10	0,10—0,25	0,25—0,50	0,5—1,0	1,0—2,0
$\frac{w_0}{\sqrt{gd}}$	0,02	0,20	0,40	0,80	1,2

Таблица 5

D, м	0,25	0,30	0,40	0,50	0,70	0,90
$10^6 \frac{\Delta}{D}$	80	67	50	40	29	22

Чем мельче грунт, тем легче поддерживается высокая консистенция и тем меньше значения параметра $\frac{w_0}{\sqrt{gd}}$. Поэтому при критической скорости величина $\sqrt[6]{S\frac{w_0}{\sqrt{gd}}}$ имеет для песчаных частиц почти постоянное значение. Учтя это обстоятельство, А. С. Стариков предложил упрощенную формулу критической скорости [1]

$$v_{кр}=10\sqrt[6]{\frac{\Delta}{D}}\sqrt{gD}. \qquad (215)$$

При мелкозернистом песке этой формулой можно пользоваться в широком диапазоне значений консистенции.

Трем режимам движения гидросмеси отвечают следующие законы изменения потерь напора (рис. 126). При больших сверхкритических скоростях потери напора на смеси несколько меньше потерь напора при движении однородной жидкости с объемным весом, равным объемному весу смеси. При умеренных сверхкритических скоростях потери напора в потоке гидросмеси становятся больше потерь напора в потоке однородной жидкости, и по мере уменьшения скоростей эта разница быстро нарастает. Точка A на рис. 126, в которой потери напора в потоке гидросмеси равны потерям напора в потоке однородной жидкости, отмечает границу между режимами больших и умеренных скоростей. Так как кривые потерь напора пересекаются под острым углом, положение точки A фиксируется не точно. Точка B обозначает границу между сверхкритическими и докритическими скоростями. Скорость гидросмеси равна здесь критической. При критической скорости по-

[1] Формула Старикова приводится в откорректированном виде.

тери напора в потоке гидросмеси могут превосходить потери напора в потоке однородной жидкости того же объемного веса в 1,5—2,0 раза, а иногда и более. При дальнейшем уменьшении скоростей потери напора в потоке гидросмеси уменьшаются очень слабо (разница с потерями напора в потоке однородной жидкости продолжает нарастать) и в точке C достигается минимум. Движение гидросмеси с минимумом потерь напора происходит уже при наличии небольшого слоя заиления. При еще более малых скоростях — левее точки C на рис. 126 — потери напора в потоке гидросмеси увеличиваются. Связь между потерями напора и скоростью смеси становится здесь обратной.

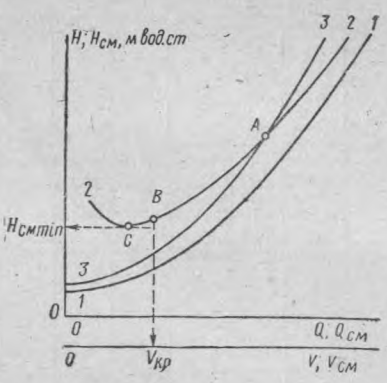


Рис. 126. Характеристики напорного трубопровода:
1 — при работе на воде; *2* — при работе на гидросмеси; *3* — при работе на однородной жидкости с таким же объемным весом,, как у гидросмеси

Поясним физические явления, которые обусловливают описанную картину. Тот факт, что в зоне больших сверхкритических скоростей потери напора в потоке гидросмеси меньше потерь напора в однородной жидкости одинакового объемного веса, принято связывать с отбором энергии от турбулентных пульсаций на поддержание твердых частиц во взвешенном состоянии. Производимая пульсационным движением «работа взвешивания» приводит к некоторому ослаблению пульсаций (частичному гашению турбулентности), а отсюда и к уменьшению количества механической энергии, переходящего в тепло. Когда твердые частицы начинают отставать от потока воды, возникает новый источник сопротивления — обтекание водой частиц. Этот новый источник сопротивления оказывается очень сильным. Он быстро компенсирует эффект гашения турбулентности и создает превышение потерь энергии над потерями энергии в потоке однородной жидкости. Чем сильнее частицы грунта отстают в своем движении от окружающей жидкости, тем больше картина движения гидросмеси приближается к картине фильтрации воды сквозь подвижный скелет грунтовых частиц. В зоне перехода к режиму заиления, где скорости такого фильтрационного (относительного) движения достигают наибольших значений, потери энергии, вызываемые обтеканием водой частиц грунта, становятся сравнимыми с потерями энергии, вызываемыми сопротивлением стенок трубопровода.

Рост потерь энергии при нарастающем заилении трубопровода (область влево от точки C на рис. 126) объясняется тем, что слой отложений все больше стесняет поперечное сечение трубы. Практического значения эта область не имеет, так как из-за угрозы

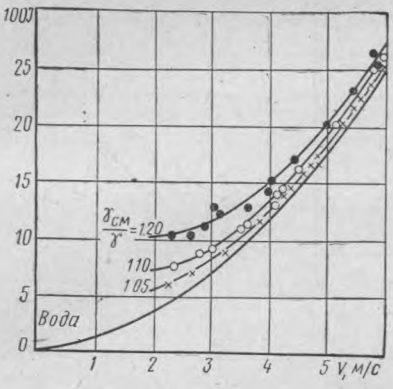


Рис. 127. Характеристики напорного трубопровода диаметром 103 мм при работе на воде и гидросмеси по измерениям Института гидромеханики АН УССР. Крупность песка 0,41 мм, I — гидравлический уклон

забоя трубопровода транспорт грунта в условиях обратной связи между $H_{см}$ и $v_{см}$ не производится. Следует, конечно, иметь в виду, что фактическая скорость гидросмеси в частично заиленном трубопроводе больше скорости, получаемой делением расхода гидросмеси на площадь полного сечения трубы.

Потери напора при движении гидросмеси изучались во многих отечественных и зарубежных лабораториях. Подавляющее большинство опытов имело своей целью определение потерь по длине и выполнялось в прямых горизонтальных трубопроводах, свободных от местных сопротивлений. На рис. 127 представлены результаты одной из серий измерений в ИГ АН УССР — характеристики трубопровода диаметром 0,103 м, при трех консистенциях смеси и одной и той же средней крупности частиц грунта 0,41 мм. Область заиления в этих опытах не освещалась.

Для определения потерь напора по длине при движении гидросмеси предложен ряд формул: А. П. Юфина, Р. Дюрана, Н. А. Силина и др. Все формулы имеют эмпирический или полуэмпирический характер, и в настоящее время трудно отдать предпочтение какой-нибудь одной из них.

Ниже приводятся две формулы: французского исследователя Р. Дюрана и ИГ АН УССР (Н. А. Силина с сотрудниками). Формула Дюрана записывается так:

$$H_{см} = \left[1+190S\left(\frac{gD}{v^2}\,\frac{w_0}{\sqrt{gd}}\right)^{3/2}\right]H. \qquad (216)$$

Выразив объемную консистенцию S по формуле (184 а), можно представить формулу Дюрана в виде

$$H_{см} = \left[1+116\left(\frac{\gamma_{см}}{\gamma}-1\right)\left(\frac{gD}{v^2}\,\frac{w_0}{\sqrt{gd}}\right)^{3/2}\right]H. \qquad (216а)$$

Величина $\frac{w_0}{\sqrt{gd}}$ в формуле Дюрана должна вычисляться по медианному значению диаметра частиц и отвечающей этому значению гидравлической крупности.

Формула ИГ АН УССР имеет вид

$$H_{см} = \left[1+0{,}13\left(\frac{v_{кр}^2}{v\sqrt{gd}}\right)^3\right]H. \qquad (217)$$

Величина критической скорости $v_{кр}$ должна подставляться сюда по формуле (214).

В формулах (216) и (217) v — средняя скорость смеси в сечении напорного трубопровода, получаемая путем деления секундного расхода смеси $Q_{см}$ на площадь сечения; H — потери напора по длине трубопровода при перекачке расхода воды $Q=Q_{см}$.

Выражения, заключенные в формулах (216) и (217) в квадратные скобки, представляют коэффициент увеличения потерь по длине. Обозначив такой коэффициент β, можем написать кратко:

$$H_{см}=\beta H;\ \beta>1. \tag{217а}$$

К такому же общему виду приводится большинство существующих формул для определения $H_{см}$. Формулы Дюрана и ИГ АН УССР могут применяться во всем диапазоне крупностей песка, мелкого и среднего гравия.

Гораздо слабее изучено влияние взвешенных твердых частиц на местные сопротивления. В настоящее время для пересчета местных потерь напора обычно применяют простейшую гипотезу об их пропорциональности действительному объемному весу смеси:

$$h_{м.\ см}=\frac{\gamma_{см}}{\gamma}\,h_{м}. \tag{218}$$

Для местных потерь в напорном трубопроводе землесоса получаем выражение

$$\sum_{н} h_{м\ см}=\frac{\gamma_{см}}{\gamma}\sum_{н} h_{м}=\frac{\gamma_{см}}{\gamma}\,\frac{v^2}{2g}\,(n_{ш}\zeta_{ш}+\Sigma\zeta_{кор}), \tag{219}$$

где $n_{ш}$ — число шаровых соединений; $\zeta_{ш}$ — коэффициент сопротивления одного соединения; $\zeta_{кор}$ — коэффициенты сопротивлений для поворотов корпусной части трубопровода.

Ввиду приближенного характера гипотезы (218), а отсюда малой точности пересчета местных потерь допустимо пользоваться при этом пересчете грубой оценкой потерь в корпусном трубопроводе, принимая в формуле (219) $\Sigma\zeta_{кор}=0{,}5—1{,}0$. Первую из этих цифр следует применять в случаях, когда нисходящий участок корпусного трубопровода наклонный, вторую — когда этот участок вертикальный.

Так как натурные испытания дают общую величину затрат напора в трубопроводе без выделения потерь по длине и местных потерь, то единственный способ узнать величину потерь по длине, не рискуя ошибиться при этом в полной величине затрат напора, состоит в том, чтобы вычесть из измеренной полной затраты напора геодезический подъем и рассчитанную сумму местных потерь:

$$h_{д}=H_{н}-\sum_{н} h_{м}-h_{к}.$$

Это дает следующую формулу пересчета полученной при натурных испытаниях характеристики напорного трубопровода с воды на смесь:

$$H_{\text{н см}}=\beta(H_{\text{н}}-\sum_{\text{н}}h_{\text{м}}-h_{\text{к}})+\frac{\gamma_{\text{см}}}{\gamma}(\sum_{\text{н}}h_{\text{м}}+h_{\text{к}}). \qquad (220)$$

Коэффициент увеличения потерь по длине β может быть взят по формуле ИГ АН УССР или по формуле Дюрана. Подсчеты по уравнению (220) производятся для фиксированной крупности частиц грунта $d_{50}=\text{const}$ при трех-четырех значениях расхода (средней скорости) и трех-четырех значениях действительного объемного веса смеси. Нанеся результаты подсчетов на график в осях $Q_{\text{см}}$, $H_{\text{н см}}$, точки, отвечающие равным значениям $\frac{\gamma_{\text{см}}}{\gamma}$, соединяют плавными линиями.

Так как вклад местных сопротивлений в общее сопротивление плавучих трубопроводов значителен, изучение местных потерь напора при движении гидросмеси составляет одну из актуальных задач исследовательской работы по дноуглублению.

§ 53. ДВИЖЕНИЕ СМЕСИ ВО ВСАСЫВАЮЩЕМ ТРУБОПРОВОДЕ

При работе на воде затраты энергии во всасывающем трубопроводе определяются в общем виде так же, как затраты энергии в напорном трубопроводе

$$H_{\text{вс}}=h_{\text{д}}+\sum_{\text{вс}}h_{\text{м}}+h_{\text{ц}}. \qquad (221)$$

Геодезический подъем $h_{\text{ц}}$ равен здесь возвышению оси насоса над уровнем воды. У речных землесосов $h_{\text{ц}}$ лежит в пределах 0,0—0,6 м. Основную часть всасывающего трубопровода составляет сосуновая труба, поворачивающаяся в вертикальной плоскости. Местных сопротивлений всего два: приемник с входным отверстием, перекрытым решеткой, и шарнирное шаровое соединение между сосуновой трубой и горизонтальным корпусным патрубком. Потери энергии в этом шаровом соединении заметно больше, чем в одном шаровом соединении плавучего трубопровода, вследствие более резкого изменения направления течения. Однако главным из двух местных сопротивлений является сопротивление приемника.

Необходимость иметь вакуум перед входом в насос меньше предельного заставляет заботиться об уменьшении потерь энергии во всасывающем трубопроводе. С этой целью диаметр всасывающего трубопровода делается, как известно, в 1,05—1,10 раза больше диаметра напорного. Таким образом, во всасывающем трубопроводе скорость потока на 10—20%, а скоростной напор на 20—30% меньше, чем в напорном трубопроводе.

При натурных испытаниях землесосов характеристику всасывающего трубопровода на воде строят, пользуясь показаниями

вакуумметра, подсоединенного к корпусному патрубку перед входом в насос. Общий вид ее такой же, как у характеристики напорного трубопровода.

Так как сосуновая труба наклонная, движение гидросмеси в ней сильно отличается от движения гидросмеси в горизонтальном напорном трубопроводе. Максимум консистенции располагается не в нижней точке поперечного сечения, а между этой точкой и осью трубы — тем дальше от стенки, чем больше наклон трубы (в вертикальном трубопроводе максимум консистенции находится на оси трубы). Хотя гидравлическая крупность твердых частиц имеет в наклонном трубопроводе составляющую, направленную против течения, эффекты, связанные с отставанием твердых частиц от воды, проявляются здесь слабо. При наклоне трубы к горизонту более чем на 40° слой осевших частиц сразу же по образовании сползает по стенке трубы вниз. В этих условиях само понятие критической скорости утрачивает смысл. Сложность и недостаточная изученность движения смеси в наклонной части всасывающего трубопровода сильно затрудняют расчет теряемого в ней напора. В связи с этим, а также учитывая, что длина всасывающего трубопровода невелика, обычно принимают упрощенную гипотезу о том, что переход с воды на смесь увеличивает во всасывающем трубопроводе как местные потери, так и потери по длине пропорционально объемному весу смеси. Однако полностью задача определения потерь напора при движении смеси этим еще не решается, так как процесс забора и транспорта грунта создает во всасывающем трубопроводе два новых вида затрат энергии, отсутствующих при движении воды.

Первый из них составляют так называемые потери в щели всасывания. Они обусловлены экранированием приемного отверстия откосом разрабатываемого грунта и затратой энергии на вовлечение частиц грунта в приемное отверстие. Этот вид потерь является самой неопределенной слагаемой потерь напора во всасывающем трубопроводе. По грубой оценке, при консистенциях до 20—25% берут

$$h_{щ}=1{,}0—1{,}5 \text{ м вод. ст.}, \qquad (222)$$

а при бо́льших консистенциях увеличивают значение $h_{щ}$ до 2 м. При работе в засоренных и гравелистых грунтах значения $h_{щ}$ могут быть еще выше. Вторая добавочная затрата энергии состоит в работе по подъему твердых частиц в сосуновой трубе от приемного отверстия до уровня воды в водоеме. Эта работа производится потоком против избыточного веса частиц и определяется выражением

$$h_{с}=\left(\frac{\gamma_{см}}{\gamma}-1\right)T_{с}, \qquad (223)$$

где $T_{с}$ — глубина опускания сосуна.

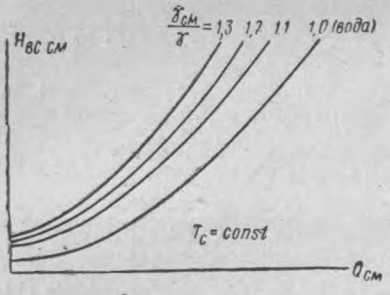


Рис. 128. Характеристики всасывающего трубопровода при работе на воде и на гидросмеси

В результате получается следующая формула для пересчета характеристики всасывающего трубопровода с воды на смесь:

$$H_{вс\ см}=\frac{\gamma_{см}}{\gamma}H_{вс}+\left(\frac{\gamma_{см}}{\gamma}-1\right)T_c+h_{щ}. \quad (224)$$

Характеристика всасывающего трубопровода при работе на смеси изображается, таким образом, двухпараметрическим семейством кривых $H_{вс\ см}=f(Q_{см}, \frac{\gamma_{см}}{\gamma}, T_c)$. Удобно представлять ее в виде нескольких графиков, каждый из которых отвечает определенному значению глубины опускания сосуна: $H_{вс\ см}=f(Q_{см}, \frac{\gamma_{см}}{\gamma}, T_c = \text{const})$ (рис. 128). При выборе расчетной производительности землесоса пользуются средним или наиболее часто встречающимся значением T_c.

§ 54. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЗЕМЛЕСОСОВ

В этом параграфе кратко излагаются способы измерений, производимых при натурных испытаниях, и способы обработки полученных данных.

При натурных испытаниях землесосов подлежат определению следующие величины: эффективная мощность и число оборотов двигателя, производительность насоса, напор, затрачиваемый в напорном трубопроводе (иногда отдельно определяется напор, затрачиваемый в его плавучей части), и напор, затрачиваемый во всасывающем трубопроводе. В процессе испытаний меняется число оборотов двигателя и сопротивление напорного трубопровода. Последнее достигается отсоединением того или иного числа секций плавучей части, а также путем частичного перекрытия выходного отверстия заглушкой. Напоминаем, что испытания ведутся на воде.

Эффективная мощность двигателя определяется или по величине вращающего момента на валу, измеряемого с помощью специального прибора — торсиографа, или по величине расхода топлива. Расход топлива за определенное время работы измеряется по разности уровней в протарированном топливном баке. Число оборотов поддерживается в это время постоянным. Подсчитав расход топлива в час $G_ч$ и сняв с винтовой характеристики дизеля значение удельного расхода топлива $g_e \frac{кгс}{э.\ л.\ с.\ ч}$,

отвечающее измеренному числу оборотов, эффективную мощность находят из соотношения

$$N = \frac{G_ч}{g_e}.$$

Число оборотов измеряется тахометром.

Производительность насоса определяется или с помощью включенного в напорный трубопровод расходомера Вентури или, при отсутствии последнего, объемным способом, при применении которого наиболее удобным индикатором служит раствор соли, обладающий высокой электропроводностью. Насыщенный раствор соли впускают через специальный вентиль или в начале напорного трубопровода или, что технически проще, во всасывающий трубопровод перед входом в насос. Предварительно в двух створах, отделенных расстоянием 100—200 м, в напорный трубопровод вводят контакты, соединенные проводами с источником тока и гальванометром. С помощью секундомера засекают моменты двух последовательных максимальных отклонений стрелки гальванометра, т. е. моменты максимумов концентрации соли в двух выбранных створах. Расход воды находят из соотношения

$$Q = \frac{V}{\Delta t},$$

где V — объем трубопровода между створами; Δt — время между отсчетами по секундомеру.

Напор, расходуемый в напорном трубопроводе, определяется по показанию манометра, подсоединенного к трубопроводу сразу за напорным патрубком насоса. Чтобы получить полную величину напора, к показанию манометра необходимо прибавить возвышение $h_{шк}$ центра шкалы манометра над осью насоса. Если, как обычно, шкала манометра градуирована в кгс/см^2, то мы имеем:

$$H_н = 10 p_м + h_{шк},$$

где $p_м$ — показание манометра.

Напор, затрачиваемый во всасывающем трубопроводе, находится по показанию вакуумметра, подсоединенного к трубопроводу перед фланцем входного отверстия насоса. Это показание выражает всю величину затрат напора во всасывающей линии и должно быть только пересчитано из килограммсилы на сантиметр в квадрате или из миллиметров ртутного столба в метры водяного столба.

Полный напор, развиваемый насосом, или, что при установившемся режиме работы то же самое, полный напор, расходуемый в трубопроводах землесоса, выражается суммой

$$H = H_н + H_{вс}. \qquad (225)$$

Испытания землесосов проводятся обычно при трех-четырех различных числах оборотов двигателя и при трех-четырех длинах напорного трубопровода. В результате получается по 9—12 значений каждой из измеренных величин. Для построения сложных семейств кривых, представляющих характеристики насоса и трубопровода, такого числа точек мало. Из затруднения можно выйти, использовав соображения подобия и размерности.

Энергия, сообщаемая насосом жидкости в единицу времени, может быть выражена с помощью двух физических величин — производительности Q м³/с, и давления в выходном патрубке p, кгс/м²:

$$N_{\text{п}}=\gamma QH=Qp. \tag{226}$$

Факторами, определяющими величину вырабатываемой энергии, служат: геометрия (т. е. форма, размеры и шероховатость) рабочего колеса, его угловая скорость Ω, рад/с и плотность жидкости ρ, кгс·с²/м⁴. Если насосы геометрически подобны, геометрия рабочего колеса однозначно определяется любым его линейным размером, например диаметром $D_{\text{к}}$, м. На основании требования одинаковой размерности обоих сторон всякого физического уравнения получаем для величин Q и p следующие соотношения пропорциональности:

$$Q\sim D_{\text{к}}^3\Omega; \quad p\sim \rho D_{\text{к}}^2\Omega^2. \tag{227; 228}$$

Разделив обе части последнего соотношения на объемный вес жидкости $\gamma=g\rho$, находим:

$$\frac{p}{\gamma}=H\sim\frac{1}{g}D_{\text{к}}^2\Omega^2. \tag{229}$$

Если рассматривается, как в нашем случае, один и тот же насос, то $D_{\text{к}}=\text{const}$, и тогда значения производительности Q_1 и Q_2, получаемые при каких-нибудь угловых скоростях Ω_1 и Ω_2 или, что то же самое, при числах оборотов в минуту n_1 и n_2, будут относиться друг к другу, как эти числа оборотов:

$$\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{n_1}{n_2}. \tag{230}$$

Отношение напоров, согласно выражению (229), будет

$$\frac{H_1}{H_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2. \tag{231}$$

Так как мощность определяется произведением Q и H, то, пренебрегая изменением к. п. д., получаем:

$$\frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3. \tag{232}$$

Равенства (230)—(232) и лежат в основе построения характеристик насосов по данным измерений.

Принят следующий порядок построений. Значения производительности, измеренные при определенной длине трубопровода, наносятся на график в функции чисел оборотов: $Q=f_1(n)$. Через центр тяжести точек и начало координат проводится прямая. Такие же прямые строятся для других длин трубопроводов. Далее, аналогичным путем строятся линейные графики $\sqrt{H}=f_2(n)$ и $\sqrt[3]{N}=f_3(n)$. Графики функций f_1, f_2, f_3 называются контрольными. Построение характеристик насоса, при наличии контрольных графиков, ведется путем попарного использования последних. Пара функций f_1 и f_2 позволяет построить семейство кривых $H=H(Q, n)$ и пара функций f_1 и f_3 — семейство кривых $N=N(Q, n)$. Основное значение контрольных графиков состоит в том, что они дают возможность построить характеристику насоса для более широкого диапазона чисел оборотов, чем тот, который охвачен измерениями. В условиях совместной работы насоса и трубопровода контрольные графики f_1 и f_2 позволяют одновременно продолжить и характеристику трубопровода за пределы измеренных значений производительности. Кроме того, контрольные графики сглаживают ошибки измерений и помогают заметить грубые ошибки. Если какая-нибудь точка сильно отклонилась от линейного закона связи, соответствующее измерение должно быть повторено. Отсюда происходит и название «контрольные».

В заключение остановимся на построении кавитационных характеристик насосов. Для получения предельного вакуума прибегают к увеличению расхода воды и к увеличению коэффициента сопротивления приемника сосуновой трубы. Увеличение расхода достигается частичным или полным отсоединением плавучей части трубопровода, т. е. снижением потерь в напорной линии землесоса, а также путем повышения числа оборотов двигателя. Коэффициент сопротивления приемника увеличивается посредством частичного перекрытия входного отверстия. На основании производимых замеров строят контрольные графики $Q=f_1(n)$ и $\sqrt{H_{вак}}=f_2(n)$. При определенном перекрытии входного отверстия, пока предельный вакуум не достигнут, эти графики имеют обычный линейный вид. При достижении предельного вакуума линейный характер функций f_1 и f_2 нарушится — увеличение числа оборотов оставляет расход и вакуум без изменения. Отвечающие этим переломным точкам значения Q и $H_{вак}$ дают точку кавитационной характеристики. Изменив перекрытие входного отверстия, строят новые контрольные графики и получают, при прекращении роста Q и $H_{вак}$ новую точку кавитационной характеристики и т. д.

§ 55. ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗЕМЛЕСОСА

Условие установившегося режима работы системы насос—трубопровод состоит в равенстве напора, развиваемого насосом, напору, расходуемому трубопроводом. Если перекачивается однородная жидкость и число оборотов рабочего колеса насоса пос-

тоянно, установившийся режим определяется точкой пересечения характеристики $H=H(Q;\ n_0)$ насоса с характеристикой трубопровода. Эта точка называется р а б о ч е й. Она определяет расчетные значения производительности и напора насоса при работе на данный трубопровод.

Как указывалось в начале главы, вследствие неравномерности грунтозабора все параметры движения смеси колеблются во времени и по длине грунтового тракта, так что применительно к перекачиванию смеси можно говорить только о квазиустановившемся режиме, характеризуемом некоторыми осредненными значениями параметров движения. Условие равенства развиваемого и теряемого напоров позволяет установить, каков этот режим при определенном значении осредненной консистенции. Поскольку осредненная консистенция может быть различной, то возможны и различные квазиустановившиеся режимы, и, следовательно, при перекачивании гидросмеси необходимо рассматривать не рабочую точку, а р а б о ч у ю л и н и ю, не забывая при этом и того, что рабочая линия является лишь осью полосы мгновенных режимов.

Рабочая линия образуется пересечением семейства кривых характеристик насоса

$$H_{см}=f_{I}\left(Q_{см},\ \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right),\ n=n_0$$

с семейством кривых характеристик грунтопровода

$$H_{см}=f_{II}\left(Q_{см},\ \frac{\gamma_{см}}{\gamma}\right),\ L=L_0.$$

Здесь n_0 — нормальное число оборотов насоса и L_0 — нормальная длина грунтопровода.

Проследим последовательно ход расчетов. Для построения характеристики насоса при работе на смеси, исходной служит характеристика насоса при работе на воде, полученная в результате стендовых или натурных испытаний. Пересчет с воды на смесь производится на основе зависимостей, приведенных в § 51: формулы (204) или (203) для пересчета напора и формулы (207) для пересчета потребляемой мощности.

Полный напор, расходуемый на перемещение смеси по грунтовому тракту, получается суммированием затрат напора в напорном и всасывающем трубопроводах. В соответствии с формулами (220) и (224) п о л н ы й р а с х о д у е м ы й н а п о р записывается:

$$H_{см}=\beta(H_{н}-\Sigma_{н}h_{м}-h_{к})+\frac{\gamma_{см}}{\gamma}(\Sigma_{н}h_{м}+h_{к}+H_{вс}+T_{с})+h_{щ}-T_{с}. \quad (233)$$

Напоминаем, что величины $H_{н}$, $H_{вс}$ берутся здесь по данным измерений, а остальные величины или рассчитываются (β, $\Sigma_{н} h_{м}$) или берутся на основании некоторых средних оценок ($h_{щ}$, $T_{с}$) или, наконец, заранее известны ($h_{к}$).

Кроме характеристики всего грунтопровода снаряда, определяемой уравнением (233), строится характеристика всасывающего трубопровода по формуле (224) и с ней совмещается кавитационная характеристика насоса. Исходной для последней служит кавитационная характеристика при работе на воде, полученная путем натурных испытаний или рассчитанная по формуле (199). Пересчет на смесь производится по формуле (208).

Все характеристики строятся обычно при четырех значениях удельного веса смеси: $\frac{\gamma_{см}}{\gamma}$ =1,0 (вода); 1,1; 1,2; 1,3 и при характерной для плеса, где работает землесос, крупности частиц грунта.

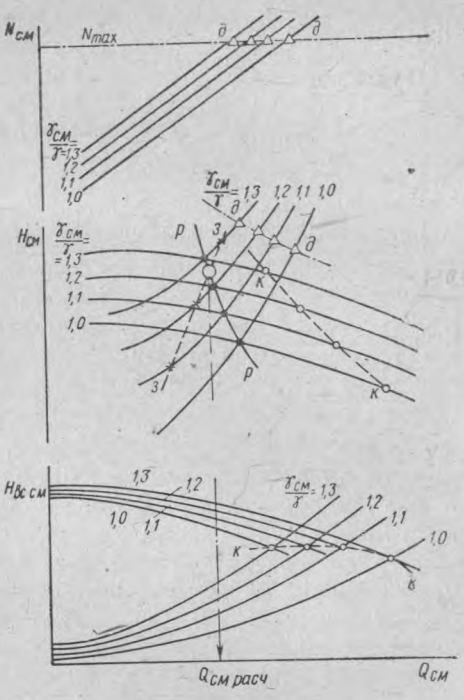


Рис. 129. Определение расчетной производительности землесоса по смеси

Совокупность графических построений, необходимых для выбора расчетной производительности землесоса, представлена на рис. 129. Главное из этих построений — совмещение характеристики грунтопровода с напорной характеристикой грунтового насоса. Образованная точками пересечения характеристик рабочая линия *р—р* с ростом консистенции уклоняется в сторону меньших значений производительности по смеси. Однако производительность по грунту с повышением консистенции всегда растет. Таким образом, желая наиболее полно использовать возможности землесоса, мы всегда заинтересованы в увеличении консистенции. Предел росту консистенции кладется одним из следующих условий: 1) развитием кавитации, 2) заилением напорного трубопровода, 3) достижением предельной мощности двигателя. Каждое из этих условий представлено на поле характеристик $Q_{см}$, $H_{см}$ своей ограничительной линией. Линия *к—к* ограничений по кавитации переносится на это поле с характеристики всасывающего трубопровода, где она строится по точкам пересечения последней с кавитационной характеристикой насоса (см. нижнюю часть рис. 129). Линия *з—з* ограничений по заилению соединяет точки характеристики грунтопровода, в которых при данном $\frac{\gamma_{см}}{\gamma}$ расход смеси имеет критическое значение: $Q_{см}=900\pi D^2_{н}v_{кр}$. Линия *д—д* ограничений

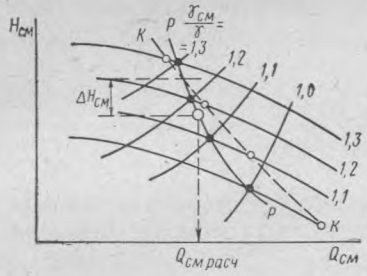


Рис. 130. Определение расчетной производительности землесоса при ее ограничении кавитацией

по мощности двигателя переносится на поле $Q_{см}$, $H_{см}$ с характеристики насоса $Q_{см}$, $N_{см}$, где она получается путем совмещения с этой характеристикой линии максимальной мощности двигателя $N=N_{max}$ (см. верхнюю часть рис. 129). Заметим, что максимальная мощность двигателя лишь немного (на 5—10%) превосходит номинальную мощность — длительная работа с большой перегрузкой вызывает износ двигателя.

Рабочая линия может пересекаться с любой из ограничительных линий, однако обычно она пересекается или с линией ограничений по кавитации, или с линией ограничений по заилению. В случае пересечения с линией ограничений по кавитации принять точку пересечения за расчетную было бы неосторожно, поскольку, как уже указывалось, действительные режимы образуют относительно рабочей линии полосу рассеяния. Поэтому в таком случае расчетные производительность и напор должны устанавливаться по точке рабочей линии, расположенной ниже точки пересечения на величину запаса $\Delta H_{см}$ (рис. 130). Ориентировочная величина запаса около 0,5 м.

Иначе обстоит дело при пересечении рабочей линии с линией ограничений по заилению (на рис. 129 представлен этот случай). Опыт показывает, что работа землесоса с небольшим слоем отложений в напорном трубопроводе не только возможна, но часто и выгодна. Поэтому установление расчетных значений производительности и напора по точке пересечения рабочей линии с линией ограничений по заилению представляет достаточно осторожное решение и может быть рекомендовано.

В течение последних лет А. С. Стариков выполнил в Московском филиале ЛИВТа большой цикл исследований работы землесосов со слоем заиления. Эти исследования подтвердили ранее имевшиеся сведения о том, что такая работа обладает важными достоинствами. К ним относятся: возможность поддерживать предельно высокую консистенцию; сглаживание колебаний консистенции в выходном сечении трубопровода; снижение износа напорного трубопровода. Сглаживание колебаний консистенции происходит вследствие того, что слой заиления работает как грунтохранилище: при малом поступлении грунта в приемник землесоса поток в напорном трубопроводе срабатывает часть слоя, повышая тем самым консистенцию на выходе; при интенсивном поступлении грунта поток откладывает излишек частиц, увеличивая толщину слоя заиления и снижая консистенцию на выходе. Хотя расчет оптимальной толщины слоя заиления еще не может быть выполнен с достаточной надежностью, Старикову удалось опытным пу-

тем создать систему автоматического регулирования работы землесоса, основанную на поддержании слоя заиления (см. ниже § 58).

Возможны, и на практике встречаются случаи, когда пересечение рабочей линии с ограничительными происходит в области очень больших значений консистенций (при $\frac{\gamma_{см}}{\gamma} > 1{,}3$). Опыт показывает, что по условиям грунтозабора, даже при автоматическом управлении землесосом, устойчиво обеспечивать осредненную расходную консистенцию больше 20—25% пористого грунта не удается. В области околокритических скоростей этому диапазону значений расходной консистенции отвечает среднее значение действительного объемного веса смеси $\frac{\gamma_{см}}{\gamma} \approx 1{,}3$. Это значение $\frac{\gamma_{см}}{\gamma}$ и следует считать предельным в тех случаях, когда ограничения по кавитации, заилению и мощности не сказываются.

Когда расчетная точка рабочей линии определена и по ней установлена расчетная производительность землесоса по смеси $Q_{см}$, остается найти расчетную производительность по грунту $Q_г$. Основная трудность состоит здесь в необходимости учесть различие между действительной и расходной консистенцией. Связь между двумя этими консистенциями исследовалась несколькими авторами, но до теоретически обоснованного и надежного решения еще далеко. В настоящее время наиболее достоверными представляются результаты, которые были получены Н. А. Силиным с сотрудниками в ИГ АН УССР. Предложенная ими эмпирическая формула связи между расходной и действительной консистенциями имеет вид

$$S_р = S\left[1 + 4\frac{S}{S_0}\left(\lg\frac{S}{S_0}\right)^3\right], \qquad (234)$$

где S_0 — параметр, определяемый выражением

$$S_0 = S + (1 - \varepsilon - S)\frac{v_{кр}}{v}. \qquad (235)$$

Здесь, как всегда, ε — коэффициент пористости.

При скорости в напорном трубопроводе, равной критической, $S_0 = 1 - \varepsilon$, и формула (234) получает вид

$$S_р = S\left[1 + 4\frac{S}{1-\varepsilon}\left(\lg\frac{S}{1-\varepsilon}\right)^3\right]. \qquad (236)$$

Вычисления, произведенные по формулам (234)—(236), показывают, что в практических расчетах, в диапазоне значений действи-

тельной консистенции 0,10—0,25, при скоростях $v_{рк} \leqslant 1{,}5v$ допустимо пользоваться более простым соотношением

$$S_р = S - 0{,}03\frac{v_{кр}}{v}. \qquad (237)$$

Последовательность подсчетов, необходимых для перехода от установленной производительности по смеси к производительности по грунту, получается следующей. Зная в расчетной точке значение действительного объемного веса смеси $\frac{\gamma_{см}}{\gamma}$, находим по формуле (184а) значение действительной консистенции S. Подсчитываем скорость потока в напорном трубопроводе $v = \frac{Q_{см}}{900\pi D_н^2}$ и по формуле (214) или (215) вычисляем критическую скорость $v_{кр}$. После этого, пользуясь формулой (234) или соотношением (237), получаем значение расходной консистенции $S_р$ и по формуле (192) переходим к консистенции пористого грунта. Наконец, по формуле (193) определяем производительность по грунту $Q_г$.

О порядках величин, с которыми приходится иметь дело, можно судить по приводимым в табл. 6 результатам расчетов по двум землесосам. Первый из них работает в режиме критической скорости, второй — при скорости больше критической.

Таблица 6

№ землесоса	Результаты расчетов величин											Ограничивающий фактор
	d_{50}, мм	$D_н$, м	$\frac{\gamma_{см}}{\gamma}$	$Q_{см}$, м³/ч	v, м/с	$v_{кр}$ м/с	$\frac{v_{кр}}{v}$	S	$S_р$	P%	$Q_г$, м³/ч	
1	0,2	0,5	1,27	2890	4,09	4,09	1,00	0,16	0,13	20,0	580	Заиление
2	0,2	0,7	1,20	7500	5,41	4,48	0,83	0,12	0,09	13,5	1010	Кавитация

Кроме производительности $Q_{см}$, в расчетной точке с помощью характеристик насоса и всасывающего трубопровода определяют значения следующих параметров работы землесоса: $H_{см}$; $H_{вс\ см}$; $H_{н\ см} = H_{см} - H_{вс\ см}$; $N_{см}$.

Все зависимости, используемые при определении расчетной производительности землесоса, приближенные и не очень точные (особенно в области околокритических скоростей). Поэтому и результат расчетов — значение $Q_г$ — является приближенным. Этот результат корректируется и уточняется путем новых натурных испытаний, а также на основе отчетных данных о работе землесоса.

В результате такой корректировки для каждого землесоса (или для серии однотипных землесосов) устанавливается так называемая техническая производительность — наибольшая производительность, которая может устойчиво обеспечи-

ваться при работе землесоса на незасоренном среднезернистом песке.

При работе землесоса на плотных гравелистых или на связных грунтах, что возможно только с применением разрыхлителя, приходится учитывать ограничения, накладываемые на производительность грунтовыми условиями и толщинами снимаемого слоя. В этих случаях производительность лимитируется не грунтоотводом, а грунтозабором, и когда речь идет о влиянии грунтовых условий, имеется в виду трудность завлечения грунта в приемник землесоса. Учет обоих указанных факторов производится с помощью коэффициентов снижения производительности: по роду грунта $K_г$ и по толщине слоя $K_с$. Коэффициент $K_с$ вводится во всех случаях папильонажной работы землесоса, так как при малом заглублении приемника в грунт засасываемая гидросмесь имеет невысокую консистенцию. Значения коэффициента $K_с$ устанавливаются для каждого землесоса опытным путем. Для коэффициента $K_г$ имеется таблица нормативных значений, но практически его также устанавливают из опыта работы на перекатах с трудными для извлечения грунтами. Из двух коэффициентов $K_г$ и $K_с$ расчетным считается тот, который на данном объекте имеет наименьшее значение. Расчетная производительность землесоса находится путем умножения его технической производительности на расчетный коэффициент снижения: $Q_г = Q_т K_р$. Коэффициент снижения по роду грунта вводится и при траншейной работе землесоса, если разрабатывается засоренный песок или крупный гравий.

В довольно редких случаях землесосам приходится работать с укороченным или удлиненным плавучим трубопроводом или подавать грунт на берег. Если для назначения производительности за недостатком времени нельзя воспользоваться характеристиками насоса и трубопроводов, ее назначают, умножая техническую производительность на коэффициент дальности и высоты рефулирования. «Техническая инструкция по производству землечерпательных работ» рекомендует следующую эмпирическую формулу для этого коэффициента:

$$K_{реф} = 1{,}4\left(0{,}7 - \lg\frac{L}{L_0}\right)\left(1 - \frac{z}{H}\right),$$

где L и L_0 — соответственно, фактическая и нормальная длина плавучего трубопровода;

z — возвышение выходного отверстия трубопровода над его положением при рефулировании в воду;

H — напор, развиваемый насосом при нормальном числе оборотов и перекачке чистой воды по трубопроводу нормальной длины.

Приведенной формулой можно пользоваться при значениях отношения $\frac{L}{L_0}$ от 0,5 до 3,0 и значениях $\frac{z}{H}$ до 0,6.

§ 56. ЗАБОР НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА ПРИ ТРАНШЕЙНОМ СПОСОБЕ РАЗРАБОТКИ ПРОРЕЗЕЙ

В настоящее время все прорези, выполняемые землесосами без разрыхлителей, разрабатываются траншейным способом. Распространенный ранее на водных путях папильонажный способ разработки вышел из употребления вследствие двух его отрицательных сторон: невозможности из-за малого заглубления приемника в грунт получить высокую консистенцию смеси и из-за недостаточной чистоты выработки.

Как указывалось в предшествующей главе, ширина траншей на уровне проектного дна назначается равной ширине корпуса снаряда, т. е. составляет 7—10 м. Заглубление приемника в грунт зависит от полезной толщины снимаемого слоя, ширины траншеи и ширины входного отверстия приемника и выбирается с учетом этих факторов так, чтобы продольные гребни на границах траншей не выступали над поверхностью проектного дна. Наибольшее распространение на современных землесосах имеют так называемые уширенные приемники. Ширина их отверстий составляет в среднем около 2,5 диаметра всасывающего трубопровода, или приблизительно от $^1/_7$ до $^1/_5$ ширины траншеи. Для того чтобы продольные гребни не выступали над проектным дном, уширенные приемники приходится заглублять в грунт на несколько метров. Через 3—5 сут после окончания разработки прорези (или отдельного ее участка) течение сглаживает гребни и поперечное сечение прорези приобретает ложбинообразный вид. Если прорезь разрабатывалась уширенным приемником, сглаженное дно оказывается расположенным на 0,6—0,8 м ниже проектного дна. Такое сильное переуглубление полезно при разработке капитальных прорезей и эксплуатационных прорезей, подверженных интенсивной заносимости.

Во всех других случаях переуглубление на 0,6—0,8 м не только не нужно, но наносит некоторый ущерб производству путевых работ, так как на извлечение соответствующего излишнего объема грунта затрачивается рабочее время снаряда (т. е. расходуются денежные средства).

В связи с этим в последние годы были выполнены большие конструкторские и экспериментальные работы по созданию щелевидных приемников с шириной зева от половины ширины траншеи до полной ширины. Щелевидный приемник с шириной зева, равной ширине траншеи, позволяет на тонких слоях грунта полностью исключить переуглубление. Основная трудность при создании щелевидных приемников состоит в том, что скорость входа воды в такой приемник оказывается малой, особенно на краях приемника. Преодолеть эту трудность можно лишь применив добавочное гидравлическое устройство. В конструкции щелевидного приемника, разработанной П. П. Пуховым, такое устройство

представляет собой гидравлический разрыхлитель с неравномерным распределением расхода между соплами (диаметр сопел, а с ним расход отдельных струй растут от оси приемника к краям). В конструкции щелевидного приемника, разработанной А. С. Стариковым, осуществлена эжекция потока гидросмеси струями, направленными вдоль приемного отверстия — от краев к центру (см. ниже). Общие недостатки щелевидных приемников состоят в их большом весе и необходимости установки специального насоса.

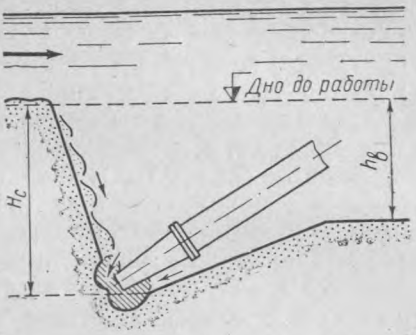


Рис. 131. Забор грунта приемником землесоса при траншейном способе работы

Рассмотрим забор грунта землесосом, имеющим обычный уширенный приемник. Перемещаясь вдоль траншеи, приемник всасывает грунт на большой глубине (рис. 131). Область, в пределах которой подтекающая к приемнику вода захватывает и увлекает с собой частицы грунта, называется сферой всасывания. На рис. 131 она показана штриховкой. Щель всасывания, т. е. просвет между приемным отверстием и массивом грунта, составляет часть сферы всасывания, где частицы воды и грунта испытывают наибольшие ускорения. В § 53 указывалось, что в щели всасывания расходуется значительное количество удельной энергии потока. Из частей грунтового массива, расположенных выше и с боковых сторон сферы всасывания, грунт поступает к приемнику в результате оползания под действием собственного веса. Мгновенные откосы грунта, примыкающего к сфере всасывания, отличаются большой крутизной. Среднее значение коэффициента такого неустановившегося откоса в песчаных грунтах составляет около 1,0, но у плотных песков оно может быть около 0,5, а песок, содержащий 1% глинистой фракции, образует вблизи сферы всасывания вертикальные мгновенные откосы. Только частицы идеально рыхлого грунта могут дать картину равномерного послойного скатывания вниз по откосу. К этой картине в реальных условиях приближается разве что картина оползания откосов в гравии и относительно однородном крупном песке. У всех остальных грунтов, т. е. в большинстве практических случаев, оползание неустановившихся откосов происходит в форме обвалов грунта отдельными призмами, объемы которых колеблются в широких пределах. Столь же беспорядочно распределение обвалов во времени. Эти хаотически чередующиеся обвалы являются главной причиной случайных колебаний консистенции в грунтопроводе землесоса.

Если грунт, сползающий с фронтального откоса, практически весь попадает в сферу всасывания, а значит и в приемное отвер-

стие, то с грунтом, поступающим с боковых откосов, дело обстоит иначе. Обрушение боковых откосов в своей главной части происходит после того, как приемник и с ним сфера всасывания продвинулись дальше по траншее. Обрушение откосов за сферой всасывания заполняет грунтом нижнюю часть траншеи и в конечном итоге приводит к формированию траншеи с установившимися боковыми откосами, угол наклона которых равен углу внутреннего трения водонасыщенного грунта. Для песков в качестве средней цифры принимают коэффициент установившегося откоса равным 3. При работе уширенных приемников переход от неустановившихся к установившимся откосам меняет и форму поперечного сечения траншеи. В створе, где в данный момент времени находится приемник землесоса, поперечное сечение траншеи имеет форму трапеции, нижнее основание которой равно ширине отверстия приемника b_c, а верхнее равно $b_c + 2m_0H_c$, где $m_0 \approx 1$ — коэффициент неустановившегося откоса и H_c — заглубление приемника в грунт. В створе, где откосы стабилизировались, поперечное сечение траншеи представляет собой треугольник высотой

$$h_в = h_п + \frac{b_т}{2m}, \qquad (238)$$

где $h_п$ — полезная толщина снимаемого слоя; $b_т$ — ширина траншеи на уровне проектного дна и $m \approx 3$ — коэффициент установившегося откоса.

Величину $h_в$ называют глубиной выработки. Указанные геометрические соотношения легко уяснить по рис. 132, на котором представлен поперечный разрез прорези, разрабатываемой уширенным приемником. При рассмотрении рисунка следует, ко-

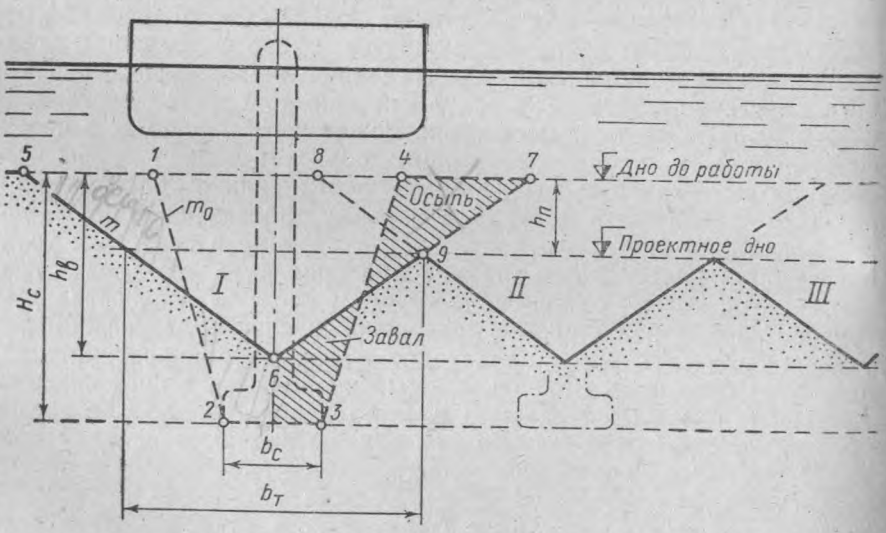


Рис. 132. Поперечный разрез прорези, разрабатываемой траншейным способом

нечно, помнить, что действительные очертания траншей криволинейные, гребни между траншеями имеют округлую форму и т. д. В той же мере, в какой условен рисунок, условно и применение таких терминов, как «трапеция» и «треугольник».

Площадь мгновенного поперечного сечения траншеи в створе, где находится приемник, называется площадью всасывания. На рис. 132 она отмечена цифрами *1—2—3—4*. Площадь установившегося поперечного сечения называют площадью собственно траншеи, или просто площадью траншеи. На рис. 132 площадь крайней левой траншеи, с которой по предположению начинается разработка прорези, помечена цифрами *5—6—7*. Для площади всасывания и площади первой (или одиночной) траншеи имеем выражения:

$$F_{вс}=\left(m_0 H_с+\frac{1}{2}b_с\right)H_с; \tag{239}$$

$$F_{тI}=m\left(h_п+\frac{b_т}{2m}\right)^2. \tag{240}$$

Если пренебречь небольшим объемом грунта, поступающим в приемник сзади, то площади $F_{вс}$ и $F_{тI}$ должны быть равны. Это равенство позволяет выразить заглубление приемника в грунт в функции полезной толщины снимаемого слоя, ширины траншеи и ширины зева приемника:

$$H_с=\frac{\sqrt{b_с^2+4mm_0\left(h_п+\frac{b_т}{2m}\right)^2}-b_с}{2m_0}. \tag{241}$$

Формула (241) есть условие чистоты выработки — при величине $H_с$, назначенной по этой формуле, гребни между траншеями непосредственно после окончания работ на прорези будут расположены в плоскости проектного дна. Рис. 132 показывает, что площади второй и последующих траншей меньше площади первой траншеи на величину площади перекрытия $mh^2_п$ (на рис. 132 помечена цифрами *7—8—9*). Отсюда площадь второй и последующих траншей равна

$$F_{тII}=b_т\left(h_п+\frac{b_т}{4m}\right). \tag{242}$$

Таким образом, на второй и последующих траншеях заглубление приемника в грунт может быть меньше, чем на первой траншее. Такое уменьшение может сократить время разработки прорези при больших толщинах снимаемого слоя. При малых толщинах оно не имеет существенного значения.

Производительность землесоса в грунтозаборе при траншейном способе работы определяется выражением

$$Q_з=60F_т v_т, \tag{243}$$

где $v_т$ — скорость перемещения снаряда вдоль траншеи, м/мин. Согласно основному уравнению технологии работы землесосов (194), производительность в грунтозаборе должна быть равна производительности в грунтоотводе. Это дает формулу для назначения скорости движения по траншее

$$v_т = \frac{Q_г}{60 F_т} . \qquad (244)$$

Площадь $F_т$ для первой траншеи должна определяться по формуле (240), а для второй и последующих — по формуле (242). Таким образом, на первой траншее в каждой серии землесос двигается немного медленнее, чем на остальных.

Заглубление приемника в грунт $H_с$ и скорость движения по траншее $v_т$ полностью определяют процесс грунтозабора при траншейном способе работы землесоса. Исходными для их назначения служат установленная производительность землесоса в грунтоотводе и полезная толщина снимаемого слоя (величины $b_с$ и $b_т$ представляют собой параметры, имеющие у каждого землесоса постоянные значения).

Для большинства прорезей, выполняемых в межень, объем переуглубления при работе уширенных приемников близок к полезному объему выемки или превосходит его. Так как число прорезей, подлежащих разработке, бывает в это время большим, то ускорение разработки представляет собой актуальную задачу. Как было указано, уменьшить переуглубление и, значит, ускорить разработку прорезей можно с помощью щелевидных приемников.

На рис. 133 показан щелевидный приемник конструкции П. П. Пухова. Он состоит из напорной трубы *1*, которая подает

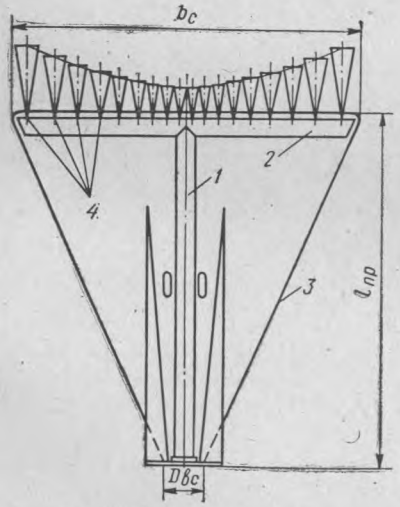


Рис. 133. Щелевидный приемник землесоса конструкции П. П. Пухова

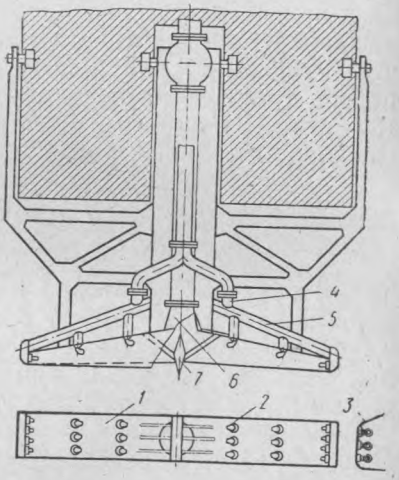


Рис. 134. Щелевидный приемник землесоса конструкции А. С. Старикова

воду от вспомогательного насоса к коллектору *2*, ряда установленных на коллекторе сопел *4*, собственно приемника с расположенным под коллектором входным отверстием шириной b_c и переходной части *3*, по которой смесь движется от входного отверстия к всасывающей трубе. На переходной части имеются ребра жесткости. Диаметры сопел, а с ними и расходы выбрасываемых струй увеличиваются от середины коллектора к краям. Это приводит к тому, что в щели всасывания (перед входным отверстием) образуется течение смеси с высокой консистенцией, направленное к середине отверстия. Грунт при этом захватывается со всей ширины криволинейного фронта размыва.

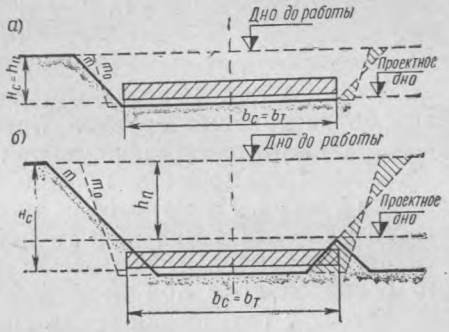


Рис. 135. Разработка траншеи щелевидным приемником при малой (*а*) и при большой (*б*) толщине полезного снимаемого слоя

Конструкция щелевидного приемника А. С. Старикова представлена на рис. 134. На широком экране *1*, схожим по своему сечению с ножом бульдозера, размещены крючкообразные сопла *2*, струи из которых направлены вдоль экрана к приемному отверстию. Вода поступает в сопла из распределительных коллекторов *5*, к которым она подводится по трубам *4*. Струи воды из сопел подсасывают окружающую жидкость и вместе с ней создают перед экраном течение, сходящееся с двух сторон к приемному отверстию. Чтобы предотвратить подсос чистой воды, над экраном помещен козырек *3*. Перед отверстием, в вертикальной плоскости его симметрии, расположен отсекатель *7*, устраняющий встречу сходящихся потоков и направляющий их в трубопровод *6*.

Ширина приемника при таком способе подвода гидросмеси может быть любой. Практическим ее пределом является ширина корпуса снаряда, т. е. ширина траншеи.

Натурные испытания приемника Старикова показали, что при полезных толщинах снимаемого слоя до 0,5 м при помощи этого приемника можно разрабатывать прорезь без всякого переуглубления.

При толщинах снимаемого слоя свыше 0,5—1,0 м, ввиду большого объема грунта, оползающего с откосов траншеи, переуглубление и при щелевидном приемнике неизбежно (рис. 135). Хотя это переуглубление меньше переуглубления при работе уширенных приемников, применение щелевидных приемников на толстых слоях грунта пока еще не обосновано.

§ 57. ЗАБОР ГРУНТА ЗЕМЛЕСОСАМИ С МЕХАНИЧЕСКИМ РАЗРЫХЛИТЕЛЕМ

Механические (фрезерные) разрыхлители предназначены для разработки связных грунтов. Землесос, оборудованный механическим разрыхлителем, перемещается по прорези папильонажным способом. Перемещение производится с помощью свай или (реже) на тросах. При тросовом папильонировании снаряд удерживается на ленте с меньшей точностью, чем при свайном. Это объясняется переменным натяжением тросов и тем обстоятельством, что становой трос при недостаточно сильном натяжении может сцепляться с грунтом, и тогда снаряд описывает дугу с центром не в точке заложения станового якоря, а в точке сцепления троса с грунтом. В результате чистота выработки при тросовом папильонировании заметно меньше, чем при свайном.

Двигатели разрыхлителя не имеют реверса — разрыхлитель вращается всегда в одну и ту же сторону. Поэтому ленты проходятся поочередно с двумя противоположными направлениями резания грунта. Если фреза вращается против часовой стрелки, то при движении по ленте справа налево ножи врезаются в грунт, идя сверху, а при движении по ленте слева направо,— идя снизу. Первый случай называется работой в накат, второй — работой в подрез (рис. 136). При работе в накат реакция грунта направлена вверх, т. е. противодействует силе веса рамы с размещенными на ней всасывающим и разрыхлительным устройствами. При работе в подрез реакция грунта направлена вниз, т. е. складывается с силой веса. Поэтому ленты, пройденные в накат, оказываются менее глубокими, чем ленты, пройденные в подрез. Если грунт очень плотный, то при работе в накат фреза может выкатываться на поверхность неразработанного дна.

Ножи разрыхлителя отделяют грунт от массива в виде «ломтей» или стружки, которая может иметь разную толщину в зависимости от соотношения между скоростью вращения фрезы и скоростью ее движения по папильонажной ленте.

Если фреза имеет z ножей и делает $n_р$ оборотов в минуту, то толщина стружки определяется выражением

$$\delta = \frac{v_п}{n_р z}, \qquad (245)$$

где $v_п$ — скорость папильонирования.

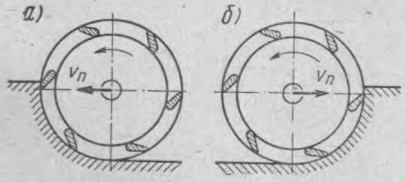


Рис. 136. Работа фрезерного разрыхлителя:
а — в накат; *б* — в подрез

Срезанный ножами грунт попадает во внутреннюю полость фрезы, откуда увлекается потоком воды в приемное отверстие всасывающего трубопровода. Если толщина стружки большая, влекущая сила потока окажется недостаточной и грунт в при-

емное отверстие поступать не будет. Ориентировочно считают, что предельная толщина стружки составляет 0,1 м. Подставив это значение δ в формулу (245), получим при данном числе оборотов разрыхлителя предельное значение скорости папильонирования

$$v_{\text{п. пред}} = 0{,}1 n_{\text{р}} z. \qquad (246)$$

Однако и при ограниченной скорости папильонирования не весь грунт, срезанный ножами фрезы, засасывается в приемное отверстие. Объясняется это тем, что сфера всасывания обычно не охватывает всю внутреннюю полость фрезы. Часть срезанного грунта выпадает из фрезы и остается на площади прорези. Поэтому иногда применяют двойной проход по папильонажной ленте. При первом проходе производится рыхление грунта по всей толщине снимаемого слоя и часть грунта засасывается. При втором проходе подбирается «просор» — остаток разрыхленного грунта.

Особенно тяжелые условия работы возникают при извлечении плотных глинистых грунтов, обладающих свойством прилипаемости. В этих случаях почти вся внутренняя полость фрезы заполняется грунтом. При движении по папильонажной ленте засасывается лишь небольшая часть грунта, а основная его часть выдавливается из фрезы наружу. Грунты такого рода могут налипать и на края приемного отверстия. Постепенное сужение просвета приводит к полному прекращению всасывания.

На разработке липких глинистых грунтов в строительной гидромеханизации, где такие грунты встречаются чаще, чем в дноуглублении, в настоящее время внедряется фрезерно-гидравлический разрыхлитель конструкции В. А. Жученко и В. И. Михайлова. У этого разрыхлителя к тыловой стороне спиц и ножей приварены трубы с соплами. Из двух сопел, имеющихся на каждой трубе, одно выбрасывает струю воды на откос разрабатываемой ленты, другое — во внутреннюю полость фрезы. Подвод воды к трубам, вращающимся вместе с фрезой, осуществлен через пустотелый вал разрыхлителя. Испытания показали, что налипание грунта на фрезу у таких разрыхлителей полностью исключается. В бассейнах, где глинистые грунты распространены (например, на Волго-Балтийском канале), фрезерно-гидравлический разрыхлитель может стать одним из средств повышения производительности землесосов.

Параметры грунтозабора у землесосов с механическими разрыхлителями, так же как у землесосов без разрыхлителей, обусловливаются, с одной стороны, условиями работы — родом грунта, толщиной снимаемого слоя, и с другой — требованием обеспечить наибольшую возможную производительность снаряда. Решение задачи получается однако менее определенным. Транспорт по трубам связных грунтов изучен недостаточно. Надежных данных ни о допустимых консистенциях, ни, тем более, о способности потока переносить грунт в комьях не имеется. При работе на тя-

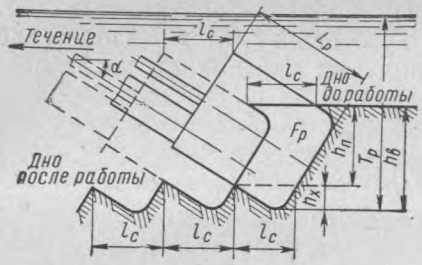


Рис. 137. Забор связного грунта приемником землесоса с фрезерным разрыхлителем

желых грунтах, кроме того, узким местом гидротранспорта обычно оказывается не грунтоотвод, а грунтозабор.

Режим грунтозабора при папильонажном способе работы определяется тремя параметрами (вместо двух при траншейном способе): заглублением приемного устройства в грунт H_c, подачей вперед l_c и скоростью папильонирования $v_п$. Заглубление фрезы в грунт принимается равным сумме полезной толщины снимаемого слоя и установленного запаса на неровность выработки, причем заглубление, равное полуторному диаметру фрезы, считается предельным. Опыт показывает, что при больших заглублениях обвалы грунта затрудняют работу разрыхлителя. Таким образом, имеем:

$$H_c = h_п + h_з \leqslant 1{,}5D_p, \tag{247}$$

где $h_з$ — запас на неровность выработки и D_p — внешний диаметр фрезы.

При значениях $h_п$, не удовлетворяющих неравенству (247), разработка прорези ведется в два слоя. Из схемы грунтозабора, показанной на рис. 137, видно, что на границах папильонажных лент разрыхлитель оставляет гребни. Вершины гребней лежат в плоскости проектного дна; запас на неровность выработки равен высоте гребней, или, что то же, величине переглубления h_x.

Величина подачи вперед определяется запасом на неровность выработки и углом наклона рамы снаряда к горизонту (т. е. глубиной опускания рамы):

$$l_c = \frac{h_з}{0{,}5 \sin 2\alpha}, \tag{248}$$

где α — угол наклона рамы.

При малых глубинах опускания рамы надо следить за тем, чтобы подача не превысила предельного значения, при котором рама снаряда упирается в неразработанный грунт. Это значит, что величина подачи должна удовлетворять неравенству

$$l_c < \frac{L_p}{\cos \alpha}, \tag{249}$$

где L_p — длина разрыхлителя. На очень плотных грунтах приходится уменьшать подачу против ее значений, указываемых формулой (248). При этом величина переуглубления h_x становится меньше установленного запаса на неровность выработки. Уменьшение подачи обусловливается необходимостью при работе на плотном грунте увеличивать удельное усилие резания на ножах

разрыхлителя. Если $P_р$ есть полное режущее усилие, развиваемое фрезой, то удельное усилие резания (т. е. усилие, развиваемое на единице длины ножа)

$$p_р = \frac{P_р}{z_р l_р}, \tag{250}$$

где $z_р = \frac{z}{2}$ — число одновременно режущих ножей и $l_р$ — средняя длина режущей (вдвинутой в грунт) части ножа. Величина полного режущего усилия выражается формулой

$$P_р = \frac{102\eta N_р}{u}, \tag{251}$$

в которой N — мощность двигателя разрыхлителя, кВт; η — общий к. п. д. двигателя и передачи к валу разрыхлителя; u — окружная скорость режущей кромки ножей, м/с.

Из формул (250) и (251) видно, что при постоянной окружной скорости (постоянном числе оборотов) и полном использовании мощности двигателя единственный способ увеличить удельное усилие резания состоит в уменьшении длины режущей части ножей, т. е. в уменьшении подачи.

Площадь поперечного сечения папильонажной ленты, или площадь резания, определяется выражением

$$F_р = l_с \left(h_п + \frac{h_x}{2} \right). \tag{252}$$

Пусть φ — отношение объема грунта, всасываемого в приемник, к объему грунта, срезаемого фрезой. Тогда величину

$$F_{вс} = \varphi F_р = \varphi l_с \left(h_п + \frac{h_x}{2} \right) \tag{253}$$

можно назвать площадью всасывания. Отношение φ на грунтах средней плотности составляет около 0,8. При переходе к тяжелым глинам оно может падать до нуля. Для скорости папильонирования получаем следующую формулу:

$$v_п = \frac{Q_г}{60 \vartheta F_{вс}}, \tag{254}$$

где $Q_г$ — расчетное значение производительности землесоса и $\vartheta \approx 0{,}95$ — коэффициент, учитывающий затрату времени на подачи (на выполнение подач затрачивается около 5% полного рабочего времени, снаряд папильонирует в течение остальных 95%).

Величина $Q_г$ устанавливается, как было изложено в конце § 55, исходя из технической производительности снаряда, значений коэффициентов снижения по роду грунта и по толщине слоя. Скорость папильонирования, подсчитанная по формуле (254), должна быть проверена на соблюдение неравенства $v_п \leqslant v_{п\ пред}$, где $v_{п\ пред}$ можно брать по соотношению (246).

§ 58. УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ЗЕМЛЕСОСОВ

Управление работой землесосов должно обеспечивать его наибольшую возможную производительность при заданных габаритах прорези. Работа с наибольшей производительностью способствует сокращению сроков разработки прорези и снижению себестоимости работ.

Производительность землесоса зависит от многих факторов, которые меняются в процессе работы, поэтому режим работы землесоса приходится изменять при движении его по прорези, согласовывая с фактическими условиями и возможностями в каждый момент времени.

Информацию, необходимую для управления работой землесосов, дают контрольно-измерительные приборы. По этим приборам определяется интенсивность рабочего режима землесосов, оценивается работа отдельных механизмов и устройств, проверяется соответствие фактических значений рабочих параметров заданным. Указатели основных приборов сосредоточены в рубке, где установлен пульт централизованного управления механизмами и рабочими устройствами землесоса. Измерительные устройства этих приборов (датчики) устанавливаются у мест их подключения, т. е. у механизмов и рабочих устройств, параметры которых измеряются, у точек подключения к грунтопроводу и т. п. Связь датчиков с указателями на пульте осуществляется с помощью электрических схем, механическими передачами или гидравлически — с помощью импульсных трубок.

На посту централизованного управления землесосом установлены все технологические приборы, а также ряд контрольных приборов, характеризующих работу основных энергетических установок. К технологическим приборам, необходимым для управления работой землесосов относятся следующие:

вакуумметры всасывающего грунтопровода (один — в рубке управления, другой — в машинном отделении у грунтового насоса); манометры напорного грунтопровода (один — в рубке и другой — в машинном отделении, оба рядом с вакуумметрами); расходомер и консистомер водогрунтовой смеси; глубиномер опускания рамы (грунтозаборного устройства); подачемер для измерения расстояний, пройденных по длине траншеи (по становому тросу); скоростемеры выбирания станового и передних боковых тросов; амперметры двигателей оперативных лебедок, величина тока на которых характеризует усилия в оперативных тросах.

На землесосах с гидравлическими разрыхлителями устанавливается манометр напорного трубопровода гидроразрыхлителя. Землесосы с механическими разрыхлителями имеют амперметр электропривода разрыхлителя и тахометр фрезы. На некоторых землесосах имеется слоемер толщины откладывающегося в напорном грунтопроводе грунта.

Кроме перечисленных технологических приборов, на пульте управления современных землесосов установлено световое табло,

на котором схематически указаны основные механизмы и рабочие устройства. При работе механизмов соответствующие обозначения на табло освещены.

Рассмотрим схемы двух из упомянутых приборов — расходомера и консистомера гидросмеси, показания которых позволяют определить производительность землесоса. На рис. 138 показана схема индукционного расходомера, установленного на отдельных землесосах с производительностью от 650 до 2500 м³/ч. В грунтопровод включен патрубок *3*, изготовленный из электроизоляционного материала, в стенки которого вделана пара электродов *2* и *6*. С помощью обмоток *1* внутри патрубка создается электромагнитное поле, силовые линии которого *B* пересекают сечение патрубка. Движущийся по грунтопроводу и патрубку поток гидросмеси имеет электропроводность благодаря ионам растворенных в воде солей. Как во всяком проводнике, пересекающем магнитные силовые линии, в потоке гидросмеси (в пределах зоны, ограниченной пунктиром) возникает электродвижущая сила. Напряжение, воспринимаемое электродами *2* и *6*, через усилитель *4* поступает на электроизмерительный прибор *5*, шкала которого градуирована единицами скорости или расхода гидросмеси. На некоторых землесосах установлены индукционные расходомеры, измеряющие величину скорости гидросмеси на нескольких уровнях по сечению грунтопровода. В патрубках этих расходомеров установлено несколько пар электродов на различной высоте по сечению.

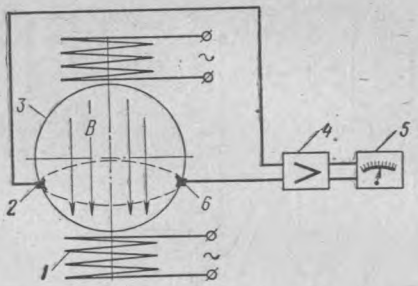


Рис. 138. Схема индукционного расходомера гидросмеси

На рис. 139 показана схема гидростатического консистомера системы К. В. Диминского. Для установки этого прибора необходимо наличие наклонного участка грунтопровода *1* с разницей отметок по высоте не менее 3 м. На различной высоте к грунтопроводу через отстойники *3* и *8* подключаются импульсные трубки *4* и *7* дифференциального манометра *6*. Импульсные трубки заполняются водой или незамерзающей жидкостью с объемным весом 1 т/м³.

Для исключения влияния потерь напора на участке грунтопровода между точками подключения прибора на показания консистомера устанавливается в одной из точек отбора давления шаровый датчик *2*. Шаровый датчик имеет наклонные к оси отверстия, через которые измерительная система сообщается с грунтопроводом. Через эти отверстия, кроме гидростатического давления, воспринимается и часть гидродинамического напора. При работе землесоса на воде поворотом шарового датчика достигают такого его положения, при котором воспринимаемый гидродинамический

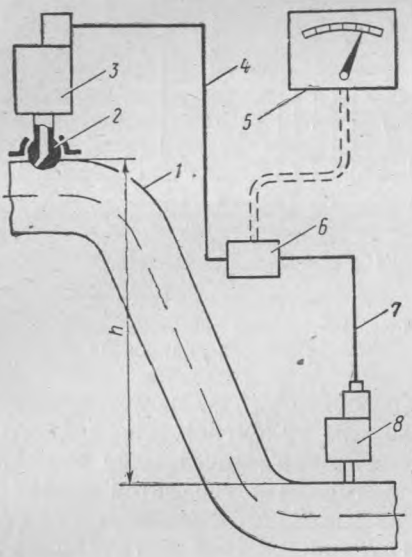


Рис. 139. Схема гидростатического консистомера системы К. В. Диминского

напор при любой скорости движения воды компенсирует потери напора на участке грунтопровода между точками подключения прибора. По данным исследований, равенство воспринимаемого шаровым датчиком гидродинамического напора и упомянутых потерь сохраняется и при движении гидросмеси по грунтопроводу.

Благодаря применению шарового датчика при движении гидросмеси по грунтопроводу перепад давления ΔP на дифманометре *6* или его показания в консистомере рассматриваемого типа равны:

$$\Delta P = \gamma_{см} h,$$

где $\gamma_{см}$ — действительный удельный вес смеси; h — разность высотного положения точек подключения прибора к грунтопроводу.

При постоянной величине h перепад давления ΔP прямо пропорционален действительному удельному весу смеси. Показания дифманометра дистанционно передаются на указатель *5* в рубку землесоса.

Производительность землесоса в различных условиях работы ограничивается грунтозабором или грунтоотводом. При разработке прорезей ограничение производительности получается преимущественно по грунтозабору вследствие малой толщины снимаемого слоя, плотных и засоренных грунтов, несовершенных грунтозаборных устройств или малой цепкости якорей. Кроме того, неравномерность самого процесса грунтозабора также приводит к ограничению производительности.

Можно указать следующие признаки работы землесоса с ограниченным грунтозабором: невозможность повысить скорость движения по траншее из-за чрезмерного натяжения тросов, «сползания» якорей или ограниченной скорости лебедок; выкатывание фрезерного разрыхлителя на поверхность или перегрузка его привода; необходимость частых очисток грунтозаборного приемника из-за большой засоренности грунта; чрезмерный рост вакуума и резкое падение расхода смеси при большой глубине всасывания или разработке плотных заиленных грунтов.

Эти признаки характерны для ограничения грунтозабора при плавном регулировании рабочего режима. Рывки, резкие измене-

ния глубины опускания грунтозаборного приемника, скорости лебедок или фрезерного разрыхлителя тоже ведут к ограничению грунтозабора, но это уже результат неплавного регулирования рабочего режима.

При появлении признаков ограничения грунтозабора принимают ряд мер к их устранению: закладывают более цепкие или тяжелые якоря, подключают гидроразрыхлитель, меняют грунтозаборный приемник, уплотняют всасывающую линию, подбирают необходимые параметры грунтозабора (скорость движения по траншее, ширину траншей, заглубление приемника), меняют разрыхлитель или назначают другой режим его работы, соблюдают равномерность рабочего режима.

Производительность землесоса ограничивается грунтоотводом при работе на крупнозернистых грунтах, увеличении дальности и высоты рефулирования, а также при пониженном расходе смеси из-за неисправностей в грунтовом насосе или двигателе. Признак ограничения производительности по грунтоотводу — угроза забоя напорного грунтопровода при небольшом увеличении скорости перемещения землесоса по длине траншеи.

Об угрозе забоя грунтопровода судят по следующим явлениям, возникающим при небольшом увеличении скорости землесоса: а) вакуум сначала возрастает, затем начинает снижаться из-за падения расхода; показания манометра увеличиваются; б) показания консистомера сначала возрастают, затем могут снизиться; показания расходомера уменьшаются; в) слоемер показывает нарастание откладывающегося слоя грунта в напорном грунтопроводе; г) струя смеси, вытекающая из напорного грунтопровода, уменьшается и в нижней части становится прерывистой и почти отвесной; д) нагрузка на двигатель уменьшается, и поэтому несколько возрастает число его оборотов.

Надо иметь в виду, что забой грунтопровода может произойти не только из-за недостаточной транспортирующей способности установки, но и вследствие внезапного засорения приемника или пропуска воздуха во всасывающую трубу. Угроза забоя возникает также из-за быстрого заглубления всасывающего приемника в грунт, резких боковых отклонений землесоса и быстрого наращивания скорости его перемещения, ведущих к резкому увеличению вакуума и падению расхода смеси.

Для предупреждения забоя грунтопровода уменьшают скорость перемещения землесоса, а при необходимости приподнимают раму. Наблюдая за показаниями вакуума, давления, расхода и консистенции смеси, скорость перемещения землесоса регулируют так, чтобы не доводить насосную установку до предзабойного состояния.

Наибольшая производительность землесоса достигается обычно при движении смеси по грунтопроводу со скоростями, близкими к критической, или при небольшом отложившемся слое грунта высотой примерно до $^1/_4$ диаметра. В этих условиях смесь движется по грунтопроводу с наибольшей консистенцией.

При разработке таких крупнозернистых грунтов, как галька и гравий, происходит чрезмерное накопление грунта в грунтопроводе, приводящее к значительному снижению расхода смеси и угрозе забоя грунтопровода. На подобных грунтах нельзя доводить установку до предзабойного состояния, потому что это повлечет за собой необходимость длительной промывки грунтопровода.

Для установления режима работы землесосов пользуются технологическими таблицами или графиками, составляемыми на основании опыта, натурных испытаний и расчетов. Параметры работы землесосов, взятые из технологических таблиц или графиков, в процессе извлечения грунта корректируются в зависимости от местных условий так, чтобы обеспечивались наибольшая возможная производительность землесоса и заданные габариты прорези.

В дноуглублении фактическую производительность землесоса определяют делением объема удаленного с прорези грунта (по промерам) на рабочее время землесоса. При этом надо иметь в виду, что при работе на течении и на размываемых грунтах производительность землесоса по промерам может быть больше производительности по грунтоотводу за счет размыва и уноса грунта с прорези течением.

Перед началом работы землесоса всасывающий приемник опускают в воду, затем заполняют водой водогрунтовый насос с помощью эжектора, высасывающего из него воздух, или с помощью небольшого водяного насоса накачивающего в водогрунтовый насос воду, и только после этого пускают в ход двигатель водогрунтового насоса. Одновременно на установленную глубину постепенно опускают приемник и приступают к извлечению грунта.

При работе землесоса траншеями необходимо строго придерживаться продольных створов на границах между траншеями или на их осях и следить, чтобы на разработанной части прорези глубина была равна заданной. Для этого систематически промеряют глубину с борта землесоса, со стороны уже разработанной траншеи, если численность команды достаточная. На землесосах с ограниченной командой глубину на пройденной части траншеи промеряют с мотозавозни или катера, оснащенных эхолотами. По результатам этих промеров корректируют заглубление всасывающего приемника в грунт.

При заметном размывающем действии речного потока на разрабатываемую прорезь применяют сквозную разработку траншей на кромках и по оси прорези через весь гребень переката или разработку прорези через одну траншею.

Землесосы с механическим разрыхлителем при толщине снимаемого слоя, превышающей его диаметр в 1,5 раза, разрабатывают грунт в несколько слоев. Землесосы со сваями на каждой папильонажной ленте удаляют всю толщину грунта, последовательно заглубляя разрыхлитель и повторно папильонируя по ленте. При работе на тросах (без свай) землесосы с механическими разрыхлителями углубляют прорезь последовательно: проходят

сначала один слой по участку прорези без перекладки якорей, а затем другой — по тому же участку и т. д.

Если землесосы с механическими разрыхлителями работают на плотных, но мягких грунтах, то по возможности увеличивают подачу вперед и скорость вращения разрыхлителя, чтобы уменьшить толщину стружки и приблизить приемник к грунту для лучшего его засасывания. При недогрузке привода разрыхлителя работают с повышенными скоростями папильонирования, но, чтобы увеличивающийся при этом просор не уменьшал глубину выработки, добавочно заглубляют приемник.

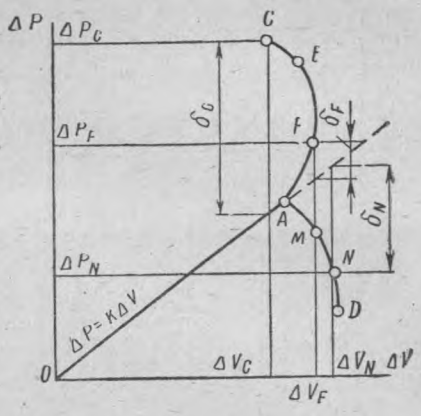


Рис. 140. Предполагаемая зависимость между приращениями вакуума и давления, заложенная в основу действия системы автоматики «Волга»

Ряд дизельных электрифицированных землесосов, выполняющих дноуглубительные работы, имеют системы автоматического регулирования грунтозабора. Землесосы типа ДЭ-650 и бóльшей производительности, работающие траншеями, оборудованы системой «Волга-67»; на землесосах меньшей производительности, работающих тоже траншеями, внедряется система «Слой». Землесосы типа ДЭ-1000 с фрезерными разрыхлителями и сваями, работающие папильонированием, оборудованы программным управлением грунтозабором.

Система автоматического регулирования грунтозабора под названием «Волга», созданная в 1967 г. ГИИВТом (руководитель С. В. Беллюстин) совместно с Волжским бассейновым управлением пути, предназначена для регулирования скорости $v_т$ движения землесоса по траншее. В основу работы этой системы взято предположение о существовании определенной зависимости между приращениями показаний вакуумметра ΔV и манометра ΔP грунтового насоса при разработке грунта по сравнению с их показаниями при работе на воде. На рис. 140 показана эта предполагаемая зависимость. Участок OA характеризует работу с низкой консистенцией гидросмеси, когда приращения вакуума ΔV и давления ΔP пропорциональны и поэтому зависимость между ними линейная: $\Delta P = \kappa \Delta V$.

Кривая AC отражает работу с высокой консистенцией гидросмеси. Чем выше консистенция, тем больше показания манометра. В связи с падением при этом расхода гидросмеси показания вакуумметра возрастают меньше, а с приближением к предельной консистенции, когда расход снижается особенно интенсивно, показания вакуумметра даже снижаются. Точка C на рис. 140 соот-

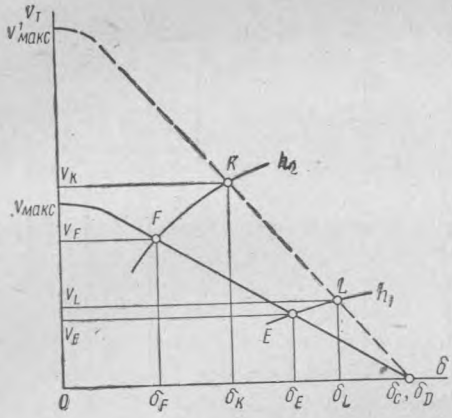


Рис. 141. Принцип регулирования скорости становой лебедки системой автоматики «Волга»

ветствует забою грунтопровода. Таким образом, кривая AC характеризует влияние ограниченной транспортирующей способности напорного грунтопровода на режим работы грунтонасосной установки.

Кривая AD соответствует работе с предельным использованием всасывающей способности грунтового насоса или с неуплотненным всасывающим грунтопроводом. По мере увеличения консистенции смеси возрастание вакуума приводит к наступлению кавитационных режимов, при которых резко уменьшается расход смеси и снижаются показания манометра. Точка D характеризует прекращение подачи гидросмеси грунтовым насосом из-за «срыва вакуума» или забоя грунтопровода.

Когда приращения ΔV и ΔP пропорциональны, что соответствует прямой OA на графике (см. рис. 140), система «Волга» обеспечивает рабочее перемещение землесоса с максимальной заданной скоростью $v_{макс}$. С увеличением консистенций смеси линейная зависимость между ΔV и ΔP нарушается и режимы соответствуют точкам на линиях AC или AD. При этом система автоматики снижает скорость $v_т$ движения землесоса по сравнению с максимальной пропорционально величине отклонения точки действительного режима от прямой OA, т. е. пропорционально например величине $\delta_F = \Delta P_F - \kappa \Delta V_F$ или $\delta_N = \Delta P_N - \kappa \Delta V_N$. Если режим приближается к точкам C или D, система автоматики останавливает становую лебедку, и движение землесоса по траншее прекращается.

Принцип пропорционального регулирования скорости землесоса системой «Волга» в графическом виде показан на рис. 141. Ось ординат графика соответствует скорости $v_т$ движения землесоса по траншее, ось абсцисс — величинам отклонения $\delta = \Delta P - \kappa \Delta V$ от линейной зависимости $\Delta P = \kappa \Delta V$. Кривыми h_1 и h_2 условно представлена при двух толщинах удаляемого слоя грунта зависимость отклонений δ, т. е. степени приближения к максимуму производительности, от скорости $v_т$ движения землесоса по траншее. Наклонная линия $v_{макс} - \delta_C$; δ_D представляет собой зависимость, по которой система автоматики «Волга» изменяет скорость $v_т$ движения землесоса при изменениях отклонений δ. При малой консистенции смеси, когда $\delta = 0$, землесос перемещается по траншее с максимальной скоростью $v_{макс}$. В случае

отклонений δ_E или δ_F система автоматики обеспечивает движение землесоса со скоростями соответственно v_E или v_F. Если отклонение достигает максимальной величины δ_C или δ_D, скорость $v_т$ землесоса становится равной нулю.

Наклон линии, по которой система «Волга» регулирует скорость $v_т$ движения землесоса, можно изменять, задавая путем ручной настройки различные максимальные значения $v_т$ и δ. Такая настройка требуется в случае значительного изменения толщины h снимаемого слоя грунта на прорези, а также при изменении гранулометрического состава грунта, чтобы уменьшить статическую ошибку регулирования или предотвратить забои грунтопровода.

Допустим, что автоматика настроена на регулирование скорости $v_т$ по зависимости, характеризуемой сплошной линией на рис. 141. При удалении с прорези толстого слоя грунта h_1, когда для достижения производительного режима требуется относительно небольшая скорость $v_т$ землесоса, равная v_E, автоматика обеспечит режим в точке E, при котором отклонение δ_E оптимально. Если снимаемый слой грунта стал малым (h_2), автоматика увеличит скорость $v_т$ землесоса до величины v_F; при этом режим установится в точке F с уменьшенным значением отклонения δ_F от линейной зависимости $\Delta P = \kappa \Delta V$. Очевидно, что в этом случае землесос будет работать с пониженной консистенцией смеси по сравнению с режимом в точке E. Разность $\delta_E - \delta_F$ называется статической ошибкой регулирования.

Чтобы уменьшить статическую ошибку регулирования, т. е. обеспечить работу землесоса с более высокой производительностью, при удалении с прорези тонкого слоя грунта h_2 можно вручную задать автоматике более высокую максимальную скорость $v'_{макс}$, изменив зависимость $v_т$ на рис. 141 в соответствии с пунктирной линией. В этом случае система «Волга» установит скорость $v_т$ землесоса равной v_K, обеспечив режим в точке K с меньшей статической ошибкой $\delta_E - \delta_K$, так как $(\delta_E - \delta_K) < (\delta_E - \delta_F)$ Если с такой зависимостью регулирования землесос будет удалять с прорези толстый слой h_1 грунта, то режим работы установится в точке L с отклонением δ_L, близким к максимальному. Вследствие колебаний рабочего режима при этом может произойти забой грунтопровода, поэтому потребуется перенастройка системы автоматики в соответствии со сплошной линией на рис. 141 и с отклонением $\delta_E < \delta_L$.

Блок-схема системы автоматики «Волга» показана на рис. 142. Фактические показания вакуумметра V и манометра P сравниваются с заданными величинами $V_{зад}$ и $P_{зад}$, устанавливаемыми опытным путем при настройке системы и приблизительно соответствующими работе на воде. Разностные сигналы $\Delta V = V - V_{зад}$ и $\Delta P = P - P_{зад}$, характеризующие приращения фактических показаний вакуумметра и манометра по отношению к заданным, сравниваются между собой в узле A, из которого выходит сигнал $\delta = \Delta P - \kappa \Delta V$. Этот сигнал воздействует через магнитный усили-

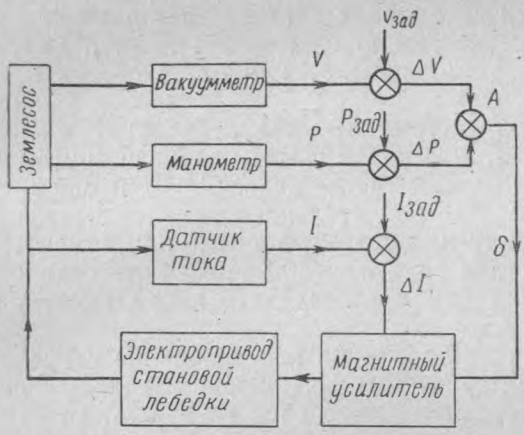


Рис. 142. Блок-схема системы «Волга»

тель на электропривод становой лебедки землесоса и соответственно на скорость выбирания станового троса или движения землесоса по траншее $v_т$.

Кроме рассмотренного воздействия на скорость $v_т$ движения землесоса по соотношению приращений показаний вакуумметра и манометра, системой «Волга» обеспечивается ограничение этой скорости при чрезмерном возрастании тягового усилия в становом тросе. Величины усилия оцениваются по току якоря электродвигателя становой лебедки. При возрастании сигнала от датчика тока I сверх заданного значения $I_{зад}$ скорость $v_т$ землесоса снижается, а по достижении током некоторого предельного значения электродвигатель лебедки останавливается и прекращается движение землесоса по траншее [1].

Система автоматического регулирования грунтозабора, названная «Слой», разработана в Московском филиале ЛИВТа под руководством А. С. Старикова. Она предназначена для регулирования скорости $v_т$ перемещения землесоса по траншее с обеспечением производительности, близкой к максимальной, без необходимости ручной перенастройки на изменяющиеся условия работы.

В качестве параметра, характеризующего достижение максимальной производительности по условиям гидротранспортирования грунта, принят слой отложения грунта в грунтопроводе, толщина $h_{сл}$ которого измеряется с помощью специального датчика-слоемера, установленного на горизонтальном участке напорного грунтопровода. Экспериментальными исследованиями установлено, что достижение максимальной производительности по гидротранспорту сопровождается отложением в грунтопроводе предельного слоя грунта определенной толщины.

В зависимости от крупности транспортируемого грунта максимальная консистенция гидросмеси и производительность землесоса различны, но предельная толщина слоя отложения грунта приблизительно одинакова. У типовых речных землесосов, работающих с паспортными (по диаметру и длине) плавучими грунтопроводами, предельная толщина слоя отложения грунта составляет около 25% от диаметра труб. Наличие в грунтопроводе слоя

[1] Материалы по описанию системы «Волга» и рассматриваемой далее системы «Слой» представлены А. С. Стариковым.

грунта той или иной толщины свидетельствует о степени использования гидротранспортной способности землесоса.

Если производительность землесоса лимитируется условиями грунтозабора, наблюдается возрастание тягового усилия в становом тросе. Повышение тягового усилия до предельно допустимой величины свидетельствует о достижении максимальной по условиям грунтозабора производительности землесоса. Оценка степени использования возможностей землесоса по грунтозабору в системе «Слой» осуществляется с помощью датчика тока в якоре электродвигателя становой лебедки, характеризующего величину тягового усилия в становом тросе.

В практике эксплуатации землесосов наблюдаются случаи работы с нарушенной герметичностью всасывающего грунтопровода. Проникновение воздуха через неплотности всасывающего грунтопровода в грунтовый насос вызывает резкие изменения расхода гидросмеси и толщины слоя отложения грунта в трубах. Подобные явления наблюдаются также при появлении кавитации в насосе вследствие увеличения сопротивления всасывающего грунтопровода, например при завале или засорении всасывающего приемника. С целью обеспечения быстрой реакции автоматики на резкие изменения расхода смеси и предотвращения забоев грунтопровода грунтом в рассматриваемых случаях в системе «Слой» используется третий датчик — вакуумметр.

Схемой системы автоматики «Слой» предусмотрено регулирование скорости $v_т$ движения землесоса по траншее только по одному из трех датчиков. Система выбирает тот сигнал, который превалирует в данный момент над остальными. Например, если толщина слоя отложения грунта больше заданного значения, а ток становой лебедки и вакуум — меньше, то регулирование скорости $v_т$ осуществляется только по сигналу от слоемера. Если ток электродвигателя лебедки больше заданного, а толщина слоя отложения грунта и вакуум — меньше, то скорость $v_т$ регулируется по сигналу от датчика тока. В тех случаях, когда от двух или всех трех датчиков поступают сигналы одного знака, регулирование производится по параметру, имеющему наибольшее отклонение от заданного значения.

Система «Слой» при изменении условий работы землесоса (род грунта, толщина удаляемого с прорези слоя грунта, глубина разработки прорези) не требует ручной перенастройки заданных значений измеряемых датчиками параметров. Возможность перенастройки предусмотрена только у вакуумметра и датчика тока на случай нарушения нормального технического состояния оборудования (появление неплотностей во всасывающем грунтопроводе; большой износ станового троса или недостаточная удерживающая сила станового якоря, требующие снижения допустимого тягового усилия в тросе).

Принцип регулирования скорости $v_т$ движения землесоса по траншее системой «Слой» показан в графическом виде на рис. 143. Ось ординат графика соответствует величинам скорости $v_т$ дви-

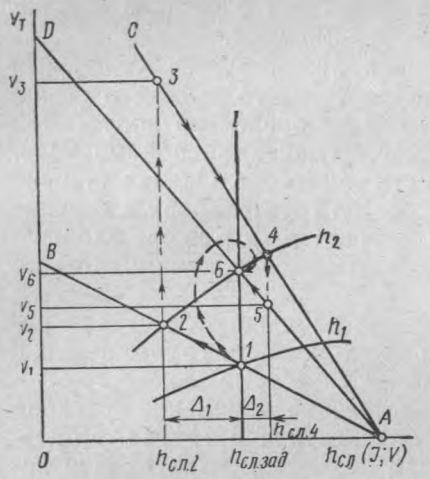


Рис. 143. Принцип регулирования грунтозабора системой автоматики «Слой»

жения землесоса, ось абсцисс — величинам управляющего сигнала, например толщине $h_{сл}$ слоя отложения грунта в грунтопроводе. Кривые h_1 и h_2 характеризуют изменение слоя отложения грунта в зависимости от скорости $v_т$ движения землесоса по траншее при удалении с прорези толстого h_1 и тонкого h_2 слоя грунта. Вертикальной линией I отмечена заданная толщина $h_{сл.\,зад}$ слоя отложения грунта в грунтопроводе, которую должна поддерживать система автоматики «Слой». Наклонные линии AB, AD, AC и т. д. соответствуют зависимостям пропорционального регулирования скорости $v_т$ по управляющему сигналу.

Особенностью системы «Слой» является автоматическое изменение угла наклона линий регулирования скорости $v_т$ с целью уменьшения статической ошибки регулирования при изменениях условий работы земснаряда.

Допустим, что после установления режима работы землесоса на линии регулирования AB в точке *1* со скоростью v_1 при толщине снимаемого слоя h_1 и заданной толщине слоя отложения грунта $h_{сл.\,зад}$ землесос переместился на участок траншеи с уменьшенной толщиной снимаемого слоя h_2. Производительность землесоса начала снижаться, и слой отложения грунта в трубах стал убывать. Автоматика тогда повышает скорость $v_т$ землесоса по линии AB до величины v_2 и новый режим работы устанавливается в точке *2*. При этом толщина слоя грунта в трубах оказывается равной $h_{сл2}$, меньше заданной величины $h_{сл.\,зад}$. Появляется отрицательная статическая ошибка регулирования $\Delta_1 = h_{сл2} - h_{сл.\,зад}$. Сигнал о величине и знаке этой ошибки накапливается в специально предусмотренном системой интеграторе, который автоматически изменяет угол наклона линии регулирования скорости, например, в положение AC (см. рис. 143). Скорость $v_т$ землесоса возрастает до величины v_3, режим работы переходит из точки *2* в точку *3*.

Вследствие возрастания скорости $v_т$ землесоса его производительность начинает увеличиваться и, соответственно, увеличивается толщина слоя грунта в грунтопроводе. По сигналу слоемера автоматика снижает скорость $v_т$ движения землесоса по линии регулирования AC. Новый режим устанавливается в точке *4* с толщиной слоя отложения грунта $h_{сл4}$ более заданной величины слоя $h_{сл.\,зад}$. Интегратор, получив информацию о поло-

жительной статической ошибке Δ_2, уменьшает наклон линии регулирования в положение AD. Скорость $v_т$ землесоса при этом снижается до величины v_5, а затем режим работы по линии регулирования AD переходит в точку *6*, соответствующую толщине слоя отложения $h_{сл.зад}$ и скорости v_6.

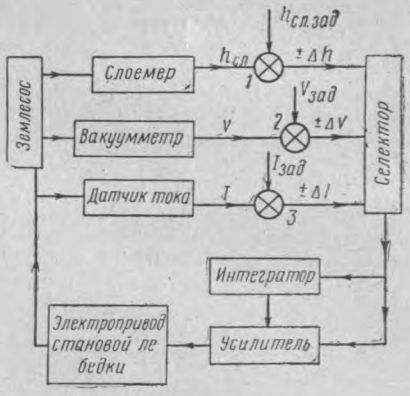


Рис. 144. Блок-схема системы «Слой»

Показанные на рис. 143 изменения режимов работы в виде резких ступенчатых переходов из точки *1* в точки *2, 3, 4, 5* и *6* в действительности осуществляются системой «Слой» плавно и имеют небольшой диапазон разброса, так как угол наклона линий регулирования изменяется автоматикой постепенно по мере поступления сигнала о величине и знаке статической ошибки регулирования. Действительную траекторию перехода режимных точек из положения *1* в положение *6* в рассмотренном примере резкого изменения толщины снимаемого слоя на прорези можно представить спиралевидной кривой, изображенной на рис. 143 пунктиром.

Таким образом, системой «Слой» при изменении условий работы землесоса обеспечивается автоматическое регулирование грунтозабора по любому из управляющих сигналов (слой отложения грунта, ток электродвигателя становой лебедки или вакуум) с автоматическим устранением статической ошибки регулирования.

Блок-схема системы «Слой» показана на рис. 144. Сигналы о показаниях слоемера $h_{сл}$, датчика тока I и вакуумметра V поступают в узлы сравнения *1, 2, 3,* которые выдают разностные сигналы $\pm\Delta h_{сл}$, $\pm\Delta I$, $\pm\Delta V$, характеризующие величину отклонения действительных величин от заданных значений. Разностные сигналы поступают в селектор, который в результате сравнения этих сигналов по знаку и по величине выбирает один из них, являющийся в данный момент определяющим. Выделенный управляющий сигнал из селектора подается в интегратор и на усилитель. В интеграторе осуществляется оценка статической ошибки регулирования, на основании чего вносятся коррективы в зависимость регулирования (угол наклона линий регулирования на рис. 143). В усилителе обеспечивается увеличение мощности управляющего сигнала, после чего он поступает на электропривод становой лебедки для изменения скорости выбирания станового троса и соответственно скорости $v_т$.

Опыт работы землесосов с системой «Волга-67» показал простоту ее устройства и надежность действия. Однако эта система

отличается сложностью первоначальной настройки при изменении условий работы (крупности грунта, толщины снимаемого слоя и др.).

Система «Слой» более универсальна для работы на грунтах разной крупности и при изменении толщины снимаемого слоя, но датчик прибора «Слоемер», измеряющего отложившийся в грунтопроводе слой грунта, быстро изнашивается и поэтому не обеспечивает надежности действия системы.

Недостатком обоих систем является подача неправильных сигналов при изменении тяговых усилий в становом тросе, регистрируемых динамометром, не только из-за изменений условий грунтозабора, но и при случайных причинах.

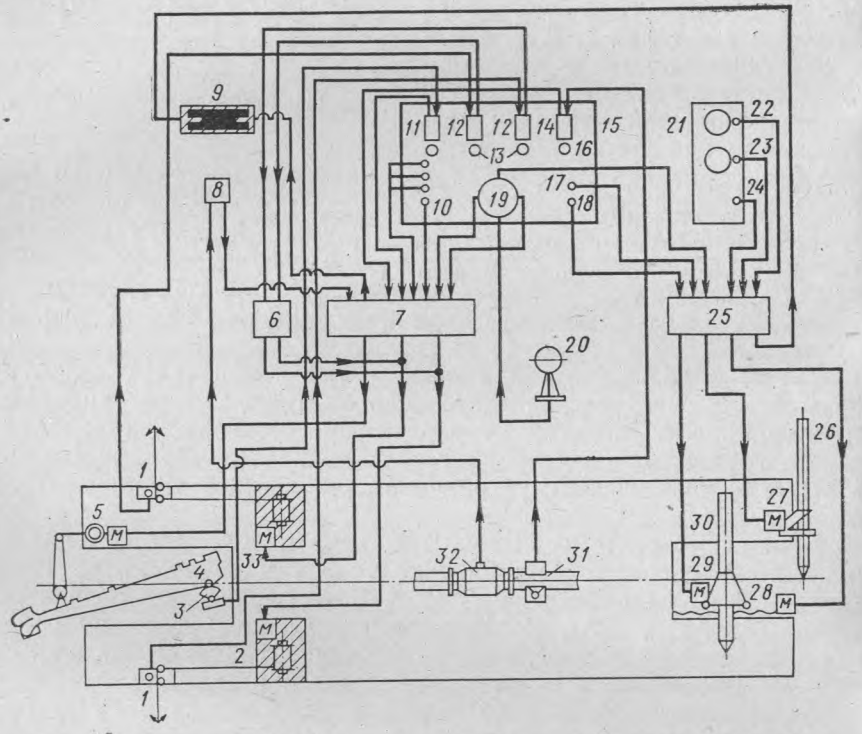


Рис. 145. Блок-схема программного управления на землесосе ДЭ-1000:

1 — датчики тяги тросов; *2, 33* — левая и правая боковые лебедки; *3* — сельсин положения рамы; *4* — рама всасывающей трубы; *5* — рамоподъемная лебедка; *6* — шкаф автоматической регулировки работы боковых лебедок и защит; *7* — шкаф автоматики передвижений землесоса; *8* — указатель скорости движения смеси; *9* — панель сигнализации; *10* — переключатель числа слоев; *11* — регулятор положения рамы; *12* — регуляторы лебедок; *13* — заданная величина тягового усилия; *14* — регулятор консистенции смеси; *15* — пульт автоматики грунтозабора и грунтоотвода; *16* — заданная степень консистенции смеси; *17* — переключатель числа смен свай; *18* — потенциометры регулировки глубин слоев; *19* — датчик углового отклонения; *20* — датчик магнитного компаса; *21* — пульт автоматики свайного устройства; *22* — переключатель и указатель подъема и опускания рабочей сваи; *23* — переключатель шага и указатель положения свайной тележки; *24* — переключатель и указатель подъема и опускания вспомогательной сваи; *25* — шкаф управления сваями; *26* — вспомогательная свая; *27* — лебедка для подъема и опускания вспомогательной сваи; *28* — лебедка для перемещения рабочей сваи; *29* — лебедка для подъема и опускания рабочей сваи; *30* — рабочая свая; *31* — консистомер; *32* — индукционный расходомер; *М* — моторы лебедок

На землесосах ДЭ-1000 (дизельных электрифицированных производительностью 1000 м³/ч, с фрезерным разрыхлителем и сваями) имеется автоматическое программное управление следующими операциями: скоростью папильонирования для поддержания заданной производительности; величиной подач вперед; количеством слоев по толщине при папильонировании; поддержанием заданных ширины и направления прорези, а также обеспечением заданной ее длины; заглублением грунтозаборного приемника в грунт в начале работы и опусканием его при переходе со слоя на слой; защитой снаряда от аварийных перегрузок тросов, засорения приемника и забоя грунтопровода и др.

Программное управление позволяет автоматически разрабатывать прорезь с заданными габаритами. Однако вахтенный начальник, наблюдая за работой автоматики, может в любой момент времени корректировать работу каждого ее звена. Управление всеми механизмами, включая и механизмы машинного отделения, сосредоточено, как и в предыдущих системах регулирования, в рубке управления.

Кроме уже названных технологических приборов, на этом землесосе установлены: магнитный компас для измерения угла крайних положений землесоса при работе на сваях, а также указатели положения тележки рабочей сваи и перемещения по высоте рабочей и вспомогательной свай и др. В отличие от предыдущих систем подачемер здесь показывает величину подачи вперед при папильонировании, а не расстояния, пройденные по траншее.

На рис. 145 показана блок-схема автоматического программного управления землесосом ДЭ-1000.

В системе автоматического управления землесосом ДЭ-1000 пока не решен вопрос о пропуске судов: трудно отыскать место, с которого ушел землесос перед пропуском судов, поскольку отход осуществляется по тросам.

§ 59. УДАЛЕНИЕ ГРУНТА РЕФУЛИРОВАНИЕМ В ВОДУ

При выдаче дноуглубительному снаряду наряда-задания на работу указывают способ удаления грунта, место и форму отвала грунта. Таким образом, снаряд не только разрабатывает прорезь по заданному направлению, с заданными габаритами и в установленный срок, но и укладывает извлеченный грунт в отвал заданной формы и на заданном месте.

Грунт, извлекаемый из прорези, используется, как уже упоминалось, для следующих целей: повышения побочней; возведения сплошного вала вдоль кромки прорези; устройства выправительных сооружений на побочнях, в затонской части, в протоках и рукавах и т. д.

По глубине воды на месте укладки или отвала грунта различают: 1) глубокие места, с глубиной более 1,5 м, достаточные для работы с плавучим грунтопроводом (рефулером) и для прохода

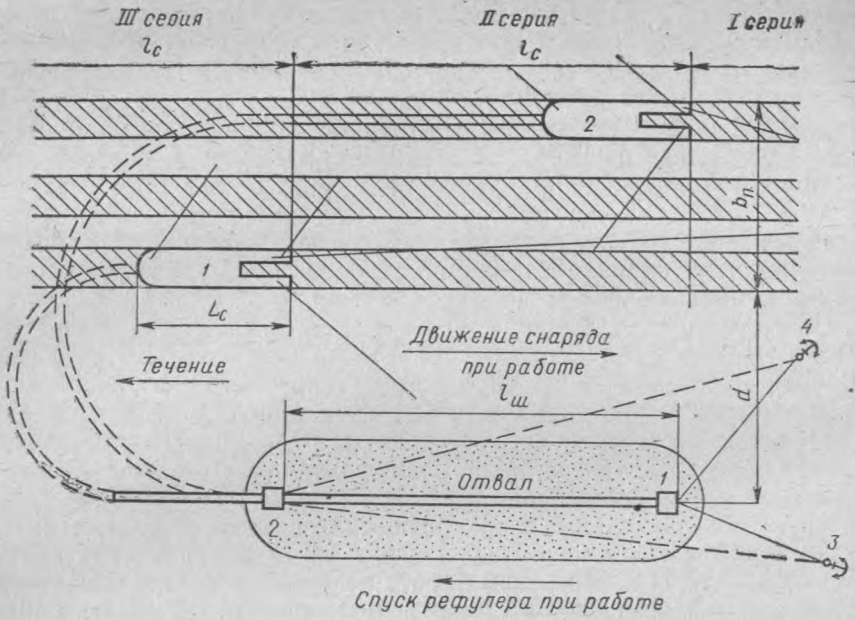


Рис. 146. Схема укладки грунта плавучим грунтопроводом:
1 и *2* — два положения землесоса и концевого понтона; *3* — становой якорь; *4* — оттяжной якорь

шаланд; 2) мелкие места, с глубиной менее 1,5 м, на которых можно работать только при помощи береговых труб.

При работе землесосов, составляющих основное рабочее ядро дноуглубительного флота, удаление грунта производится по плавучим грунтопроводам и редко по береговым трубам. Производительность землесосов колеблется преимущественно от 150 до 1000 м³/ч, а у отдельных землесосов доходит до 2500 м³/ч.

Землесосы, эксплуатирующиеся на наших реках, имеют длину плавучего грунтопровода преимущественно от 150 до 500 м и отдельные землесосы — до 650 м. В связи с тем что грунтопровод при работе имеет криволинейное очертание в плане (колышку), расстояние от кромки прорези до отвала грунта меньше длины грунтопровода, и поэтому весь грунт приходится укладывать на ограниченном расстоянии от прорези. Для того чтобы отваливать грунт вплотную к побочням, в затонские части и протоки, необходимо новые снаряды выпускать с плавучими грунтопроводами значительно бо́льшей длины.

При наличии течения плавучий грунтопровод (рефулер) устанавливают на двух якорях: с т а н о в о м и о т т я ж н о м, причем первый закладывают по линии грунтопровода несколько в сторону от прорези, а второй, наоборот, ближе к прорези (рис. 146). Становой и оттяжной якоря и тросы служат для удержания концевого понтона-площадки на месте отвала и спуска понтона по

течению по мере заполнения места отвала грунтом, для перемещения понтона в стороны от оси отвала, чтобы расширить место отвала грунта, для предупреждения обмеления концевого понтона и снятия последнего с мели, если он обмелел.

Наибольшее расстояние d от концевого понтона грунтопровода до кромки прорези зависит от способа перемещения землесоса по прорези, длины плавучего грунтопровода L, ширины прорези $b_п$, длины землесоса $L_с$, «шага» рефулера $l_ш$, т. е. расстояния, проходимого землесосом без перевода рефулера. Расстояние $l_ш$ при работе землесоса сериями сверху вниз равно длине серии $l_с$.

При работе сериями траншей по течению и против течения и при укладке грунта сплошным валом вдоль прорези (см. рис. 146) наибольшее расстояние d можно определить:

а) при начале работы на серии траншей, когда землесос находится у ближайшей к месту отвала грунта кромки прорези, а концевой понтон на конце серии,— по формуле

$$d=0{,}75(L-L_с-l_ш); \qquad (255)$$

б) при конце работы на серии траншей, когда землесос находится у дальней от места отвала грунта кромки прорези, а концевой понтон спущен к началу серии,— по формуле

$$d=0{,}75(L+L_с-l_ш)-b_п. \qquad (256)$$

В расчет принимается полученное мéньшее значение d.

При работе папильонированием против течения или сериями по течению и при укладке грунта тоже сплошным валом вдоль прорези наибольшее расстояние d определяют:

а) после перевода концевого понтона в новое положение выше носа снаряда на величину шага перекладки $l_ш$ — по формуле (255);

б) перед переводом концевого понтона в новое положение, когда он находится на величину шага перекладки ниже носа снаряда,— по формуле (256).

Рефулированием можно удалять главным образом легкие грунты — песчаные, супесчаные и илистые, труднее — суглинистые, еще труднее — глинистые, так как они не поддаются быстрому разжижению.

При первых признаках образования в грунтопроводе забоя во время работы землесоса поднимают приемник из грунта, не извлекая его из воды, и промывают грунтопровод до тех пор, пока из выкидного конца не начнет вытекать чистая вода. Если после промывки забой грунта не удается удалить, то производят очистку грунтопровода от забоя.

Очистку плавучего грунтопровода осуществляют путем последовательной его промывки, для чего открывают люки, имеющиеся в каждом звене грунтопровода. Сначала открывают люк, расположенный в третьем-четвертом звене, и промывают часть грунто-

провода, примыкающую к снаряду. Затем этот люк закрывают и открывают следующий, расположенный через несколько звеньев, и т. д.

При работе землесоса против течения сериями траншей или папильонированием концевой понтон рефулера (при установленном расстоянии d) завозят вверх по течению на наибольшее расстояние от начала работы или от начала серии. Для укладки грунта в виде сплошного вала грунтопровод по мере разработки прорези перемещают вниз по течению, для чего потравливают оба его троса.

Когда землесос работает папильонированием, скорость перемещения грунтопровода при однообразных глубинах на месте отвала должна примерно равняться скорости продвижения землесоса вдоль прорези. При работе траншеями скорость перемещения грунтопровода на таких же глубинах должна быть меньше скорости продвижения снаряда вдоль траншей во столько раз, сколько траншей разрабатывается по ширине прорези. Если грунт укладывается в два или более сплошных вала, скорость перемещения грунтопровода должна быть соответственно больше. К моменту, когда землесос будет находиться против места начала отвала, концевой понтон рефулера должен быть против начала работы или начала серии. После этого концевой понтон снова завозят по возможности на наибольшее расстояние выше землесоса, и работа продолжается на следующей серии.

При работе землесоса по течению траншейными и папильонажными сериями концевой понтон рефулера в начале работы на серии устанавливают против конца серии, а к моменту окончания разработки серии концевой понтон должен находиться примерно против начала серии. После этого землесос спускают на новую серию на наибольшее по длине рефулера расстояние, и работа продолжается. Когда землесос работает сериями по течению, перекладка якорей концевого понтона производится без остановки снаряда.

Для более полного использования мелководных мест под отвал грунта и для придания отвалу распластанного очертания концевой понтон перемещают веерообразно последовательным потравливанием станового и оттяжного тросов. При малых скоростях течения, отсутствии течения и низовом ветре перемещение грунтопровода достигается выбиранием тросов от якорей, завезенных в противоположную сторону. Для облегчения и ускорения работ по рефулированию грунта на мелководные места рекомендуется применять плоскодонные мелкосидящие понтоны.

При недостаточной емкости места для отвала грунта в воду последний укладывают выше уровня воды. Для такой укладки концевой понтон обсушивают рефулированием грунта без потравливания тросов, а затем на надводный грунт кладут сухие трубы и продолжают рефулирование. По мере увеличения площади надводного грунта наращивают сухие трубы; при этом концевой понтон плавучего грунтопровода остается неподвижным.

Когда дальнейшее рефулирование становится невозможным вследствие использования емкости места отвала грунта или длины сухих труб, плавучий грунтопровод переводят на новое место отвала грунта, и процесс рефулирования продолжается. Для снятия обсушенных понтонов прекращают рефулирование, чтобы облегчить трубы, а если после этого понтоны не всплывут, их снимают с мели при помощи мотозавозни и лебедок снаряда.

Для увеличения емкости места отвала грунта в воду, рефулирования грунта на сухие пески и для возведения выправительных сооружений из рефулируемого грунта применяют специальные разливные понтоны, которые устанавливают за электрифицированным концевым понтоном или вместо неэлектрифицированного концевого понтона. Разливной понтон передвигается вдоль выправительного сооружения или места отвала грунта и намывает тело грунтовых дамб по всему их гребню или отвал грунта (без прокладки сухих труб).

Когда землесосы работают на каналах, узких участках рек и на открытых участках водохранилищ, применяют вместо плавучих грунтопроводов конические насадки, обеспечивающие удаление грунта выбросом на расстояние до 30—40 м.

Землесос, удаляющий грунт выбросом через насадку, имеет комплект сменных конических насадок разных диаметров и поворотный патрубок на корпусном грунтопроводе. Патрубок, позволяющий выбрасывать водогрунтовую смесь с любого борта, делают с наибольшим возможным консольным выносом насадки за борт, чтобы увеличить дальность выброса.

Конические насадки применяют на землесосах, работающих траншеями, при этом длину серий увеличивают по сравнению с рефулерным способом удаления и работу на каждой серии начинают с траншеи, наиболее удаленной от створа отвала грунта. Коническую насадку на первых траншеях ставят под углом 35—40° к горизонту, при котором обеспечивается наибольшая дальность полета струи. По мере приближения к отвалу изменяют угол наклона насадки, обеспечивая этим укладку грунта от каждой траншеи возможно ближе к створу отвала.

Удаление грунта по коническим насадкам имеет ряд недостатков: забрызгивает землесос грунтовой смесью, и последняя попадает в механизмы, на каналах и узких участках рек берег подмывается струей из насадки, и большие объемы грунта сползают в воду. В связи с этим надо по возможности избегать работать с насадками.

Глава IX

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ГРУНТА ЧЕРПАКОВЫМИ СНАРЯДАМИ

§ 60. ЗАБОР ГРУНТА МНОГОЧЕРПАКОВЫМИ СНАРЯДАМИ ПРИ РАБОТЕ НА ТОНКИХ СЛОЯХ

После установки многочерпакового снаряда на прорези на якорях и тросах приводят в движение черпаковую цепь, опускают в грунт черпаковую раму и приступают к извлечению грунта. Как уже упоминалось, для извлечения грунта делают подачи снаряда вперед по становому тросу и затем перемещают его поперек прорези — папильонируют.

При опускании черпаков только до проектного дна глубина после работы снаряда может оказаться меньше проектной, так как черпаки имеют криволинейный зев и выработанное дно получается неровным. Кроме того, могут иметь место просоры грунта из черпаков на уже разработанную прорезь. Чтобы обеспечить проектную глубину при наличии неровного дна и просоров, работают с некоторым переуглублением, т. е. опускают черпак ниже проектного дна на величину запаса на неровность выработки.

При работе с запасом на неровность требуется дополнительное извлечение грунта ниже проектного дна, что увеличивает объем выемки и при прочих равных условиях удлиняет время разработки прорези и удорожает саму работу. Для уменьшения объема выемки работают с возможно минимальным запасом на неровность.

Многочерпаковым снарядом приходится работать на связных и несвязных грунтах, на тонких и толстых слоях. Тонкими слоями считают такие, толщина h которых меньше полного вылета a черпака ($h<a$) и одновременно меньше разности между радиусом $r_к$ козырька черпака на нижнем барабане и радиусом $r_р$ реборды барабана, т. е. $h<r_к-r_р$. Толщина h толстых слоев больше полного вылета a черпака ($h>a$) или разности $r_к-r_р$.

Для более полного заполнения черпака грунтом при заданной толщине снимаемого слоя необходимо правильно назначить подачу $l_с$ вперед по становому тросу и ширину $b_с$ снимаемой черпаком стружки грунта.

На рис. 147 показан вид сбоку на нижнюю часть черпакового устройства, работающего на несвязных тонких слоях папильонированием. Горизонтальная линия $А-А$ (см. рис. 147) лежит в плоскости рабочего дна прорези и проходит через нижнюю точку козырька черпака, который только что вошел на нижний барабан. Горизонтальная линия $Б-Б$ лежит в плоскости действительного дна прорези, положение которого зависит от провеса шлейфа ни-

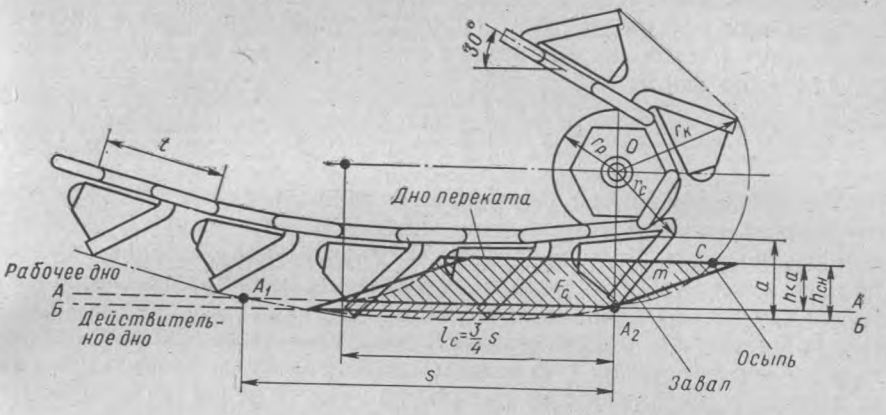


Рис. 147. Забор черпаками тонких слоев несвязного грунта при длинном шлейфе (вид сбоку)

же линии $А — А$ и от подачи вперед. Нижняя часть провисающей бухты черпаковой цепи, козырьки которой соприкасаются с рабочим дном или находятся ниже него, называется шлейфом, а расстояние A_1A_2 — длиной s шлейфа.

От линии $А — А$ (рис. 148) отсчитываем рабочую толщину h снимаемого слоя, а от линии $Б — Б$ — действительную толщину слоя $h_{сн}$ с учетом грунта, снятого ниже линии $А — А$ черпаками провисающей части шлейфа. Проектное дно расположено выше действительного дна прорези на величину запаса на неровность выработки $h_н$ и от него будем отсчитывать полезную толщину снимаемого слоя $h_п$ (см. рис. 148); тогда действительная толщина слоя $h_{сн} = h_п + h_н$.

При работе на тонких слоях нижний барабан находится выше поверхности неразработанного грунта и поэтому не мешает перемещению снаряда поперек прорези при любых подачах вперед. В этом случае при правильных папильонажных лентах можно было бы делать подачи вперед равными длине шлейфа, соблюдая только проектную глубину. Но при папильонировании на тросах, вследствие их гибкости, не удается получить правильных папильонажных лент одинаковой ширины, равной подаче вперед, так как траектория движения нижнего барабана поперек прорези имеет вид извилистой линии, а не дуги с постоянным радиусом. Поэтому при назначении подач, равных длине шлейфа, на прорези могут остаться неразработанные поперечные гребни грунта, возвышающиеся над проектным дном.

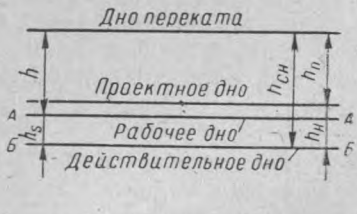


Рис. 148. Положение дна переката: проектного, рабочего и действительного

Вследствие этого для обеспечения проектной глубины по всей прорези при работе на тонких слоях папильонированием на тросах подачу вперед целесообразно назначать меньше длины шлейфа: $l_c < s$, по формуле

$$l_c = \left(\frac{3}{4} - \frac{2}{3}\right)s. \qquad (257)$$

Такие подачи дают возможность производительно работать при небольших скоростях папильонирования и при этом мало изнашиваются тросы. Если же из-за конструктивных особенностей папильонажных лебедок нельзя работать на небольших скоростях, то подачу вперед назначают меньше указанной по формуле (257). Величину подачи вперед также приходится снижать при работе на глинистых грунтах с большим сопротивлением резанию, когда черпаковый двигатель или папильонажные лебедки не позволяют резать грунт одновременно несколькими черпаками шлейфа.

По своему очертанию провисающая бухта черпаковой цепи, частью которой является шлейф, пока она не находится в движении и не соприкасается с дном прорези, похожа на цепную линию, но отличается от последней неравномерностью распределения веса по длине. Во время же работы, когда черпаки шлейфа забирают с прорези грунт, очертание черпаковой цепи отличается от цепной линии. Последнее обстоятельство затрудняет вычисление длины шлейфа теоретическим путем, и поэтому приходится измерять ее в натуре. (Приближенный расчет длины шлейфа дан в работе А. С. Старикова — см. список литературы).

Длина шлейфа черпаковой цепи изменяется при изменении длины провисающей бухты, глубины опускания рамы и точки ее подвеса, а также при износе цепи. При постоянных точке подвеса рамы и длине бухты длина шлейфа изменяется только при изменении глубины опускания рамы и при износе цепи. На рис. 147 изображен длинный шлейф при малой глубине черпания. Как показали измерения, выполненные производственно-теплотехническими партиями, длина шлейфа при небольших глубинах черпания колеблется от 1,3 до 3,2 t (t — шаг черпаковой цепи). Длина шлейфа при больших глубинах черпания резко уменьшается и доходит до 0,5 t, т. е. практически шлейфа нет.

Шлейф имеет провес h_s ниже линии $A - A$ (см. рис. 148); наибольший провес h_s наблюдается примерно на середине длины шлейфа, а на концах его провес равен нулю. Вследствие этого грунт снимается черпаками и ниже линии $A - A$, т. е. ниже рабочего дна. Практика работы снарядов на песчаных грунтах показывает, что провес в шлейфе тяжелой черпаковой цепи может доходить до 0,3—0,4 м и более; его необходимо в таких случаях учитывать, чтобы избежать ненужного переуглубления.

Положение действительного дна прорези по линии $Б - Б$ будет зависеть от провеса шлейфа на границе двух смежных подач. При подаче вперед $l_c = s$ провес на этих границах будет равен нулю, следовательно, действительное дно прорези по линии $Б - Б$ будет

совпадать с рабочим дном по линии $A — A$, несмотря на переуглубление в середине шлейфа. При малых подачах вперед величина провеса на их границах будет близка к величине h_s, и поэтому действительное дно прорези по линии $Б — Б$ будет ниже рабочего по линии $A — A$ на всю величину h_s.

Для практических целей кривую провеса шлейфа между точками A_1 и A_2 (см. рис. 147) можно принять за параболу, тогда величина провеса шлейфа на границах подач может быть представлена в долях от величины провеса h_s посередине. Так, при $l_c = {}^3/_4 s$; $l_c = {}^1/_2 s$ и $l_c = {}^1/_4 s$ величины провеса на границе этих подач будут соответственно ${}^1/_2 h_s$; ${}^3/_4 h_s$ и h_s, т. е. будут колебаться от 0,5 h_s до h_s. Для практических целей при подачах вперед ($l_c < {}^1/_2 s$) можно считать, что действительное дно прорези расположено ниже рабочего на величину наибольшего провеса h_s.

Если при работе на песчаных грунтах с подачами меньше половины длины шлейфа наибольший провес последнего равен запасу на неровность, например 0,15 м, проектное дно совпадает с рабочим, а действительное дно будет на 0,15 м ниже рабочего. В этом случае полезную толщину слоя $h_п$ можно отсчитывать от рабочего дна и работать без запаса. Если же провес будет больше запаса на неровность, например на 0,1 м, то на эту величину можно приподнять черпаки над рабочим дном, т. е. уменьшить на 0,1 м глубину опускания рамы, отсчитываемую от наинизшей точки черпака, который вошел на нижний барабан. Провес шлейфа увеличивается вместе с увеличением длины шлейфа, и наоборот.

На глинистых грунтах, оказывающих большую вертикальную реакцию погружению черпаков и большое сопротивление резанию, провес шлейфа при прочих равных условиях значительно меньше, чем на песчаных грунтах, где реакция и сопротивление малы. Поэтому на связных грунтах провесом шлейфа в большинстве случаев можно пренебречь и считать рабочее и действительное дно лежащими в одной плоскости, или $h_п + h_s = h = h_{сн}$. Провесом шлейфа можно пренебречь в некоторых случаях и на несвязном грунте, если работать с нетяжелой черпаковой цепью.

Песчаный грунт лежит под водой откосом (см. рис. 147) с заложением m, обычно равным 2—3 и более. Почти по всей длине подачи тонкий слой грунта снимается черпаками шлейфа, а после выхода черпаков в точке c из грунта последний осыпается и снова ложится откосом. Площадь F_c папильонажной стружки, снимаемой черпаком (заштрихована на рис. 147) при подачах $l_c \leqslant 0{,}5\ s$ и тонком песчаном слое, можно определить по формуле

$$F_c = l_c(h + h_s). \qquad (258)$$

Для тонкого слоя связного грунта, пренебрегая провесом шлейфа, получим:

$$F_c = l_c h. \qquad (259)$$

Формулы (258) и (259) справедливы для параллельного папильонирования. При багермейстерском папильонировании пло-

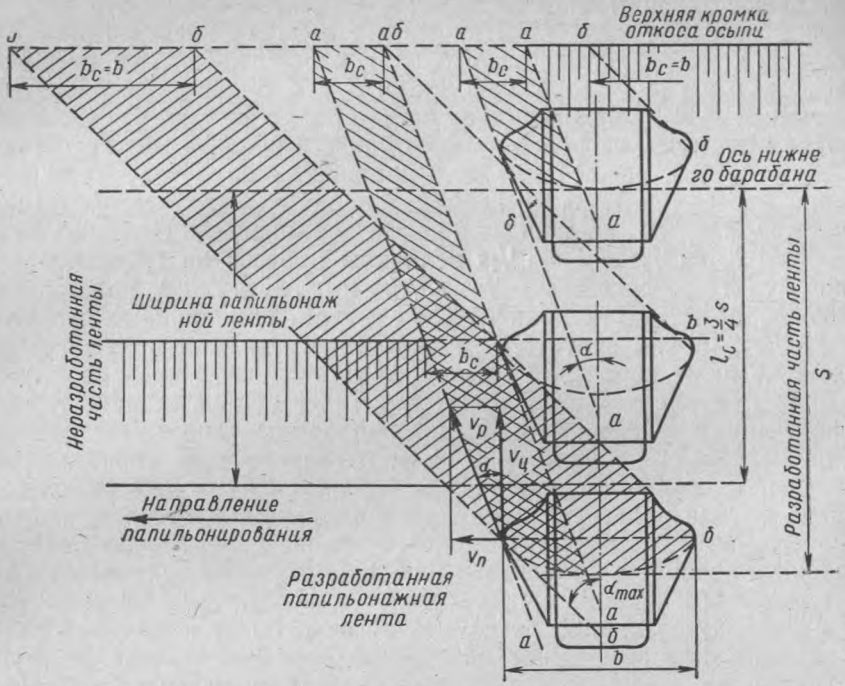


Рис. 149. План забора черпаками тонких слоев несвязного грунта при длинном шлейфе

щадь папильонажной стружки определяется соответственно по следующим формулам:

$$F_c = l_c(h + h_s)\cos\beta; \tag{260}$$

$$F_c = l_c h \cos\beta. \tag{261}$$

В этих формулах β — угол наклона продольной оси снаряда к оси прорези в плане.

На рис. 149 показана ширина стружки b_c, срезаемой черпаками по наклонным к оси прорези линиям $a — a$ и $б — б$ при работе снаряда с длинным шлейфом. Линии $б — б$ показывают пути движения черпаков при большой ширине стружки, равной ширине черпака ($b_c = b$), а линии $a — a$ — при малой ширине стружки, значительно меньшей ширины черпака ($b_c \ll b$).

При работе на гибких тросах действительные траектории движения черпаков будут криволинейными, а не прямолинейными, как показано на рис. 149. Поэтому, если ширина стружки равна ширине черпака ($b_c = b$), между смежными стружками возможны пропуски грунта. Кроме того, при такой большой ширине стружки боковые поверхности черпаков при срезании мнут грунт, на что расходуется энергия черпакового двигателя и лебедок и затрудняется процесс грунтозабора.

Расчеты и практика показывают, что во избежание пропусков грунта и для устранения мятия грунта необходимо, чтобы ширина стружки была $b_c < 0{,}6\,b$, т. е. каждую стружку надо перекрывать последующим черпаком не менее чем на 40% ширины последнего.

При работе на песчаных грунтах возможны просоры на разработанные участки прорези, главным образом из-за того, что часть грунта вываливается из черпака, когда он находится на нижнем барабане, и вымывается течением. Реже просоры получаются из-за того, что, не успев вывалиться на верхнем барабане, грунт снова попадает в прорезь из черпаков провисающей бухты.

Вываливается песок из черпаков на нижнем барабане в тот момент, когда черпаки выходят из грунта, а вымывается — когда черпаки двигаются от поверхности дна водоема до уровня воды, особенно при значительных скоростях движения черпаковой цепи и скоростях течения. Неполное опорожнение черпаков с песчаным грунтом на верхнем барабане происходит в основном при больших скоростях движения цепи (больше 18—20 черпаков в минуту) и при отсутствии грунтоуловителя на передней стенке колодца.

Весь грунт, попавший в просор, распределяется по разработанной площади прорези довольно равномерно, заполняя впадины и возвышения, оставшиеся после работы черпаков. Практика показывает, что просор на тонких песчаных слоях нередко достигает 15—20% толщины снимаемого слоя, что вместе с неровностью выработки и определяет потребный запас $h_н$.

При работе на связных грунтах вываливания и вымывания его из черпаков на нижнем барабане течением обычно не происходит, но может иметь место неполное опорожнение черпаков на верхнем барабане. Поэтому на связных липких грунтах, если нет специальных устройств для опорожнения черпаков, работают с меньшей скоростью движения черпаковой цепи, чтобы удлинить время нахождения черпаков с грунтом над колодцем и тем самым добиться их лучшего опорожнения. Однако часть липкого грунта и при меньшей скорости может не вывалиться в колодец, и тогда черпак опорожнится на уже разработанной части прорези или придет с частью грунта в шлейф, т. е. в грунтозабор.

Вообще при работе на тонких слоях связных грунтов приходится главным образом учитывать неровность выработки от криволинейности зева черпаков, а не от просора. При работе же на несвязных грунтах, особенно на песчаных, хотя дно и разравнивается течением, приходится назначать запас на неровность из-за значительного просора грунта.

Объем стружки w_c неразрыхленного несвязного грунта, снимаемой черпаком со дна водоема на тонких слоях при параллельном папильонировании и небольших подачах, определяют по формуле

$$w_c = \varphi F_c b_c = \varphi l_c (h + h_s) b_c. \qquad (262)$$

Здесь φ — коэффициент неполноты объема снимаемой стружки из-за криволинейности очертаний зева черпака, равный отношению действительного объема стружки $w_с$ к объему параллелепипеда $w_п$ такой же высоты, длины и ширины. Коэффициент φ для заданной формы черпака зависит от ширины стружки $b_с$ и толщины снимаемого слоя $h_{сн}$ и может быть определен по формуле

$$\varphi = \frac{w_с}{w_п} = \frac{l_с h_{сн} b_с - \omega l_с}{l_с h_{сн} b_с}, \qquad (263)$$

где ω — поперечная площадь гребней, остающихся на рабочем дне прорези. Величина этого коэффициента колеблется в большинстве случаев от 0,8 до 1.

При работе на связных грунтах, когда $h_s = 0$, формула (263) примет следующий вид:

$$w_с = \varphi b_с l_с h. \qquad (264)$$

При багермейстерском папильонировании формулы (262) и (264) соответственно изменяются в следующие:

$$w_с = \varphi F_с b_с \cos\beta = \varphi l_с (h + h_s) b_с \cos\beta; \qquad (265)$$

$$w_с = \varphi l_с h b_с \cos\beta. \qquad (266)$$

Скорость папильонирования $v_п$ при известных значениях ширины стружки $b_с$ и числа черпаков $n_ч$, проходящих в минуту, определяется по формуле

$$v_п = b_с n_ч. \qquad (267)$$

Число черпаков $n_ч$ устанавливается в соответствии с условиями работы.

Для улучшения грунтозабора при работе многочерпаковых снарядов на тонких слоях несвязного и незасоренного грунта в лаборатории дноуглубления МОФ ЛИВТа разработаны грунтозаборный экран и пригрузочное устройство шлейфа черпаковой цепи.

Грунтозаборный экран предназначен для обеспечения высокой степени наполнения черпаков грунтом и для ликвидации грунтового «валика» на передней кромке папильонажной ленты, если последний образуется при выходе черпаков из грунта.

Пригрузочное устройство шлейфа черпаковой цепи, создающее дополнительную вертикальную силу, действующую на черпаки, должно способствовать их погружению в грунт и обеспечивать полноту разработки папильонажных лент при значительных подачах вперед.

Грунтозаборный экран и пригрузочное устройство шлейфа были установлены на снаряде «Московская-118» и испытывались при работе на тонких слоях песчаного грунта. Эти испытания показали их работоспособность, а также необходимость некоторых доделок.

§ 61. ЗАБОР ГРУНТА МНОГОЧЕРПАКОВЫМИ СНАРЯДАМИ ПРИ РАБОТЕ НА ТОЛСТЫХ СЛОЯХ

При работе на толстых слоях, как и на тонких, для более полного заполнения черпака грунтом необходимо правильно назначать величину подачи вперед l_c и ширину снимаемой черпаком стружки b_c. Забор черпаками толстых слоев несвязных грунтов отличается от забора толстых слоев связных грунтов, а поэтому рассмотрим их раздельно.

На рис. 150 показана нижняя часть черпакового устройства (вид сбоку), работающего на толстых слоях несвязных грунтов папильонированием. Предполагается, что после прохода черпаков грунт осыпается и вдоль папильонажной ленты получается откос с заложением m. Как видно из рисунка, заглубление шлейфа в грунт в направлении подачи вперед ограничено упором спинки черпака, вошедшего на нижний барабан, в откос осыпи. Если такого ограничения не сделать, то при папильонировании звенья цепи и реборда нижнего барабана будут мять грунт. Кроме того, как и на тонких слоях, рабочая длина шлейфа не должна быть более $^3/_4$ или $^2/_3$ его длины.

При длинном шлейфе или крутых откосах заглубление шлейфа в откос осыпи будет ограничиваться упором спинки черпака в откос, а при коротком шлейфе или очень пологих откосах заглубление шлейфа в откос осыпи ограничивается длиной шлейфа. В дальнейшем изложении будем иметь в виду только первый случай, детально показанный на расчетной схеме (рис. 151), как более часто встречающийся в дноуглублении.

При упоре спинки черпака в откос осыпи (точка C на рис. 151) грунт в нижней части откоса, в пределах площади *1—8—5* и тре-

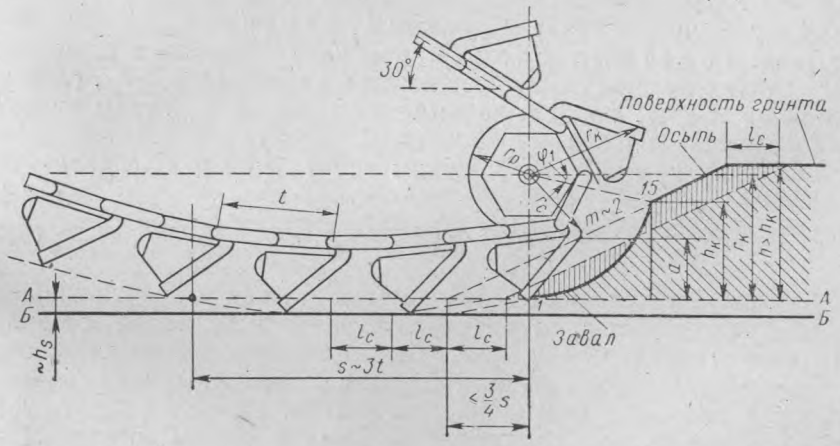


Рис. 150. Забор черпаками толстых слоев несвязного грунта при длинном шлейфе (вид сбоку)

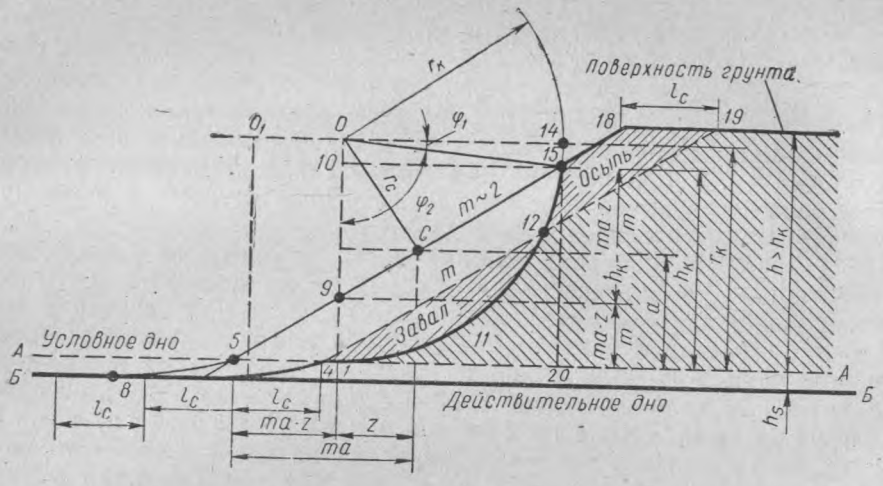


Рис. 151. Расчетная схема забора черпаками толстых слоев несвязного грунта

угольника *1—5—9,* забирает черпак, когда он находится в шлейфе, а грунт в средней части откоса, в пределах площади *1—11—15—9,*— когда вращается вместе с барабаном. Грунт, лежащий по откосу выше точки *15,* непосредственно в черпак не попадает и во время забора черпаком площади *1—11—15—9* в него не осыпается. После же выхода черпака из откоса грунт, лежащий выше точки *15,* осыпается и заполняет часть площади *8—1—11—15—5,* снятой черпаком.

Как видно из схемы (см. рис. 151), положение точки *15,* в которой черпак на барабане выходит из откоса осыпи, зависит только от размеров черпака и барабана и от заложения откоса. Толщину грунта в точке *15* назовем критической толщиной $h_к$. Толстыми слоями при работе черпаков на несвязных грунтах будем считать только слои толщиной $h \geqslant h_к$, слои же толщиной $h < h_к$, но больше вылета a черпака, будем считать промежуточными.

Величину критической толщины грунта можно определить по формуле

$$h_к = r_к(1 - \sin \varphi_1). \qquad (268)$$

Для каждого снаряда величина угла φ_1, как и положение точки *15,* зависят только от размеров черпака и барабана, от заложения m откоса осыпи и может быть получена построением, аналогичным показанному на рис. 151. Для стандартных же черпаков, имеющих подобные очертания при разных емкостях, этот угол меняется только при изменении заложения откоса осыпи. Для стандартных черпаков угол φ_1 можно принять равным около 15° при откосе осыпи $m = 2$ и около 20° при $m = 3$.

Величина критической толщины грунта $h_к$ при $m=2—3$, подсчитанная по формуле (268), для стандартных черпаков емкостью $w=100—690$ л колеблется приблизительно от 0,6 до 1,2 м. Если сравнить значение критической толщины грунта $h_к$ с величиной a вылета черпаков, то увидим, что первая величина превышает вторую в пределах от 0,1 до 0,3 м (для разных черпаков). Таким образом, выход черпака из откоса осыпи с $m=2—3$ происходит при толщине грунта $h_к$, немного превышающей наибольшую толщину тонкого слоя, равную вылету a черпака.

Рассмотрим теперь определение подачи вперед на толстых слоях несвязного грунта с $h>h_к$ (см. рис. 151). В этом случае черпак шлейфа, подходя к откосу, начинает забирать грунт в точке *8* в пределах площади *8—1—5* и треугольника *5—9—1*, а затем подходит к точке *1*. Начиная с точки *1* черпак, вращаясь вместе с барабаном, забирает грунт в пределах площади *1—9—15—11* и выходит из грунта в точке *15*. После прохода черпака на неразработанной части грунта остается круговая поверхность *1—11—15*, имеющая в верхней части более крутой откос, чем откос осыпи. Вследствие этого верхняя площадь грунта *12—15—18—19* осыпается и занимает положение равновеликой ей площади *4—12—11—1*. В результате этого к моменту возвращения черпаков по следующей папильонажной ленте откос грунта снова будет иметь заложение m.

В зависимости от пологости откоса грунт после осыпи площади *12—15—18—19* весь разместится правее точки *1* или частично левее точки *1*. В первом случае величина подачи вперед будет больше длины линии *5—1*, во втором — меньше *5—1*. На рис. 151 основание нового откоса осыпи расположено немного левее точки *1*, и поэтому величина подачи вперед меньше длины линии *5—1* ($l_с<5—1$). В том и другом случаях величину подачи вперед $l_с$ можно получить из равенства площадей *8—5—15—11—1* и *8—5—18—19—4*.

Площадь $F_с$, или *8—5—18—19—4*, равна сумме площадей *8—5—4* и *5—18—19—4*:

$$F_с=l_с h+l_с h_s=l_с(h+h_s). \qquad (269)$$

Площадь $F'_с$, или *8—5—15—11—1*, равна сумме площадей *8—5—1*, *5—9—1* и *1—10—15—11* за вычетом площади треугольника *9—10—15*:

$$F'_с=l_с h_s+\frac{(ma-z)^2}{2m}+\frac{1}{4}r_к^2\left(\frac{2\varphi_2}{180^\circ}\pi-\sin 2\varphi_2\right)-\frac{m}{2}\left(h_к-\frac{ma-z}{m}\right)^2. \qquad (270)$$

Величина подачи вперед определяется из равенства площадей $F'_с$ и $F_с$, или *8—5—15—11—1* и *8—5—18—19—4*, и будет равна

$$l_с=\frac{1}{h}\left[\frac{(ma-z)^2}{2m}+\frac{1}{4}r_к^2\left(\frac{2\varphi_2}{180^\circ}\pi-\sin 2\varphi_2\right)-\frac{m}{2}\left(h_к-\frac{ma-z}{m}\right)^2\right], \qquad (271)$$

где $2\varphi_2$ — центральный угол против всего сегмента. Половина этого угла φ_2 показана на рис. 151 против полусегмента *1—10—15—11*.

Величину угла φ_2 можно найти из треугольника *10—0—15*, где длина катета $0—10=r_к-h_к$ и длина гипотенузы $0—15=r_к$; тогда

$$\cos\varphi_2=\frac{r_к-h_к}{r_к}. \qquad (272)$$

Зная для конкретного снаряда значение $r_к$, а для заданного грунта также и значение $h_к$, получим величину угла φ_2.

Таким образом, работа на слоях несвязного грунта толщиной $h\geqslant h_к$, как это видно из схемы (см. рис. 151), характеризуется постоянством снимаемой черпаком площади $F'_с$, или *8—5—15—11—1*, величина которой зависит не от толщины снимаемого слоя h, а от пологости откоса m и от размеров черпака и барабана.

Поскольку числитель в формуле (271) не зависит от толщины слоя h, он будет постоянным для всех значений $h>h_к$; величина же подачи вперед $l_с$ будет уменьшаться для данного черпака при увеличении толщины h только пропорционально этой толщине (при постоянном заложении откоса осыпи). Угол φ_2, как и угол φ_1, будет постоянным для всех размеров стандартных черпаков при данном заложении откоса осыпи m. В связи с этим значение числителя в формуле (271) будет меняться только при изменении размеров черпака и пологости откоса m.

Подачи вперед, подсчитанные по формуле (271) для стандартных черпаков, при толщине слоя, которая больше $h_к$ и равна (1—2) $r_к$, колеблются приблизительно от 0,2 до 0,8 м.

Для определения подач вперед на промежуточных слоях несвязного грунта в числитель формулы (271) вместо критической толщины $h_к$ надо подставлять толщину h промежуточного слоя. Подсчеты показывают, что для стандартных черпаков подача вперед на этих слоях при упоре спинки черпака в откос осыпи и при заложениях откосов $m=2—3$ колеблется от 0,4 до 1,2 м и составляет примерно $^1/_2—^3/_4$ шага черпаковой цепи. Длину шлейфа в этом случае можно использовать для увеличения подачи вперед только в том случае, если работать с некоторым заглублением спинки черпака в откос осыпи.

При работе на толстых слоях несвязного грунта с подачей $l_с\leqslant 0{,}5\,s$ площадь стружки можно определить по формуле

$$F_с=l_с h_{сн}=l_с(h+h_s) \qquad (273)$$

и объем стружки — соответственно по формуле

$$w_с=F_с b_с=l_с(h+h_s)b_с. \qquad (274)$$

При работе папильонированием на толстых слоях связного грунта (рис. 152) подачу вперед ограничивают величиной радиального вылета черпака $a_р$, т. е. $l_с=a_р$. Это необходимо для того,

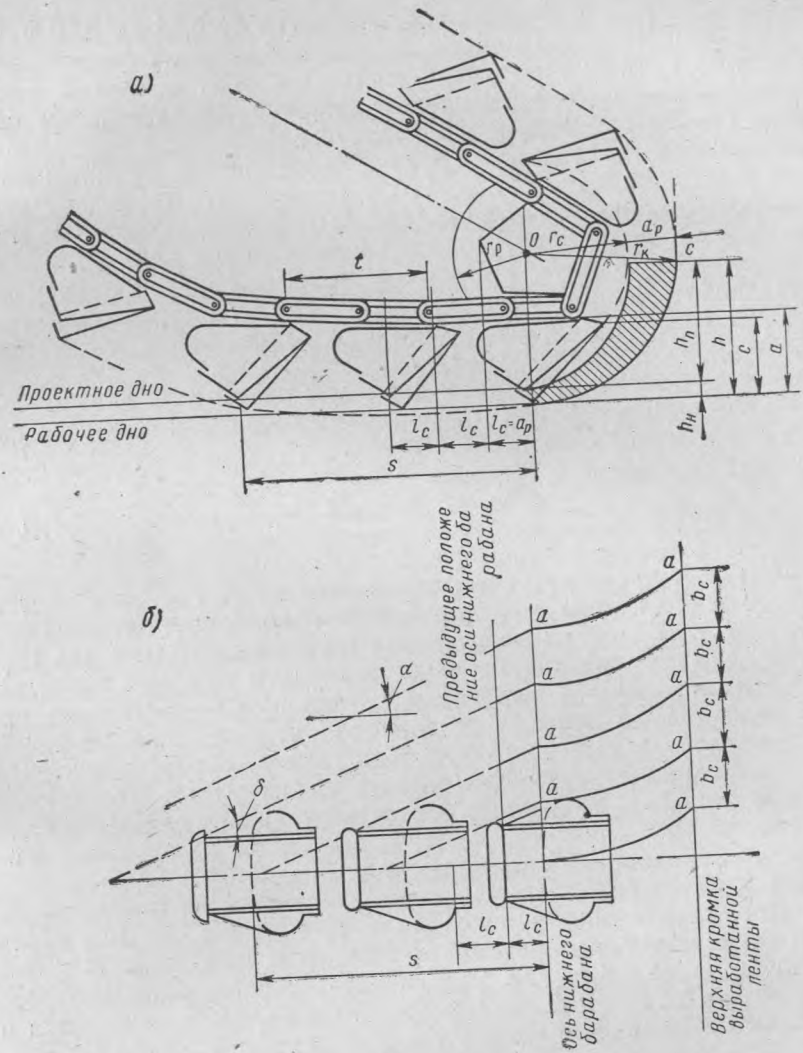


Рис. 152. Схема забора черпаками толстых слоев связного грунта:
а — боковой вид; *б* — план

чтобы нижний барабан не попадал в грунт и не препятствовал перемещению снаряда поперек прорези. Под радиальным вылетом черпака на нижнем барабане понимают разность между радиусом козырька $r_к$ и радиусом спинки $r_с$, если радиус реборд барабана $r_р$ меньше радиуса спинки $r_с$. При $r_р > r_с$ будем считать $a_р = r_к - r_р$.

Величина радиального вылета $a_р$, а следовательно, и подача вперед $l_с$ при работе на толстых связных слоях грунта колеблются

для стандартных черпаков приблизительно от 0,25 до 0,50 м, т. е. по величине несколько меньше величины подачи на толстых слоях несвязного грунта. При таких малых подачах основная работа по срезыванию грунта выполняется черпаками на нижнем барабане, и там же они заполняются грунтом.

В связных грунтах при проходе черпаков по папильонажной ленте с толщиной слоя $h > 1{,}5\,r_к$ у поверхности грунта остаются нависающие клинья грунта значительных размеров, которые могут обвалиться в черпаки до ухода последних из-под клиньев и повредить черпаковую цепь. Поэтому в связных грунтах не рекомендуется работать при толщине слоя $h > 1{,}5\,r_к$; при наличии такой толщины следует работать в два или более слоев, из которых каждый будет толщиной $h \leqslant 1{,}5\,r_к$.

Объем стружки, снимаемой черпаком на толстых связных слоях, можно вычислить, как и для тонких несвязных слоев, по формуле, аналогичной (264), но при $\varphi = 1$:

$$w_c = F_c b_c = l_c h b_c. \qquad (275)$$

На толстых и промежуточных слоях несвязного грунта и толстых слоях связного грунта при длинных шлейфах работают с подачами $l_c \leqslant 0{,}5\,s$. В этом случае черпаки шлейфа несколько раз пересекают одну и ту же папильонажную ленту и снимают значительную часть неровностей выработки, оставшихся после первого прохода черпаков по ленте. Одновременно черпаки шлейфа подбирают и значительную часть просоров грунта, образовавшихся во время наполнения черпаков (если грунт не унесло течением за пределы шлейфа). Указанные обстоятельства позволяют на таких слоях и при таком шлейфе работать без запаса на неровность выработки или назначать минимальную его величину.

Для лучшего наполнения черпака при работе на толстых слоях несвязного грунта ширину стружки b_c при подаче $l_c \leqslant 0{,}5\,s$ можно не ограничивать неровностями выработки и просорами и назначать даже более $0{,}6\,b$, т. е. увеличивать скорость папильонирования до $v_п = 0{,}6\,b n_ч$ и более. Для лучшего наполнения черпака на толстых слоях связного грунта и таком же соотношении подачи и длины шлейфа ширину стружки b_c можно назначать только из условия отсутствия мятия грунта около $0{,}6\,b$, т. е. тоже не ограничивать неровностью выработки. При такой ширине стружки оставшиеся после первого прохода черпаков по ленте косые гребни грунта, а также и просоры будут сняты при следующих папильонажных ходах задними черпаками шлейфа, и, следовательно, обеспечится необходимая чистота прорези.

При работе снарядов на осыпающихся грунтах всякие неровности выработки и просоры (особенно расположенные поперек течения) частично разравниваются и уносятся течением на разработанную часть прорези ниже снаряда, что и следует иметь в виду при назначении запаса $h_н$. Величину запаса на неровность выра-

ботки на различных грунтах и для снарядов разной производительности назначают в зависимости от отношения величины подачи к длине шлейфа в пределах от 0,05 до 0,30 м.

§ 62. ПОДЪЕМ ГРУНТА ЧЕРПАКАМИ НА ВЕРХНИЙ БАРАБАН И ИХ ОПОРОЖНЕНИЕ

На пути движения черпака от выхода его из грунта до обратного возвращения в грунт различают следующие характерные моменты: 1) выход черпака из грунта при вращении его вместе с нижним барабаном; 2) вращение черпака с нижним барабаном в воде от поверхности грунта до перехода на раму и подъем черпака по раме от барабана до уровня воды; 3) подъем черпака по раме от уровня воды до верхнего барабана; 4) вращение черпака вместе с верхним барабаном и его опорожнение; 5) движение черпака в провисающей бухте от верхнего барабана до грунтозабора. При этом подъем несвязных, главным образом песчаных, грунтов значительно отличается от подъема связных, в основном глинистых грунтов.

При выходе из грунта плоскость зева черпака может быть наклонена к горизонту под углом 45° и более, причем этот угол наклона зависит от возвышения точки выхода черпака из грунта (см. точку *C* на рис. 147 и точку *15* на рис. 150) над рабочим дном. Возвышение же точки выхода черпака из грунта над рабочим дном прорези зависит при работе на тонких несвязных и на толстых и тонких связных слоях только от толщины слоя (см. рис. 147 и 152), при работе на толстых несвязных слоях — только от пологости откоса осыпи (см. рис. 150). На рис. 153 графически изображена плоскость зева черпака в момент выхода из связного грунта при разной толщине снимаемого слоя.

В связи с большим отклонением плоскости зева черпака от горизонтального положения в момент выхода его из грунта часть забранного несвязного грунта может вывалиться через козырек на лежащую впереди неразработанную ленту (на тонких слоях) и реже на откос осыпи (на толстых слоях). Отношение объема грунта в черпаке w_i, оставшегося после выхода его из тонкого слоя несвязного грунта, к полной геометрической емкости черпака w называется коэффициентом наполнения черпака K_c по толщине снимаемого слоя.

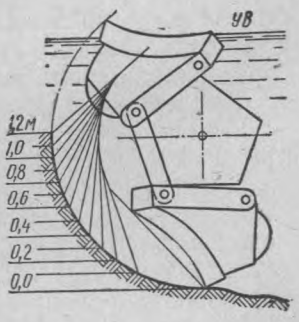


Рис. 153. Схема изменения угла наклона зева к горизонту при выходе черпака из разных толщин связного грунта

Несвязный грунт, вываливающийся из черпака, вместе с грунтом призмы волочения из шлейфа образуют впереди черпака валик. Последний приподнимает точку выхода черпака из грунта и тем самым ограничивает дальнейшее вываливание грунта. Наблюдения над забором грунта черпака-

ми показывают, что этот валик после прохода черпаков может осыпаться и уноситься течением на разработанную часть прорези. Поэтому при рассмотрении забора несвязного грунта черпаками он не учитывался.

При работе на малых глубинах черпания момент выхода черпака из воды обычно совпадает с моментом его перехода на раму, а на больших глубинах черпак, перейдя с барабана на раму, движется некоторое время по ней, пока не дойдет до уровня воды. Во время вращения черпака с нижним барабаном от поверхности грунта до перехода на раму плоскость его зева постепенно разворачивается, пока не примет то положение, при котором черпак поднимается по раме. При вращении черпака с барабаном тоже может происходить вываливание части несвязного грунта из черпака и вымыв его течением. Правда, время, в течение которого происходит это вращение, сравнительно мало, что и ограничивает упомянутые потери грунта.

При работе на грунтах, которые при подъеме их в черпаках по раме могут сливаться через спинку или козырек, различают полную геометрическую емкость черпака w, соответствующую оптимальной глубине черпания или опускания рамы, и используемые геометрические емкости $w_н$, соответствующие другим глубинам опускания рамы. При оптимальной глубине черпания плоскость зева черпака на раме занимает горизонтальное положение и на верхний барабан можно поднять объем даже сливающегося грунта, равный полной геометрической емкости w.

При глубине черпания больше оптимальной плоскость зева черпака на раме наклонена к горизонту, причем козырек находится ниже спинки. В этом случае при подъеме по раме грунт может сливаться через козырек, пока не займет горизонтальное положение вровень с козырьком.

При глубинах черпания меньше оптимальной плоскость зева черпака на раме тоже наклонена к горизонту, но спинка находится уже ниже козырька (см. рис. 147 и 150). Тогда при подъеме по раме сливающегося грунта последний из черпака может сливаться через спинку, пока не займет горизонтальное положение вровень со спинкой.

Используемой геометрической емкостью $w_н$ черпака на раме при неоптимальной глубине черпания и называется емкость, находящаяся ниже горизонтальной плоскости, проведенной через наинизшую точку зева черпака, козырек или спинку. На рис. 154 показана кривая изменения емкости черпака $w_н$ в зависимости от глубины черпания $H_ч$ или от угла наклона рамы к горизонту $\alpha^0_р$ для черпака неравного наполнения. Отношение используемой емкости черпака $w_н$ при данной глубине черпания или опускания рамы $H_ч$ к полной геометрической емкости черпака w называется коэффициентом наполнения черпака K_0 по глубине опускания рамы.

Опыт работы многочерпаковых снарядов на тонких песча-

ных слоях показывает, что, несмотря на достаточный объем стружки, при выходе черпака из воды в нем не всегда полностью заполнена грунтом даже используемая емкость $w_н$ и тогда при движении черпака к верхнему барабану грунт не сливается. При этом в момент выхода черпака из воды верхняя часть его используемой емкости занята водой.

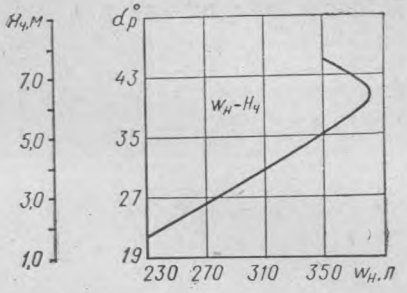


Рис. 154. Кривая зависимости $w_н = w_н(\alpha_р)$ или $w_н = w_н(H_ч)$

Однако при работе на толстых песчаных слоях и достаточном объеме стружки черпак при выходе из воды может быть заполнен грунтом больше используемой емкости; тогда при движении черпака к верхнему барабану из него будет сливаться грунт.

Таким образом, при работе многочерпаковых снарядов на несвязном грунте коэффициент наполнения черпаков $K_н$, равный отношению объема грунта в черпаке к его полной геометрической емкости, зависит от толщины снимаемого слоя и глубины опускания рамы, или глубины черпания. Для обеспечения на несвязных грунтах наполнения черпака, равного произведению $K_н w$, объем снимаемой стружки $w_с$ назначают несколько больше упомянутого наполнения черпака ($w_с > K_н w$).

Поднимаемые черпаками связные грунты или не вываливаются совсем или вываливаются значительно меньше несвязных при выходе черпаков даже из тонкого слоя и при движении их до уровня воды и до верхнего барабана. Поднимать же эти грунты в черпаках по раме можно в объеме, равном или даже превышающем полную геометрическую емкость (с «шапкой»), так как этот объем мало зависит от угла наклона зева черпака к горизонту.

Коэффициент наполнения $K_н$ черпаков связаным грунтом зависит главным образом от качества самого грунта и объема снимаемой стружки.

При работе на связных грунтах объем стружки $w_с$ надо назначать равным геометрической емкости черпака w (но с учетом разрыхленности грунта в черпаке) или несколько больше этой емкости, если грунт поднимается на верхний барабан с «шапкой».

Черпак с грунтом и водой после выхода из воды движется далее по раме и подходит к верхнему барабану, затем вращается вместе с барабном и при этом освобождается от грунта, который вываливается в грунтоприемный колодец.

Несвязные грунты сравнительно хорошо вываливаются из черпаков на верхнем барабане не только при нормальной скорости движения черпаковой цепи (16—18 черпаков в минуту), но даже и при ее увеличении. Связные грунты, особенно липкие глины, с трудом и не полностью вываливаются из черпаков на верхнем барабане даже при скорости движения цепи ниже нормальной.

В последнем случае для улучшения опорожнения черпаков на верхнем барабане приходится (на снарядах без специальных приспособлений) снижать скорость движения цепи, чтобы увеличить время нахождения черпака над колодцем, или уменьшать наполнение черпаков, а это снижает производительность снарядов.

§ 63. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МНОГОЧЕРПАКОВЫХ СНАРЯДОВ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ РАБОТОЙ

Правильно поставленный процесс черпания должен обеспечить при минимальном переуглублении не только проектную глубину на прорези, но и наибольшую в данных условиях производительность, т. е. выполнение работ в кратчайший срок. Поэтому в дальнейшем рассмотрим те условия, которые могут обеспечить такую производительность снаряда.

Часовая производительность снаряда в грунтозаборе на несвязных и связных грунтах с ненарушенной структурой определяется по формуле

$$Q_з = \varphi(h+h_s)b_п l_п = \varphi(h+h_s)l_с v_п 60, \qquad (276)$$

где $l_п$ и $b_п$ — длина и ширина разработанной прорези.

Остальные обозначения в формуле уже известны, но их численные значения надо брать средними за час работы. Порядок установления величин φ, $l_с$, h_s, $v_п$ с учетом обеспечения минимума переуглубления и проектной глубины уже изложен при рассмотрении процесса грунтозабора.

При переменной толщине снимаемого слоя по папильонажной ленте для обеспечения постоянного наполнения черпаков и постоянной производительности соответственно изменяют скорость папильонирования и ширину стружки. Если толщина слоя уменьшается вдоль ленты, то подачу вперед назначают по наибольшей толщине слоя и наибольшую возможную, чтобы начать работу на толстом слое с малой скоростью папильонирования и иметь резерв увеличения скорости папильонирования при проходе тонких слоев. При увеличении толщины слоя вдоль ленты подачу назначают также, чтобы начать работу на тонком слое с большой скоростью $v_п$ и закончить на толстом слое с малой скоростью $v_п$.

При значительной разнице в толщине снимаемого слоя по длине лент прорезь по ширине можно разделить на секции со сравнительно мало меняющимися толщинами снимаемого слоя. В этом случае в секциях с тонкими слоями следует работать на больших подачах вперед, а в секциях с толстыми слоями — на малых.

Часовую производительность снаряда в грунтоподъеме на несвязных и связных грунтах можно определить по формуле

$$Q_п = \frac{1}{k} K_н w K_ч = \frac{1}{k} K_н w n_ч 60, \qquad (277)$$

где k — коэффициент разрыхления грунта в черпаках;
$K_н$ — коэффициент наполнения черпаков;
w — полная геометрическая емкость черпаков;
$K_ч$ — суммарное число черпаков, проходящих за час;
$n_ч$ — число черпаков, проходящих в минуту.

Численные значения k, $K_н$ и $n_ч$ должны быть взяты средние за час работы.

Коэффициентом разрыхления k называется отношение объема грунта в разрыхленном состоянии (в черпаке) к объему того же грунта при ненарушенной структуре (в грунтозаборе). Величина этого коэффициента для разных грунтов и при разной степени их разрыхления колеблется от 1 до 1,25 и более.

Если бы весь объем грунта, снятый черпаками при грунтозаборе, доходил до верхнего барабана и там опоражнивался, имело бы место равенство $Q_з = Q_п$. В действительности такое равенство может быть только при достаточно толстых слоях и отсутствии вымыва грунта течением из черпаков, т. е. главным образом на связных грунтах. На тонких слоях и при наличии вымыва грунта из черпаков течением, т. е. главным образом на несвязных грунтах, не весь грунт, взятый черпаком в грунтозаборе, доходит до верхнего барабана: часть его вываливается из черпаков, т. е. идет в просор. Следовательно, в этом случае между грунтозабором и грунтоподъемом имеет место зависимость $Q_з \geqslant Q_п$.

Таким образом, установление процесса извлечения грунта надо начинать с назначения элементов грунтоподъема, обеспечивающих расчетную производительность, главным образом числа черпаков $n_ч$, проходящих в минуту, и коэффициента наполнения, расчетную величину которого обозначим через $K_р$ в отличие от его фактической величины $K_н$. Затем необходимо назначить соответствующие элементы грунтозабора, главным образом подачу вперед $l_с$ и скорость папильонирования $v_п$. При этом должна быть исключена по возможности работа снаряда при соотношении $Q_з < Q_п$.

При работе на несвязных грунтах число черпаков, проходящих в минуту, назначают нормальное, т. е. соответствующее нормальному числу оборотов двигателя, или несколько (на 15—20%) повышенное, если это позволяет черпаковый двигатель. При работе на связных грунтах число черпаков, проходящих в минуту, зависит не только от числа оборотов двигателя, но и от времени, необходимого для освобождения от грунта черпака на верхнем барабане, и от сопротивления грунта резанию. Поэтому на связных грунтах приходится в ряде случаев назначать число черпаков и ниже нормального.

Назначая величину подачи вперед и скорости папильонирования, а следовательно, и ширину стружки, необходимо учитывать не только объем грунта, снимаемый черпаком, проектную глубину и минимальное переуглубление, но и скоростной режим лебедок, так как на некоторых снарядах они ограничивают скорость папильонирования.

На практике фактическую часовую производительность сна-

ряда определяют по промерам глубин со снаряда до и после работы и по количеству наполненных снарядом (за час) грунтоотвозных шаланд и объему грунта в них. Если бы просор грунта из черпаков полностью попадал на разработанную часть прорези в пределах снаряда и если бы разработанная часть прорези не размывалась течением, то производительность, вычисленная по промерам, равнялась бы производительности по грунтоподъему. В действительности же при работе снаряда в реке производительность по промерам обычно больше производительности по грунтоподъему, так как прорезь размывается течением и часть просора из черпаков уносится течением ниже снаряда. Таким образом, величина производительности по промерам зависит не только от работы снаряда, но и от работы потока.

Для получения наибольшей производительности многочерпакового снаряда и наиболее ровного дна прорези необходимо правильно назначать режим работы: подачу вперед, скорость папильонирования и скорость движения черпаковой цепи, или число черпаков, проходящих в минуту. Для определения этого режима, а также для установления коэффициента использования технической производительности при выдаче нарядов-заданий составляют технологические таблицы или графики.

В технологических таблицах для работы многочерпаковых снарядов, как и для работы землесосов прежде всего устанавливают расчетную производительность, а затем назначают такой режим грунтозабора и грунтоподъема, который может обеспечить эту производительность. Примерный состав технологической таблицы для работы шаландового снаряда приводится здесь.

Технологическая табл. 7 составлена для работы многочерпакового шаландового снаряда технической производительностью 100 м³/ч на песчаном грунте при $K_г = 1{,}0$; емкости черпака $w = 0{,}168$ м³; числе черпаков, проходящих в минуту, $n_ч = 14—18$.

Коэффициент $K_г$ в этой таблице учитывает влияние грунта на использование технической производительности (см. § 46).

В технологических таблицах за глубину опускания рамы, или глубину черпания $H_ч$, принимается погружение ниже уровня воды режущей кромки черпака, только что вошедшего на нижний барабан, а за толщину снимаемого слоя $h_{сн}$ — проектная толщина слоя плюс запас на неровность выработки дна прорези. За расчетный по условиям наполнения черпаков коэффициент использования технической производительности $K'_р$ здесь принимается меньший из коэффициентов $K_с$ и K_0.

Для глинистых грунтов в пластичном, полутвердом и твердом состояниях, а также для гравелистых и галечных грунтов коэффициент K_0 не учитывается, так как переливание грунта через спинку или козырек черпака практически имеет место лишь при легко сливаемых грунтах. Для сыпучих и текучих глинистых грунтов коэффициент K_0 учитывается при установлении значения коэффициента $K'_р$, но в том случае, если по величине он меньше ко-

Таблица 7

Глубина черпания $H_ч$ / длина шлейфа, s, м	Толщина снимаемого слоя грунта с неровностью выработки $h_{сн}$, м	Коэффициент использования технической производительности			Расчетная производительность $Q_р$, м³/ч	Площадь папильонажной ленты F, м²	Режим работы	
		по толщине слоя $K_с$	по глубине опускания рамы K_0	расчетный по условиям наполнения черпаков $K'_р$			Подача вперед по становому тросу $l_{с.т}$, м	Скорость папильонирования $v_п$, м/мин
1,5 / 3,0	0,2	0,68	0,75	0,68	68	0,30	1,5	3,8
	0,3	1,0	0,75	0,75	75	0,30	1,0	4,4
	0,4	1,0	0,75	0,75	75	0,40	1,0	3,1
	0,6	1,0	0,75	0,75	75	0,48	0,8	2,6
	0,8	1,0	0,75	0,75	75	0,64	0,8	1,9
	1,0	1,0	0,75	0,75	75	0,70	0,7	1,6
2,0 / 2,1	0,2	0,68	0,78	0,68	68	0,24	1,2	4,6
	0,3	1,0	0,78	0,78	78	0,24	0,8	5,3
	0,4	1,0	0,78	0,78	78	0,32	0,8	3,9
	0,6	1,0	0,78	0,78	78	0,48	0,8	2,7
	0,8	1,0	0,78	0,78	78	0,64	0,8	1,9
	1,0	1,0	0,78	0,78	78	0,70	0,7	1,7
3,0 / 1,4	0,2	0,68	1,0	0,68	68	0,18	0,9	6,3
	0,3	1,0	1,0	1,0	100	0,18	0,6	10,0
	0,4	1,0	1,0	1,0	100	0,24	0,6	7,8
	0,6	1,0	1,0	1,0	100	0,48	0,8	3,5
	0,8	1,0	1,0	1,0	100	0,64	0,8	2,5
	1,0	1,0	1,0	1,0	100	0,70	0,7	2,2

эффициента $K_с$. Величина коэффициента K_0 устанавливается для разных снарядов управлениями пути на основе натурных измерений используемой емкости черпаков при разных глубинах опускания рамы.

Толщина $h_{сн}$ снимаемого слоя при работе на глинистых грунтах в пластичном и твердом состояниях оказывает меньшее влияние на производительность многочерпакового снаряда, чем при работе на песчаных и текучих глинистых грунтах.

Значения коэффициента $K_с$ возрастают до 1 при увеличении отношения толщины $h_{сн}$ снимаемого слоя к вылету a черпака до 0,5, т. е. при $h_{сн} : a \geqslant 0{,}5$ этот коэффициент уже не оказывает влияния на производительность. При установлении расчетного по наполнению черпаков коэффициента $K'_р$ коэффициент $K_с$ учитывается только в том случае, если он меньше коэффициента K_0.

Расчетную производительность шаландового снаряда $Q_р$ получают умножением технической производительности $Q_т$ на расчетный коэффициент ее использования $K_р$, за который принимают меньший из коэффициентов $K_г$ и $K'_р$. Потребную для обеспечения расчетной производительности площадь папильонирования F

можно определить делением производительности по грунтозабору $Q_з$ на принимаемую скорость папильонирования $v_п$, при этом производительность по грунтозабору следует назначать (в большинстве случаев) несколько больше расчетной.

По технологической таблице в соответствии с грунтовыми условиями, глубиной черпания и толщиной снимаемого слоя грунта вахтенный начальник назначает режим работы снаряда по грунтозабору и грунтоподъему. Затем этот режим он корректирует в соответствии с фактическими условиями работы, наблюдая за наполнением выходящего из воды черпака и за числом черпаков, проходящих в минуту. При уменьшении наполнения черпаков вахтенный начальник увеличивает скорость папильонирования, а если уменьшается число черпаков, проходящих в минуту, принимает меры для поддержания наибольшего в данных условиях числа черпаков.

Вахтенный начальник следит также за промерами глубины до работы снаряда (на неразработанной части прорези) и после его работы (на разработанной части прорези). Промеры до работы снаряда необходимо вести с промерного мостика в поперечниках, расположенных через 10 м по длине прорези, и на поперечниках в точках через 2—5 м по их длине, или эхолотом. Глубина после работы измеряется с бортов снаряда за пределами грунтоприемного колодца и с кормы снаряда на разработанной прорези; в зависимости от результатов этих измерений рама поднимается или опускается.

В процессе папильонирования по ширине прорези снаряд подходит попеременно то к левой, то к правой кромке прорези. Когда снаряд приходит на кромку прорези, вахтенный начальник прежде всего проверяет, находится ли снаряд в створе со створными знаками, ограничивающими ширину прорези; затем прекращает папильонирование, делает подачу снарядом вперед и начинает папильонирование к другой кромке прорези. Вахтенный начальник, кроме того, постоянно следит за работой шаланд и за лотками.

Если во время папильонирования снаряда встретится камень, необходимо, осторожно работая около него со сниженной скоростью черпаковой цепи, попытаться забрать его в черпак и вытащить на палубу. Для больших камней, которые не удается поднять, роют яму такой глубины, чтобы камень оказался в ней ниже проектного дна (раму в таких случаях приходится опускать более глубоко).

Общая мощность N, развиваемая черпаковым двигателем во время работы снаряда, расходуется: а) на механические потери, возникающие в самом двигателе, передаточных механизмах и соединениях черпаковой цепи, а также при вращении черпаковых барабанов и роульсов ($N_м$); б) на отделение грунта от его массива (на резание грунта) и на преодоление сопротивлений при наполнении черпаков грунтом ($N_{р.н}$); в) на подъем грунта в черпаках по черпаковой раме до

верхнего барабана ($N_{п.г}$) и г) на подъем воды, занимающей в черпаках объем, не заполненный грунтом ($N_{п.в}$).

Общую величину мощности, затрачиваемой при работе многочерпакового снаряда, можно найти по формуле

$$N = N_м + N_{р.н} + N_{п.г} + N_{п.в}. \qquad (278)$$

В условиях эксплуатации снарядов общую мощность N определяют измерениями в натуре при работе на разных грунтах и на различной глубине черпания.

Для определения мощности $N_м$, расходуемой на механические потери, измеряют мощность двигателя при работе на воде $N_в$ и вычитают из нее мощность, расходуемую на подъем воды в черпаках, для чего пользуются формулой

$$N_м = N_в - N_{п.в} = N_в - \frac{w_н H_ц \gamma_0 n_ч}{60 \cdot 75}, \qquad (279)$$

где $w_н$ — используемая емкость черпака при данной глубине черпания $H_ч$;

$H_ц$ — возвышение центра тяжести черпака на верхнем барабане над уровнем воды;

γ_0 — объемный вес воды, 1000 кгс/м³.

Для определения мощности $N_{р.н}$, расходуемой на резание грунта и наполнение им черпаков, измеряют в натуре при работе на грунте общую мощность двигателя N и вычитают из нее мощность, расходуемую на подъем грунта, и мощность $N_м$, расходуемую на механические потери.

Мощность, расходуемая на подъем грунта в черпаках

$$N_{п.г} = \frac{Q_п[(\gamma_г - \gamma_0)H_ч + \gamma_г H_ц]}{3600 \cdot 75}, \qquad (280)$$

где $Q_п$ — часовая производительность снаряда в грунтоподъеме, м³/ч;

$\gamma_г$ — объемный вес грунта, кгс/м³;

$H_ч$ — глубина черпания, м.

По найденной мощности $N_{р.н}$ можно вычислить усилие, затрачиваемое на резание грунта. При этом следует учесть, что, по некоторым исследованиям, на резание грунта расходуется около 0,8 мощности $N_{р.н}$, а на заполнение им черпаков — около 0,2 $N_{р.н}$. Надо также учесть, что в резании грунта принимают участие черпаки в шлейфе и черпак на нижнем барабане, имеющие разные скорости движения.

Тогда удельные усилия резания $p_у$, приходящиеся на одну погонную единицу режущей кромки черпака,

$$p_у = \frac{75 \cdot 60 \cdot 0{,}8 N_{р.н}}{b_р n_ч t \left(n_ш + \frac{r_к}{r_б}\right)}, \qquad (281)$$

где $b_р$ — длина режущей части козырька черпака;
$n_ш$ — число черпаков, срезающих грунт в шлейфе;
$r_к$ — радиус козырька черпака на нижнем барабане;
$r_б$ — радиус окружности, вписанной в многоугольник нижнего барабана.

Зная удельные усилия резания для разных грунтов, можно при недостаточной общей мощности N, развиваемой двигателем, уменьшать мощность $N_{р.н}$, которая расходуется на резание грунта, для чего надо соответственно уменьшать величины $b_р$, $n_ч$ или $n_ш$.

В. Н. Песочинский, используя зависимость общей мощности N, развиваемой черпаковым двигателем, от получаемой производительности Q, с одной стороны, и зависимость производительности по грунтоподъему и грунтозабору от определяющих ее параметров — с другой, разработал способ и технологические графики для определения эффективных режимов работы многочерпаковых снарядов.

В этом способе под эффективным понимается такой режим работы, при котором, исходя из условий наиболее полного использования мощности двигателя снаряда, достигается наиболее высокая производительность при наименьшей затрате мощности на единицу извлеченного грунта.

При разработке этого способа большое внимание уделено влиянию на затрачиваемую мощность: объемного веса разных грунтов; плотности несвязных и консистенций связных грунтов; сопротивления резанию различных грунтов; механических потерь у снарядов с различными передачами и разным весом черпаковой цепи.

Способ определения наиболее высокой производительности при наименьшей удельной затрате мощности разработан применительно к морским условиям дноуглубления, где разнообразие грунтов по весу, плотности или консистенции и сопротивлению резания, а также снарядов по типу передач и весу черпаковых цепей требует определения для каждого снаряда и на каждом грунте разного режима работы. В дноуглублении на реках и водохранилищах этот способ пока не нашел применения, главным образом из-за недостатка численных характеристик грунтов и трудоемкости расчетов, но, используя его, необходимо разработать сравнительно простой способ определения таких режимов работы многочерпаковых снарядов, при которых достигается наиболее высокая производительность с наименьшими затратами на единицу извлеченного грунта.

Некоторые снаряды оборудованы системой автоматики грунтозабора, которая регулирует частоту вращения боковых лебедок и этим поддерживает постоянный крутящий момент на валу привода черпаковой цепи. При увеличении нагрузки на привод выше заданной система уменьшает частоту вращения барабана выбирающей лебедки, при уменьшении нагрузки — наоборот.

§ 64. УДАЛЕНИЕ ГРУНТА ШАЛАНДАМИ

При работе многочерпакового шаландового снаряда грунт удаляют при помощи несамоходных шаланд, толкаемых теплоходами-шаландерами к месту отвала, и самоходных. Производительность отдельных шаландовых снарядов колеблется преимущественно от 100 до 500 м³/ч. Шаландовые снаряды работают на участках рек со сравнительно тяжелыми грунтами и на внетранзитных работах. Удалять грунт шаландами можно как в воду, так и на берег. В последнем случае применяют шаландоразгружатели.

Преимущество шаландового удаления грунта — возможность удалять любой грунт и на любое расстояние от места работ, недостаток — невозможность использования для отвала грунта мелких мест, а также потребность в специальном флоте (шаланды, теплоходы-шаландеры), вследствие чего стоимость удаления грунта шаландами значительно выше чем рефулированием.

Для погрузки грунта в несамоходную шаланду последнюю с закрытыми люками и туго набитыми тросами подводят шаландером к снаряду, затем учаливают к борту снаряда, после чего пускают в ход черпаковый двигатель. Самоходная шаланда подходит к снаряду своим ходом и швартуется.

Для успешной работы снаряда подвижную часть грунтоотводного лотка опускают над шаландой возможно ниже, чтобы угол наклона его к горизонту был как можно больше,— тогда грунт, попадающий из грунтоприемника снаряда на лоток, перемещается в шаланду без задержек. По мере загрузки шаланды грунтом и увеличения ее осадки подвижную часть лотка опускают еще ниже, до возможного предела. Если грунт, несмотря на предельное опускание лотка, задерживается в нем, то с помощью насоса лоток промывают водой. Обычно во время погрузки шаланда выходит за пределы корпуса снаряда. Во избежание трения боковых тросов снаряда о днище шаланды на новых снарядах имеются специальные устройства для их пропуска под днищем.

При погрузке шаланд большое внимание обращают на полноту их загружения. Загрузку шаланды начинают с кормы (нижней части грузового люка) и по мере заполнения ее спускают вниз по течению; если работа ведется в стоячей воде, шаланду переводят вдоль борта без остановки снаряда.

Когда работают на каменистых грунтах, а также при широкой шаланде или недостаточной длине лотка для равномерной загрузки шаланды приходится ее развертывать (кантовать). Для этого несамоходную шаланду по заполнении грузовых люков подтягивают к носу снаряда, затем отталкивают ее носовую часть от снаряда, после чего шаланда развертывается силой течения. Затем шаланду подтягивают вдоль борта так, чтобы нижние по течению люки стали под грузовой лоток, и ведут погрузку обычным способом. Развертывание шаланд производится при приподнятом положении лотка. Если течение отсутствует или оно слабое,

развертывание несамоходных шаланд производят при помощи лебедок или шпилей снаряда.

При погрузке каменистых грунтов стенки грузовых люков шаланд и тросы предохраняют от ударов камней. Тросы заключают в кожухи, стенки люков защищают деревянными или железными щитами, а на конец грунтового лотка подвешивают качающийся щит, воспринимающий удары крупных камней. Когда работают на илистых и мелкопесчаных грунтах, обеспечивают плотность люковых створок тщательной выверкой талрепов и прокладкой в пазы специальных уплотнений.

Вместе с грунтом из черпаков в шаланду попадает некоторое количество воды, которое резко возрастает, если для улучшения перемещения грунта по лотку в грунтовый колодец подают воду насосом; при наполнении шаланды грунтом вода сливается за борт через комингсы. При грунтах, плохо выпадающих из смеси (илистые, мелкопесчаные), часть их вместе с водой уходит за борт, что ухудшает чистоту разработки прорези. Это обстоятельство учитывают при назначении глубины черпания и при наполнении шаланд.

Как правило, погрузку шаланд ведут поочередно с обоих бортов снаряда и смену шаланд осуществляют без прекращения работы снаряда. Для этого механизируется перекладка клапана грунтового колодца (чтобы его можно было перекладывать во время поступления грунта в колодец).

При погрузке шаланд с одного борта снаряда сначала отводят груженую шаланду от снаряда, а затем подводят к нему порожнюю. В этом случае требуется остановка снаряда и поэтому смену шаланды выполняют с наименьшей потерей времени. Погрузку шаланд с одного борта приходится вести при недостаточных глубинах у другого борта снаряда и при работе в стесненных акваториях.

В настоящее время разрабатываются и внедряются полуавтоматические и автоматические устройства для швартовки и перемещения шаланд вдоль борта снаряда. В качестве примера рассмотрим автошвартовное устройство Горьковского ЦКБ, схематически изображенное на рис. 155.

На каждом борту снаряда имеются следующие основные узлы этого устройства: штанга-ловитель *1* (рис. 155, *а*) для первоначальной связи шаланды со снарядом и фиксирования ее положения при сцеплении с замками снаряда; два замка *5* (типа замков-автосцепов, применяемых при толкании судов) для сцепления шаланды со снарядом при швартовке, установленные на каретках и перемещающиеся по направляющим рельсам *4*, чтобы была возможность передвигать шаланду вдоль борта в процессе загрузки; швартовный электрошпиль *2* для перемещения кареток замков и вместе с ними шаланды в процессе заполнения ее грунтом; трос *3* и блок *6* электрошпиля; пульт управления электрошвартовным шпилем из рубки снаряда.

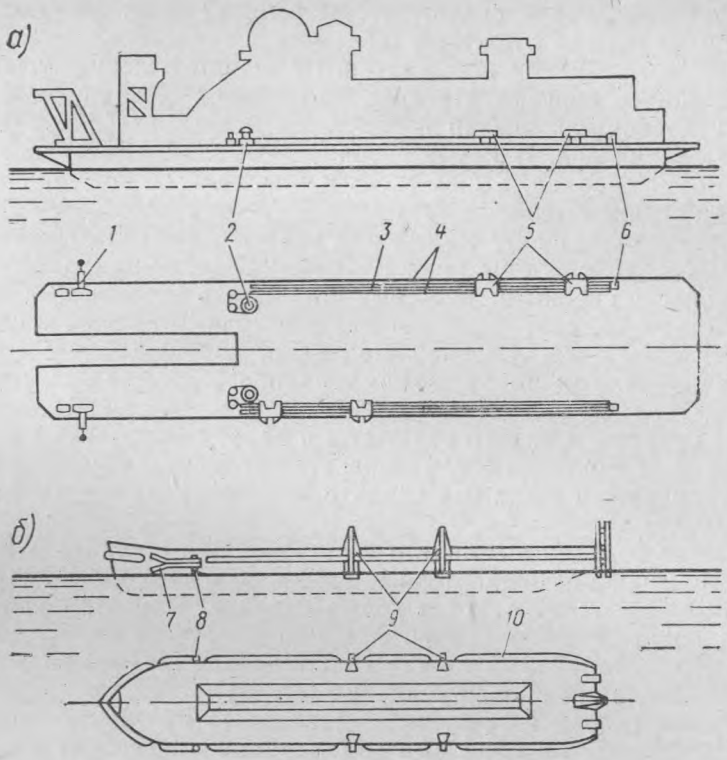


Рис. 155. Схема автошвартовного устройства на снаряде *(а)* и шаланде *(б)*

Кроме того, на палубе снаряда (на каждом борту) устанавливают: стойки с направляющими блоками и поддерживающими тросы роликами; панель для открытия замка (если эта операция выполняется дистанционно); талреп для выбирания слабины троса; тягу, соединяющую замки, и другие детали.

На каждом борту шаланды находятся основные узлы автошвартовного устройства: ловушка *7* (рис. 155, *б*) для захвата штанги-ловителя, состоящая из двух параллельно приваренных угольников, расширяющихся к носовой части шаланды (угольники образуют канал, захватывающий головку штанги); ограничитель-предохранитель *8* для освобождения штанги-ловителя при неудачном подходе шаланды (не удалось погасить инерцию); два вертикальных рельса *9* для сцепления шаланды с замками на снаряде; привальный брус *10* для защиты сцепных рельсов.

Работа автошвартовного устройства может быть разбита на несколько (1—6) операций.

1. Шаланда, толкаемая шаландером, подводится к борту снаряда под углом или параллельно борту. При подводе шаланды к

снаряду судоводитель следит, чтобы выступающая за борт снаряда штанга попала в ловушку шаланды.

2. После попадания конца штанги с шаром в ловушку шаланда и шаландер двигаются вперед по инерции. К концу этой операции судоводитель обязан погасить инерцию, реверсируя двигатель на задний ход. В конце операции нос шаланды будет поджат к борту снаряда, а шар штанги продвинется по каналу ловушки до ограничителя.

3. Судоводитель дает малый ход вперед и перекладывает руль с таким расчетом, чтобы поджать кромку шаланды к борту снаряда и попасть сцепными рельсами шаланды в автосцепные замки.

4. Шаландер, освободив автосцеп, отходит от этой шаланды для сцепления с загруженной шаландой, находящейся у другого борта снаряда. Пришвартованная шаланда начинает загружаться грунтом. По мере заполнения шаланду периодически перемещают к корме снаряда, для чего включают в работу швартовный шпиль. В конце хода шаланда останавливается конечным выключателем. При перемещении шаланды вдоль борта снаряда штанга-ловитель выходит из ловушки.

5. После подхода шаландера к загруженной шаланде и сцепки с ней открывают автошвартовные замки, для чего электрошпилем дополнительно смещают их к корме снаряда. При этом выталкиваются подпружинные клинья и замки открываются. Судоводитель отводит толкаемый состав от снаряда, стараясь не попасть ловушкой шаланды на выступающую штангу.

6. После отвода загруженной шаланды от борта снаряда шпиль включают на обратный ход и замки переводят для следующей сцепки в исходное положение, к шпилю, где они останавливаются конечным выключателем.

Описанное автошвартовное устройство без применения ручного труда и участия матросов обеспечивает: швартовку шаланды к борту снаряда, принудительное периодическое перемещение шаланды вдоль борта снаряда по мере ее загрузки, отход от борта снаряда шаланды после загрузки, приведение устройства в исходное положение для новой швартовки. В настоящее время ведутся работы по совершенствованию этого автошвартовного устройства. Самоходные шаланды швартуются к снаряду и отходят от него своим ходом.

При ближней отвозке грунта речной шаландовый снаряд обычно имеет две шаланды и, если они несамоходные, один шаландер, который поочередно толкает шаланды. Если же снаряд работает с тремя несамоходными шаландами и одним шаландером, целесообразно толкать по две шаланды. Тогда у шаландера часть времени будет свободной и его можно использовать для выполнения производственных операций. При отвозке грунта на большое расстояние следует иметь у снаряда несколько шаланд.

Глубина на месте отвала грунта должна быть не менее осадки груженой шаланды плюс запас под днищем, необходимый для отвала грунта. Если створки грунтовых люков в открытом со-

стоянии опускаются ниже днища шаланды, запас под днищем соответственно увеличивают.

Место отвала грунта заполняют по возможности равномерно по всей площади. Малоемкое место отвала заполняют начиная от наиболее удаленной границы, чтобы более полно использовать емкость. При открытии люков следят за тем, чтобы шаланды освобождались от грунта равномерно, с наименьшими перекосами в продольном и поперечном направлениях. После открытия створок люков и вываливания грунта немедленно очищают люки от остатков грунта. После полной очистки грунтовых люков их тросы туго набивают и створки плотно закрывают.

Если шаланды используют для берегового отвала грунта, для их разгрузки применяют шаландоразгружатели, главным образом рефулерные. Обычно разгружатель находится против такого отвала грунта и передвигается вдоль берега в небольших границах (при помощи своих лебедок) по мере заполнения участков берега грунтом. Шаланды, подвозящие грунт к перегружателю, имеют глухие двойные днища (без люков). При разгрузке шаланд рефулерным разгружателем одновременно с работой всасывающего приемника в шаланду подается вода насосом разгружателя для разжижения грунта.

Количество шаланд, требующихся для бесперебойной работы снаряда, при фактической производительности снаряда Q м³/ч и расчетной емкости шаланды q м³ определяется по формуле

$$n = \left(\frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + t_0\right)\frac{Q}{q} + n_c, \qquad (282)$$

где l_1 и l_2 — расстояния соответственно от снаряда до места отвала грунта и обратно (обычно $l_1 \cong l_2$);

v_1 и v_2 — скорости хода или толкания шаланд соответственно на место отвала грунта (груженых) и обратно (порожних);

t_0 — время опорожнения шаланд на месте отвала грунта;

q — расчетная емкость шаланд, получаемая делением их геометрической емкости на коэффициент рыхления грунта, равный 1,15—1,20;

n_c — количество шаланд в толкаемом составе.

Количество шаланд вычисляется по этой формуле приближенно, так как фактическая часовая производительность снаряда непостоянна, остановки снаряда не распределяются равномерно по длине прорези и в течение суток, а емкость различных шаланд, работающих при снаряде, может оказаться неодинаковой. По формуле (282) может быть решена и обратная задача — вычислена допустимая дальность отвозки грунта в различных производственных условиях при наличии определенного количества шаланд.

Для правильной организации дноуглубительных работ составляют график работы (рейсов) шаланд. При этом уточняют производительность снаряда по длине прорези в отдельные части суток и учитывают различные комбинации толкаемых составов с шаландами различной емкости. График работы шаланд состав-

ляют так, чтобы не было простоя дноуглубительного снаряда из-за отсутствия шаланд, а потребность в шаландах и шаландерах была бы минимальной.

В настоящее время несамоходные шаланды передвигаются от снаряда к месту отвала преимущественно шаландерами-толкачами. Сцеп толкача с шаландой для такого передвижения осуществляется при помощи специального сцепного устройства на носу толкача и корме шаланды, которое может быть ручным или автоматическим.

§ 65. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ГРУНТА ОДНОЧЕРПАКОВЫМИ СНАРЯДАМИ

Плавучие одночерпаковые снаряды (штанговые и грейферные), работающие на внутренних водных путях, по количеству и производительности составляют незначительную долю от всех дноуглубительных снарядов. Производительность отдельных штанговых снарядов доходит до 120 м³/ч, грейферных — до 50 м³/ч. Одночерпаковые снаряды в основном предназначены для работы на глинистых, галечных и каменистых грунтах, а также для скалоуборочных работ.

По способу установки на прорези одночерпаковые снаряды могут быть разделены на две группы. Снаряды первой группы устанавливают на закольных сваях и тросах с якорями (рис. 156), при этом сваи ограничивают подвижность снаряда. Снаряды второй группы — на тросах и якорях: одном становом и четырех боковых (для предотвращения крена эти снаряды иногда имеют сваи и специальные понтоны).

К первой группе относятся штанговые снаряды с ковшом на жесткой рукояти, ко второй — грейферные с ковшом на тросе. Как правило, для уменьшения горизонтального давления на закольные сваи от действия ковша при врезании его в грунт разработка прорези штанговыми снарядами производится по течению. Грейферные снаряды могут с одинаковым успехом работать как по течению, так и против течения, так как при заборе грунта их ковшом не возникает горизонтальных сил. Однако при работе грейферного снаряда против течения опусканию ковша препятствует становой трос, поэтому его отводят в сторону через выносные ролики на борту снаряда или через уравнительный понтон, после чего трос уже идет к якорю.

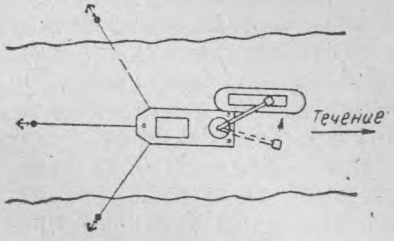


Рис. 156. Установка штангового снаряда на прорези по течению

Особенность установки штангового снаряда заключается в опускании свай, удерживающих снаряд на месте и обеспечивающих лучшее сопротивление отталкивающему действию ковша,

а также предохраняющих снаряд от дифферента. Сваи опускают под действием силы тяжести или принудительно. В первом случае сваи бросают с наивысшего положения, а затем поворачивают ковш при помощи поворотного круга то на один, то на другой борт, производя этим дополнительный нажим на сваи и заглубляя их в грунт на необходимую глубину. Принудительное погружение и подъем свай производятся с помощью зубчатой рейки и зубчатого колеса или тросов и блоков.

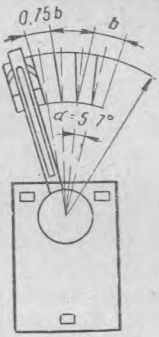


Рис. 157. Разработка прорези штанговым снарядом

Одночерпаковые снаряды в отличие от многочерпаковых являются снарядами периодического действия. Вследствие этого для достижения одинаковой производительности емкость ковшей одночерпаковых снарядов должна быть больше емкости черпаков многочерпаковых снарядов.

В цикл работы одночерпакового снаряда входят следующие основные операции: установка ковша над местом погружения в воду и опускание его на дно, забор грунта ковшом, подъем, поворот и опорожнение ковша.

Ввиду большого количества малых операций важным фактором повышения производительности снаряда является жесткая экономия времени — сокращение длительности отдельных операций и частичное одновременное их выполнение. Число циклов работы снаряда в зависимости от его мощности и опыта вахтенного начальника колеблется примерно от 40 до 100 в час.

Для достижения наибольшей эффективности работы одночерпакового снаряда необходимо обеспечить правильное маневрирование ковшом. Чтобы определить место погружения ковша, поворотный круг градуируют, а на палубе неподвижно закрепляют указатель положения стрелы и ковша относительно диаметральной плоскости снаряда. Для бóльшей чистоты выработки следы смежных ковшей перекрывают примерно на $^1/_4$—$^1/_3$ ширины b ковша (рис. 157).

Угол последовательного поворота стрелы штангового снаряда, зависящий от ширины ковша и радиуса работы снаряда, определяют по формуле

$$\alpha = \frac{0{,}75b180}{\pi r}, \qquad (283)$$

где b — ширина ковша;

r — радиус работы снаряда.

Практически угол α колеблется в пределах 5—7°.

Во время отрыва грунта ковшом и опорожнения ковша возникает кренящий момент, который ограничивает возможность по-

ворота стрелы. Угол поворота ковша при заборе грунта обычно значительно меньше (приблизительно в два раза), чем при его опорожнении. На существующих штанговых плавучих снарядах предельный угол поворота стрелы при заборе грунта в среднем составляет 45°. Для обеспечения устойчивости штангового снаряда при опорожнении ковша в шаланду последнюю подчаливают к снаряду частично ниже его носа (см. рис. 156).

При работе штангового снаряда следует учитывать, что впереди него образуется вал из грунта и камня, который достигает значительной высоты. Этот вал резко снижает глубины на разрабатываемом перекате, и проход судов мимо работающего снаряда становится опасным.

В связи с этим, если штанговый снаряд работает на транзите, приходится разрабатываемую им часть ширины прорези выключать знаками обстановки из судового хода до окончания работы на ней. Работы на лимитирующих глубину перекатах или других углубляемых участках проводят при повышенных уровнях, когда судовой ход широкий. Для уборки крупных камней и разборки вала, образующегося впереди снаряда, необходимо иметь при штанговом снаряде водолазный кран.

Вследствие конструктивных особенностей штанговых снарядов и специфичности их работы неровности на дне прорези, остающиеся после разработки, значительно больше, чем после работы многочерпаковых снарядов. Поэтому при работе штанговыми снарядами величина запаса на неровность выработки тоже повышается. На глинистых и каменистых грунтах запас на неровность допускается для штанговых снарядов соответственно 0,2 и 0,25 м, для грейферных — соответственно 0,25 и 0,3 м.

Способ перемещения снаряда по прорези прежде всего зависит от ее ширины. Двигаясь только вдоль прорези, снаряд может разработать ширину прорези

$$b_{\text{п}}=2r\sin\beta, \tag{284}$$

где r — радиус работы, м;

β — предельный угол отклонения ковша от диаметральной плоскости при заборе грунта, град.

При перемещении снаряда вдоль прорези поперечная ее разработка производится на отдельных стоянках вращением поворотного круга с установленным на нем рабочим устройством.

Перемещение снаряда вперед (подача) осуществляется спуском его по становому тросу или подтягиванием при помощи ковша. В последнем случае ковш выносится вперед на всю длину штанги и забрасывается на дно. После подъема свай снаряд подтягивают вперед на оттяжном тросе ковша, причем заднюю сваю часто оставляют волочащейся по дну, чтобы снаряд сохранил направление движения.

Наибольшую величину подачи $l_{\text{с}}$ снаряда вперед (рис. 158) можно определить по формуле

$$l_{\text{с}}=2(H+T)\operatorname{tg}\Theta, \tag{285}$$

где H — возвышение центра вращения штанги над уровнем воды;

T — глубина от уровня воды до проектного дна;

θ — наибольший угол отклонения штанги от вертикали в сторону снаряда.

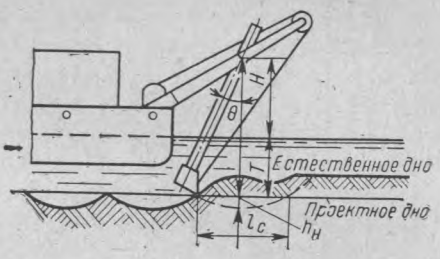


Рис. 158. Схема к расчету подачи вперед штангового снаряда

Поскольку при вращении ковш описывает дугу, неизбежна некоторая неровность выработки $h_н$, величина которой определяется по формуле

$$h_н=(H+T)\left(\frac{1}{\cos\theta}-1\right). \qquad (286)$$

Из сопоставления двух последних формул нетрудно видеть зависимость неровности выработки от подачи вперед:

$$h_н=\frac{l_c(1-\cos\theta)}{2\sin\theta}, \qquad (287)$$

т. е. величина неровности выработки, или переуглубления, будет тем больше, чем больше подача вперед и угол отклонения штанги от вертикали.

Величину подачи вперед l_c штангового снаряда, исходя из допустимой или заданной неровности выработки $h_н$, можно вычислить по формуле

$$l_c=2\sqrt{3h_н(H+T+{}^3/_4h_н)}. \qquad (288)$$

Величину подачи вперед l_c можно также вычислить, исходя из использования емкости черпака w при заданной толщине снимаемого слоя h, по формуле

$$l_c=\frac{wK_н}{bhk}, \qquad (289)$$

где $K_н$ — коэффициент наполнения ковша;

b — ширина ковша;

k — коэффициент рыхления грунта.

Правильное соотношение между Q, l_c и $h_н$ устанавливают практически — наблюдением в процессе работы за наполнением ковша и неровностью выработки. Средняя величина подачи в обычных условиях работы одночерпакового снаряда составляет около 1,5—2,5 м.

Если заданная ширина прорези превышает разрабатываемую снарядом ширину с отдельных стоянок при его перемещении только вдоль прорези, снаряд должен перемещаться и поперек про-

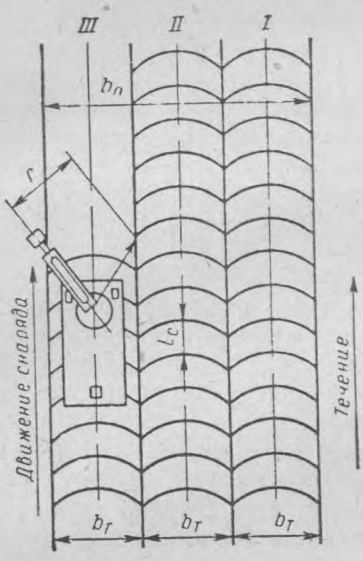


Рис. 159. Схема работы одночерпакового снаряда траншеями

рези. Разработка всей прорези в этом случае обычно производится сериями траншей, а по ширине траншей — поворотом рабочего устройства на отдельных стоянках снаряда.

На каждой траншее серии (рис. 159) снаряд, разработав на одной стоянке всю ширину траншеи, делает подачу вперед и на новой стоянке вновь разрабатывает всю ширину траншеи. Так снаряд перемещается вдоль траншеи до конца серии, т. е. пока позволяют боковые якоря без их перекладки. После этого снаряд переводят на соседнюю траншею, где повторяется то же самое. После разработки прорези траншеями по всей ширине одной серии боковые якоря перекладывают и снаряд переходит на следующую серию траншей.

Грейферные снаряды в отношении циклов работы, совмещения отдельных рабочих операций и разработки прорези траншейным (продольным) способом работают так же, как штанговые. При этом величина подачи вперед грейферного снаряда не должна превышать длины грейфера.

При захвате грунта грейфером на дне прорези остаются отдельные ямы и неровность выработки будет еще больше, чем при работе штангового снаряда. Это вызывает необходимость увеличения запаса на неровность или значительного перекрытия последующим ковшом грейфера части выработки предыдущего. Отдельные опускания ковша в грунт производят с перекрытием его следа примерно на $^1/_3$—$^1/_2$ его ширины.

Чистота выработки грейферного снаряда в основном зависит от точности опускания ковша, поэтому забором грунта управляют вахтенный начальник и старший матрос. При этом один из них находится у лебедки, а второй — в носовой части палубы или в лодке впереди снаряда, откуда наметкой прощупывает неровность дна и указывает, куда надо опускать ковш.

Часовую производительность Q штангового и грейферного снарядов определяют по формуле

$$Q = \frac{K_н w n}{k}, \qquad (290)$$

где w — емкость ковша;
n — число циклов (экскаваций) в час;
$K_н$ — коэффициент наполнения ковша;
k — коэффициент рыхления грунта.

Поскольку емкость рабочего устройства для данного снаряда — величина постоянная, так же как и коэффициент рыхления для данного грунта, повышение производительности снаряда может быть обеспечено только повышением коэффициента наполнения ковша и увеличением числа циклов (экскаваций) в час, т. е. сокращением времени каждого цикла и каждой операции цикла в отдельности. Полнота наполнения ковша в большой степени зависит от правильности принятой подачи вперед и точности места опускания ковша, а также от толщины снимаемого слоя.

§ 66. ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ В СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ

Дноуглубительные работы в скальных грунтах, или скалоуборочные работы, состоят из предварительного дробления скалы и последующей уборки раздробленной скалы. Дробление осуществляют при помощи взрывания или специальными снарядами — скалодробителями. Для взрывания скалы используют шпуровые или накладные заряды [1].

Скалодробильные снаряды со свободно падающими долотами имеют от одного до трех долот весом от 3 до 20 т каждый, падающих с высоты 2—3 м. Производительность таких снарядов достигает 8 м³/ч.

На наших водных путях работает также скалодробильный снаряд с двумя пневматическими долотами. Корпус снаряда состоит из понтона, имеющего центральный прорез; внутри прореза могут перемещаться скалодробильные устройства. По всей длине понтона с обеих сторон прореза установлены фермы, по которым передвигаются вдоль прореза два мостовых крана. На каждом кране установлена передвижная тележка с подвешенным к ней скалодробильным устройством (пневматическим молотом, долотом и направляющей рамой). Тележка с молотом и долотом может перемещаться по крану поперек центрального прореза.

Для разработки в скальном грунте судоходной прорези последняя разбивается на короткие (порядка 20 м) серии узких (около 2,5 м) траншей. Длина и ширина траншей принимаются несколько меньше длины и ширины центрального прореза, в котором перемещаются скалодробильные устройства. Каждая такая траншея разрабатывается при одном неподвижном положении снаряда.

Дробление скалы по каждой траншее ведется продольными или поперечными рядами воронок; расстояние между рядами принимается около 0,3—0,4 м. При продольном дроблении мостовые краны с долотами сначала двигаются по первому продольному ряду воронок, дробя скалу от концов центрального прореза к его

[1] Буровые и взрывные работы излагаются в курсе «Строительные работы», а здесь рассматриваются только их особенности при скалоуборочных работах.

середине с подачами тоже порядка 0,3—0,4 м. После встречи кранов их тележки передвигают долота на второй продольный ряд воронок, и краны с долотами перемещаются по этому ряду, дробя скалу от середины прореза к его концам и т. д., пока не будет раздроблена скала в последнем продольном ряду.

При поперечном дроблении мостовые краны с долотами сначала устанавливаются по концам центрального прореза и тележки на них передвигают долота по первым поперечным рядам воронок, затем краны перемещают долота на вторые поперечные ряды воронок и т. д. до встречи кранов и долот в средней части центрального прореза.

После каждой подачи крана или тележки по ряду воронок скалодробильное устройство опускается на дно, в молот подается сжатый воздух, который приводит в движение «бабу», ударяющую по долоту, и дробя скалу, разрабатывает воронку. Каждое долото весит 1,7 т, имеет длину 3 м и диаметр 0,3 м. Чтобы получить на проектной глубине сравнительно ровное дно из воронок в скальной породе, последние разрабатывают с переуглублением. Производительность снаряда по дроблению прочной монолитной скалы составляет около 3 м³/ч и более, крупность раздробленной породы — преимущественно 10—15 см, отдельные фракции имеют в поперечнике до 50 см.

Опыт работы этим снарядом показал, что для увеличения его производительности и улучшения качества дробления скалы необходима автоматизация его работы, система которой и разрабатывается в лаборатории дноуглубления МОФ ЛИВТа.

Для накладных зарядов, применяемых при дноуглублении на наших реках, используется некондиционный пироксилиновый порох. Заряды имеют длину 3—10 м и более и диаметр 0,15—0,25 м; в каждый заряд ставят 1—2 боевика из аммонита или тротила. Расход пороха колеблется от 50 до 100 кг/м³ в зависимости от прочности скалы и толщины снимаемого слоя. Глубина дробления под зарядом меняется от 0,3 до 0,8 м, а в отдельных случаях доходит до 1 м и более; расстояние между зарядами зависит от глубины дробления и колеблется от 0,2 до 1,2 м. Выработка в день на человека составляет 4—10 м³ раздробленной породы.

Зимой накладные заряды укладывают на дно в продольные по течению борозды или для серии зарядов пробивают две поперечные борозды, расположенные в начале и конце зарядов. В последнем случае из верхней борозды в нижнюю пропускают шпагат, по которому затем подают удлиненный заряд. Способ с поперечными бороздами значительно сокращает ледовые работы, но укладка зарядов менее точна, чем при способе с продольными бороздами. Зимой проводят преимущественно крупные взрывы, так как ледовый покров при взрывах нарушается на большой площади.

Летом накладные заряды укладывают с наклонных или горизонтальных площадок. При наклонной площадке сначала сбра-

сывают якорь заряда — крупный камень, затем площадка выдергивается из-под заряда. Горизонтальные площадки состоят из двух понтонов длиной 4—5 м с длинным люком посередине, который закрыт двумя створками, вращающимися на продольной оси. На створки укладывают два заряда, затем створки поворачивают, и заряды ложатся на дно. Способ укладки зарядов с горизонтальной площадки значительно производительнее, чем с наклонной: 7 человек укладывают за смену до 10 т зарядов. Взрыв производится электропалением при бескапсюльном взрывании (с помощью детонирующего шнура).

На некоторых реках накладные заряды используют и для удаления раздробленной скалы. Для этого раздробленную породу обкладывают накладными зарядами как подковой, причем в заднюю стенку подковы кладут сдвоенные заряды. При взрыве около 90% скалы летит из подковы на расстояние от 5 до 15 м (расход пороха соответственно от 25 до 40 кг/м^3). Последовательными взрывами скалу можно перебросить на любое расстояние, причем стоимость переброски от кромок прорези может получиться меньше стоимости удаления скалы многочерпаковым снарядом.

Для шпуровых зарядов предварительно бурят шпуры. Бурение ведут с площадки-понтона, опирающегося на сваи. В настиле площадки имеются сплошные прорезы, по краям которых уложены рельсы для передвижения тележек с бурильными станками. Подъем и опускание свай и работа станков осуществляются сжатым воздухом, подаваемым от компрессоров, установленных на отдельном понтоне на безопасном расстоянии от места дробления. Бурильная площадка-понтон устанавливается на месте работы по поперечным береговым створам и подается вперед по становому тросу.

Бурение ведут через опускаемые на дно обсадные трубы, имеющие на нижнем конце коронку и соединенные через переходную муфту со станком. Если наносного слоя нет, обсадную трубу немного забуривают в скалу, а при наносном слое около 0,5 м и более ее устанавливают без забуривания. Труба крепится к кронштейну понтона верхней частью, перфорированной для облегчения выноса шлама. После установки трубы и станка над ней в трубу опускают бур для бурения шпура. По окончании бурения шпура станок передвигают, а через обсадную трубу, которая остается на месте, производится зарядка шпуров.

Размеры сетки шпуров определяют опытным путем или расчетом. Так, на породах от гранита до сланцев и при толщине снимаемого слоя 2,5—3 м применяют сетку шпуров размером 1,5××1,5 м; перебур составляет 0,75—1 м, отношение расстояния между шпурами к длине шпура 0,4.

В качестве взрывчатого вещества используется динамит с содержанием от $^1/_3$ до $^2/_3$ нитроглицерина, что значительно мощнее аммонитов. Патроны динамита через обсадную трубу подают в шпур (заряжается около $^2/_3$ длины шпура) и досылают запальником, причем боевик кладут сверху. Взрывание производится

электропалением. Применяется короткозамедленное взрывание, с замедлением между рядами взрывов в 25 мс.

Скалобурильную установку на площадке-понтоне размером 10×20 м с четырьмя бурильными станками и с компрессорами общей производительностью 20 м³/мин обслуживают 16 человек. Установка при скорости течения 1,5—2 м/с и глубине в реке около 2,5 м за 2—2,5 ч работы бурит около 50 шпуров и за 10 ч работы дробит до 800 м³ скалы.

При таком способе работы большой перебур, частое расположение скважин и мощное взрывчатое вещество исключают некачественное дробление: глубина дробления получается больше проектной, а крупность раздробленных фракций небольшая. Дробление скалы скалодробильным снарядом значительно дороже, чем скалобурильной установкой и взрывами.

Раздробленную скалу, как и раздробленный камень, можно извлекать многочерпаковыми или штанговыми снарядами. Опыт показывает, что наиболее производительна и экономична работа многочерпаковых снарядов.

Для извлечения раздробленной скалы желательно применять многочерпаковые снаряды с ременной передачей от двигателя на верхний барабан во избежание обрыва черпаковой цепи при задевании за скалу. При извлечении раздробленной скалы скорость черпаковой цепи снижают до 5—7 черпаков в минуту, козырьки черпаков усиливают зубьями и работают рамой вниз по течению. Для повышения производительности снарядов толщина снимаемого слоя должна быть не менее двойного вылета черпака, вследствие чего небольшие снаряды наиболее экономичны на скалоуборке. Коэффициент использования производительности составляет 5—15%.

В настоящее время на одном из многочерпаковых снарядов, убирающих раздробленную скалу, внедряются грунтозаборный экран и пригрузочное устройство шлейфа черпаковой цепи, о которой уже сказано в § 1 гл. IX. Экран и пригрузка шлейфа должны резко повысить производительность снаряда на уборке дробленой скалы и использование рабочего времени, а также качество скалоуборки.

Штанговые снаряды используются для извлечения скалы при толщине снимаемого слоя не менее 1 м, так как на тонких слоях их производительность мала. Применение штанговых снарядов наиболее целесообразно на слабых скальных грунтах, разбираемых без дробления взрывами.

Для удаления тонкого снимаемого слоя раздробленной скалы в расположенные поблизости емкости можно использовать «плавучий бульдозер», состоящий из двух понтонов, спаренных на расстоянии около 5 м друг от друга и имеющих общую палубу. Между понтонами на тросах опускают щит типа бульдозера, упирающийся с помощью шарнирно прикрепленных к нему штанг в корпус понтонов в их кормовой части. Такой «бульдозер» вниз по течению перемещают толканием.

Для расчета веса P шпуровых зарядов в горной промышленности пользуются формулой

$$P=K_в W^3, \qquad (291)$$

где $K_в$ — коэффициент, характеризующий удельный расход взрывчатого вещества;

W — линия наименьшего сопротивления, или глубина заложения заряда в скалу.

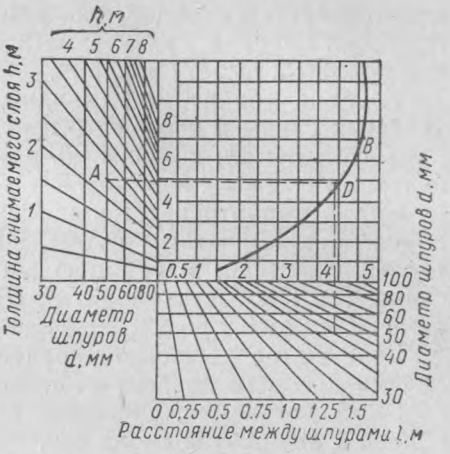


Рис. 160. Номограмма зависимости расстояния между шпурами от толщины снимаемого слоя скалы и диаметра шпура $l=f(h; d)$

Эта формула позволяет получать заряды наименьшего веса, т. е. дает возможность достигнуть наименьшего удельного расхода взрывчатого вещества на 1 м³ раздробленной скалы. При дноуглублении удельный вес взрывчатого вещества в общей стоимости работ невелик, и гораздо важнее заложить заряды такого веса и на таком расстоянии, в результате взрыва которых получится ровная выработка и мелкое дробление скалы.

При дноуглубительных работах расчет расстояния между шпурами ведут по специальной номограмме, составленной У. Лангефорсом (рис. 160). По этой номограмме для заданной, например, полезной толщины снимаемого слоя скалы $h=2{,}5$ м и заданного диаметра шпура $d=50$ мм, двигаясь от точки A в первом квадранте к точке D на кривой B во втором квадранте, получим далее в третьем квадранте расстояние между шпурами $l=2{,}25$ м. Перебур Δh ниже проектного дна принимается равным $0{,}6l$, а расстояние E между рядами шпуров $(1—1{,}2)l$.

Удельный расход p (кг/м³) взрывчатого вещества и вес заряда в шпуре определяют по формулам

$$p=0{,}45+0{,}05h, \qquad (292)$$

$$P=plEh. \qquad (293)$$

При назначении расстояния между шпурами учитывают также крупность раздробленной взрывами породы и увязывают это с характеристиками снарядов, применяемых для ее извлечения. Опыт показывает, что средняя крупность взорванной породы почти линейно зависит от относительного расстояния между шпурами: $m=l:H$ (где H — глубина шпура, равная $h+\Delta h$). Следовательно, меняя величину m и соответственно величину перебура, можно получить разную крупность и разную стоимость дробления 1 м³ скалы. Крупность же взорванной породы резко влияет на произ-

водительность снарядов, так как уменьшается коэффициент наполнения черпака при увеличении отношения крупности взорванной породы к вылету черпака.

Глубина дробления накладными зарядами зависит от характеристик скалы и взрывчатого вещества, а также от размеров заряда (высоты $2h$, ширины $2b$, длины $2l$) и расстояния ($2r$) между центрами соседних зарядов.

Скала характеризуется коэффициентом k_1, величина которого определяется опытным путем. Этот коэффициент, кроме свойств скалы, учитывает и водяную забойку. При изменении крепости скалы (по Протодьяконову) от 5 до 19 величина коэффициента k_1 изменяется от 0,2 до 4,4.

Взрывчатое вещество характеризуется коэффициентом k_2, величина которого зависит от плотности взрывчатого вещества и скорости детонации. Значение коэффициента k_2 составляет для пороха и аммонитов около 130.

Глубина дробления скалы накладными зарядами зависит также от коэффициента η, показывающего отношение полезно используемой части заряда ко всему заряду (при взрыве продукты детонации расширяются во все стороны одинаково, а полезно используется только часть их, направленная в сторону скалы). Величина коэффициента η зависит от ширины и высоты заряда; для удлиненных зарядов этот коэффициент вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{1}{2} - \frac{h}{4b}. \qquad (294)$$

Высота заряда определяет величину импульса, действующего на скалу, и влияет на глубину ее дробления. Глубину дробления скалы накладными зарядами можно найти из общей формулы, имеющей вид

$$\frac{k_1}{k_2 \eta h} = f(z;\ b;\ l;\ r), \qquad (295)$$

где z — полезная глубина дробления скалы.

Для облегчения пользования этой формулой А. В. Станкеевым составлены специальные номограммы для удлиненных зарядов с $l \geqslant 5b$ и для квадратных в плане зарядов, т. е. с $l = b$.

Пользуясь такими номограммами, можно для заданной глубины дробления скалы подобрать оптимальные размеры и расположение зарядов, при которых удельный расход взрывчатого вещества будет наименьшим. Для наиболее полного использования взрывчатого вещества заряд должен быть плоским, однако по технологическим причинам удается изготовить заряды с отношением высоты к ширине не менее 1:2 или 1:3. Для увеличения глубины дробления в отдельных случаях разрешается изготовлять заряды высотой, равной ширине, но не больше, так как дальнейшее увеличение высоты бесполезно.

Глава X

ВЫПРАВИТЕЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ — РУСЛОВЫЕ И БЕРЕГОВЫЕ, ИХ ВОЗВЕДЕНИЕ

§ 67. РУСЛОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ ИЗ КАМЕННОЙ НАБРОСКИ

Различают следующие конструкции русловых сооружений, применяемых преимущественно при выправлении рек: 1) из каменной наброски; 2) из грунта (намывные и насыпные); 3) свайно-грунтовые. При этом сооружения из каменной наброски наиболее надежные.

Конструкция выправительного сооружения выбирается в зависимости от срока его службы и местных условий: глубины в русле и скорости течения, условий пропуска ледохода, наличия местных строительных материалов, возможности наиболее полной механизации строительных работ, наличия строительного оборудования и др.

Для выправительных сооружений применяют такие строительные материалы, которые позволяют наиболее полно механизировать процесс их возведения. В связи с этим для них прежде всего рекомендуются камень, грунт и сваи. Многие годы для выправительных сооружений широко применялся хворост, но в связи с трудностями при этом механизации строительных работ в последние годы его использование резко сократилось.

Из каменной наброски возводят полузапруды, запруды и продольные дамбы преимущественно меженного действия. Полузапруды (рис. 161) и запруды из каменной наброски в поперечном профиле имеют форму трапеции с шириной по гребню 1,5—3 м и откосами: верховым (напорным) от 1:1 до 1:1,5, низовым (сливным) от 1:1,5 до 1:2, речным (у полузапруд) от 1:3 и более.

Гребню полузапруды придается продольный уклон i от 1:300 до 1:100 с подъемом от головы к берегу (корню). При подходе к корню гребню полузапруды придают более крутой подъем от 1:10 до 1:25 на протяжении от $^1/_6$ до $^1/_{10}$ длины сооружения. Гребень запруды в средней части делается горизонтальным, а к берегам — с уклонами, как у полузапруды. При длинных сооружениях или низких берегах уменьшают уклон гребня.

Гребень и прилегающие к нему части обоих откосов выкладывают из более крупных камней. Отметка гребня головы полузапруд, гребня запруд и продольных дамб определяется расчетом.

В основании каменной полузапруды и запруды на размываемых грунтах укладывают расстилочный донный хворостяной тюфяк толщиной 0,35—0,45 м с загрузкой камнем от 0,1 до 0,2 м³ на 1 м² тюфяка. Крупность камня при этом определяется расчетом. Расстилочные тюфяки из-под каменной наб-

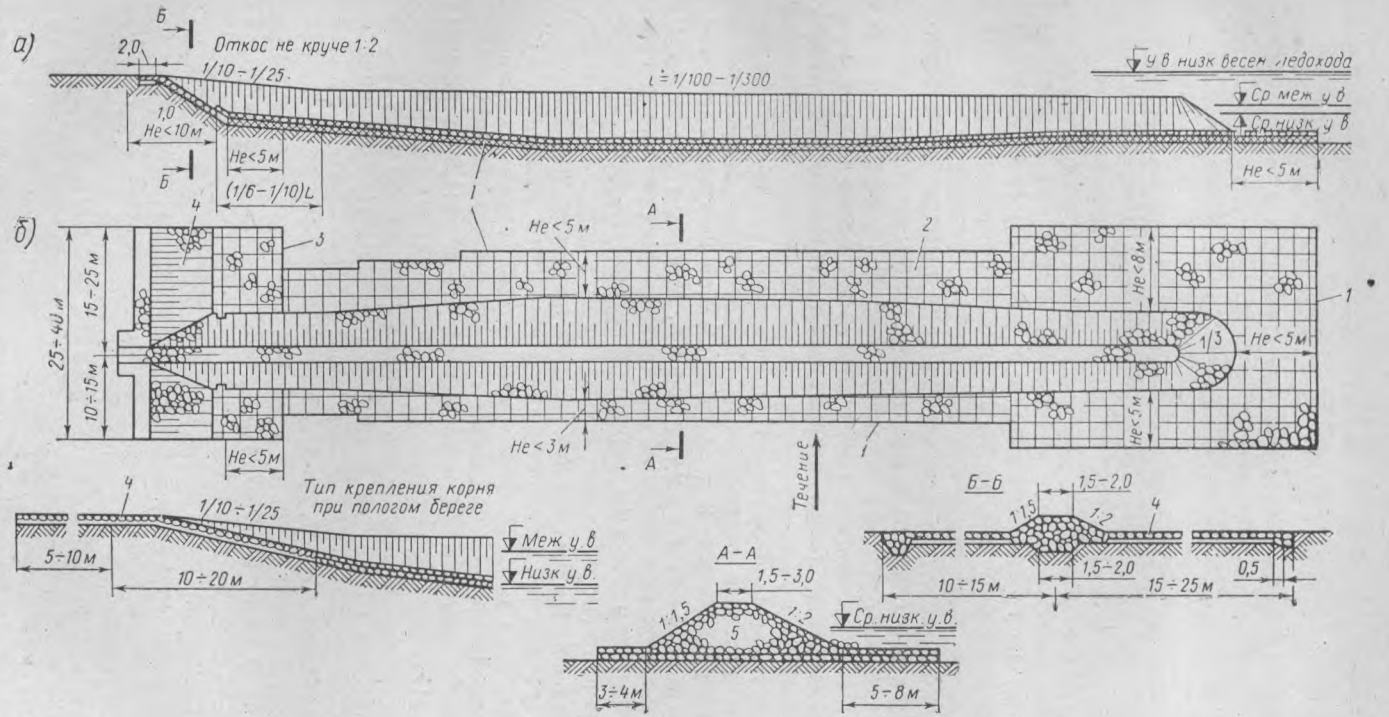


Рис. 161. Полузапруда меженного действия из каменной наброски:

а — фасад; *б* — план; *1* — расстилочный хворостяной тюфяк; *2* — клетки тюфяка; *3* — береговой подводный хворостяной тюфяк; *4* — надводное береговое крепление из каменной наброски; *5* — каменная наброска тела полузапруды с укладкой по гребню и откосам крупных камней

роски полузапруд и запруд выпускают на 3—4 м с верховой стороны и на 5—8 м и более — с низовой. При этом длина выпуска тюфяка с низовой стороны запруд обосновывается расчетом. На трудноразмываемых грунтах и во второстепенных сооружениях расстилочный тюфяк может укладываться только под головой полузапруд или под низовой частью тела запруд и полузапруд. На Дону, где в районе работ имеется много местного камня, полузапруды строят совсем без расстилочного тюфяка. При подмыве основания и просадке тела сооружения досыпают камень.

Голову каменной полузапруды, где ледоход проходит выше гребня, делают без расширения. В случаях, когда ледоход проходит ниже гребня сооружения и сооружение является головным, голову полузапруды расширяют в низовую сторону.

Корни меженных запруд и полузапруд из каменной наброски делают толщиной 1—2 м при ширине поверху, равной ширине гребня. Котлованы для корней закладывают в период низкого стояния уровней на отметке рабочего уровня. Корни полузапруд или запруд, врезанные в спланированный откос берега, поднимают по откосу: при затопляемых берегах на длину 10—20 м до бровки и несколько продолжают по горизонтальной части берегов, а при высоких (незатопляемых) берегах — несколько выше уровня высоких вод, на длину от 4 м и более.

Откос берегов в районе корней этих полузапруд и запруд планируют не круче 1:2 и укрепляют ниже меженного уровня воды береговыми хворостяными тюфяками, загружаемыми камнем, а выше — каменной наброской на слое щебня. Длина крепления берега принимается с верховой стороны 10—15 м и с низовой 15—25 м от оси сооружения, а иногда и более. Прилегающая к бровке полоса берега на ширине 2 м также укрепляется. В месте упора надводного крепления берега в подводный береговой тюфяк устраивают каменную призму. Если грунты трудноразмываемые, берег выше и ниже корня полузапруды и запруды не крепят.

Продольные струенаправляющие дамбы из каменной наброски (рис. 162) имеют такой же поперечный профиль и ширину по гребню, как и описанные полузапруды и запруды, но одинаковые откосы с речной и береговой стороны — от 1:1 до 1:1,5. Если вдоль речного откоса меженные скорости течения повышенные, заложение его увеличивается. Откос головы дамбы принимается равным 1:3.

Гребню струенаправляющей дамбы в продольном направлении придают уклон поверхности потока при расчетном уровне в пределах дамбы, при подходе к берегу уклон гребня на протяжении 20—50 м увеличивают в пределах от 1:10 до 1:25.

В основание каменной дамбы на размываемых грунтах укладывают расстилочный тюфяк, который выпускается из-под каменной наброски дамбы с речной стороны на 6—12 и с береговой на 3—5 м. При легких условиях работы сооружения расстилочный тюфяк укладывают только с речной стороны и под головой.

Корень дамбы сопрягают с берегом в виде призмы из камен-

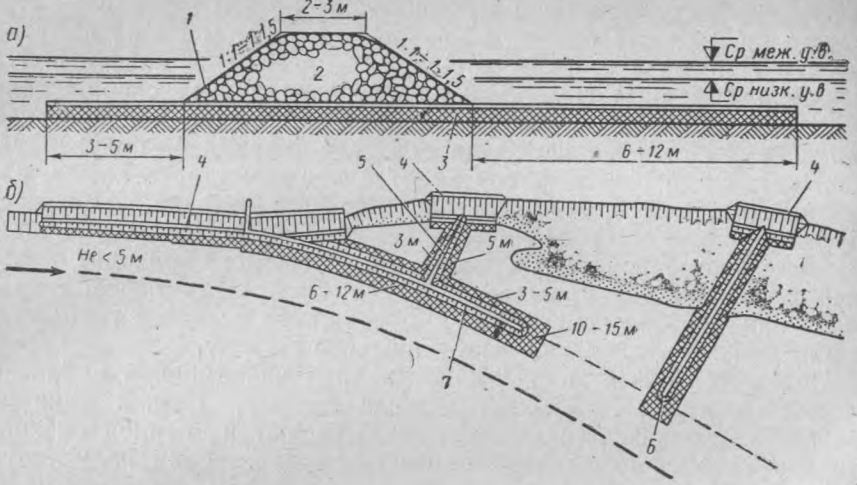


Рис. 162. Струенаправляющая дамба из каменной наброски:
а — поперечный разрез; *б* — план: *1* — плотная укладка крупных камней; *2* — наброска из камня; *3* — расстилочный хворостяной тюфяк; *4* — береговое укрепление; *5* — траверса; *6* — полузапруда; *7* — струенаправляющая дамба

ной наброски; длина корня 10—20 м. В месте примыкания корня к берегу последний крепят с верховой и с низовой сторон на 20—50 м от оси дамбы. Надводный откос берега укрепляют в районе корня дамбы каменной наброской на слое щебня, а на подводный откос укладывают хворостяной тюфяк, загружаемый камнем.

Для более быстрого отложения наносов между дамбой и берегом устраивают один или несколько траверсов, конструкция которых аналогична конструкции полузапруд.

Возведение сооружений из каменной наброски выполняется как в навигационный, так и в зимний период. Русловую часть тела сооружения из каменной наброски в отдельных случаях выполняют в навигационный период в два срока. Сначала, при более высоких уровнях, отсыпают нижнюю часть тела сооружения. Последующая же досыпка тела и выравнивание гребня под проектный профиль, а также обделка откосов с укладкой крупных камней производятся после спада уровней и выхода каменной наброски в надводное положение. Устройство корневой части прикорневого берегового укрепления, как правило, относят на навигационный период, приурочивая к периоду стояния низких меженных уровней реки.

Работам по возведению сооружений из каменной наброски предшествует разбивка и закрепление на берегу и на воде основных линий и элементов сооружения. При высотной разбивке учитывают запас на последующую осадку сооружения примерно на 0,3 м.

Строительство полузапруды или дамбы из каменной наброски с расстилочным тюфяком в основании в навигационный период

ведется в следующем порядке: 1) срезка и планировка под проектный профиль берегового откоса на участке прикорневого крепления; 2) укладка расстилочного тюфяка в основание сооружения, а также берегового тюфяка по подводному откосу и подошве на участке прикорневого крепления; 3) выемка котлована под корень сооружения и устройство корневой части; 4) отсыпка сопрягающей призмы и устройство крепления надводного откоса и бровки на участке прикоренного крепления; 5) отсыпка русловой части тела сооружений и обделка под проектный профиль гребня и надводной части откосов каменной наброски с укладкой крупных камней.

При строительстве такой же полузапруды или дамбы в зимний период некоторые работы выполняют заранее — в навигационный период. К таким работам относятся срезка и планировка откоса, выемка котлована под корень, устройство корневой части, крепление подводного откоса, отсыпка сопрягающей призмы и крепление надводного откоса на участке прикорневого укрепления берега. В зимний же период выполняются ледокольные работы по вскрытию майны для укладки расстилочного тюфяка, вязка и укладка расстилочного тюфяка, ледокольные работы по устройству майны для отсыпки тела сооружения, отсыпка тела сооружения из каменной наброски, обделка гребня и надводной части откосов каменной наброски с укладкой крупных камней.

Камень в тело полузапруд и струенаправляющих дамб отсыпают от корня к голове на полную высоту, а в тело запруд — послойно по всей длине с ростом сооружения по высоте.

Отсыпка русловой части тела сооружения из каменной наброски в зависимости от местных условий и производственных возможностей выполняется в навигационный период одним из следующих способов: 1) выгрузкой камня по створу сооружения из шаланд или саморазгружающихся барж-площадок; 2) выгрузкой камня из бункеров или опрокидываемых вагонеток, установленных на палубе спаренных плашкоутов; 3) выгрузкой камня из барж с помощью плавучих кранов или транспортеров.

Выгрузка камня из шаланд, с барж-площадок или плашкоутов возможна при достаточных глубинах в месте выгрузки, причем не всегда на полную высоту сооружения. С помощью плавучих кранов сооружение из каменной наброски можно возводить на полную высоту; при этом камень доставляется баржей, плашкоутом или иным судном, которое устанавливается на якорных оттяжках в створе сооружения, к нему причаливается плавучий кран, и они перемещаются вдоль фронта отсыпки по мере выгрузки камня в тело сооружения.

При использовании береговых приобъектных штабелей отсыпать камень в тело сооружения можно автосамосвалами пионерным способом на полную проектную отметку, если имеются благоприятные условия сопряжения сооружения с берегом.

При устройстве корневой части сооружений из каменной наброски работы ведут в следующем порядке: вынимают грунт из

котлована, закладывают корневую часть, засыпают котлован вместе с корневой частью (если корень заглубленный), срезают и планируют под проектный профиль береговой откос на участке прикорневого крепления. Корень сооружения из каменной наброски часто устраивают незаглубленным, т. е. котлован корня заполняют камнем заподлицо с его бровками и по поверхности наброски укладывают крупные камни.

Последовательность постройки запруд из каменной наброски несколько отличается от постройки полузапруд и дамб и ведется в следующем порядке: 1) устраивают оба корня запруды и береговые укрепления в районе корней, 2) укладывают расстилочный тюфяк в основание и отсыпают тело запруд из каменной наброски с креплением гребня и надводных откосов крупными камнями.

При строительстве запруд из каменной наброски применяют в основном те же способы производства работ, что и при возведении полузапруд и дамб, но соблюдают следующие особенности возведения тела запруд: камень в тело отсыпают только после укладки расстилочного тюфяка по всей площади основания сооружения и равномерным слоем по длине запруды с постепенным ростом по высоте, причем по мере роста каменной наброски по высоте увеличивают крупность отсыпаемого камня.

При небольших скоростях воды в перекрываемом рукаве возможно возведение запруды следующим комбинированным способом. После укладки расстилочного тюфяка по всему основанию сооружения со стороны обоих берегов в тело на части длины запруды отсыпают камень. Отсыпка ведется частью пионерным способом от корня, а частью с воды, до проектной отметки гребня. От каждого берега отсыпают участки такой длины, при которых в свободной части русла скорости не превысят допускаемых для отсыпки камня имеющейся крупности. Затем отсыпают камень на средней части запруды, но последовательно по высоте и равномерным слоем по всей длине этой части запруды. При малой ширине перекрываемого рукава обычно применяют отсыпку пионерным способом по всей длине запруды.

Отсыпка камня в теле запруды может выполняться в период стояния высоких уровней полностью до проектной отметки гребня с последующей обделкой сооружения под проектный профиль после спада уровней до низких. В этом случае укладка расстилочного тюфяка выполняется в зимний период, а отсыпка камня в тело — в навигационный период.

§ 68. РУСЛОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ ИЗ ГРУНТА

Самыми дешевыми и наиболее прогрессивными по способу производства работ являются сооружения из грунта. Выправительные сооружения из грунта могут быть: 1) чисто грунтовые и содержащие в теле звенья из деревьев (ветвистых завес) или пучков хвороста; 2) с неукрепленными и укрепленными гребнем

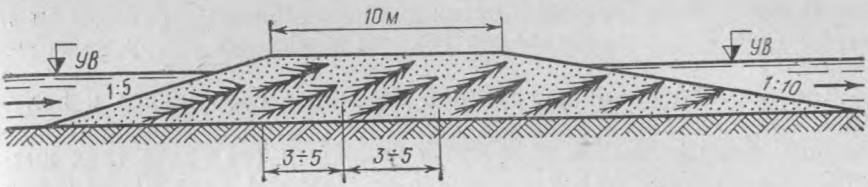


Рис. 163. Поперечный профиль намывного сооружения: УВ — уровень воды

и откосами; 3) полного профиля из грунта и профиля с призмами из каменной наброски.

По способу возведения грунтовые сооружения делятся на: а) сооружения из рефулированного грунта, намываемые землесосами в воду; б) сооружения из насыпного грунта, возводимые земснарядами: многочерпаковыми или грейферными; в) сооружения из насыпного грунта, возводимые береговыми землеройными машинами, и г) комбинированные, намываемые землесосами или отсыпаемые многочерпаковыми снарядами ниже рабочего уровня и в остальной части тела, отсыпаемые береговыми машинами.

Преобладающий вид грунтовых сооружений — продольные сооружения (дамбы), реже применяются поперечные сооружения (запруды и полузапруды).

Работы по устройству грунтовых сооружений ведутся в такой последовательности:

а) устройство каменных призм и звеньев из деревьев или пучков хвороста, если призмы и звенья предусмотрены; б) намыв или насыпка подводной части тела сооружений; в) насыпка надводной части; г) крепление гребня и откосов, если оно предусмотрено.

По длине грунтовые сооружения возводятся в следующем порядке: продольные — сверху вниз по течению, полузапруды — от корня к голове, запруды — от берега с наибольшими скоростями, или от берега с относительно более слабыми грунтами, или от обоих берегов к середине русла.

Выбор способа возведения грунтового сооружения (намывного, насыпного или комбинированного) зависит от грунтовых условий, уровенного режима при производстве работ, расположения грунтовых карьеров и наличия строительного оборудования.

Сооружения из грунта, возведенные намывом землесосами, наиболее экономичны. Эти сооружения имеют распластанный профиль (рис. 163) с шириной гребня до 10—20 м, с боковыми откосами от 1:5 до 1:10 и более пологими, при этом подводные откосы могут получаться круче надводных.

Намывные сооружения можно возводить полностью на всю высоту только при уровнях не ниже отметки их гребня. При этом для удобства выполнения работ нужен в конце грунтопровода

специальный разливочный понтон с оперативными лебедками и устройством для регулирования высоты выкидного патрубка грунтопровода.

Для плотной укладки грунта в намывное сооружение и получения его проектного профиля концевой понтон перемещают возможно более частыми и короткими подачами (не более трех диаметров грунтопровода). Наилучшие результаты дает автоматизированная передвижка концевого понтона, осуществляемая с помощью устанавливаемой на нем специальной аппаратуры, разработанной Московским ЦПКБ МРФ. Датчик этой аппаратуры при достижении заданной отметки на участке намыва подает команду на две электрифицированные лебедки — стравливать трос на заданную длину.

Повышение плотности и качества намыва сооружений достигается также подачей грунтовой смеси из выкидного патрубка навстречу или поперек течения, чтобы лучше осаждался грунт и уменьшался его унос, и увеличением насыщения смеси путем разделения ее при выходе из концевого патрубка при помощи *делителя* на два потока с различным насыщением.

Делитель нижнюю половину струи с высоким насыщением смеси и крупными фракциями направляет в намываемое сооружение, а верхнюю половину струи с низким насыщением и мелкими фракциями — в сторону от этого сооружения. При таком делении смеси достигается уменьшение ширины гребня сооружения, увеличение высоты надводной части и повышение качества намыва не только по плотности, но и по крупности.

По проекту Горьковского ЦКБ МРФ концевой разливочный понтон, где за выкидным патрубком монтируется делитель смеси, оборудуется двумя электрифицированными лебедками с автоматизированным управлением. При этом система подвески делителя позволяет вести намыв как с ним, так и без него.

Для придания намывному сооружению более крутых откосов и уменьшения уноса грунта во время намыва в его основании можно также устанавливать звенья ветвистых завес или пучков хвороста. Эти ветвистые завесы или пучки хвороста входят при намыве в состав тела сооружения; количество их зависит от скорости течения и крупности рефулируемого грунта и колеблется примерно от 100 до 300 звеньев на 1000 м^3 тела сооружения. Ветвистые звенья или хворостяные пучки укладывают рядами по всей ширине основания намываемого сооружения через 3—5 м в ряду или только под сливным откосом. Завесы или пучки в рядах располагают в шахматном порядке и закрепляют на месте установки донными свайками или якорными грузами.

Выправительные сооружения из грунта, возводимые намывом в воду, получаются все же широкими по гребню, с пологими откосами и соответственно с большой поверхностью. В случае необходимости их крепления целесообразно предварительно уменьшить их ширину по гребню и пологость откосов, а следовательно, и площадь поверхности, так как уборка излишнего грунта обой-

дется значительно дешевле, чем крепление уменьшаемой при этом их поверхности.

При высоких уровнях излишний грунт можно удалить землесосом, намывавшим сооружение, или многочерпаковым снарядом. В некоторых случаях достаточно уменьшить ширину только надводной части сооружения, срезая ее при достаточных глубинах плавучими средствами, а при малых глубинах — вдоль сооружения — береговыми машинами. При этом излишний грунт удаляется за пределы укрепляемой поверхности.

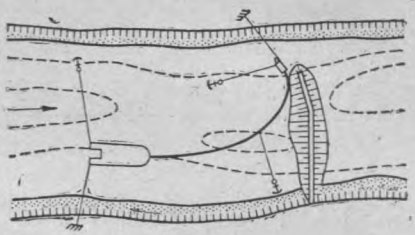


Рис. 164. Схема намыва запруды в воду

Намыв полузапруд землесосами в воду ведется от берега к голове. При небольших скоростях течения и глубинах концевой понтон устанавливают по оси полузапруды, при больших скоростях и глубинах этот понтон ставят примерно нормально к оси сооружения, чтобы грунтовая смесь сбрасывалась навстречу течению. Корневая часть полузапруды намывается из ближнего карьера, головная — из удаленного. Крепление гребня и откосов, если оно предусмотрено проектом, выполняют сразу после окончания намыва грунта, но головную часть крепят в первую очередь.

Намыв запруд полного профиля землесосом в воду рентабелен только на реках с небольшими скоростями течения или при предварительном выполнении специальных мероприятий, способствующих перекрытию прорана. Намыв запруд, перекрывающих рукава, ведут обычно от берега, у которого большие скорости и глубины, чтобы облегчить закрытие прорана и сопряжение запруды с берегами. При наличии в средней части рукава осередка с небольшой глубиной намыв запруды целесообразен и от двух берегов. Если в перекрываемом рукаве большие скорости течения и легкоразмываемое русло, то предварительно укладывают расстилочный тюфяк по длине запруды или только в районе намечаемого прорана.

В начале работ по возведению запруды намыв грунта ведется по оси сооружения, а затем на подходе к прорану несколько изгибается против течения (рис. 164). При сжатии потока на $^2/_3$—$^3/_4$ ширины уклон, скорость течения и унос грунта в зоне прорана резко увеличиваются и перекрытие прорана замедляется, а при уносе грунта, равном подаче землесосом, может и совсем прекратиться. В рукаве с небольшим расходом и когда работает крупный землесос, такое равенство уноса и подачи может и совсем не наступить, но интенсивность возведения запруды в зоне прорана все же резко уменьшится.

Сброс грунтовой смеси в проран производится землесосом навстречу течению или нормально к нему. При затруднительности намыва запруды по створу концевой понтон передвигается вперед

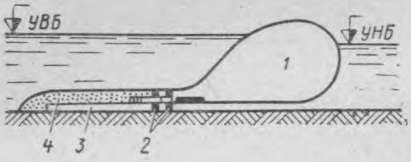


Рис. 165. Разрез наливной перемычки:
1 — вода; *2* — прошивка; *3* — понур; *4* — пригрузка камнем; *УВБ* — уровень верхнего бьефа; *УНБ* — уровень нижнего бьефа

по направлению намыва и косо вверх навстречу потоку. Отвал грунта при таком перемещении понтона отклоняется от оси запруды и получает небольшой изгиб в виде шпоры (см. рис. 164), что, как показывает опыт работ, облегчает перекрытие прорана.

При перекрытии прорана, когда в его зоне перед окончанием намыва сосредоточиваются все падение уровней и наибольшие скорости потока, особенно необходимо подавать грунтовую смесь непрерывно и с наибольшим насыщением, чтобы закончить работу в кратчайший срок. Перерыв в намыве, даже малейший, ведет к немедленному расширению прорана, затрудняющему его перекрытие.

Перекрытие намывными запрудами больших рукавов и со значительными скоростями течения можно осуществлять следующим образом: 1) перекрывая проран намываемой запруды галечно-гравийной смесью или каменной наброской; 2) намывая запруду под защитой временного продольного сооружения или мягкого наливного сооружения.

Перед перекрытием прорана намывной запруды каменной наброской отсыпается банкет из камней по всей его ширине и укрепляются торцы намытых частей запруды. Затем перекрывается весь проран каменной наброской до сухих отметок, а сама фильтрующая наброска замывается землесосом и засыпается бульдозером песком.

Намыв перед истоком рукава временного продольного сооружения от берега до приверха острова значительно проще и дешевле, чем запруды. Намыв же под его защитой в тихой воде самой запруды осуществляется без заметного уноса грунта и с обжатым профилем (с более узким гребнем и меньшим заложением откосов, чем на течении). По окончании намыва гребень и откосы запруды укрепляются, а временное продольное сооружение размывается потоком.

Наливная мягкая перемычка (из водостойкой ткани) ставится в самом рукаве и перекрывает его (рис. 165), а за ней, тоже в тихой воде, намывается запруда с небольшим уносом грунта и обжатым профилем. Преимущество мягкой перемычки по сравнению с временным продольным сооружением — возможность быстрой установки и переноса и применение одной наливной перемычки для намыва нескольких запруд.

При значительном падении уровней в перекрываемом рукаве намываются одновременно две параллельные запруды, что облегчает перекрытие их проранов, так как падение в рукаве делится между ними и скорости в обоих проранах будут меньше, чем в одном, но не получается при этом обжатого профиля запруды.

Струенаправляющие продольные дамбы из рефулированного грунта строятся с расчетом на минимальный поперечный перелив воды через них на спаде паводка. Отметки гребня выбирают на высоте того уровня на спаде паводка, при котором начинается интенсивный поперечный слив воды из главного русла в отделяемую дамбой боковую емкость (затонскую часть, побочневую протоку и др.). Отметки гребня, удовлетворяющие этому условию, находят расчетом или простейшими поплавочными наблюдениями в месте возведения сооружения.

Практически отметка гребня в голове дамбы получается равной 1—3 м над проектным уровнем. Гребню дамбы в продольном направлении придают уклон поверхности потока при расчетном уровне, при этом его желательно делать несколько ниже уровня наинизшей весенней подвижки льда.

Намыв продольных сооружений значительно проще, чем запруд и полузапруд, так как: а) сброс грунтовой смеси землесосом производится в тихую воду, образующуюся воздействием на поток уже намытой части сооружения; б) унос грунта вследствие намыва сооружения по течению значительно меньше (в 2—3 раза), чем при намыве навстречу или нормально к течению; в) концевой понтон устанавливается в наивыгоднейшее положение, при котором смесь сбрасывается навстречу потоку; г) перестановки концевого понтона проще и меньше затраты времени на остановки землесоса, при которых намыв прерывается и намытая часть сооружения может разрушаться.

Укрепление надводного профиля намывных сооружений значительно повышает сопротивляемость их размыву течением воды и разрушению ледоходом, но в большинстве случаев и значительно повышает стоимость сооружений. В ряде случаев более экономично оставлять эти сооружения неукрепленными и ежегодно ремонтировать их, подсыпая или намывая грунт в их тело. Нельзя оставлять неукрепленными намывные запруды, перекрывающие активно работающие в паводок протоки, и все намывные сооружения, расположенные в местах образования ледовых заторов.

Насыпные грунтовые сооружения в русле реки можно возводить: 1) отсыпкой из шаланд; 2) непосредственно многочерпаковыми снарядами или плавучими грейферами с разработкой грунта в русловом карьере, расположенном вдоль сооружения; 3) бульдозером с разработкой грунта в береговом карьере, расположенном у места отсыпки сооружения, или бульдозером с перемещением грунта в сооружение из резерва, намытого землесосом. Выбор способа отсыпки зависит от конструктивных особенностей сооружения и, в частности, от его поперечного профиля, местных условий и производственных возможностей.

Шаландами, нагружаемыми многочерпаковыми снарядами, отсыпаются выправительные сооружения из песчано-гравелистых грунтов. Отсыпка шаландами применяется тогда, когда нельзя использовать землесосы из-за отсутствия вблизи грунтов, пригод-

ных для намыва. Сооружение, отсыпанное шаландами, имеет откосы от 1:3 до 1:8 в зависимости от крупности грунтов и глубины в его створе. Шаландами можно отсыпать сооружение до проектной отметки только при высоких уровнях, когда глубина над его гребнем не меньше осадки шаланд. Неполная же отсыпка сооружения шаландами целесообразна всегда, когда можно подойти к его створу груженым шаландам.

По площади сооружения грунт отсыпается шаландами одинаковым слоем, но в первую очередь в местных углублениях русла, а затем уже идет отсыпка полного профиля сооружения. Шаландами нельзя отсыпать сооружение до проектного профиля, и поэтому после спада уровня его досыпают, снимают лишний грунт и планируют откосы плавучим грейфером (рис. 166) или береговыми машинами.

Многочерпаковыми снарядами непосредственно отсыпаются сооружения из песчано-гравелистых и гравелисто-галечных грунтов. Снарядом с обычными короткими лотками, как и шаландами, можно отсыпать сооружение только при высоких уровнях, когда глубина над ним больше осадки снаряда. Для отсыпки, например, полузапруды снаряд устанавливается рамой против течения, т. е. поперек оси сооружения, и забирает грунт перед полузапрудой, папильонируя вдоль ее напорного откоса. При этом отсыпка грунта через лоток ведется вдоль полузапруды от корня к голове. После спада уровней сооружение достраивается и откосы планируются так же, как и после отсыпки шаландами.

Многочерпаковым снарядом с длинным или удлиненным лотком полузапруду можно отсыпать от корня к голове и при низких уровнях, если глубины достаточны для его прохода к корню полузапруды. При этом снаряд устанавливается рамой вдоль оси сооружения, т. е. поперек течения, и отсыпка ведется из траншеи, разрабатываемой вдоль напорного откоса (рис. 167). Таким же снарядом, но при недостаточных глубинах, для прохода к корню снаряд сначала устанавливают, как обычно, т. е. рамой против течения, и отсыпают головную часть сооружения, которую сразу

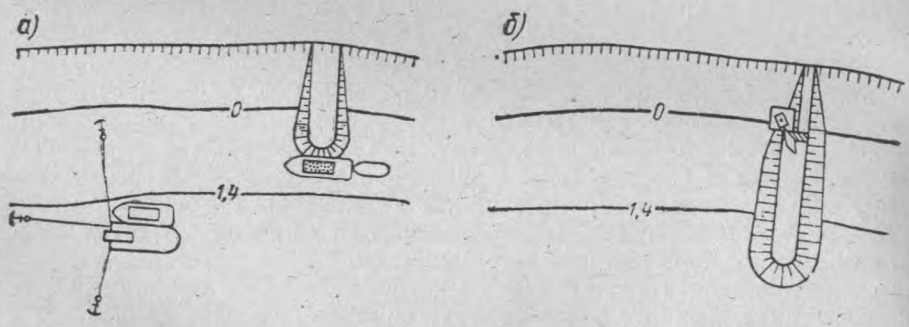


Рис. 166. Схема отсыпки полузапруды:
а — отсыпка основания шаландами; *б* — досыпка верхней части плавкраном

же укрепляют. Затем переставляют снаряд вдоль оси сооружения и, разрабатывая траншею вдоль напорного откоса, отсыпают сооружение от головы к корню. После отсыпки гребень сооружения разравнивается бульдозером, поверхность при надобности укрепляют, материал для крепления подается в баржах по траншее и укладывается по поверхности плавучим грейфером.

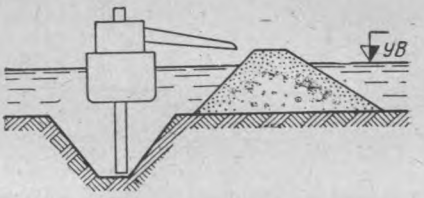


Рис. 167. Схема отсыпки полузапруды многочерпаковым снарядом с удлиненным лотком

Плавучим грейфером возможна отсыпка выправительных сооружений из песка, гравия и гальки. До полного профиля отсыпаются сооружения из крупных грунтов на больших глубинах и при небольших скоростях течения. Сооружения из песка и при больших скоростях течения в подводной части намываются землесосом, а в надводной — отсыпаются грейфером. Карьер для забора грунта располагают с обеих сторон или с одной напорной стороны сооружения. Грейфер отсыпает сооружения очень неровно, и поэтому с ним должен работать бульдозер для разравнивания грунта.

Грунтовые сооружения, отсыпаемые шаландами, непосредственно многочерпаковыми снарядами или плавучими грейферами из песчано-гравелистых грунтов, имеют подводные откосы: напорный от 1:3 до 1:4 и сливной от 1:6 до 1:10; надводные — от 1:3 до 1:5.

Береговыми землеройными машинами можно отсыпать грунтовые сооружения самостоятельно или в комплексе с землесосами. Отсыпка сооружений небольшой длины (до 150 м) и при небольших скоростях течения экономичнее одними береговыми машинами, так как при этом получается обжатый профиль сооружений. Возведение сооружений большой длины и при значительных скоростях течения экономичнее комплексным способом, при котором подводная часть намывается землесосом, а надводная — отсыпается береговыми машинами из намытого резерва грунта (рис. 168).

В этом случае потери грунта при отсыпке подводной части береговой машиной больше уноса при ее намыве.

Рассмотрим отсыпку грунтовой полузапруды полностью береговой машиной — бульдозером. Отсыпка грунтовой полузапруды бульдозером ведется по длине от берега к голове и в два яруса по высоте. В первую очередь отсыпается тело сооружения до отметки 0,2—0,5 м выше рабочего уровня и во вторую очередь — до проектной отметки гребня.

При возведении первого яруса насыпи грунт перемещается из берегового карьера бульдозером в воду в пределах всей ширины этого яруса на уровне принятой отметки. Грунт перемещается на

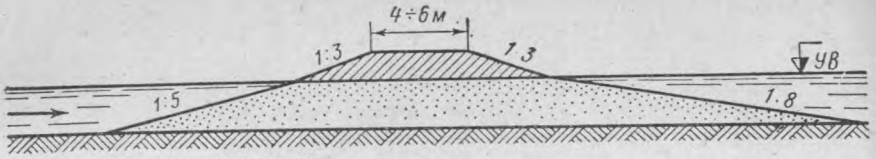


Рис. 168. Поперечный профиль грунтового сооружения (намывного в подводной части и насыпного в надводной)

длину до 20 м веерообразными проходами бульдозера, который возвращается обратно задним ходом (рис. 169).

После возведения первого 20-метрового участка насыпи на полную ширину первого яруса бульдозер начинает отсыпку следующего участка тоже веерообразными проходами. При этом он может разворачиваться и обратно возвращаться по отсыпанному первому участку прямым ходом.

Для возведения второго яруса насыпи (рис. 170) бульдозер перемещает грунт по ходовой траншее к голове полузапруды или дамбы, откуда и начинает отсыпку. Каждый рабочий участок второго яруса длиной не более 20 м отсыпается по высоте наклонными слоями, причем отсыпка в конце участка доводится до проектной отметки гребня. Дойдя задним ходом до начала рабочего участка, т. е. до отметки первого яруса, бульдозер разворачивается и возвращается к резерву уже прямым ходом.

По мере отсыпки полузапруды до проектных отметок производится планировка и обделка под проектный профиль ее гребня бульдозером и надводных откосов — навесным планировочным щитом. Насыпь тела грунтового сооружения при надобности крепят, и в возможно короткие сроки.

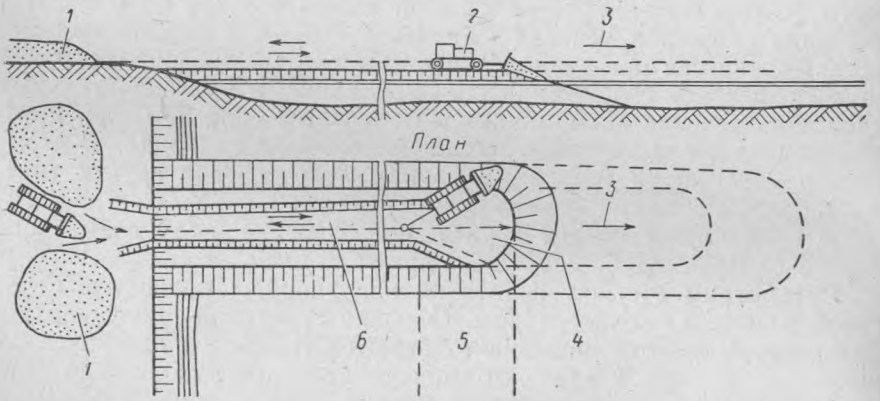


Рис. 169. Схема отсыпки нижнего яруса насыпи полузапруды веерообразными проходами бульдозера:

1 — береговой резерв грунта; *2* — бульдозер; *3* — направление отсыпки насыпи; *4* — место отсыпки веерообразными проходами бульдозера; *5* — рабочий участок отсыпки длиной 5—20 м; *6* — траншейка для прохода бульдозера при перемещении грунта

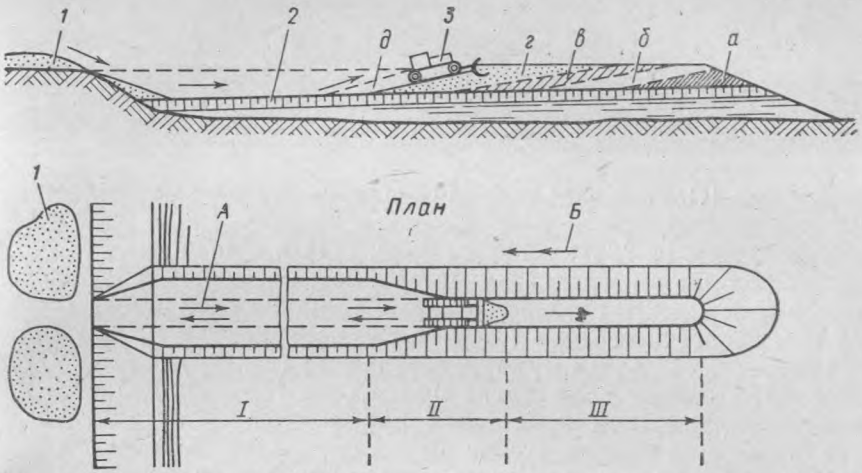


Рис. 170. Схема отсыпки бульдозером верхнего яруса насыпи при небольшой ширине гребня:

1 — береговой резерв грунта; *2* — отсыпанный первый ярус насыпи; *3* — отсыпка второго яруса насыпи бульдозером; *а, б, в, г, д* — последовательность отсыпки; *А* — направление хода бульдозера; *Б* — направление отсыпки второго яруса насыпи (гребня); *I* — участок перемещения бульдозера прямым ходом вперед и обратно; *II* — участок отсыпки с обратным перемещением бульдозера задним ходом; *III* — участок законченной отсыпки до отметки гребня

Береговые землеройные машины при возведении сооружений из грунта применяются преимущественно совместно с землесосами, а не самостоятельно. При этом землесос, как уже упоминалось, намывает подводную часть и резерв грунта для отсыпки надводной части береговыми машинами. Для образования этого резерва подводная часть намывается шире профиля сооружения и на 0,3—0,5 м выше рабочего уровня воды. Объем резерва примерно в 1,5 раза должен быть больше объема отсыпаемой части сооружения, так как довольно большие потери грунта получаются при работе береговых машин. Допускается также отсыпка надводной части из берегового карьера автосамосвалами с разравниванием затем бульдозерами, если резерв намыть невозможно. Ширина гребня насыпной части такого сооружения составляет 4—6 м, откосы — от 1:3 до 1:5.

Тип крепления гребня и надводных откосов грунтовых сооружений определяется условиями работы сооружения и производственными возможностями. Эти укрепления должны быть: достаточно прочными, чтобы противостоять размыву потоком и разрушению ледоходом; морозостойкими; допускать применение механизации работ по их возведению и использование местных строительных материалов.

Гребень и надводные откосы грунтовых сооружений при надобности укрепляются преимущественно мелкообломочным материалом (гравием, щебнем, металлургическим шлаком, галькой), реже — каменной наброской и хворостяными покрытиями (тюфяками или матами с пригрузкой).

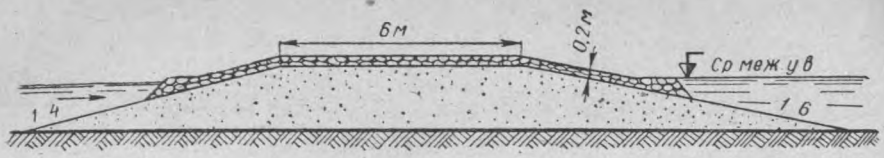


Рис. 171. Укрепление профиля грунтового сооружения щебнем

Укрепление из гравия, щебня (рис. 171) и шлака представляет собой равномерный слой этих материалов, насыпаемый по укрепляемой поверхности гребня и откосов. Толщина слоя щебня (гальки) при скорости течения 1,5—2 м/с — не менее 0,2 м, при бо́льших скоростях — до 0,4 м; крупность щебня (гальки) определяется расчетом. Толщина слоя шлака при тех же условиях делается несколько больше, при этом шлак применяется несортированный, преобладающий размер кусков шлака определяется расчетом.

Мелкообломочные материалы укладываются на откосы и гребень сооружения сразу же после его возведения, так как им не опасны осадки грунта в сооружении; кроме того, для них не требуется тщательная планировка поверхности сооружения. Нижняя грань крепления доводится до 1,5 м ниже проектного уровня и может кончаться упорной призмой; уклоны откосов колеблются примерно от 1:4 до 1:6. Гравийно-галечные крепления выдерживают в некоторых случаях даже тяжелые условия ледохода. Мелкообломочные материалы сравнительно широко распространены, возможна механизация их добычи и укладки, по стоимости они пока наиболее дешевые. В связи с этим в ближайшие годы можно ожидать широкого их использования в креплениях.

Каменной наброской можно укреплять надводные и подводные откосы грунтовых сооружений на всех реках, в любое время года и при любых условиях ледохода. При этом, так же как при укладке гравия и щебня, можно не ждать окончания осадки грунта в сооружении. Экономически такое крепление оправдывается при наличии местного дешевого камня и при достаточно устойчивых грунтах основания сооружений, а вообще оно более дорогое, чем крепление из мелкообломочных материалов. Подводная наброска камня (без подбора) образует откосы с уклонами от 1:1,5 до 1:3 в зависимости от глубины и скорости течения, а при надводной наброске крупных камней этот уклон может быть 1:1, но не должен превышать уклона, соответствующего углу внутреннего трения основания.

При отсутствии в достаточном объеме местного гравия, щебня или шлака для укрепления грунтового сооружения, а также при невозможности механизировать эти работы могут применяться хворостяные тюфяки или маты.

Хворостяные тюфяки толщиной 0,35—0,45 м, пригруженные камнем, применяют для укрепления грунтовых сооружений, подверженных воздействию интенсивного перелива воды че-

рез их гребень, ледохода и других факторов. Хворостяными тюфяками могут укрепляться и подводные откосы намывных сооружений.

Хворостяные маты представляют собой плотные, скрепленные проволокой покрывала, изготовляемые в виде лент шириной 3 м. Хворостяные маты укладывают на поверхности грунтового сооружения с перекрытием и скрепляют между собой плетневыми клетками, пригружаемыми слоем камня, гравия или глины. При устройстве крепления из хворостяных материалов необходимо обеспечить условия для прорастания хвороста.

Хворостяные покрытия обладают рядом преимуществ по сравнению с предыдущими креплениями: хворост для них широко распространен на многих реках; они эластичны — следуют за деформациями сооружения; под водой долго сохраняются. Одновременно эти покрытия имеют и существенные недостатки: трудность механизации и большая трудоемкость работ по их возведению и соответственно высокая стоимость; недолговечность при попеременной работе над водой и под водой; небольшая устойчивость при воздействии ледохода. В связи с этими недостатками применение покрытий из хвороста в последние годы резко уменьшается.

§ 69. СВАЙНЫЕ И СВАЙНО-ГРУНТОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ

В свайных и свайно-грунтовых сооружениях, возводимых на некоторых реках, основную рабочую часть составляет сплошная стенка из свай диаметром 16—20 см, забитых на глубину 2—3 м. Такая свайная стенка может быть с гравийно-галечной постелью, с намытыми грунтовыми призмами или с отсыпанными и укрепленными призмами из грунта.

Сооружения свайные и свайно-грунтовые применяют в качестве полузапруд, запруд и продольных дамб. Отметки голов этих сооружений определяются расчетом и обычно получаются для сооружений меженного действия на 1—2 м выше проектного уровня. При этом соблюдается условие сохранности их при весеннем ледоходе.

Сваи забивают вплотную друг к другу, от корня к голове сооружения, и так, чтобы стенка из них имела в русловой части подъем гребня к берегу с уклоном от 1:100 до 1:300, а в прикорневой части — с уклоном 1:25. Забивка свай ведется сваебойным агрегатом, размещающимся на понтоне, с помощью дизель-молота, пневматического молота, работающего от компрессора, или вибромолота; на легких грунтах сваи можно опускать подмывом. Сваебойный агрегат перемещают при помощи тросов, закрепленных за якоря.

В свайных сооружениях с постелью свайная стенка забивается сквозь предварительно отсыпанную постель из гравия и гальки, которая служит для защиты дна от размыва (рис. 172). Такие сооружения применяются там, где на них не будет воздейство-

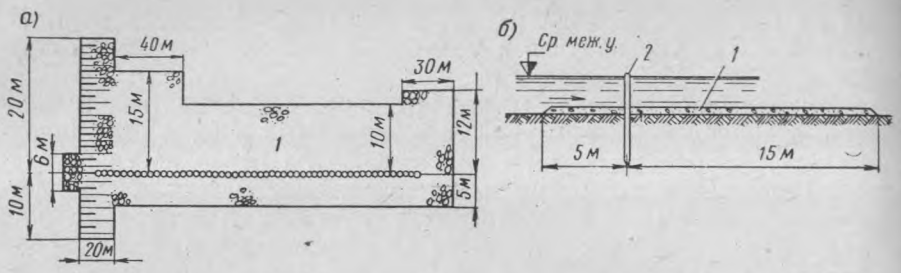


Рис. 172. Свайное сооружение с гравелисто-галечной постелью:
а — план; *б* — разрез; *1* — постель; *2* — сплошной свайный ряд

вать ледоход. Для возведения свайных сооружений с постелью по схеме, показанной на рис. 173, требуются: шаландер с шаландой для подвозки гравийно-галечного грунта и отсыпки его из шаланды в постель и сваебойный агрегат (копер) для забивки стенки.

При возведении сооружений из свай с намывными грунтовыми призмами предварительно забивается свайная стенка, а затем намываются землесосом верховая и низовая грунтовые призмы. Ось свайной стенки намечается по сливной грани гребня сооружения, чтобы его тело в основном располагалось выше стенки.

В свайно-грунтовых сооружениях из свай с насыпными грунтовыми призмами (рис. 174) тело этих призм отсыпается из местных песков, с откосами 1:2 и 1:2,5, а поверхность призм и дно реки со сливной стороны покрываются слоем гальки и гравия толщиной 0,5 м. Головная часть сооружения длиной 25—30 м отсыпается полностью из гравийно-галечного грунта и делается расширенного профиля, с низовым откосом 1:4 или 1:5. Такие сооружения применяют там, где на них воздействует ледоход.

Для возведения свайно-грунтовых сооружений с призмами по схеме, приведенной на рис. 175, используются, кроме сваебойного копра и шаландера с шаландой, еще грейферный снаряд и баржа. Отсыпка грунта в тело сооружения ведется этим грейферным сна-

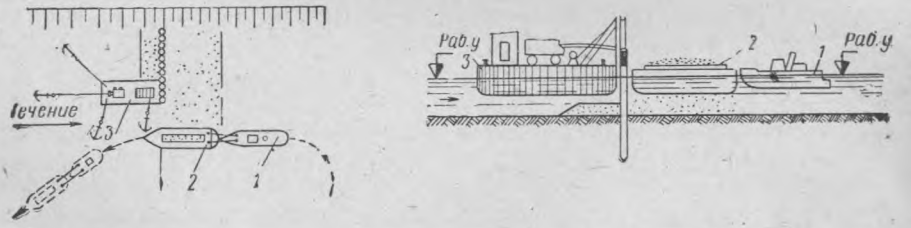


Рис. 173. Схема возведения свайного сооружения с гравелисто-галечной постелью:
1 — шаландер; *2* — шаланда; *3* — сваебойный копер

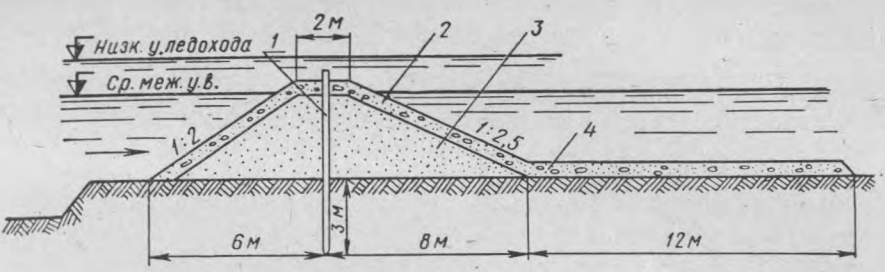


Рис. 174. Поперечный разрез свайного сооружения с грунтовой призмой:
1 — сплошной свайный ряд; *2* — гравийное покрытие; *3* — песчаная призма; *4* — постель из гравия

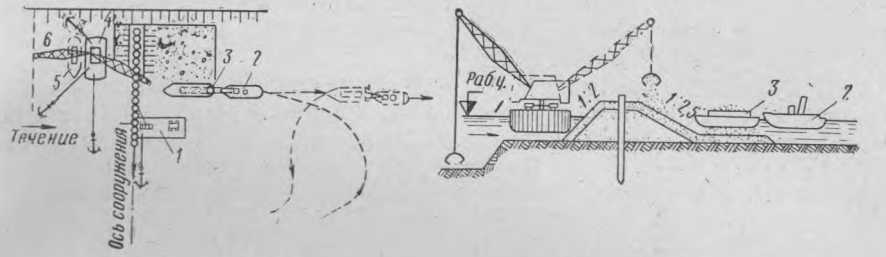


Рис. 175. Схема возведения свайно-грунтового сооружения с призмами:
1 — сваебойный копер; *2* — шаланде; *3* — шаланда; *4* — грейферный снаряд; *5* — баржа с гравием; *6* — карьер забора грунта

рядом, перемещающимся на тросах с верховой стороны предварительно забитой свайной стенки, причем грунт для тела сооружения берется непосредственно со дна реки выше сооружения. Для того чтобы образующаяся выемка не угрожала устойчивости сооружения, применяют грейферные снаряды с вылетом стрелы не менее 12 м. Этот же снаряд ведет и отсыпку по поверхности сооружения защитного слоя гравия, забирая его из поданной к его борту баржи. Гравийно-галечную постель за низовым откосом насыпают из шаланд ровным слоем, открывая для этого люки постепенно. Выгрузка возможна при очень малом запасе воды под днищем груженой шаланды.

§ 70. БЕРЕГОВЫЕ УКРЕПЛЕНИЯ

Размываемые берега можно укреплять: 1) посевом трав и посадкой кустарника и деревьев; 2) хворостяными покрытиями; 3) камнем и мелкообломочными материалами; 4) бетонными и асфальтовыми покрытиями; 5) химическими и синтетическими материалами.

При выправлении рек размываемые берега укрепляются преимущественно каменной укладкой в надводной части и каменной наброской или хворостяными тюфяками с пригрузкой камнем в

подводной части, а также короткими грунтовыми полузапрудами (шпорами). Следует сразу же заметить, что использование хвороста при укреплении берегов, как и при возведении русловых сооружений, в последние годы резко сокращается.

Укрепление берегов бетонными и асфальтовыми покрытиями при выправлении рек пока применяется редко, только в тех случаях, когда укрепление берега необходимо также для защиты от размыва территории города, промышленного предприятия, порта или другого объекта. Но эти покрытия перспективны для использования и вообще при выправлении рек, а поэтому далее рассматриваются.

Укрепление берегов посевом трав, посадкой кустарника и деревьев является простым и в некоторых случаях эффективным способом защиты от размыва, но из-за целого ряда существенных недостатков применяется редко и в небольших размерах, поэтому здесь не рассматривается.

Исследования химических и синтетических материалов могут привести к созданию совершенно новых видов креплений берегов, которые снизят трудоемкость и стоимость их возведения. Такие исследования ведутся по двум направлениям: 1) изыскиваются химические материалы, т. е. различные отвердители, образующие в смеси с грунтом прочные соединения; 2) подбираются синтетические материалы, пригодные для изготовления матов и оболочек, укрепляющих берега. Пока крепления из химических и синтетических материалов и способы их изготовления недостаточно отработаны и находятся в опытной проверке, но исследования эти должны быть перспективными.

Крепление надводных откосов каменной укладкой выполняется только после устройства надежного упора по подошве надводного откоса. Камень при креплении откосов укладывается по подстилочному слою из щебня, гравия или шлака. Для крепления камнем надводный откос берега предварительно планируется под уклон не круче 1:2. При этом подводный откос может быть укреплен каменной наброской, хворостяным тюфяком или другим покрытием.

Сопряжение надводного крепления берега из каменной укладки с подводным креплением производится отсыпкой каменной упорной призмы, которая начинается от средненизкого уровня и доводится до среднемеженного уровня, где начинается каменная укладка. Упорная призма имеет ширину 1—1,5 м и речной откос с уклоном 1:1,5 (рис. 176).

Крупность камней в укладке определяется расчетом в зависимости от скорости течения и интенсивности ледохода. Толщина подстилающего слоя составляет 0,1 м. По высоте берега каменная укладка заканчивается на 0,5 м выше наивысшего весеннего ледохода при незатопляемых берегах. Если крепится невысокий (затопляемый) берег, то горизонтальная площадка укладки заходит за бровку берега на 1,5—2 м, причем на бровке выкладывается из крупных камней бордюр укладки.

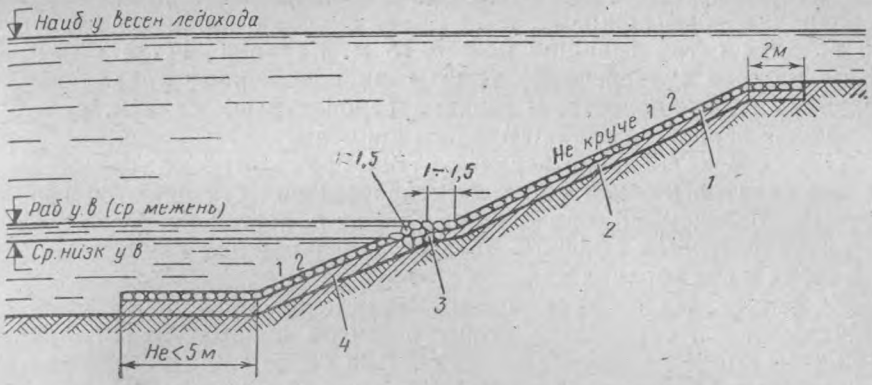


Рис. 176. Укрепление надводных береговых откосов каменной укладкой (затопляемый берег):
1 — каменная укладка; *2* — слой щебня толщиной 0,1 м; *3* — сопрягающая призма; *4*—хворостяной тюфяк с загрузкой камнем

Хворостяными тюфяками крепятся преимущественно подводные откосы. Хворостяной тюфяк представляет собой большое по площади, но сравнительно небольшое по высоте хворостяное тело, заключенное между двумя сетками хворостяных канатов, связанных между собой. Площадь малых тюфяков доходит до 200 м², больших — до 500 м², толщина преимущественно 0,35—0,45 м. Тюфяки имеют нижнюю сетку из хворостяных канатов, два взаимно перпендикулярных слоя хвороста и верхнюю сетку также из канатов (рис. 177).

Нижняя сетка состоит из нижних (продольных) канатов, располагаемых поперек течения реки через 1 м один от другого, и верхних (поперечных), расположенных перпендикулярно нижним на таком же расстоянии один от другого. В местах пересечений обоих канатов их перевязывают по диагонали проволокой или тонкой смольной веревкой.

Нижний слой хвороста укладывают параллельно нижним канатам нижней сетки, он имеет вместе с верхними канатами этой

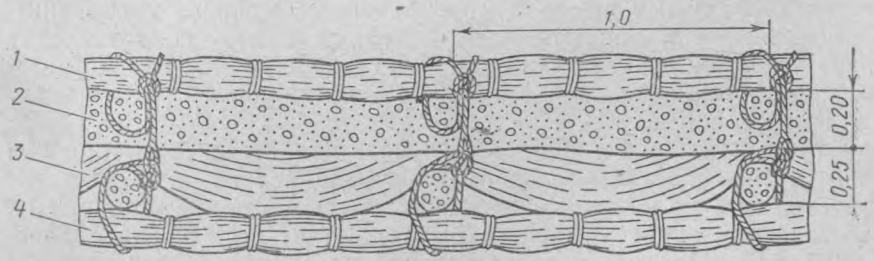


Рис. 177. Хворостяной тюфяк:
1 — верхний канат верхней сетки; *2* — верхний слой хвороста; *3* — нижний слой хвороста; *4* — нижний канат нижней сетки

сетки толщину 0,25—0,20 м. Верхний слой хвороста располагают перпендикулярно нижнему, и он имеет вместе с нижними канатами верхней сетки толщину 0,20—0,15 м. Верхняя сетка тюфяка имеет нижние (поперечные) канаты, расположенные параллельно верхнему слою хвороста, и верхние (продольные) канаты, расположенные перпендикулярно нижним канатам.

Пересечения канатов верхней сетки приходятся над пересечениями канатов нижней сетки. Эти пересечения стягиваются веревочными подвязками, проходящими через оба слоя хвороста. Толщина хворостяных тюфяков считается без нижних канатов нижней сетки и без верхних канатов верхней сетки.

Хворостяными тюфяками при укреплении подводного откоса перекрывают последний по всей его высоте и намеченной длине. При этом подводный откос планируют не круче 1:2, чтобы не было сползания тюфяков вниз по откосу под влиянием собственного веса.

Верхний по высоте откоса край подводных тюфяков во избежание их гниения доводят только до средненизкого уровня воды, а нижний край—до конца откоса и выводят за его подошву на дно на длину 5—10 м и более. Длина перекрытия тюфяками дна зависит от его рельефа, скорости течения и глубины. Тюфяки для подводных откосов изготовляют длиной не менее 15 м, чтобы их не сдвинуло с места льдинами или случайно заброшенными якорями.

При производстве работ тюфяки, изготовленные на береговом или плавучем стапеле, спускают на воду, буксируют к месту потопления и счаливают в непрерывную тюфячную ленту, которая затем последовательно затапливается на месте укладки. Загрузка ленты тюфяков производится равномерной отсыпкой камня от береговой стороны к реке и в направлении от напорного края к сливному, т. е. от верховой по течению кромки ленты к низовой.

Бетонные плиты и бетонные тюфяки, применяемые при укреплении берегов, наиболее долговечны и, кроме того, при устройстве их возможна полная механизация работ.

Бетонные плиты в зависимости от условий их работы, способа изготовления, размеров и организации производства делают армированными или неармированными. Основное требование, предъявляемое к покрытиям из бетонных плит,— сопротивление размывающему действию потока. Это обеспечивается весом бетонных плит и предотвращением выноса подстилающего грунта через щели между ними.

Форма плиты в большинстве случаев делается квадратной или прямоугольной. Наиболее часто встречающаяся толщина плит колеблется от 8 до 20 см. Размеры квадратных в плане плит при их изготовлении заводским способом делают от 0,7×0,7 до 3×3 м. Плиты, бетонируемые непосредственно на откосе, имеют размеры в плане от 4×4 до 10×10 м и толщину 10—30 см.

Вес бетонных плит, изготовляемых заводским способом, при соблюдении требования устойчивости должен также соответство-

вать грузоподъемности применяемых средств механизации. Для предотвращения выноса частиц основания из-под бетонных плит устраивают под ними обратный фильтр с диаметром частиц верхнего слоя, несколько бо́льшим ширины щелей между соседними плитами. Для придания бо́льшей устойчивости и монолитности бетонные плиты делают армированными с выпусками арматуры, которые позволяют соединять соседние плиты в сплошное бетонное покрытие.

Бетонные плиты при больших объемах работ изготовляют на заводе и доставляют на место укладки в готовом виде. В этом случае значительно удешевляется их изготовление и, следовательно, снижается стоимость бетонного покрытия в целом. В отдельных случаях изготовляют плиты непосредственно на строительной площадке с применением минимальной механизации.

Бетонные плиты применяют главным образом для укрепления надводных береговых откосов (рис. 178) при значительных скоростях течения воды и большой высоте волны. Плиты применяют как бетонируемые непосредственно на откосе (монолитные), так и заводского изготовления (сборные).

Для бетонирования надводного откоса или укладки бетонных плит берег предварительно срезают и планируют под откос не круче 1:2. При этом подводный откос укрепляют каменной наброской, тюфяками или другим покрытием. По всей поверхности укрепляемого плитами откоса обычно укладывают обратный фильтр. Кроме того, на уровне сопряжения надводного откоса с подводным укладывают упорную каменную призму или у нижнего ряда плит делают бетонный зуб для предохранения от сползания надводного крепления.

Сборные бетонные плиты укладывают после приемки упорной призмы, обратного фильтра и проверки ровности поверхности основания. При перевозке и укладке сборные плиты перемещают

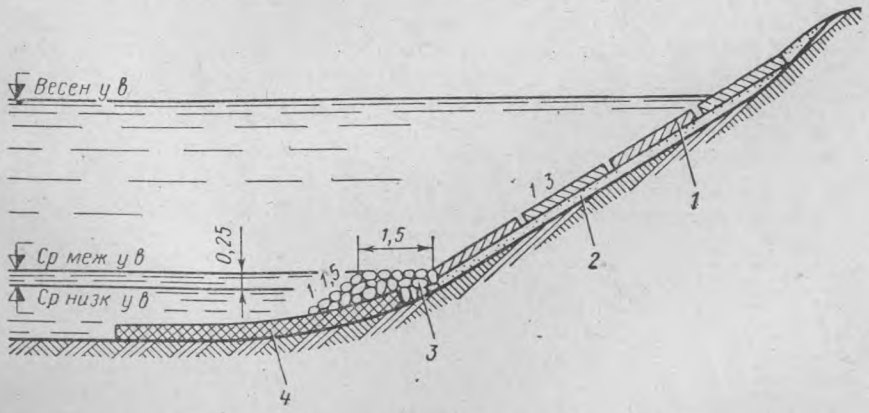


Рис. 178. Укрепление берегового откоса бетонными плитами:
1 — плита толщиной 0,15 м; *2* — подстилающий слой толщиной 0,2 м; *3* — сопрягающая призма из каменной наброски; *4* — хворостяной тюфяк

кранами, оборудованными крюками для зацепления за монтажные петли.

На откосе плиты укладывают снизу вверх по откосу параллельными рядами на всю длину участка крепления. Толщина открытого шва между плитами должна быть такой, чтобы щебень не вымывался из обратного фильтра. Уложенные на откосе плиты соединяют шарнирами в виде хомутов. После укладки плит и монтажа шарниров красят шарнирные соединения и открытые части арматуры.

Монолитными бетонными плитами крепление откосов выполняется непосредственно на откосе и состоит, кроме планировки откоса и устройства обратного фильтра, из укладки слоя жесткого бетона и изготовления армированных бетонных плит. Слой жесткого бетона толщиной 2—3 см укладывают по обратному фильтру для уменьшения утечки цементного молока из нижнего слоя бетона в начальный период бетонирования.

Арматурные сетки изготавливают в арматурной мастерской или на береговой площадке и доставляют к месту укладки. Нижнюю арматурную сетку укладывают на подготовку из жесткого бетона, верхнюю — после бетонирования плиты примерно на $^2/_3$ ее толщины. Арматурные сетки соседних плит стыкуют внахлестку, скрепляя их проволокой или сваркой.

При небольших объемах бетонной кладки заготовка бетона выполняется на передвижной бетономешалке, а при значительных — на приобъектной бетонной установке. Во избежание деформации арматурной сетки бетон выгружают с высоты не более 3 м и с постепенным (без рывков) опрокидыванием бадьи или ковша. Уплотняют бетон глубинным или поверхностным вибратором.

Каждую отдельную плиту бетонируют в один прием без перерыва и без образования других швов, кроме заданных. Перерывы в бетонировании допускаются только по швам сопряжения отдельных плит. После бетонирования и первоначального схватывания поверхность свежего бетона затирают цементным тестом для придания ей гладкости и создания плотности и морозоустойчивости. Для образования стыков устанавливают по контуру плит на ребро пропитанные креозотом доски, которые являются и опалубкой при бетонировании плит.

К недостаткам бетонной одежды берегов следует отнести возможность расстройства ее от неравномерной осадки. Чтобы это исключить, необходимо тщательно уплотнять подстилающий слой. На грунтах, способных пучиться, кроме подстилающего обратного фильтра, насыпают песчаную подушку промерзания.

Каменная упорная призма начинается на отметке средненизкого уровня, где кончается подводный тюфяк, и возводится в большинстве случаев до отметки среднемеженного уровня, где начинается крепление откоса бетонными плитами (см. рис. 178).

Армированные бетонные тюфяки длиной 7,5 м, шириной 1,2 м и толщиной 7,5 см, применяемые на р. Миссисипи, могут быть использованы и на наших реках. Такой тюфяк состоит

из 25 плиток шириной по 0,3 м каждая, соединенных арматурой. Эти тюфяки изготовляются на специальных механизированных предприятиях.

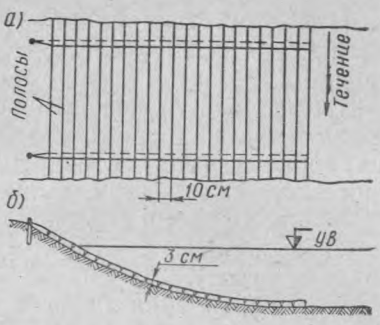


Рис. 179. Гибкий бетонный мат: *а* — план; *б* — разрез

Для изготовления армированных бетонных тюфяков сначала из омедненной проволоки диаметром 4 мм делают каркасы, которые укладывают в специальные формы и в формах бетонируют. Бетон приготовляют из цемента низшей марки и в тех же формах около 2 ч подвергают специальной обработке при высокой температуре, а формы пропаривают. Полученные тюфяки специальным захватным приспособлением подают на склад, где они окончательно затвердевают и откуда их развозят по местам работы.

Армированные бетонные тюфяки укладывают тоже на предварительно спланированный береговой откос, который уже засыпан гравием и утрамбован. Затем с двух перпендикулярно расположенных друг к другу судов с помощью установленных на них кранов, а также лебедки или трактора на берегу укладывают тюфяки на береговом откосе и по дну. Уложенные тюфяки связывают по длине и крепят к откосу анкерными болтами, а береговой откос после укладки тюфяков асфальтируют.

На р. Миссисипи для укрепления берегов также применяют армированные маты размером в плане 7,3×18,3 м и толщиной 3 см, состоящие из цементобетонных полос (плит) шириной 10 см, соединенных арматурной проволокой (рис. 179). Для придания такому мату гибкости срезают боковые грани соседних полос. Маты отливают в специальных формах, откуда их после затвердевания бетона извлекают и наматывают на деревянный сердечник, образуя таким образом рулон диаметром 0,9 м.

Такие рулоны погружают на специальный понтон, имеющий кран и рядом с ним станину с большим пустотелым стальным барабаном. На этот барабан перематывают с сердечников готовые маты, причем концы арматурной проволоки предыдущего мата связывают с концами проволоки последующего мата и, таким образом, составляют покрывала требуемой длины.

Армированные цементобетонные маты тоже укладывают на спланированный откос. Кран поднимает их с понтона вместе с барабаном и переносит на бровку укрепляемого откоса; концы арматуры закрепляют на берегу, а барабан скатывается вниз по откосу, и мат покрывает откос сверху донизу, включая и подводную часть. Очередной мат укладывают с перекрытием предыдущего. Благодаря своей гибкости эти маты хорошо прилегают к откосу берега и дну. Уложенные на надводном откосе маты защищают слоем асфальта.

При отсутствии на рабочем судне подъемного крана ленты мата можно укладывать с помощью лебедки и шарнирного трапа (рис. 180). В этом случае после установки судна рулон бетонной ленты судовой лебедкой и тросом, пропущенным через блок, закрепленный на берегу, скатывают к урезу воды по откидному шарнирному трапу и закрепляют за береговой упор, после чего трос судовой лебедки снимают с берегового блока и судно отводят от берега. Барабан скатывается лебедкой по откосу, бетонная лента мата при этом сматывается с барабана и укладывается по подводному откосу.

При укреплении берегов бетонными плитами, тюфяками или матами необходимо особенно тщательно укладывать по откосу обратный фильтр. На несвязных грунтах обратные фильтры устраивают из нескольких слоев, на связных—обычно однослойными. Материалами для фильтров служат песок, гравий, галька и щебень. Во избежание заиления обратные фильтры должны быть защищены от попадания в них загрязненных ливневых вод.

Основное условие надежной работы фильтра состоит в том, чтобы частицы одного слоя (или дренируемого основания) не могли проникать в промежутки между частицами другого слоя. Крупность материала слоев фильтра возрастает от его основания к поверхности, т. е. по направлению движения фильтрационного потока.

Для удешевления монолитных бетонных покрытий в Московском филиале ЛИВТа проведены исследования применения другого материала — грунтобетона, состоящего из песка (~70%), глины (~15%) и цемента (~15%) с добавлением иногда для морозостойкости раствора хлористого кальция. Грунтобетон — достаточно прочный, морозостойкий и водостойкий материал, пригодный для береговых покрытий, толщина которых из этого материала колеблется от 12 до 20 см в зависимости от волновых и ледовых нагрузок.

Откос под крепление грунтобетоном планируют под уклон 1:3 — 1:4 и уплотняют. Грунтобетонную смесь приготовляют в растворомешалке, затем укладывают на откос в опалубку, уплотняют вибратором и посыпают слоем песка. Смесь можно приготовлять и прямо на откосе с помощью самоходного грунтосмесителя. Опыт возведения таких креплений на реках Северной Двине и Вычегде дал положительные результаты.

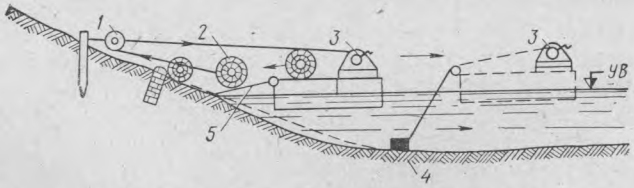


Рис. 180. Укладка гибкого бетонного мата с судна:
1 — блок; *2* — гибкий бетонный мат, скатанный в рулон; *3* — лебедка; *4* — рулон, раскатанный по откосу; *5* — шарнирный трап

Асфальтовые тюфяки, применяемые при укреплении берегов, представляют собой битумное покрытие, обладающее достаточной гибкостью и не имеющее незащищенной от воды арматуры и швов, через которые может вымываться грунт укрепляемого откоса. Основой асфальтовых тюфяков является проволочная сетка, диаметр проволоки которой 4—6 мм (рис. 181). Применяемые американцами асфальтовые тюфяки имеют размеры 65×9 м при толщине 5 см и весе около 80 т.

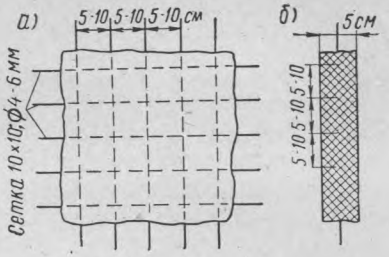


Рис. 181. Асфальтовый тюфяк:
а — план; *б* — разрез

Асфальтовые тюфяки при правильном подборе состава асфальтовой массы отличаются достаточной твердостью при высоких температурах и гибкостью — при низких. Они меньше подвержены образованию трещин при неровностях на укрепляемом откосе, чем бетонные тюфяки. При этом арматура должна быть достаточно гибкой, в противном случае она может разрезать асфальт, особенно при небольшой его толщине. Американцы изготовляют асфальтовые тюфяки на месте работы на специальных баржах.

При укреплении надводных береговых откосов могут применяться также гибкие асфальтовые маты, имеющие меньшие размеры, чем тюфяки,— длину 10—15 м, ширину 3—5 м, вес 4—8 т и более тонкую арматуру — 3—4 мм. Изготовляют маты на строительных площадках или заводах и транспортируют к месту укладки свернутыми в рулон на барабане диаметром 0,8—1,2 м.

Для укрепления береговых откосов асфальтовыми матами и тюфяками берег тоже планируется под откос не круче 1:2. Размер асфальтовых матов и тюфяков зависит от строительного оборудования и от размеров укрепляемого берегового откоса. У асфальтовых матов и тюфяков нет оголенной арматуры и отсутствуют швы, через которые может происходить вымывание грунта. Поэтому асфальтовое покрытие является надежным укреплением берегов. Асфальтовая одежда берегов предпочтительна в районах умеренного климата, без резких колебаний температуры.

Готовые асфальтовые маты доставляют к месту укладки свернутыми в рулоны на барабанах. На надводный откос по его высоте асфальтовые маты укладывают последовательно — от подошвы крепления к бровке и по длине откоса от верхового конца крепления вниз по течению впритык друг к другу. При высоте надводного откоса, превышающей длину мата, для укрепления берега укладывают два асфальтовых мата тоже впритык один к другому.

На надводный откос асфальтовые маты укладывают с помощью крана, перемещающегося по откосу (рис. 182). Для этого на береговой площадке сначала раскладывают маты по направлению укладки. Затем кран захватывает маты за трос, вмонтированный

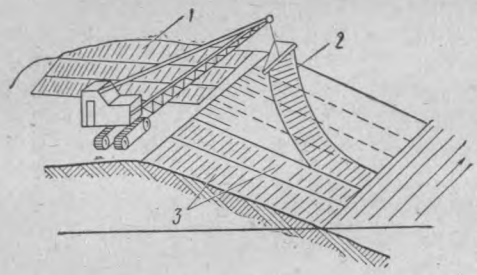


Рис. 182. Укладка асфальтовых матов береговым краном:
1 — маты на площадке; *2* — мат в момент укладки его краном; *3* — маты, уложенные на откос

в его торец, и укладывают их на место по разбитым створам. По мере укладки матов по откосу выполняется заделка швов сопряжения. Для заделки верхней кромки покрытия сопрягают торцовую кромку асфальтовых матов с ограничительным бетонным зубом, устраиваемым на верхней кромке крепления.

В случае отсутствия крана укладка асфальтовых матов по береговому надводному откосу может быть выполнена с помощью лебедок, установленных на берегу на полозьях. При этом скатанный рулоном асфальтовый мат устанавливают на бровке откоса, против места укладки, и ось барабана, на который накатан мат, пропускают в проушины стропа, соединенного с тросом лебедки.

Свободный конец асфальтового мата закрепляют у линии верхней кромки берега за свайки, брус и т. д. Затем рулон постепенно спускают под откос с притормаживанием лебедкой. По мере спуска мат сматывается с барабана и укладывается на поверхность на бровку. Укладка следующего мата ведется в том же порядке. По мере передвижения фронта работ лебедку переставляют.

Сопряжение нижней кромки надводного крепления из асфальтовых матов с подводным креплением зависит от типа последнего и от конструкции сопрягающей части. При устройстве сопряжения в виде призмы из каменной наброски нижнюю кромку асфальтовых матов доводят до тыловой стороны сопрягающей призмы, помещая впритык к ней. При устройстве подводного крепления из асфальтовых тюфяков последние сопрягают с асфальтовыми тюфяками надводного крепления перекрытием внахлестку.

Асфальтовые тюфяки для крепления подводных откосов изготовляют на месте работ с использованием специально оборудованного палубного судна и с него же выполняют укладку тюфяков. С этой целью судно оборудуют якорными устройствами для установки и перемещения в створе сооружения и в створе укладки тюфяков.

Асфальтовые тюфяки укладывают по длине берега снизу вверх по течению и так, чтобы каждый последующий тюфяк перекрывал внахлестку предыдущий тюфяк.

Для укладки асфальтового тюфяка на подводный откос рабочее судно устанавливается в створах укладки тюфяка, возможно ближе к береговому откосу. За береговые якорные упоры зачаливают блоки для пропуска через них тяговых тросов судовых лебедок, с помощью которых стаскивают тюфяки с палубы рабочего судна. Тяговые тросы от лебедок, установленных на палубе судна,

пропускают через береговые блоки и скрепляют с тросами тюфяка. Тюфяк подтаскивают к урезу воды до проектной линии верхней кромки подводного крепления и устанавливают по боковым створам. Верхнюю кромку тюфяка закрепляют за береговые упоры или на нее отсыпают сопрягающую призму из каменной наброски. Рабочее судно перемещается на якорных оттяжках в сторону русла с одновременным и постепенным сползанием тюфяка на воду и укладкой его на подводный береговой откос. После этого рабочее судно якорными оттяжками перемещается несколько выше по течению, вновь устанавливается у берегового уреза в створах расположения следующего тюфяка, и весь процесс повторяется.

При креплении надводного откоса асфальтовыми матами в месте сопряжения с ними подводных асфальтовых тюфяков заливается асфальтовая смесь того же состава, что и для надводного покрытия.

Грунтовые шпоры намываются или отсыпаются так же, как и полузапруды.

Глава XI

ЗНАКИ СУДОХОДНОЙ ОБСТАНОВКИ И СВЕТОСИГНАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ НИХ

§ 71. РАЗНОВИДНОСТИ СУДОХОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

Основное назначение судоходной обстановки заключается в следующем: а) указании направления, границ и габаритов (глубины и ширины) судовых ходов; б) регулировании движения через шлюзы, узкие рукава, кривые колена и вообще участки с односторонним движением; в) указании границ акваторий портов, пристаней, затонов, аванпортов, портов-убежищ; г) обозначении расположенных вблизи судовых ходов подводных и надводных препятствий и сооружений.

Знаки судоходной обстановки или знаки навигационные по месту нахождения делятся на береговые и плавучие. По государственному стандарту [1] береговые знаки делятся на: 1) знаки направления и границ судового хода и 2) знаки информационные (предупредительные и указательные).

К знакам направления и границ судового хода относятся: створные, перевальные, ориентиры (весенние), ходовые и мостовые знаки, а к информационным знакам — плесовые, перекатные и семафорные мачты, знаки у подводных и надводных сооружений, рейдовые и др.

Плавучие знаки, расположенные на кромках судового хода, делятся по государственному стандарту [2] на кромочные, поворотные, разделительные, свальные и дублирующие (на опасности), а расположенные на оси судового хода — на осевые, поворотно-осевые и разделительные. К плавучим знакам относятся буи, бакены и вехи.

Судоходная обстановка делится на освещаемую, неосвещаемую и светоотражающую. Освещаемая обстановка устанавливается на водных путях с круглосуточным движением судов или плотов; неосвещаемая — на путях со слаборазвитым судоходством, где движение судов или плотов производится только днем; светоотражающая — на путях с малой интенсивностью движения судов ночью.

По государственному стандарту [3] сигнальные огни на знаках обстановки различают по цвету, режиму горения и форме. По цвету применяют белый, красный, зеленый и желтый огни. Белым цветом считается цвет излучения лампы накаливания, работаю-

---

[1] ГОСТ 16150—70. Знаки навигационные береговые. Типы, основные размеры и технические требования.

[2] ГОСТ 3337—73. Знаки навигационные плавучие.

[3] ГОСТ 13311—67. Огни навигационные. Системы и основные параметры.

щей в светосигнальных приборах с бесцветной оптикой. Цвет красного, зеленого и желтого огней обеспечивается наличием в тех же приборах светофильтров, обычно стеклянных.

По режиму горения используют огни: а) постоянный; б) проблесковый; в) группопроблесковый; г) затмевающийся. Постоянным считается непрерывающийся (без изменения силы света) огонь; проблесковым — одинарные проблески (вспышки) света, повторяющиеся через равные промежутки времени, но при продолжительности вспышки меньше продолжительности паузы (например, проблеск 0,5 с, пауза 2,5 с); группопроблесковым — чередование групп из двух или трех проблесков света с короткими паузами между ними и длительной паузой между группами проблесков (например, группа из двух проблесков: проблеск — 0,3 с, пауза — 0,5 с, проблеск — 0,3 с, пауза — 2,5 с); затмевающимся — прерывный огонь с длительностью проблеска больше длительности паузы (например, проблеск 2,5 с, пауза 0,5 с).

Форма огней зависит от их источника света: от лампы накаливания излучается точечный огонь; от газосветной трубки — линейный; от комбинации лампы и трубки — комбинированный (точечно-линейный). Из газосветных трубок и светоотражающих материалов можно также получить светящиеся цифры. Кроме того, огни различают по их числу и положению на знаке: один огонь; два или три огня один над другим; два огня рядом и т. д.

В зависимости от интенсивности судоходства и сплава леса в плотах водные пути с освещаемой обстановкой по ее составу и требованиям к ней делятся на три группы:

I — по которым за сутки проходит более 30 судовых или 5 плотовых составов;

II — по которым за сутки проходит не более 30 судовых или 5 плотовых составов;

III — по которым за сутки проходят единицы судовых составов и нет регулярного сплава леса в плотах.

Судоходная обстановка на реках подразделяется на меженную и весеннюю, или паводковую. Паводковая обстановка содержится в период высоких вод, когда глубины в речном русле большие и для безопасного движения судов требуется преимущественно ограждение различных препятствий, а также обеспечение возможности плавания по тиховодам, воложкам, протокам и т. п. Меженная обстановка содержится в остальной период навигации, при низких уровнях, когда надо не только ограждать препятствия, но точно указывать направление, границы и габариты судового хода.

В управлениях пути и каналов судоходной обстановкой ведают службы пути, а в технических участках пути и районах гидротехнических сооружений — старшие инженеры и инженеры по обстановке, прорабы путевых работ и их помощники.

Работники, обслуживающие судоходную обстановку, выполняют следующие работы: устанавливают знаки обстановки и со-

держат их в исправности, дают сведения для информации судоводителей и руководителей движением флота об условиях судоходства, а также проводят траление, дно- и берегоочищение.

§ 72. БЕРЕГОВЫЕ ЗНАКИ И ОГНИ НА НИХ

К береговым знакам, как уже упоминалось, относятся: створные, перевальные, весенние, ходовые, мостовые, а также мачты (плесовые, перекатные, семафорные) и другие знаки.

Створные знаки образуют линейный, щелевой или кромочный створ.

Линейный створ состоит из двух створных знаков, переднего и заднего, и указывает направление судового хода.

Щелевой створ состоит из трех знаков, двух передних и одного заднего, и тоже указывает направление судового хода.

Кромочный створ состоит из двух створных знаков и указывает одну из кромок судового хода.

Створные знаки изготовляются шести типов: с квадратным вертикальным щитом (рис. 183); с квадратным вертикальным и трапецеидальным наклонным щитами (рис. 184); с прямоугольным вертикальным щитом (рис. 185); с трапецеидальным наклонным щитом (рис. 186); кромочный передний с прямоугольным верти-



Рис. 183. Знак створный (тип I)



Рис. 184. Знак створный (тип II)



Рис. 185. Знак створный (тип III)

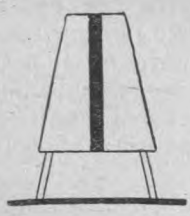


Рис. 186. Знак створный (тип IV)

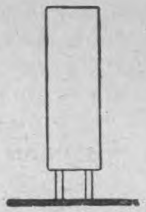


Рис. 187. Знак створный (тип V)

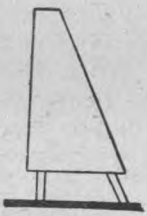


Рис. 188. Знак створный (тип VI) для левой кромки (для правой кромки изображение зеркальное)

кальным щитом (рис. 187); кромочный задний с особым вертикальным щитом, наклонная сторона которого обращена к судовому ходу (рис. 188).

Перевальные знаки изготовляются двух типов: с двумя квадратными вертикальными щитами; с двумя квадратными вертикальными и двумя трепецеидальными наклонными щитами. Эти знаки применяются только на реках для указания направления широкого судового хода при переходе (перевале) его от одного берега к другому.

Створные и перевальные знаки окрашиваются в красный цвет для установки на светлом фоне и в белый — для установки на темном фоне. Створные знаки типов II—IV имеют посредине щита створную полосу, черную на белых щитах и белую — на красных.

Высота стандартных щитов створных знаков типов I—IV колеблется: вертикальных — от 0,6 до 6 м, наклонных — от 2,45 до 12 м. Высота стандартных щитов кромочных знаков колеблется от 2 до 12 м. Высота стандартных щитов перевальных знаков составляет: вертикальных 0,6—1,2 м, наклонных 2,45—4,3 м. Выбор размеров щитов створных и перевальных знаков зависит от необходимой дальности их видимости.

Дальность видимости щитов знаков зависит от их размеров, прозрачности атмосферы и других условий видимости и составляет для створных знаков типа I примерно 2—4 км, типа II — 4—9 км, типа III — 4—13 км, типа IV — 6—14 км, типов V и VI — 3—13 км, для перевальных знаков типа I — 2—4 км и типа II — 4—9 км.

На знаках линейного створа в темное время зажигаются в основном белые точечные огни; на переднем — постоянный огонь, на заднем — проблесковый.

Допускается на знаках правого берега зажигать красные точечные или красные линейные огни и на знаках левого берега — зеленые точечные или зеленые линейные.

На знаках кромочных створов зажигаются точечные огни: на правой кромке — красные, на левой — зеленые; на переднем знаке — постоянный огонь, на заднем — двухпроблесковый.

На знаках щелевого створа зажигаются в основном белые точечные огни, на передних знаках — постоянные огни, на заднем — проблесковый.

Допускается на знаках правого берега применять красные точечные огни и на знаках левого берега — зеленые точечные. Допускаются также на знаках щелевого створа линейные постоянные огни, на передних знаках обоих берегов — красные, на заднем знаке — зеленый.

На перевальных знаках зажигаются в основном точечные постоянные огни, на правом берегу — красный огонь, на левом — белый.

Допускается на левом берегу зеленый огонь.

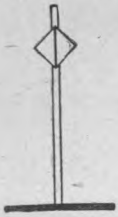


Рис. 189. Знак ходовой

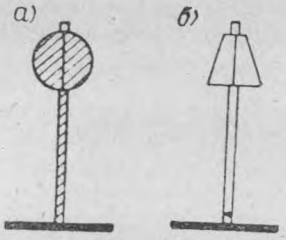


Рис. 190. Знаки весенние (ориентиры)

Ходовые знаки (рис. 189) служат для указания направления судового хода, идущего вдоль берега, на котором они стоят. Изготовляются они двух типов: для правого берега — красные; для левого — белые. Каждый знак имеет квадратный щит, одна диагональ которого вертикальная, другая — горизонтальная. Высота таких знаков 4—7 м, длина стороны щита 0,6 — 1,75 м, дальность видимости 1—2 км и больше. На этих знаках в темное время зажигаются точечные проблесковые огни, на знаке правого берега — красный, на знаке левого — зеленый. Опоры (столбы) ходовых знаков и перевальных знаков, имеющих два квадратных вертикальных щита, для усиления контрастности допускается окрашивать в зависимости от фона чередующимися полосами красного и белого или черного и белого цветов.

Весенние знаки (ориентиры) для указания направления судового хода в половодье и ограждения затопленного берега или острова изготовляются двух типов: для правого берега — красные с круглым щитом (рис. 190, *а*), для левого — белые с трапециевидным щитом (рис. 190, *б*). Высота таких знаков 4,0—7,0 м, щитов на них 0,6—1,75 м, дальность видимости 1—2 км и больше. В темное время на этих знаках зажигаются точечные двухпроблесковые огни, на знаке правого берега — красный, на знаке левого — зеленый.

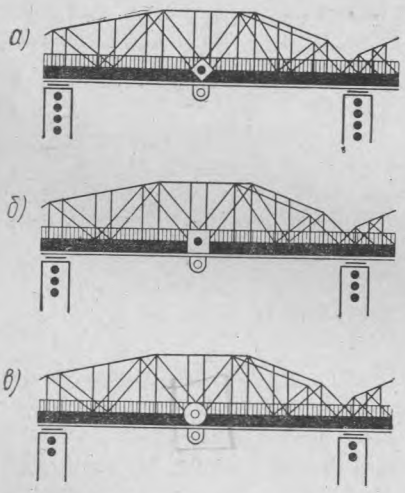


Рис. 191. Расположение знаков и огней у судоходного мостового пролета:
а — для прохода судов сверху; *б* — для прохода судов снизу; *в* — для проводки плотов

Мостовые знаки для обозначения ходовых пролетов мостов изготовляются двух типов: для прохода судов — квадратный красный щит; для проводки плотов — круглый белый щит (рис. 191). Длина стороны квадрата 1 и 2 м, диаметр круга — тоже 1 и 2 м. В этих пролетах в темное время зажигаются по два точечных постоянных огня, один под другим; на квадратном щите и ниже него — красные, когда ход открыт судам, на круглом щите и ниже него — зеленые, когда ход открыт плотам.

Опоры (устои, быки) ходовых пролетов мостов обознача-

ются двумя-четырьмя точечными постоянными зелеными огнями, видимыми только со стороны входа в пролет и расположенными один под другим. Число этих огней указывает высотный габарит пролета: 4 огня — более 15 м, 3 огня — 10—15 м и два огня — менее 10 м.

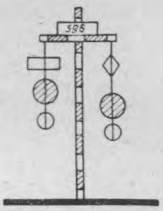


Рис. 192. Мачта перекатная



Рис. 193. Мачта семафорная

Мачты информационных (предупредительных и указательных) знаков изготовляются четырех типов: плесовые с черно-белыми полосами и перекатные с красно-белыми полосами (рис. 192); семафорные красные на светлом фоне и белые на темном фоне (рис. 193).

Плесовые и перекатные мачты служат для указания на них фактических наименьших глубины и ширины судового хода соответственно на плесе (значительном по длине участка пути) и перекате, семафорные мачты — для регулирования движения по узким судовым ходам. Высота мачт — 5,0 и 7,5 м.

На плесовой и перекатной мачтах вывешиваются (см. рис. 192) следующие сигнальные фигуры: 1) прямоугольная, черная или белая, в зависимости от фона, обозначающая глубину 100 см; 2) большой красный шар, обозначающий глубину 20 см или ширину 20 м; 3) малый, черный или белый шар, обозначающий глубину 5 см или ширину 5 м; 4) ромб, черный или белый, обозначающий ширину 50 м. Размеры сигнальных фигур: прямоугольной и ромба 40×20 или 35×70 см, диаметр большого шара 35 или 60 см, диаметр малого шара 20 или 35 см.

Сигнальные фигуры глубины вывешиваются на верхней по течению половине поперечной реи мачты одна под другой в убывающем по глубине порядке, а фигуры ширины — на нижней по течению половине реи в таком же порядке по ширине. На рис. 192 сигнальные фигуры показывают глубину 125 см и ширину 75 м. При глубине на судовом ходу, превышающей максимальную осадку судов на 25% и более, на рее мачты вывешивается крест, черный или белый (размер 60×60 или 105×105 см).

На плесовой и перекатной мачтах в темное время для обозначения глубины можно зажигать три точечных проблесковых огня, расположенных один под другим: белый, зеленый и красный. Один проблеск верхнего белого огня обозначает глубину 1 м, один проблеск среднего зеленого огня — 20 см, один проблеск нижнего красного огня—5 см. Последовательностью и количеством проблесков этих огней можно показать любую имеющуюся на плесе или перекате глубину.

На семафорной мачте вывешиваются (см. рис. 193) одновременно две сигнальные фигуры одна под другой: цилиндр, черный

или белый; конус красный (обе фигуры одинаковых размеров — 60×95 или 110×60 см). Цилиндр разрешает движение судам, конус запрещает им движение. Верхняя на мачте сигнальная фигура относится к судам, идущим по течению, нижняя — к судам, идущим против течения. На рис. 193 сигнальные фигуры показывают: разрешен проход судам по течению, запрещен — против течения.

На семафорной мачте в темное время зажигаются точечные постоянные огни: когда ход закрыт,— в обоих направлениях два красных огня один под другим; когда ход открыт сверху,— верхний огонь зеленый и нижний красный; когда ход открыт снизу,— верхний огонь красный и нижний зеленый.

Береговые знаки обстановки высотой до 10 м возводятся деревянными или металлическими, а высотой более 10 м — преимущественно металлическими. Деревянные створные, перевальные, весенние и ходовые знаки в конструктивном отношении представляют обычно столбы с подкосами, на которых укреплены один или два щита, некоторые створные знаки — четырехгранные усеченные пирамиды со щитом. Щиты больших размеров имеют просветы.

Деревянные мачты, плесовые, перекатные и семафорные,— это тоже столбы с подкосами, в верхней части которых укреплена поперечина (рея) для вывешивания на ней сигнальных фигур. Другие информационные знаки: рейдовые у подводных и надводных сооружений (переходов), знаки «Сигнал» и «Внимание» и т. д., столбы с подкосами, на которых укреплена соответствующая опознавательная фигура.

Металлическими при высоте более 10 м сооружаются главным образом створные знаки. Такие знаки состоят из сквозной металлической мачты на бетонном основании со щитом и светосигнальным прибором на верху знака.

Створный металлический знак большой высоты (рис. 194) имеет деревянный прямоугольный щит, сварную металлическую ферму (мачту), бетонный фундамент, балкон или люльку для ремонта и окраски щита, светосигнальный прибор, оттяжки из тросов с анкерными плитами, проволочное ограждение и помещение для аккумуляторов или батарей.

Сварная ферма такого створного знака изготовляется из стали углового профиля, укрепляется на бетонном фундаменте и для устойчивости закрепляется по высоте с четырех сторон одним или двумя поясами тросовых оттяжек. Для натяжения оттяжек нижние концы их соединяют с анкерными тягами стяжными муфтами. Щит из досок, укрепляемый на верху мачты, окрашивается в цвет, дающий наибольшую контрастность с окружающим фоном (белый или красный). Внутри каждой фермы делают металлическую стремянку, служащую для подъема на мостик, где установлен створный светосигнальный прибор.

На озерах к береговым и островным знакам относятся также маяки — высокие знаки башенного типа, ограждающие опасные

для судоходства места и служащие ориентиром для судоводителей при определении курса судна по навигационным приборам и картам. Огни на маяках могут быть постоянные или проблесковые. Для отличия огней одного маяка от огней другого, кроме различных проблесков, используется разный цвет огней. Цветные огни чаще встречаются в маяках с угловым освещением, огонь которых виден не со всех сторон (не круговой), а только в промежутке между двумя заданными румбами. Во время туманов с маяков подаются звуковые сигналы или сигналы радиостанции. Высота маяков определяется расчетом, исходя из необходимой дальности их видимости.

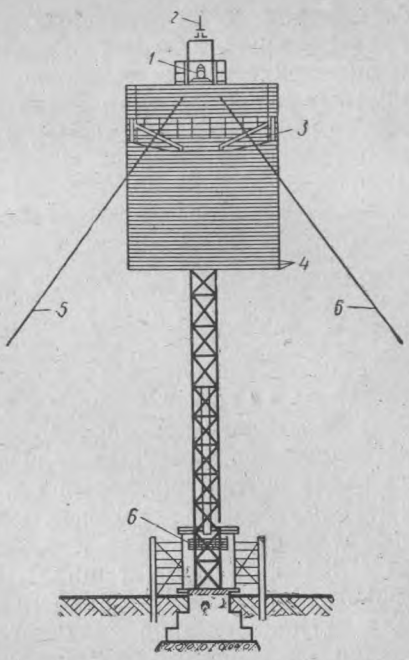


Рис. 194. Металлический створный знак с оттяжками:
1 — светосигнальный прибор; *2* — молниеотвод; *3* — люлька; *4* — доски; *5* — оттяжки; *6* — помещение для аккумуляторов или батарей

Особо следует отметить береговые навигационные огни на судоходных каналах с наводными бровками. Обычно на таких каналах береговых знаков обстановки в светлое время не требуется, так как надводные откосы канала и бровки в это время хорошо видны и судоводитель по ним легко ориентируется. В темное же время на берегах каналов на специальных опорах зажигаются навигационные огни: путевые вдоль канала (рис. 195); опознавательные на входах в канал; прицельные для указания оси канала на длинных прямолинейных участках (рис. 196). Кроме того, на каналах имеются светофоры, регулирующие движение судов через шлюзы, а также у паромных переправ и заградительных ворот. Светофоры работают круглосуточно.

Путевые огни — точечные, постоянные на правом берегу красные, на левом зеленые. Опознавательный огонь — точечно-линейный, проблесковый, на правом берегу красный, на левом зеленый. Прицельный огонь тоже точечно-линейный, но постоянный желто-красный. На

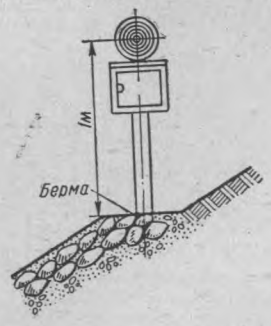


Рис. 195. Путевой огонь на канале

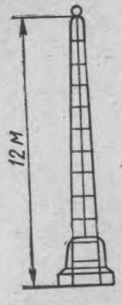


Рис. 196. Прицельный огонь на канале

светофорах огни точечные, постоянные, красный огонь — ход судам закрыт, зеленый — ход открыт. При следовании по каналу и при подходе к шлюзам огни не должны слепить судоводителя, поэтому все источники света на территории, акватории и сооружениях канала закрываются абажурами.

§ 73. РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ БЕРЕГОВЫХ ЗНАКОВ

В зависимости от назначения знака требуется либо только обнаружить его щит, либо опознать щит и по форме. В соответствии с этим различают две дальности видимости знаков в светлое время суток, когда их щиты отличаются размерами и формой; дальность обнаружения и дальность различения.

Дальность обнаружения — это максимальное расстояние, на котором при определенных условиях наблюдения щит знака становится заметным (глаз видит на окружающем фоне пятно на месте щита), но форма его неразличима. Дальность различения — это максимальное расстояние, на котором при определенных условиях наблюдения опознается форма щита знака (глаз видит силуэт щита). Цвет щита знака является отличительным признаком только при небольшой дальности видимости. Для щитов знаков с большой дальностью видимости цвет выбирается из условия контрастности их окраски и окружающего фона.

Дальность видимости (обнаружения и различения) знака зависит от углового размера и формы щита, прозрачности атмосферы, контрастности щита с фоном, яркости щита и фона, принятой вероятности видимости. Угловой размер знака или угол α (рис. 197), под которым его щит виден глазом, зависит от линейного размера щита h (высоты или ширины) и от расстояния D, на котором знак находится от глаза: $\operatorname{tg}\alpha \cong h : D$. При увеличении расстояния D угловой размер знака и соответственно его видимость уменьшаются, и наоборот.

Прозрачность атмосферы оценивается коэффициентом τ_a пропускания атмосферы, который при легкой дымке принимается равным 0,7, а при хорошей видимости 0,84. Яркость щита знака зави-

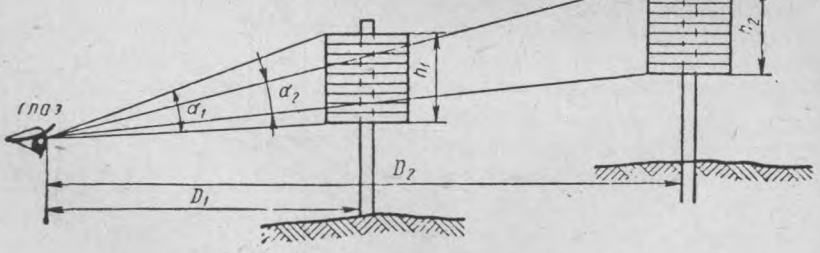


Рис. 197. Угловой размер щитов знаков

сит от его освещенности и отражательной способности. Во многих случаях для видимости знака бо́льшее значение имеет не столько яркость его щита, сколько разница между яркостью щита и общего фона, т. е. контрастность щита на этом фоне. Следует также отметить, что дальность видимости знаков на фоне неба больше, чем на фоне местности.

Для створных знаков достаточно обеспечить только дальность их обнаружения, так как по количеству и взаимному расположению створных щитов, т. е. обнаруженных пятен, судоводитель может определить тип створа и свое положение относительно оси или кромки створной полосы. Для перевальных и ходовых знаков тоже достаточно обеспечить дальность их обнаружения. Для знаков весенних и знаков ходовых пролетов мостов обеспечивается дальность различения, так как по форме щитов весенних знаков надо определять, на каком берегу они установлены, а по форме мостовых знаков—назначение ходового пролета.

Видимость створных знаков обеспечивается при $\tau_a = 0{,}7$, для двусторонних створов допускается принимать $\tau_a = 0{,}84$. Видимость перевальных, ходовых и весенних знаков на путях группы I обеспечивается при $\tau_a = 0{,}7$, а на путях групп II и III при хороших условиях видимости в районе их установки допускается $\tau_a = 0{,}84$.

Расчет дальности видимости знаков основывается на двух основных зависимостях: 1) видимого контраста K_D от расстояния до знака D, т. е. от дальности видимости; 2) порогового контраста $K_п$ от углового размера α знака и его формы [1].

Первая зависимость (световоздушная) имеет следующий вид:

$$K_D = \frac{K_0}{1 + \frac{Я_н}{Я_ф}\left(\tau_a^{-D} - 1\right)}, \qquad (296)$$

где K_0 — истинный яркостный контраст знака с фоном, определяемый по соотношению $K_0 = (Я_0 - Я_ф) : Я_ф$;

$Я_0, Я_ф, Я_н$ — яркость соответственно объекта (знака), фона, неба у горизонта;

τ_a — коэффициент пропускания атмосферы на 1 км.

Вторая зависимость имеет такой вид:

$$K_п = \frac{n(1+0{,}68\gamma)c}{eЯ_ф^{1-a}}, \qquad (297)$$

где n — коэффициент запаса;

γ — показатель, определяющий вероятность видимости знака;

c — коэффициент, учитывающий уровень разрешения зрительной задачи (обнаружение или различение знака) и форму знака;

a и e — параметры, зависящие от углового размера α знака и яркости фона $Я_ф$.

[1] Л. Т. Белова. Методы расчета дальности обнаружения и различения знаков судоходной обстановки. Труды ЛИВТа. Вып. 132. М., «Транспорт». 1972.

Следовательно, вторая зависимость через параметры a и e связывает пороговый контраст $K_п$ с угловым размером знака α при прочих заданных величинах.

При увеличении расстояния D до знака видимый контраст K_D между знаком и фоном уменьшается, и когда K_D становится меньше порогового контраста $K_п$ ($K_D < K_п$), знак становится невидимым.

Дальность видимости знака и определяется тем расстоянием D, для которого $K_D = K_п$. Принимая $K_D = K_п$ и решая зависимость (296) относительно D, получим выражение для дальности видимости

$$D = \frac{1}{\lg \tau_a} \lg \frac{1}{1 + \frac{Я_ф}{Я_н}\left(\frac{K_0}{K_п} - 1\right)}, \qquad (298)$$

где все обозначения известны, а отношение $Я_ф : Я_н$ называется коэффициентом светлоты фона и дается в соответствующих таблицах.

Расчет дальности видимости знаков обстановки по формуле (298) довольно сложен, и поэтому для дальности видимости стандартных знаков Московским филиалом ЛИВТа составлены специальные таблицы. Согласно данным этих таблиц, дальность видимости створных знаков разных типов при разных метеорологических условиях колеблется примерно от 2 до 14 км, перевальных — от 2 до 9 км, ходовых — от 1 до 4 км, весенних — от 1 до 4 км.

Практика судовождения и расчеты показывают, что дневная видимость знаков обстановки даже в хорошую погоду и на фоне неба не превышает 15 км, а огни видны на бо́льшем расстоянии. В связи с этим на длинных створных линиях водохранилищ для дневной видимости устанавливают дополнительные плавучие знаки (буи).

Расчет дальности видимости (обнаружения или различения) щита знака с заданной его высотой, шириной и площадью ведется по уравнениям (297) и (298) подбором в следующей последовательности:

1) определяют входящие в уравнение (297) показатель γ, коэффициент c, параметры a и e и яркость $Я_ф$;

2) значение показателя γ определяется по задаваемой вероятности p видимости знака: при $p=0{,}75$ $\gamma=0{,}48$, а при $p=0{,}99$ $\gamma=1{,}65$ (для стандартных щитов с площадью $S \leqslant 13$ м² и дальностью $D \leqslant 4$ км при расчете их обнаружения принимали $p=0{,}99$, а при $S>13$ м² и $D>4$ км — $p=0{,}75$; при расчете дальности различения для всех знаков принимали $p=0{,}75$);

3) значение коэффициента c, зависящее от формы щита и уровня разрешения зрительной задачи (обнаружение или различение) тоже задают: для обнаружения — от 1,0 до 1,4 и для различения — от 5,5 до 8,0 (при расчете обнаружения стандартных щитов

принимали $c=1{,}2$, а для их различения $c=6{,}5$);

4) значение яркости фона $Я_ф$ принималось для стандартных щитов равным 30 нт (нит—единица измерения яркости);

5) угловой размер α щита получается из упомянутого соотношения $\operatorname{tg}\alpha \cong h:D$ или более точно из соотношения $\operatorname{tg}\alpha \cong d:D$, где d — диаметр круглого диска с площадью, равной площади щита, а величиной D надо задаваться;

Таблица 8

Угловой размер α щита знака, угл. мин.	1	2	5	10
$1-a$	0,32	0,27	0,22	0,17
e	0,73	2,8	11,5	23,0

6) параметры a и e, зависящие от углового размера α и принятой яркости $Я_ф$, определяются по табл. 8.

7) рассчитывают по уравнению (297) значение порогового контраста $K_п$ для обнаружения (различения) знака;

8) определяют или задают для уравнения (298) входящие в него коэффициент τ_a, коэффициент светлоты фона $b = Я_ф : Я_н$ и истинный контраст K_0;

9) значения коэффициента τ_a берутся в пределах от 0,7 до 0,84 согласно указаниям, сделанным выше;

10) коэффициент $b = Я_ф : Я_н$ принимался для стандартных щитов равным 0,8 (для фона — песок, и солнце расположено сбоку от наблюдателя), а вообще в зависимости от условий освещения и фона он сильно колеблется;

11) значение истинного контраста K_0 принимается при расчете видимости стандартных щитов равным 0,65;

12) рассчитывают по формуле (298) дальность D (обнаружения или различения) и сравнивают ее с той дальностью, для которой были заданы в уравнении (297) параметры a и e, зависящие от углового размера α знака (а следовательно, и от D); при значительных расхождениях между D, полученными по уравнению (298) и заданным при определении $K_п$, расчет повторяется.

§ 74. ПЛАВУЧИЕ ЗНАКИ И ОГНИ НА НИХ

К плавучим знакам судоходной обстановки, как уже упоминалось, относятся буи, бакены и вехи. Плавучие знаки обозначают: 1) кромки или ось судового хода на его прямолинейных участках, а также на поворотах и разветвлениях; 2) направление свального течения; 3) препятствия на судовом ходу и вблизи от него.

ГОСТом предусмотрены 4 силуэта плавучих знаков: треугольный и прямолинейный (буи и бакены), круглый (бакены), линейный (буи и вехи). Каждый знак-силуэт должен изготовляться разных размеров для различной дальности видимости; например, треугольные и прямоугольные знаки для дневной видимости 2—4 км с высотой огней над уровнем воды 0,8—3 м.

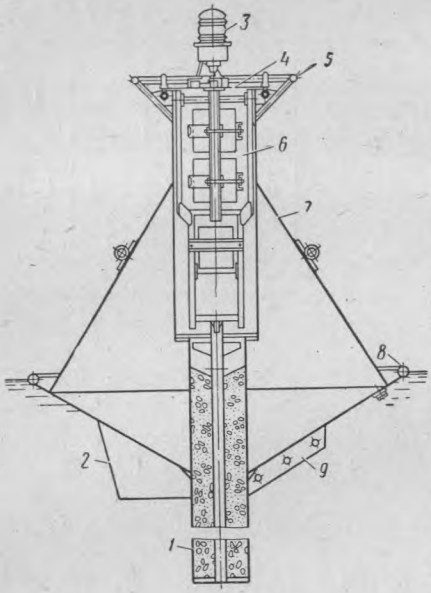


Рис. 198. Буй РБ-1,4

Рассмотрим три типа буев с электрическим питанием от сухих батарей или аккумуляторов: речной буй РБ-1,4; озерно-речной буй ОРБ-2,0; озерный буй ОБ-3,25. Высота огней буев над уровнем воды соответственно 1,4; 2,0 и 3,25 м. Область использования буев — преимущественно крупные реки, водохранилища и озера.

На рис. 198 показан речной буй РБ-1,4. Этот буй имеет стальной сварной корпус *7*, состоящий из двух конусов с центрально расположенным пеналом и хвостовиком. Нижний конус корпуса обеспечивает необходимую плавучесть; в пенале *6* размещаются кассеты с источниками питания, в хвостовике — бетонный балласт *1* для обеспечения остойчивости буя.

Под нижним конусом расположен стабилизатор *2*, предохраняющий буй от вращения относительно вертикальной оси при установке его на течении. К этому конусу приварены три планки *9* с отверстиями для крепления якорной цепи при установке буя на течении и в местах, где нет течения.

Корпус предохранен отбойной стальной трубой *8*, охватывающей нижний конус по большому диаметру. В конусе, где он соединен с этой трубой, предусмотрены вырезы, позволяющие использовать отбойную трубу для крепления гака или троса при подъеме и буксировке буя. К верхнему конусу приварены два уха для раскрепления буя при перезарядке. В верхней части конуса предусмотрено ограждающее кольцо *5* из стальной трубы для предохранения светосигнального прибора от повреждений при навале судна.

Крышка *4* пенала своими прорезами накладывается на направляющие ребра и крепится откидными болтами. На крышке установлен на амортизаторах светосигнальный прибор *3* и размещен сальник, через который проходит гибкий кабель. Источники питания (сухие батареи или аккумуляторы), расположенные в пенале, соединяются с электролампой светосигнального прибора этим кабелем. Буй имеет осадку около 1 м, диаметр корпуса 1,5 м, дальность его видимости 1,5—2 км.

Озерно-речной буй ОРБ-2,0 виден дальше, чем речной, за счет бо́льших размеров и бо́льшей высоты огня над водой. В конструкции он подобен речному, но имеет еще под хвостовиком контргруз из чугунных дисков для остойчивости и скобы на верхнем конусе

для обслуживания фонаря и источников питания (тоже сухих батарей или аккумуляторов) непосредственно с корпуса буя. Этот буй имеет осадку немного больше 1 м, диаметр корпуса около 2 м, дальность его видимости $\sim$3 км.

На рис. 199 показан озерный буй ОБ-3,25, несколько отличающийся по конструкции от предыдущих двух буев. Корпус буя тоже состоит из двух конусов, но с цилиндрической вставкой *1*. К хвостовику с бетонным балластом *6* крепится не только контргруз, но и якорная цепь. Корпус предохранен не одной, а двумя отбойными стальными трубами *2* по наружным диаметрам верхнего и нижнего конусов. Пенал *5* для кассет с источниками питания и крышка *4* на нем расположены значительно ниже светосигнального прибора.

Силуэтный усеченный конус *3* резко возвышается над корпусом (поплавком), и в нем имеется створка для доступа к пеналу.

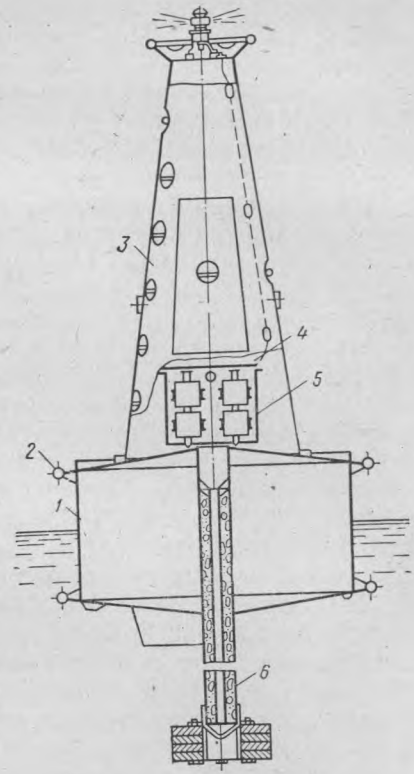


Рис. 199. Буй ОБ-3,25

Этот буй имеет осадку около 1,5 м, диаметр корпуса 2 м, дальность видимости до 4—5 км.

Буи удерживаются на месте установки на якорных тросах или цепях преимущественно железобетонными и чугунными якорями. Якоря делаются с выемкой внизу в виде сегмента, что обеспечивает присасывание якоря к дну водоема. Вес таких якорей колеблется от 100 до 400 кг и зависит от размеров буев. Длина якорных цепей зависит от глубины на месте установки и от типа якорного устройства; приближенно ее принимают равной тройной глубине в месте установки буя.

Буи левой кромки (кромочные) судового хода окрашиваются на реках, каналах и речных участках водохранилищ в белый цвет; на озерно-речных участках водохранилищ — белый и черный. Буи правой кромки судового хода везде окрашиваются в красный цвет. Буи на оси (осевые) широких судовых ходов водохранилищ окрашиваются черными и белыми горизонтальными чередующимися полосами. Поворотные буи окрашиваются на левой кромке в белый цвет с черной горизонтальной полосой посередине, на правой — в красный цвет тоже с черной горизонталь-

ной полосой посередине; поворотно-осевые — красно-черными полосами; разделительные — вертикальными черными и красными полосами.

Бакены различают по их сигнальной фигуре (силуэту). Каждый бакен состоит из сигнальной фигуры и плотика, на котором она установлена. Область использования бакенов—реки, но и здесь они постепенно заменяются буями.

Применяются в основном три вида плотиков для бакенов: бревенчатый плотик с треугольным основанием, устанавливаемый при скорости течения менее 5 км/ч; дощатые плотики с таким же основанием и с лыжным основанием, устанавливаемые при скорости течения больше 5 км/ч.

На бакенах применяются сигнальные фигуры в виде пирамиды, шара и цилиндра. Пирамида состоит из трех деревянных ножек, врезанных вверху в деревянный штырь, а внизу — в поперечины плотика и обшитых досками с просветами. Пирамида окрашивается в белый цвет. На штыре пирамиды укрепляется светосигнальный прибор. Бакены с пирамидой обозначают левую кромку судового хода. Шар состоит из стойки, врезанной в плотик, на которой укреплены два взаимно перпендикулярных круглых диска из досок с просветами. Шар и стойка окрашиваются в красный цвет. Бакены с шаром обозначают правую кромку судового хода. Свальный бакен представляет собой дощатый с просветами цилиндр, устанавливаемый тоже на плотике. Этот бакен указывает на отклонение направления течения в сторону от судового хода и окрашивается на левой кромке в бело-черный цвет, а на правой — в красно-черный. Высота бакенных пирамид, шаров и цилиндров колеблется от 0,5 м до 1,25 м, дальность видимости 1,5—2 км. Бакены удерживаются на месте установки тросами с якорным грузом.

В темное время на кромочных буях и на бакенах зажигается точечный огонь: на правой кромке судового хода — красный, постоянный или проблесковый; на левой — белый или зеленый, постоянный или проблесковый; на осевых буях — белый двухпроблесковый; на свальном бакене на правой кромке — красный трехпроблесковый, на левой — зеленый, тоже трехпроблесковый; на поворотных буях — в основном белый или красный затмевающиеся огни и на поворотно-осевых — белый трехпроблесковый; на разделительных буях — в основном красный и зеленый проблесковые, один под другим.

Веха представляет собой наклонно плавающий шест длиной 3—6 м и более, возвышающийся над водой на 1—2,5 м и зачаленный за якорный груз или за забитую в дно свайку. В надводной части вехи окрашиваются тем же цветом, что и соответствующие по расположению буи или бакены. На красные, бело-черные и красно-черные вехи сверху надевается надставка (топовая фигура) черного цвета в виде шара. Вехи не освещаются, дальность их видимости 0,5—1 км. Линейные буи (сигары) должны иметь высоту 1—2 м и дальность видимости 1—2 км.

К береговым и плавучим знакам предъявляются следующие требования: долговечность и надежность действия; однообразие зрительного восприятия с судового хода; возможность установки (кроме вех) светосигнального оборудования и источников питания; возможность нанесения светоотражающих покрытий; соблюдение требований техники безопасности.

§ 75. ОПТИКА И ИСТОЧНИКИ СВЕТА В СВЕТОСИГНАЛЬНЫХ ПРИБОРАХ ОБСТАНОВКИ

На наших водных путях применяются в основном на знаках обстановки электрические сигнальные огни. В качестве источников света используются при этом лампы накаливания и газосветные трубки. Сила света электрических сигнальных огней, благодаря применению оптических усилителей (линз и рефлекторов), значительна. Это обстоятельство даже при применении цветных фильтров, уменьшающих силу света, позволяет обеспечивать необходимую дальность видимости огней.

Светосигнальный прибор с лампой накаливания для огней на знаках обстановки состоит из следующих элементов: корпуса, линзы или рефлектора-отражателя, светофильтра (при надобности в цветном огне), электролампы накаливания, патрона, фотоавтомата, фокусировочного и крепежно-монтажного устройств. Корпус светосигнального прибора служит для объединения в одно целое основных деталей этого прибора.

Светосигнальный прибор с газосветной трубкой состоит из корпуса, линзы или отражателя, газосветной трубки, преобразователя напряжения и крепежно-монтажного устройства.

Светосигнальные приборы знаков обстановки по характеру обзора могут быть кругового, направленного и секторного действия. Огонь приборов кругового действия виден по горизонту со всех сторон; приборов направленного действия — только в одном заданном направлении; приборов секторного действия — в пределах одного или нескольких заданных секторов.

Линза собирает в узкий пучок лучи, падающие на нее от раскаленной нити лампы, и направляет их в сторону судоводителя, что увеличивает дальность видимости огня. Для сигнальных приборов обстановки применяют дисковые и цилиндрические линзы.

Дисковая линза имеет форму слегка вогнутого диска со ступенчатой внутренней поверхностью, фокус линзы расположен на ее оптической оси, на некотором расстоянии от внутренней поверхности. Лучи света от лампы, установленной в фокусе линзы, выходят из линзы пучком, сосредоточенным в горизонтальной и вертикальной плоскостях в границах углов рассеивания линзы.

Цилиндрическая линза представляет собой полый цилиндр со ступенчатой внешней поверхностью, ее фокус расположен в центре цилиндра на вертикальной оси. Лучи света от лампы, установленной в фокусе линзы, выходят из линзы узким пучком на все стороны по горизонту и в пределах углов рассеивания в вертикальной

плоскости. Диаметр дисковых линз колеблется в основном от 160 до 140 мм, сила света увеличивается по оси в 200—160 раз и на границах угла рассеивания, равного 3°,— в 12—6 раз. В последнее время для приборов направленного действия используются преимущественно автомобильные фары с отражателями, но намечены к выпуску и приборы с дисковыми линзами. Цилиндрические линзы имеют диаметр от 75 до 105 мм, угол рассеивания в вертикальной плоскости 2—6° и увеличивают силу света в 4—10 раз.

Светосигнальные приборы устраивают так, чтобы нить электролампы, вставленной в прибор, находилась в фокусе линзы. Кроме того, на случай неточного изготовления линз и электроламп в светосигнальных приборах имеется фокусировочное устройство, позволяющее устанавливать нить электролампы точно в фокусе линзы.

Автомобильные металлические фары с параболическим хромированием зеркальным отражателем (рефлектором) применяются в обстановке без рассеивателя на узких судовых ходах и с рассеивателем — на широких ходах. Лучи света от лампы, установленной в фокусе рефлектора, выходят из фары параллельным сосредоточенным пучком. При наличии рассеивателя угол расширения светового потока составляет 5° и более.

Для получения цветного огня (красного, зеленого и желтого) в светосигнальных приборах судоходной обстановки применяют стеклянные и пластмассовые светофильтры. Светофильтры снижают дальность видимости огня, и поэтому для цветных огней применяют более мощные электролампы, чем для белых (бесцветных) огней, если потребная дальность видимости одинакова. Цветной огонь при дисковой линзе получают с помощью светофильтра в виде диска, помещаемого внутрь прибора за линзу. При цилиндрической линзе цветной огонь получают с помощью светофильтра в виде цилиндра или бездонного стакана, вставляемого внутрь линзы.

Мощность применяемых в судоходной обстановке электроламп зависит от необходимой дальности видимости сигнального огня, от наличия в светосигнальном приборе линзы и светофильтра. Огромное большинство знаков судоходной обстановки имеет автономные источники питания — аккумуляторы или сухие батареи. Срок службы аккумулятора и батареи зависит главным образом от мощности, расходуемой на питание электролампы. В связи с этим стремятся снизить мощность электроламп на знаках обстановки, добиваясь необходимой дальности их видимости использованием хороших линз и отражателей, а также тщательной фокусировкой ламп.

В настоящее время на знаках обстановки применяют преимущественно специальные маломощные сигнальные водные электролампы (СГВ) напряжением 2,5 и 6,0 В, а также используют маячные электролампы (ММ) напряжением 6 и 12 В. Сила тока ламп СГВ напряжением 2,5 В колеблется от 0,16 до 0,45 А, мощность — от 0,4 до 1,12 Вт; срок службы их составляет 250 ч горения. Сила тока ламп СГВ напряжением 6,0 В колеблется от 0,33 до 2,0 А,

мощность — от 2 до 12 Вт; срок службы ламп мощностью до 6 Вт — 500 ч, мощностью 12 Вт — 300 ч. В используемых маячных лампах сила тока составляет 0,5—1,0 А и мощность 3—12 Вт.

Для уменьшения потребной мощности и увеличения срока службы ламп СГВ принято их наполнять инертным несветящимся газом — криптоном. Лампы СГВ предназначены преимущественно для круговой и направленной оптики. Выпускаются эти лампы двух видов: с телом накала, расположенным вдоль оси лампы (для приборов кругового действия), и поперек оси (для приборов направленного действия).

Основным преимуществом ламп СГВ, помимо их большой экономичности и наличия однотипных цоколей, позволяющих унифицировать светосигнальную аппаратуру, является соответствие их тока разрядному току сухих батарей, что определяет одновременно и высокую экономичность работы источников тока. Весьма важно также создание в лампах СГВ формы светящегося тела, наилучшим образом сочетающейся с назначением сигнального огня и типом оптических устройств. Часть ламп СГВ на 2,5 В выпускаются усовершенствованными, имеющими фокусирующий цоколь.

В судоходной обстановке, кроме ламп накаливания, в качестве сигнальных огней применяют стеклянные газосветные трубки тлеющего разряда с отражателями. Газосветные трубки светятся, когда через наполняющий их газ пропускается электрический ток высокого напряжения. При подаче такого тока на электроды, впаянные на концах трубки, происходит газовый разряд и свечение трубки в виде сплошной линии по ее длине. Трубки тлеющего разряда, заполненные неоном, светятся оранжево-красным цветом; заполненные аргоном и покрытые изнутри люминофором — зеленым; заполненные гелием — желтым.

Для «зажигания» газосветной трубки требуется напряжение до 1000 В и более. После «зажигания» потребное напряжение значительно уменьшается, но все же измеряется сотнями вольт. Для преобразования постоянного тока от аккумуляторов и сухих батарей в прерывистый и повышения его напряжения с 2,5 до 1000 В и более используются полупроводниковые преобразователи тока.

Газосветные трубки обладают преимуществами по сравнению с лампами накаливания: срок службы их достигает 10 тыс. ч; они мало чувствительны к изменению напряжения и экономичнее по питанию; для получения на них цветного огня не требуются светофильтры; их огни, имеющие на береговых знаках форму светящейся линии, хорошо отличаются от точечных огней ламп накаливания, что облегчает судовождение на участках с большим количеством разных огней на берегу; установка их проще. Однако малая яркость и большие габариты огней газосветных трубок затрудняют применение оптических систем, так как для достаточной концентрации светового потока светящееся тело должно иметь малые размеры. Поэтому газосветные трубки применяют

пока в светосигнальных приборах с ограниченной дальностью видимости (до 3 км).

При питании огней знаков обстановки током от береговой сети применяют понижающие трансформаторы и выпрямители и тоже электролампы накаливания СГВ.

Потребная сила источника света (электролампы), используемого в светосигнальном приборе судоходной обстановки, определяется по формуле

$$I_0 = \frac{\varepsilon_ц D^2 \tau_a^{-D}}{\tau_ф K}, \qquad (299)$$

где $\varepsilon_ц$ — величина пороговой освещенности, необходимая для определения цвета огня, лк;

D — потребная дальность видимости огня, км;

τ_a — коэффициент пропускания или прозрачности атмосферы на 1 км;

$\tau_ф$ — коэффициент пропускания светофильтра;

K — коэффициент увеличения силы света оптикой.

Сила света I_0 выражается по формуле (299) в свечах.

Огни судоходной обстановки создаются пока преимущественно точечными источниками света (электролампами), не имеющими различимых глазом линейных и угловых размеров. Освещенность на глазе судоводителя, получающаяся от такого источника света, обратно пропорциональна квадрату расстояния D, с которого наблюдается огонь, и, кроме того, зависит от коэффициента пропускания или прозрачности атмосферы τ_a. До глаза судоводителя доходит в атмосфере лишь часть отражаемых источником света волн и его наблюдаемая яркость ослабляется, что и учитывается коэффициентом прозрачности. При расчетах силы света, в зависимости от значения водного пути и типа знака, принимается $\tau_a = 0{,}7$ (легкая дымка) или $\tau_a = 0{,}84$ (хорошая видимость).

Для того чтобы световой сигнал воспринимался глазом судоводителя, освещенность на его зрачке должна быть равна или больше величины $\varepsilon_п$, называемой *световым порогом чувствительности зрения* и выражаемой в люксах. При увеличении расстояния сначала исчезает разница в цвете, а потом становится невидимым и сам огонь; поэтому величина пороговой освещенности $\varepsilon_ц$, необходимая для определения цвета огня, больше светового порога чувствительности зрения $\varepsilon_п$ и разная для различных цветов. В расчетах дальности видимости огней судоходной обстановки принимают: для белого огня $\varepsilon_ц = \varepsilon_п = 2 \cdot 10^{-7}$ лк, для красного $\varepsilon_ц = 3{,}5 \cdot 10^{-7}$ лк, для зеленого $\varepsilon_ц = 5 \cdot 10^{-7}$ лк. Эти значения пороговой освещенности принимаются для уверенной видимости огней на водных путях, где в поле зрения попадают и другие огни, кроме сигнальных. При полной же темноте абсолютная величина пороговой освещенности значительно меньше и равна $\varepsilon_ц = 1 \cdot 10^{-9}$.

Снижение силы света лампы светосигнального прибора светофильтром учитывается коэффициентом пропускания светофильтра $\tau_ф$. Этот коэффициент зависит от толщины стекла, концентрации

красителя и цвета краски. В расчетах дальности видимости огней судоходной обстановки принимают: для красных фильтров $\tau_ф = 0{,}18$, для зеленых $\tau_ф = 0{,}20$ и для желтых $\tau_ф = 0{,}45$.

§ 76. СВЕТОСИГНАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ОБСТАНОВКИ

Светосигнальные приборы обстановки различают: а) по характеру обзора (круговые, направленные и секторные); б) по источнику света (с лампой накаливания и с газосветной трубкой), о чем уже упоминалось; в) по знакам, на которых они используются (для буев и бакенов, створных и перевальных знаков, ходовых и весенних знаков, плесовых, перекатных и семафорных мачт и др.).

На бакенах используются приборы кругового действия с лампой накаливания и с газосветной трубкой. Бакенные приборы с лампой накаливания и цилиндрической линзой диаметром 75 мм (Л-75) могут быть с карданным подвесом и без такового.

На рис. 200 показан бакенный светосигнальный прибор с карданным подвесом ФБК-75. В этом приборе к корпусу *12*, имеющему вид цилиндрического патрубка, приварены три стойки *1*, а к вершинам стоек приварено неподвижное кольцо *2*, к которому шарнирно прикреплено первое подвижное кольцо *7*. С по-

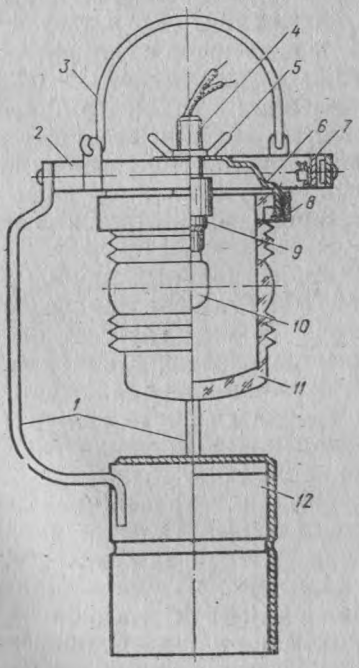


Рис. 200. Светосигнальный прибор с карданным подвесом

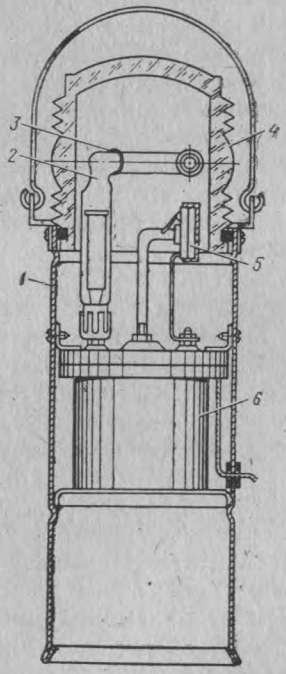


Рис. 201. Газосветный прибор кругового действия

мощью двух металлических кронштейнов (на рисунке не показаны, так как расположены в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка) к первому подвижному кольцу *7* также шарнирно прикреплено второе подвижное кольцо *8*, которое жестко соединено с линзой *11*. Такое устройство позволяет линзе вращаться в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях (карданный подвес). При надобности добавляется светофильтр.

На линзу *11*, в зазор между ее буртиком и вторым подвижным кольцом *8* надевается крышка *6* прибора. В середине этой крышки имеется резьба, в которую ввинчивается штуцер *4*, к нижнему концу которого прикреплен патронодержатель *9* с лампой *10*. В настоящее время эти приборы имеют пластмассовый штуцер, представляющий с патронодержателем одну деталь. При фокусировке штуцер ввинчивают или вывинчивают из крышки *6* и закрепляют в нужном положении с помощью барашка *5*. Провода для питания электролампы проходят внутри штуцера, как показано на рисунке. Прибор имеет ручку *3*. Бакенный прибор ЭСПК-75 с карданом имеет те же составные части, но другую конструкцию.

Благодаря карданному подвесу при качании бакена ось прибора сохраняет вертикальное положение и кольцевой пучок лучей, распространяющийся во все стороны от линзы под заданным при фокусировке углом к поверхности воды, сохраняет этот угол наклона при качаниях бакена. Фактором, способствующим поддержанию линзы в вертикальном положении, служит также ее сравнительно большой вес. Дальность видимости с лампой 2,5 В— 0,45 А при слабой дымке: белого огня — 2,4, цветного — 1,0 км.

Бакенный прибор с лампой накаливания и такой же линзой, но без карданного подвеса, устроен аналогично описываемому далее светосигнальному прибору ЭСП-105. При наклоне такого бакенного прибора на несколько градусов резко снижается сила света в направлении горизонта и, следовательно, уменьшается его дальность видимости.

На рис. 201 показан бакенный светосигнальный прибор кругового действия с газосветной трубкой (ФБГ). Этот прибор состоит из цилиндрической линзы *4* диаметром 75 мм, газосветной трубки *2*, металлического корпуса *1*, преобразователя *6* напряжения с 2,5 на 1000 В, фоторезистора *5* внутри линзы для отключения прибора в светлое время. Газосветная трубка свернута кольцом диаметром 5 см, расположенным в фокальной плоскости линзы, и имеет резиновые предохранительные кольца *3*.

Линза предохраняет трубку от внешних воздействий и дает увеличение силы света в 1,5—2 раза в горизонтальном направлении. Дальность видимости в условиях слабой дымки при токе 0,4 А цветного огня 0,8 км. Такую же примерно дальность видимости дают бакенные приборы с линзой Л-75 и лампой накаливания той же мощности при одинаковой цветности. Однако характер светораспределения в вертикальной плоскости у приборов с газосветной трубкой и лампой накаливания совершенно различен.

Прибор с газосветной трубкой имеет большой вертикальный угол рассеивания, и при установке на знаке с наклоном 15° дальность его видимости практически такая же, как и без наклона. Трубки обеспечивают цветное излучение от источника света без применения светофильтров. Кроме того, этот прибор при питании через преобразователь напряжения *6* мало чувствителен к изменению величины питающего напряжения. Так, например, при снижении напряжения с 2,5 на 2 В сила света приборов с лампой накаливания снижается почти вдвое, а газосветного — менее чем на 10%.

Срок службы газосветной трубки доходит, как уже упоминалось, до 10 тыс. ч, что обеспечивает высокую надежность сигнального огня, в то время как лампы накаливания служат не более 350 ч. Установка трубки в газосветных приборах не требует, в отличие от лампы накаливания, особой тщательности. При установке же в прибор лампы накаливания отклонение от фокуса в долях миллиметра дает резкое снижение силы света в нужном направлении.

Несмотря на такие положительные качества газосветных приборов, широкому применению их пока препятствует несовершенство трубок, рассчитанных на питание от электросети, где стабильность параметров не имеет большого значения. Питание этих приборов, как правило, осуществляется от источников напряжением 2,5 В, а для зажигания трубок требуется, как уже отмечалось, напряжение до 1000 В и более.

При горении это напряжение на трубке уменьшается примерно в два раза. Преобразователь *6* служит для трансформации постоянного тока низкого напряжения в прерывистый высокого.

На рис. 202 представлен светосигнальный прибор ЭСП-90 кругового действия, предназначенный преимущественно для буев, а также для некоторых береговых знаков. Этот прибор состоит из цилиндрической линзы *3* диаметром 90 мм, лампы *5* накаливания 2,5 или 6 В, корпуса *1*, крышки *2*, фокусирующего устройства *6* с патроном, фотоавтомата *8*, защелки для закрепления крышки прибора *7* и ножек для крепления на знаке. Такие приборы выпускают двух типов: ЭСП-90К с линзой ЛК-90, дающей концентрированный в вертикальной плоскости световой поток, и ЭСП-90Р с линзой ЛР-90, дающей расходящийся в вертикальной плоскости поток. Для получения цветного огня внутри линзы устанавливают светофильтр *4*.

Осевая сила света линзы ЛК-90 больше, чем линзы ЛР-90; но под углом около 4° к оптической оси сила света этих линз становится одинаковой, а при дальнейшем увеличении угла рассеивания сила света линзы ЛР-90 уже становится больше, чем линзы ЛК-90. Эти особенности светораспределения позволяют разграничить область применения приборов ЭСП-90К и ЭСП-90Р. Приборы ЭСП-90К рекомендуются для знаков, постоянный угол наклона которых под действием ветра и течения не превышает примерно 4°. При больших постоянных углах наклона знаков целесообразно применять приборы ЭСП-90Р.

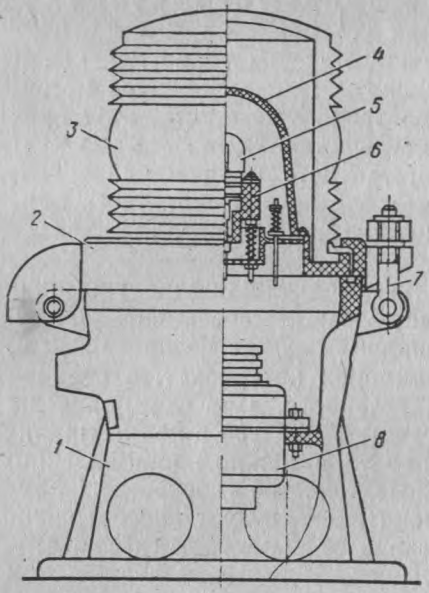


Рис. 202. Светосигнальный прибор ЭСП-90

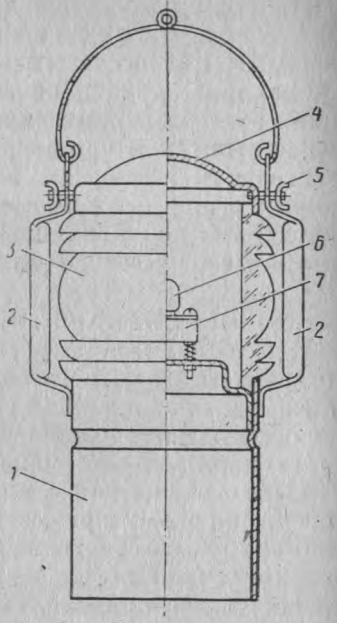


Рис. 203. Светосигнальный прибор ЭСП-105

Дальность видимости огней ЭСП-90К при вертикальной линзе с лампой 2,5 В—0,45 А при слабой дымке: белого огня — 2,7, цветного — 1 км, а с лампой 6 В — 3 А — соответственно 4,5 и 2 км. Применение намечаемой к выпуску конденсорной панели в виде приставки к линзе увеличивает дальность видимости по ее оси в два раза.

Береговой светосигнальный прибор ЭСП-105 кругового действия с лампой накаливания и цилиндрической линзой диаметром 105 км, используемый преимущественно на ходовых и весенних знаках и на мачтах, показан на рис. 203. В состав прибора входят: цилиндрический корпус *1*, стойки *2*, линза *3*, крышка *4*, лампа *6* на 2,5 или 6 В, фокусирующий патрон *7*, а также крепежный барашек *5*. Дальность видимости огней этого прибора с лампой 2,5 В—0,45 А при слабой дымке: белого огня — 2,8, цветного — 1,2 км. Прибор ЭСПК-90 с карданом и линзой ЛК имеет дальность видимости с лампой 6В—3А (при слабой дымке) белого огня — 4,5, цветного — 2 км.

На створных знаках в качестве светосигнальных приборов направленного действия с лампой накаливания применяются фарастворный прибор ФФ-160 и прибор ЭСПН-140. В фарастворном приборе с диаметром фары 160 мм используется параболоидный металлический отражатель. Угол рассеивания в горизонтальной плоскости при силе света, равной половине максимальной, составляет при разных лампах 1,5—3°. При необходи-

мости получения светового пучка с большим углом рассеивания при лампах на 2,5 В устанавливается стеклянный рассеиватель, повышающий угол рассеивания до 26°.

Светосигнальный прибор направленного действия ЭСПН-140 (рис. 204) состоит в основном из металлической автофары *1,* электрического патрона *2,* лампы *3* напряжением 2,5 или 6 В, фотоавтомата *4* и светофильтра *5* для цветного огня вместо переднего стекла. Этот прибор крепится к знаку с помощью кронштейна, при этом фотоавтомат прикрепляется к кронштейну отдельно от светосигнального прибора. Дальность видимости с лампой 2,5 В—0,16 А при слабой дымке на ширине 150 м составляет: белого огня — 2,8, цветного — 1,4 км. Намечается к выпуску светосигнальный прибор направленного действия ЭСПН-160 с двумя линзами 139 и 160 мм, двумя патронами и лампами для дальности видимости белого огня до 8,5 и цветного — 3,5 км.

Светосигнальный прибор направленного действия с газосветной трубкой ФСГ (рис. 205) для створных знаков имеет: металлический корпус *6;* прямолинейную газосветную трубку *2* длиной 400 мм; параболо-круговой отражатель *1* из белой жести, в фокусе которого и установлена газосветная трубка; фокусирующие стойки *4* для крепления трубки, длину которых

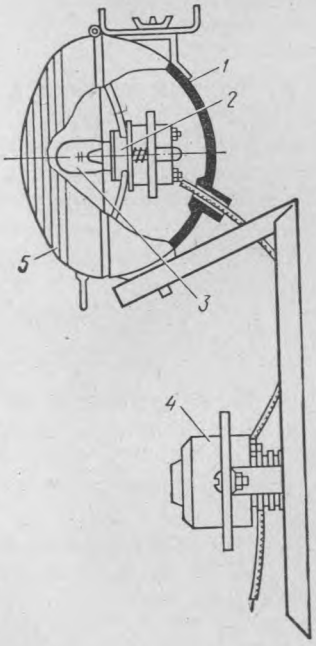


Рис. 204. Светосигнальный прибор ЭСПН-140

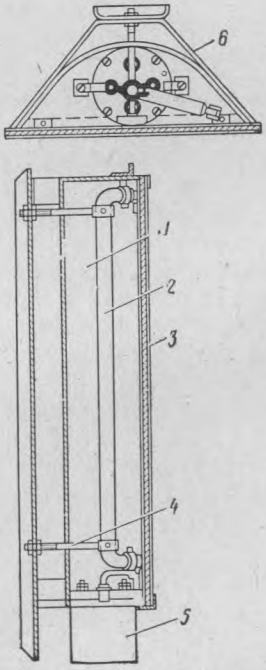


Рис. 205. Газосветный прибор направленного действия

можно регулировать; защитное стекло *3* в передней части корпуса; преобразователь напряжения *5,* установленный в нижней части прибора; фоторезистор для отключения трубки днем. Нижний конец трубки присоединяют к выводам преобразователя, а верхний — получает питание через корпус прибора.

Створный газосветный прибор дает огонь в форме вертикальной линии и обеспечивает хорошую видимость по всей ширине судового хода. Этот прибор, как и прибор ФБГ, мало чувствителен к величине питающего трубку напряжения. Дальность видимости в условиях слабой дымки при токе 0,4 А цветного огня 3 км.

На перевальных знаках используются для обозначения двух направлений судового хода по два фаростворных прибора и береговые приборы ЭСП-105. Можно также использовать по два створных прибора ФСГ с газосветной трубкой. Для перевальных и ходовых знаков намечается к выпуску светосигнальный прибор кругового и направленного действия ЭСПП-90. Дальность видимости с лампой 2,5 В — 0,45 А при слабой дымке: белого огня — 2,7, цветного — 1,0 км. Светосигнальные приборы секторного действия получают путем введения в береговые приборы ЭСП-105 шторок, закрывающих ненужную часть кругового обзора.

§ 77. АВТОМАТЫ И ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВЕТОСИГНАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Для управления светосигнальными приборами на знаках судоходной обстановки используются электронные устройства ФАУСП (фотоавтоматическое устройство светосигнального прибора), которые выполняются на основе полупроводниковых элементов и не имеют подвижных частей и контактов. Серия этих фотоавтоматов объединяет несколько их типов, отличающихся техническими характеристиками, а также работой в постоянном режиме напряжением 2,5 — 6 В или в прерывистом — напряжением 220 В. Основная масса сигнальных огней нуждается в простейших фотоавтоматах для включения и отключения лампы в зависимости от естественной освещенности.

Серийные фотоавтоматы сконструированы из функциональных блоков, сочетанием которых можно получить необходимый фотоавтомат. Блоки имеют одинаковое плановое расположение одноименных контактных выводов, и их соединение между собой не представляет трудности.

В состав блоков, каждый из которых выполняет определенную функцию, могут входить: фотодатчик — выключатель для отключения лампы при увеличении освещенности в диапазоне 100 — 300 лк; затмеватель для зажигания лампы на 2,5 с с интервалами 0,5 с; проблескатор, зажигающий лампу на 0,5 с с интервалами 2,5 с; повторитель проблеска для зажигания второй лампы на 0,5 с после гашения первой; группопроблескатор, зажигающий лампу два или три раза подряд по 0,5 с с интервалами между

группами вспышек 2,5 с; стабилизатор для поддержания на лампе определенного напряжения 2,5 или 6 В; усилитель, регулирующий ток в цепи лампы; дубликатор для включения резервной лампы при перегорании основной. Блоки выключателя, группопроблескатора, стабилизатора и усилителя изготовляются отдельно для напряжений 2,5 и 6 В.

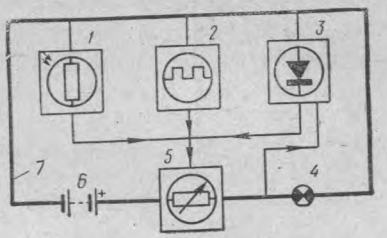


Рис. 206. Структурная схема фотоавтомата типа ПС-2,5

На рис. 206 приведена структурная схема фотоавтомата-проблескатора на 2,5 В ПС-2,5, подключенного к источнику питания *6* и сигнальной лампе *4*. В состав этого фотоавтомата входят четыре блока: фотодатчик *1*, проблескатор *2*, стабилизатор *3* и усилитель *5*. Напряжение питания 2,5—4 В, допустимый ток — 0,5 А.

Основная электрическая цепь *7*, питающая светосигнальную лампу, показана толстой линией, а цепь управления — тонкой. В основную цепь, кроме источника питания и лампы, включен также блок-усилитель, который является электронным ключом, управляемым датчиками. Если на усилитель не воздействует фотодатчик и другие блоки автомата, то он свободно пропускает ток и лампа горит под полным напряжением источника питания.

Блок-фотодатчик в зависимости от освещенности посылает на вход усилителя бóльший или меньший управляющий ток. Сопротивление усилителя от этого изменяется, и при освещенности больше 300 лк лампа гаснет, если освещенность мéньшая — лампа загорается. Поскольку сигнальные огни преимущественно действуют ночью, использование фотоавтомата увеличивает календарную длительность действия источников тока (аккумулятора или батареи) и света (лампы). Блок-проблескатор обеспечивает прерывистое горение (обычно на 0,5 с) сигнальной лампы, вырабатывая импульсы тока, при воздействии которых на усилитель лампа гаснет (обычно на 2,5 с).

Блок-стабилизатор контролирует и поддерживает постоянное напряжение на лампе, посылая в усилитель ток управления, увеличивающий его сопротивление настолько, чтобы напряжение на лампе сохранялось равным заданному. Стабильность напряжения обеспечивает постоянство силы света сигнального огня и расчетную дальность его видимости. Стабилизатор действует только в том случае, когда источник тока имеет напряжение больше заданного, избыток которого гасится в выходном транзисторе усилителя, за счет чего он во время работы нагревается.

При питании ламп от сухих батарей стабилизатор напряжения фотоавтомата предохраняет лампу от перенапряжения в начальный период разрядки и затем при подстановке дополнительных элементов. Стабилизация напряжения необходима также при питании светосигнальных приборов от береговых электрических се-

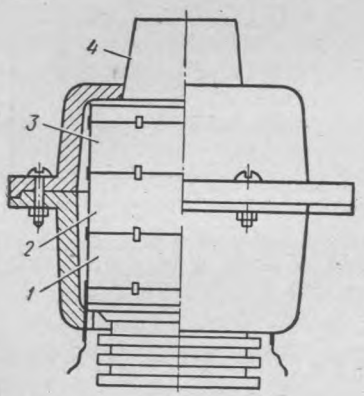


Рис. 207. Общий вид фотоавтомата

тей, имеющих значительные колебания напряжения. При питании выпрямителя светосигнального прибора от сети следует рассчитывать так, чтобы выпрямленное напряжение было лишь немного (на 15—20%) больше номинального.

Внутреннее устройство одного из фотоавтоматов, состоящего из четырех блоков, показано на рис. 207. Здесь *4* — блок-фотодатчик — выключатель, *3* — блок-проблескатор, *2* — блок-стабилизатор напряжения и *1* — блок-усилитель. В фотоавтоматах, обеспечивающих группопроблесковый или затмевающийся огонь, вместо блока-проблескатора установлен блок-группопроблескатор или блок-затмеватель.

В местах разделения судового хода находят применение двойные сигнальные огни, для обеспечения которых используются сдвоенные светосигнальные приборы с фотоавтоматами зависимого действия. Такие сдвоенные приборы работают в проблесковом режиме и зажигают поочередно красный и зеленый огни. Красный огонь управляется обычным фотоавтоматом-проблескатором и зажигается первым. Зеленый огонь зажигается в момент гашения красного огня специальным автоматом-повторителем проблеска.

При установке двух светосигнальных приборов, один из которых резервный, применяются два автомата. Основной прибор управляется обычным фотоавтоматом, а для включения резервной лампы устанавливается специальный автомат-дубликатор. При перегорании основной лампы происходит переключение действия сигнала на резервную лампу с помощью обычного блока-усилителя с несколько измененным входом.

Все серийные фотоавтоматы (ФАУСП) имеют корпус одного образца, что позволяет устанавливать любой из них на специально предусмотренное место в светосигнальных приборах или отдельно — например в контейнерах с источниками питания. При установке фотоавтомата со светосигнальным прибором направленного действия фотодатчик направляют в ту же сторону, что и прибор.

Устройство фотоавтоматов позволяет заменять функциональные блоки в них и восстанавливать неисправный автомат без особых трудностей. Замена блоков может производиться также для переделки фотоавтомата с одного напряжения на другое (меняется блок-стабилизатор) или для переделки проблескового фотоавтомата на фотовыключатель (удаляется проблескатор). Блоки-проблескаторы и группопроблескаторы работают при напряжениях от 2,5 до 12 В, поэтому их можно использовать в любых

фотоавтоматах. При выборе фотоавтомата руководствуются характеристикой работы сигнальной лампы и ее мощностью.

Электрический ток, питающий светосигнальные приборы судоходной обстановки, поступает, как уже упоминалось, в основном от автономных источников питания — аккумуляторов и сухих (гальванических) батарей. Береговая электросеть используется для питания сигнальных приборов на береговых знаках, если она расположена недалеко от них, непрерывно действует и подает ток напряжением не свыше 220 В. Для использования тока от береговой сети прокладывается специальная линия ответвления, которая может питать несколько сигнальных приборов в радиусе 200—500 м, зарядную станцию для аккумуляторов и осветительную сеть постового домика.

В судоходной обстановке применяют щелочные железо-никелевые (ЖН) и кадмий-никелевые (КН) аккумуляторы и сухие батареи: «Прибой» 1,3НВМЦ-500; «076» 1,3НВМЦ-700; «Бакен» 1,3НВМЦ-900; «Волна» 1,3НВМЦ-1500. Под обозначением 1,3НВМЦ понимают батареи «накальные воздушно-марганцево-цинковые» с начальным напряжением 1,3 В, а под числами 500—1500 — марочную емкость в А·ч.

От аккумуляторов получают питание светосигнальные приборы на береговых знаках, а также на плавучих знаках, мало повреждаемых судами и плотами. Аккумуляторы выпускаются отдельными элементами (банками) емкостью ЖН-45,60; 100 А·ч и КН-55,80; 125 А·ч. Начальное напряжение каждого элемента 1,25 В, конечное — 1,1 В; зарядный ток 12—31 А. Потеря емкости на саморазряд составляет для аккумуляторов ЖН за 6 дней при 20°С 14% и при 40° 66%, для КН — соответственно 7 и 10%.

Электролитом в щелочных аккумуляторах служит раствор едкого кали в дистиллированной воде, в южных районах с высокой температурой — раствор едкого натра. Добавление в электролит моногидрата лития обеспечивает более длительное время службы аккумуляторов и понижает точку замерзания электролита. Аккумуляторы ЖН предназначены для северных и средних широт, а КН — для южных широт, но последние могут применяться в любых широтах.

Для питания ламп на 6 В используются аккумуляторные батареи 6ЖН-45 из шести последовательно соединенных элементов с емкостью 45 А·ч, для ламп СГВ на 2,5 В составляют батареи 3ЖН-45 из трех элементов с той же емкостью 45 А·ч. Следует иметь в виду, что при последовательном соединении элементов аккумулятора увеличивается только его напряжение, а емкость не изменяется. Аккумуляторы при правильной эксплуатации выдерживают несколько сотен зарядно-разрядных циклов и могут прослужить более 10 навигаций.

Зарядка аккумуляторов производится на судовых и береговых зарядных станциях. Судовые зарядные станции имеются на обстановочных теплоходах, а береговые располагают в прибрежных пунктах с постоянно действующей электросетью. При невозмож-

ности использовать береговую сеть для зарядки аккумуляторов и отсутствии судовой зарядной станции создаются автономные зарядные станции с двигателем и генератором.

Заряженные аккумуляторы проверяют, чтобы установить, имеют ли они достаточное напряжение: для батареи 3ЖН оно должно быть с учетом потерь на стабилизацию 2,7—4,0 В и для батареи 6ЖН 6,2—9,0 В. Нормальный срок действия заряженного аккумулятора определяется делением его емкости на разрядный ток лампы и умножением результата на коэффициент 0,9, учитывающий саморазряд аккумулятора. Так, лампа СГВ с разрядным током 0,24 А будет гореть от аккумуляторной батареи емкостью 45 А·ч нормальным накалом около 170 ч, лампа СГВ с разрядным током 0,45 А — 90 ч.

При средней продолжительности горения сигнальных огней в средней полосе СССР 5 ч в сутки летом и 12 ч — осенью аккумуляторную батарею 3ЖН-45 при питании лампы СГВ на 0,24 А достаточно было бы менять через 34 сут летом и через 14 сут осенью. Практически же, вследствие саморазряда аккумуляторов, увеличивающегося с повышением их температуры и продолжительности саморазряда, а также из-за испарения электролита и необходимости добавления дистиллированной воды приходится и летом аккумуляторы подзаряжать значительно чаще. Лампы на 0,45 А, питаемые от аккумулятора 3ЖН-45, могут гореть с нормальным накалом летом около 18 сут и осенью — 8 сут, но практически их также подзаряжают чаще.

Аккумуляторы 3ЖН-45 рекомендуются для питания постоянных огней преимущественно ламп на 2,5 В, с разрядным током 0,16—0,45 А, при этом время их действия будет соответственно 20 — 8 сут, а также для питания проблесковых огней преимущественно ламп на 6 В с разрядным током 0,33—2,0 А, время их действия в этом случае составит 30—10 сут.

Сухие (гальванические) батареи являются простыми и удобными в эксплуатации автономными источниками питания, хотя и имеют некоторые недостатки. К последним относятся: недолговечность (не могут храниться больше года — саморазряжаются под нагрузкой и при бездействии), быстрая потеря напряжения при непрерывной работе (видимость огня к утру становится хуже, чем была вечером). В отличие от аккумуляторов запас энергии у сухих батарей не восстанавливается и после израсходования емкости их использовать нельзя.

В сухих батареях «Прибой», «076», «Волна» допустимый ток — 0,3 А, в батарее «Бакен» — 0,65 А. При работе с проблесками допустимый ток может быть увеличен в 1,5—2 раза. Длительность работы при полной нагрузке свежезаряженных батарей «Прибой», «076», «Бакен», «Волна» составляет соответственно 20—30—40—60 сут; через 7 мес. хранения — от 13 до 40 сут и через 12—15 мес.— примерно в два раза меньше, чем через 7 мес.

Во избежание резкого снижения силы света электролампы по мере сработки питающих ее батарей до напряжения 2,2—2,0 В

подключают последовательно дополнительные батареи из числа уже использованных и разряженных до напряжения 0,90—0,95 В. Если при таком подключении напряжение в цепи возрастет против нормального более чем на 10—12%, то во избежание быстрого перегорания лампы в цепь включают последовательно с батареями соответствующее дополнительное сопротивление, которое в дальнейшем при падении напряжения снимается. Соответствующее подключение использованных батарей применяется и при питании автомобильных ламп. Такое подключение повышает полезную отдачу электроэнергии, позволяя использовать ее в количествах, соответствующих марочной емкости батарей.

Монтаж электропроводки на знаках судоходной обстановки заключается в соединении двумя изолированными проводами источников питания — аккумулятора, сухой батареи или проводов береговой сети с двумя клеммами патрона лампы. Аккумулятор и сухую батарею содержат в специальном ящике, покрытым изоляционным материалом.

Наличие тока в цепи светосигнального прибора проверяется контрольной лампой, а величина напряжения сухих батарей, питающих огни,— вольтметром. Состояние аккумуляторов проверяется нагрузочной вилкой. Для восстановления работоспособности щелочных аккумуляторов электролит в них меняют не реже раза в навигацию, т. е. через 6—7 мес. В жаркое время через отверстия сухих батарей электролит частично испаряется и для восстановления их работоспособности в них вливают раствор нашатыря или кипяченую остуженную воду.

Глава XII

РАССТАНОВКА ЗНАКОВ И ИХ НАВИГАЦИОННОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

§ 78. РАССТАНОВКА ЗНАКОВ НА РЕКАХ

Основной вид знака для каждого плеса реки выбирают в зависимости от средней величины расчетного расстояния, с которого должен быть виден знак. Для расчетных расстояний больше среднего знаки обстановки с соответствующей дальностью видимости подбирают индивидуально. На магистральных водных путях устанавливают преимущественно береговые знаки высшей категории. На реках, эксплуатируемых в течение всего навигационного периода, береговая обстановка включается в действие, как только суда начнут работать, т. е. до очищения реки ото льда, и выключается после прохода последнего судна; плавучая обстановка содержится с момента очищения реки ото льда и до появления шуги и сала.

На реках различают, как уже отмечалось, судоходную обстановку паводковую и меженную. Паводковая обстановка содержится при высоких уровнях, меженная — при наступлении низких уровней воды. На реках с поводком в начале навигации меженная обстановка вводится постепенно, по мере спада паводка и вхождения реки в меженные берега. На реках с паводком не в начале навигации или совсем без паводка меженную обстановку выставляют сразу после очищения реки ото льда.

На реках в межень, если возможно расположить береговые знаки с необходимой видимостью, применяют преимущественно *береговую обстановку*, указывающую направление судового хода. Береговая обстановка имеет ряд преимуществ перед плавучей: бóльшую сохранность знаков (не сбиваются судами и плотами), бóльшую надежность их бесперебойного действия, широкие возможности электрификации знаков, а также внедрения оптики и автоматики. При хорошей видимости сети береговых знаков роль плавучих знаков заключается в более точном определении границ судового хода на перекатах, в ограждении подводных препятствий и в обозначении тиховодов для судов, идущих против течения.

Различают меженную обстановку *плесовую* и *перекатную*. Плесовая обстановка состоит преимущественно из береговых знаков, указывающих направление судового хода. Расстановка береговых знаков на плесовых участках остается почти постоянной, так как положение судового хода на них изменяется редко и незначительно. Плавучие знаки на плесовых участках ставят только для ограждения примыкающих к судовому ходу подводных препятствий.

Знаки судоходной обстановки на реках расставляют согласно составленной проектной схеме, которая ежегодно корректируется. В проектной схеме указывают последовательность расположения и состав береговых знаков, а также количество и примерную расстановку плавучих знаков. Проектную схему составляют отдельно на паводковый и меженный периоды навигации.

Перестановка знаков обстановки в течение навигации, вызываемая текущими изменениями в положении судового хода, производится с сохранением по возможности общей схемы их расположения. О всех значительных изменениях действующей схемы расстановки знаков обстановки судоводителей извещают информационными бюллетенями, радиоинформацией и путевыми листками.

Судоходная обстановка обычно обеспечивает непрерывную цепь знаков для указания направления судового хода на всем его протяжении. Не соблюдается это условие только на участках рек, где отсутствуют затруднительные для судоходства перекаты и где ширина судового хода значительно превышает гарантированную. На таких участках ограничиваются установкой знаков лишь для ограждения отдельных препятствий и затруднительных мест. Кроме того, на реках указываются кромки судового хода, но не на всем протяжении, а только на определенных участках. Эти участки устанавливаются из условия обеспечения безопасного маневрирования судовых и плотовых составов при ограниченной по ширине полосе судового хода. На путях первой группы обязательна и непрерывная цепь сигнальных огней.

Направление судового хода на реках указывается, как сказано выше, преимущественно береговыми знаками обстановки. На рис. 208 показана схема расстановки береговых знаков на участке реки, где нет перекатов или других препятствий, требующих постановки плавучих знаков. На участках, где судовой ход проходит в средней части русла или переходит (переваливает) от одного берега к другому, направление его указывается створными, створно-перевальными и перевальными знаками.

Перевальные знаки, указывающие только общее направление судового хода без точной ориентации его положения, применяются на плесовых участках с длиной прямолинейного перевала не более 3 км и при условии, что ширина полосы для свободного расхождения судовых и плотовых составов больше гарантированной ширины судового хода в 3 раза и более. Если же ширина этой полосы превышает гарантийную ширину судового хода только в 2 раза, то предельная длина перевала, обставляемого перевальными знаками, сокращается до 1,5 км. Перевальные знаки применяют также на перекатных участках, где общее направление судового хода с перевалом к одному из берегов в течение навигации сохраняется (хотя и изменяется в зависимости от стояния уровней воды и расположения дноуглубительных прорезей) и где, кроме береговой, содержится плавучая обстановка.

Перевальный знак указывает два направления судового хода на двух смежных перевалах, для чего щиты знака располагают

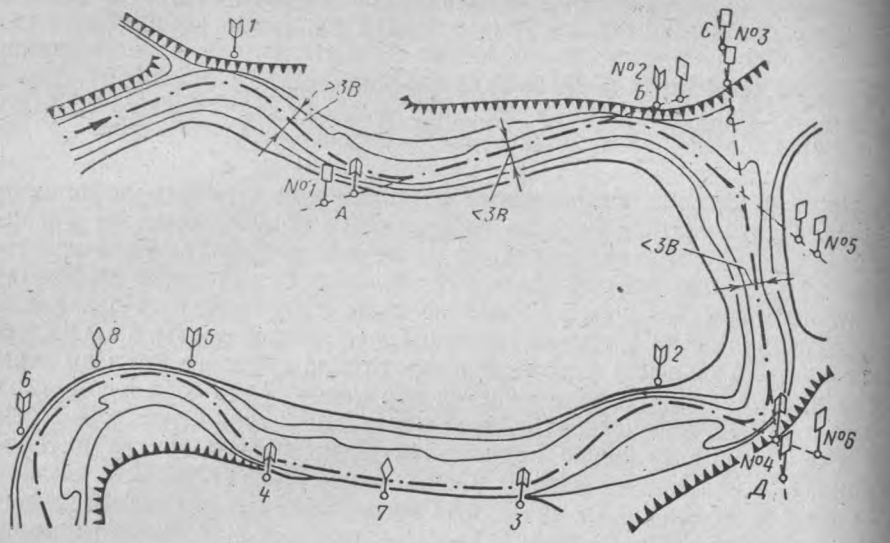


Рис. 208. Схема расстановки береговых знаков на плесовом участке реки: *1—6* — перевальные знаки; № 1—6 — линейные створы; *А* и *Б* — створно-перевальные знаки; *7, 8* — ходовые знаки; створы № 4 и 6 — створ-тройник (два знака створных, один створно-перевальный)

перпендикулярно каждому направлению судового хода. Если же судовой ход за или перед перевалом проходит вдоль берега, то соответствующий щит перевального знака для лучшей видимости его с судов располагают не перпендикулярно линии берега, а под углом к ней в 75—80°.

Прямолинейные участки судового хода как на реках, так и на водохранилищах могут иметь двустороннее (встречное) или одностороннее расположение створов. При двустороннем или встречном расположении створов как линейных, так и щелевых створные знаки ставят на обоих концах створной линии, и судоводители при движении судна в любом направлении могут ориентироваться по передним створам. При одностороннем расположении створов их знаки устанавливают только на одном конце створной линии, и судоводители при движении судна в одном направлении ориентируются по передним створам, а при движении обратно — по задним, расположенным за кормой судна, что менее удобно.

Створные знаки устанавливают во всех случаях, когда требуется точное указание положения судового хода. Встречные створы обязательны при длине заствориваемого участка более 5 км, если это позволяют берега. На реках I группы встречные створы устанавливают и на более коротких (но не менее 1 км) участках, если это возможно по очертаниям береговой полосы. Не ставят встречные створы в тех случаях, когда их приходится выносить далеко

за пределы застворяемого участка судового хода, так что протяжение неходовой части створа будет больше, чем сама ходовая его часть. Вообще створные знаки ставят так, чтобы при движении судна в грузовом направлении они находились перед ним.

На рис. 208 створ № 1 и встречный ему № 2 определяют положение судового хода на участке *АБ* протяжением 2,5 км, где ширина судоходной полосы меньше тройной гарантированной ширины ($<3B$). На участке *СД* поставлен один створ № 4, так как неходовая часть встречного створа № 3 была бы больше 1 км. На рисунке положение этого встречного створа № 3 показано пунктирной линией. Для выхода же на створ № 4 установлен короткий створ № 5. Там, где застворяются два последовательно расположенных участка судового хода, ставят створы-тройники. Они состоят из трех знаков, образующих две пары створов. На рис. 208 это створы № 4 и 6.

Если застворению подлежит только один участок судового хода, а на следующем за ним участке достаточно перевального знака, ставят створно-перевальный знак. Передний знак в этом случае имеет два щита и один из них вместе со щитом заднего знака образует линию створа. Другой щит, выполняющий функцию перевального знака, расположен перпендикулярно направлению судового хода или, если судовой ход проходит вдоль берега, под углом к нему в 75—80° (створно-перевальные знаки *1* и *2* на рис. 208).

Если между двумя застворяемыми участками судовой ход проходит вдоль берега не более 500 м и при подходе судна к одному створу судоводителю хорошо виден следующий створ, знаки обоих створов делают без перевальных щитов. В ночное время на передних знаках таких створов устанавливают створно-перевальные сигнальные фонари.

На участках, где судовой ход на большем протяжении проходит вдоль одного и того же берега, положение его указывается ходовыми знаками. Ходовые знаки ставят в том случае, когда протяжение участка судового хода, примыкающего к берегу, больше расчетной дальности видимости створно-перевальных или перевальных знаков, установленных по концам этого участка (ходовой знак 7 на рис. 208), или когда вследствие сильной вогнутости ходового берега прямая, соединяющая расставленные по концам участка створно-перевальные или перевальные знаки, выходит за кромки полосы судового хода (ходовой знак 8). Расстояние между смежными ходовыми знаками определяется условиями видимости со знака на знак.

Ходовые знаки устанавливают также и на тех участках, где полоса русла, непосредственно примыкающая к берегу, несудоходна (вследствие засоренности упавшими деревьями, карчами, высыпками из оврагов и т. п.), но имеет ширину не более 10—30 м. При бóльшем удалении судоходной полосы от берега ходовые знаки не ставят и судовой ход на этом участке обставляют створными и плавучими знаками.

Плавучая обстановка рек, ограждающая судовой ход, расставляется по латеральной системе (знаки ставят по сторонам судового хода); только в устьях больших рек эта обстановка может быть расположена по кардинальной системе (знаки указывают взаимное положение опасности и знака относительно четырех сторон света).

Плавучая обстановка на реках дополняет береговую, указывая кромки судового хода на отдельных его участках. По расположению знаки плавучей обстановки подразделяются на основные и вспомогательные. По форме основные и вспомогательные плавучие знаки одинаковы. К основным плавучим знакам относятся такие, без которых на данном участке не могут быть обеспечены условия, необходимые для безопасного плавания судов.

На плесовых участках рек, где судовой ход проходит в средней части русла, полого переваливает от одного берега к другому или проходит вдоль одного из берегов, ограждают основными плавучими знаками следующие опасные препятствия: каменистые огрудки и камни-одинцы, затопленные суда и якоря, замытые в грунт бревна и карчи и т. д. Эти препятствия ограждают в том случае, когда глубина на них превышает транзитную не более чем на 30—50 см и когда они находятся в пределах судоходной полосы, ширина которой принимается на реках I и II групп равной двойной гарантированной ширине судового хода и на реках III группы равной полуторной гарантированной ширине. Выправительные и водозаборные сооружения, выступающие к судовому ходу, тоже ограждают плавучими знаками, как и опасные подводные препятствия.

Для ограждения некоторых препятствий, особенно опасных для судоходства (затопленные близ судового хода суда; головы выправительных сооружений, выступающие до судового хода; оставшиеся неубранными устои или кусты свай от бывших на этом участке реки мостов, водозаборных или других сооружений), устанавливают два плавучих знака. Один из них, называемый дублирующим, помещают на самом препятствии, а другой, являющийся основным,— на одном траверзе с дублирующим, на расстоянии 10—15 м от него в сторону судового хода.

На рис. 209 показана схема расстановки плавучих знаков, ограждающих рассмотренные препятствия. Знак *1* ограждает

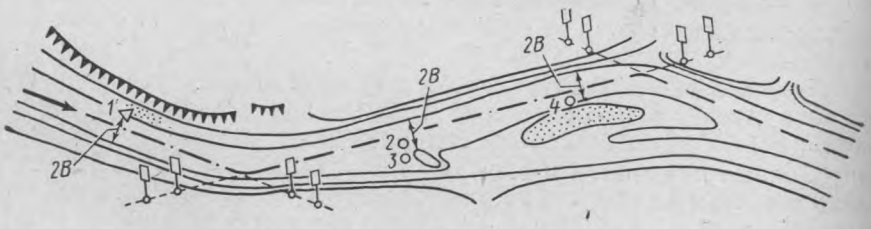


Рис. 209. Схема расстановки плавучих знаков на плесовом участке реки

огрудки, знак *2* — затопленное судно, знак *3* является дублером знака *2*. Знак *4* (вспомогательный) установлен у песчаной отмели, стесняющей судовой ход до двойной гарантированной ширины.

Вспомогательными плавучими знаками ограждают грунтовые отмели, если глубины на них меньше транзитной и если они находятся в пределах судоходной полосы, имеющей ширину, равную на реках I группы двойной гарантированной ширине судового хода и на реках II группы,— полуторной гарантированной ширине. На реках III группы эти грунтовые отмели не ограждают. Приглубый песок, расположенный у берега, противоположного ходовому, если тиховод вдоль него используется для движения судов вверх, ограждают вспомогательными плавучими знаками независимо от ширины судового хода.

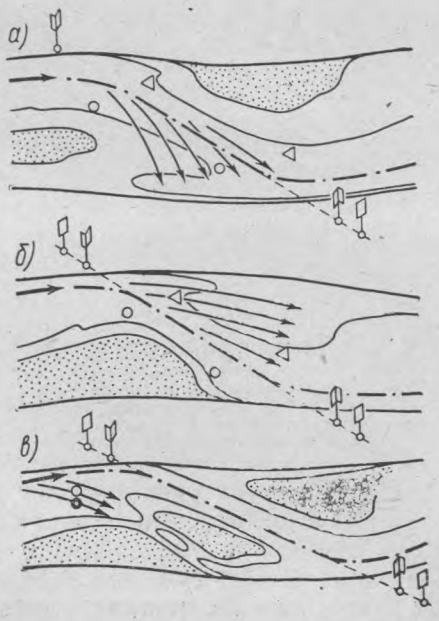


Рис. 210. Схемы расстановки плавучих знаков на перекатах

На рис. 210 показаны схемы расстановки плавучих знаков на перекатах. На перекатах, где судовой ход направлен по перевалу от одного берега к другому, состав плавучей обстановки определяется в зависимости от длины корыта переката и от наличия поперечных свальных течений. На перекатах, длина корыта которых не превышает двойной ширины судового хода, допустима установка только двух знаков: одного на входе и одного на выходе. Перекаты, длина корыта которых больше двойной ширины судового хода, обставляют преимущественно четырьмя знаками — двумя на входе и двумя на выходе. Знаки на кромках судового хода не ставят один против другого, а несколько сдвигают в продольном направлении.

Дополнительно обставляют подходы к сложным перекатам с большим свалом воды в затонскую часть, с низким нижним побочнем и при узких плесовых лощинах. Если судовой ход в пределах корыта переката имеет перелом, то устанавливают промежуточные знаки, указывающие место поворота судового хода.

Основными плавучими знаками на перекатах являются те, к которым оттягивают судовые составы и плоты при прохождении переката. Так, при сливе воды в затонскую часть и крутом подвалье (рис. 210, *а*) основными являются верхний знак у нижней косы и нижний знак — у верхней. На перекатах с низким нижним



Рис. 211. Схема расстановки знаков на участке реки в половодье:
1, 3 — весенние знаки; *2* — плавучий знак; *4* — весенний створ; *5* — меженный створ с перевальным знаком; *6* — перевальный знак для меженного судового хода

побочнем (рис. 210, *б*) основными являются знаки, обставляющую верхнюю косу.

Рассмотренная расстановка основных и вспомогательных плавучих знаков применяется на тех перекатах, на которых ось судового хода закреплена створными знаками, а ширина судового хода — менее полуторной гарантированной для рек I и II групп и равна гарантированной для рек III группы. При соответственно большей ширине судового хода и наличии створов все плавучие знаки на перекате являются вспомогательными.

На перекатах типа россыпи, где судовой ход, стесненный побочнями и осередками, может быть искривлен в нескольких местах, промежуточных плавучих знаков должно быть столько, чтобы линия кромки судового хода, определенная соседними знаками, не пересекалась отмелями, глубина на которых меньше транзитной. Там, где для судоходства открыты два судовых хода, выше и ниже их разветвления ставят разделительные плавучие знаки.

На перекатах и на других участках реки, где имеются свальные течения (поперечные или направленные под углом к линии судового хода), ставят свальные знаки (рис. 210, *в*, здесь свальный бакен обозначен двойным кружком). Свальный знак устанавливают вне судового хода, за той кромкой, в сторону которой направлено свальное течение воды, и на расстоянии 5—10 м от этой кромки. На кромке судового хода против свального знака устанавливают основной плавучий знак для ограждения свального.

Открытые для взводного судоходства дополнительные судовые ходы по тиховодам, проходящие вдоль одного из берегов, обставляют при песчаном русле вспомогательными плавучими знаками, преимущественно неосвещаемыми. Освещаемую обстановку на тиховодах и вторых ходах по воложкам и рукавам содержат только на участках с интенсивным судоходством во взводном направлении. Дополнительно к ней могут выставляться плавучие вехи.

На реках иногда выставляют плавучую обстановку для плотовых составов. Плотовым составом обычно требуется меньшая глубина, но бóльшая ширина и бóльшие радиусы закруглений, чем составам судов. В связи с этим наряду с обычной обстановкой, указывающей положение основного транзитного судового хода для судовых составов, на затруднительных участках выставляют за одной из кромок судового хода вторую линию плавучих знаков, обозначающих границу хода для плотовых составов.

Судовой ход в условиях паводка не везде имеет строго определенное положение, и поэтому необязательно, чтобы его направ-

ление было непрерывно обозначено береговыми знаками (рис. 211). На период паводка могут быть выставлены паводковые створные знаки, определяющие направление судового хода только в этот период. Если с наступлением меженных уровней воды направление судового хода меняется, то паводковые створные знаки своевременно убирают.

Для ограждения затопленных бровок меженных берегов и затопленных островов, расположенных на тех участках паводкового русла, где в этот период плавают суда, устанавливают весенние знаки. Весенний знак не указывает направления судового хода, а только предупреждает об опасности. Весенние знаки могут использоваться в меженный период в качестве ориентиров и для ограждения выступающих на судовой ход незатопляемых мысов.

Плавучую обстановку в паводковый период сводят к минимуму. Паводковые плавучие знаки (буи и бакены) применяют для ограждения тех препятствий, установка на которых постоянных весенних знаков невозможна, например на затопленных головах выправительных сооружений, а также для ограждения затопленных островов и яров, каменных высыпок и т. п., где весенние знаки не выставляют, так как они могут быть уничтожены ледоходом.

Перекатные сигнальные мачты устанавливают на берегу выше и ниже переката на таком расстоянии, чтобы судоводитель, увидев вывеску глубин, в случае необходимости своевременно сделал оборот и остановил судно в безопасном месте. Обычно сигнальные мачты ставят на 300—800 м выше и на 200—500 м ниже переката.

Сигнальные мачты устанавливают преимущественно на лимитирующих перекатах рек I и II групп с гарантированными габаритами пути. На реках, где габариты пути не гарантируются, сигнальные мачты ставят на лимитирующих перекатах только при отсутствии радиосвязи для передачи на суда сведений о габаритах пути.

Если промежутки между перекатами не превышают по длине 1—2 км, ставят одну пару сигнальных мачт, показывающих наименьшие габариты судового хода для данной группы перекатов. На реках с бригадным методом обслуживания, где информация о глубинах на лимитирующих перекатах регулярно передается по радио, сигнальные мачты могут не устанавливаться. Плесовые сигнальные мачты помещают на границах участков, протяжение которых определяется в зависимости от средней величины суточного пробега грузовых составов.

Знаки глубины судового хода вывешивают на мачтах на спаде половодья, когда появляется на перекате или плесе глубина, превышающая осадку наибольших плавающих судов только в 1,25 раза. При глубине больше указанной величины на мачтах должна быть вывешена крестообразная сигнальная фигура (крест).

Семафорные мачты устанавливают на берегу в верхней и нижней частях участка с односторонним движением и на

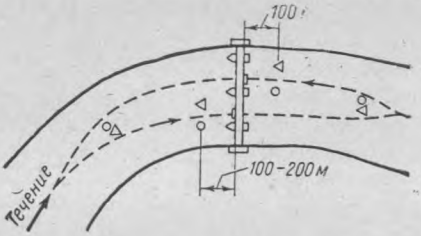


Рис. 212. Схема расстановки плавучих знаков на примостовом криволинейном участке

таком расстоянии от него, чтобы с подходящих судов своевременно могли увидеть семафорные сигналы и в случае необходимости остановиться в безопасном месте. К участкам с односторонним движением обычно относятся рукава, протоки и крутые колена, имеющие узкий и извилистый судовой ход (на которых встречные суда не могут разойтись или на которых с одного встречного судна не видно другого), а также участки, где не допускается двустороннее движение из-за больших скоростей течения или значительного числа препятствий для судоходства.

На обеих семафорных мачтах, ограждающих участок с односторонним движением, вывешивают одинаковые семафорные знаки или световые сигналы. С этой целью на длинных засемафоренных участках, где с одной семафорной мачты другая не видна, мачты соединяют телефонной связью или радиосвязью. На всех современных электрифицированных шлюзах применяют светофоры, которые имеют два огня: зеленый, разрешающий проход судам, и красный — запрещающий.

Выше и ниже участка с односторонним движением перед семафорными мачтами, а также на подходах к участкам пути, где расхождение и обгон судов затруднительны, на расстоянии 200—500 м от захода в такой участок сверху и снизу по течению располагают на берегу знаки «Сигнал».

На участках рек с мостовыми переходами выставляют плавучую направляющую обстановку (рис. 212). Если мост расположен на прямолинейном участке судового хода и течение воды направлено по оси мостового пролета, то на подходе к пролету, открытому для движения по течению, на расстоянии от моста 100—200 м ставят одну пару плавучих знаков. На подходе к пролету, открытому для движения против течения, установка таких знаков необязательна.

Если мост расположен на криволинейном участке русла (см. рис. 212) или если течение воды на подходе к мосту направлено под углом к оси мостового пролета, то плавучая обстановка выше моста состоит из двух и более пар знаков. Ближнюю к мосту, или нижнюю пару верховых знаков, помещают на расстоянии от него 100—200 м, вторую, или верхнюю пару верховых знаков,— на расстоянии 400—1000 м. Знаки верхней пары располагают так, чтобы образуемая ими и знаками нижней пары линия судового хода совпадала с направлением течения. Ниже моста, на расстоянии 100 м от него, устанавливают только одну пару плавучих знаков.

В тех случаях, когда пролеты, открытые для движения судов против течения и по течению, граничат друг с другом, у нижней

пары знаков выше моста затемняют грани светосигнальных приборов, обращенных к мосту и соседнему пролету, чтобы они не мешали водителям низовых судов. Если для движения судов в одном направлении открыты два и более смежных пролета, на границе подхода к ним устанавливают разделительные плавучие знаки.

Для регулирования пропуска судов под мосты устанавливают семафоры или светофоры круглосуточного действия. Необходимость в таком регулировании возникает, если у моста только один судоходный пролет или если судоходных пролетов два, но встречные составы не могут разойтись из-за узкости и криволинейности судового хода или из-за наличия опасных свальных течений. Пропуск судов через наплавные мосты также регулируется с помощью семафорной сигнализации. Верхнюю семафорную мачту устанавливают не ближе 1 км от моста, а нижнюю — не ближе 200 м.

Кроме транзитных судовых ходов, судоходная обстановка содержится на всех подходных судовых ходах: входах в затоны, рейдах портов, подходах к причалам пристаней и промышленных предприятий. Ограждаются все косы, стрелки и другие мели, расположенные между транзитным и подходным судовыми ходами. При большом количестве посторонних береговых огней знаки обстановки освещают вместо белого огня зеленым, вместо постоянного огня — проблесковым.

На рис. 213 приведена схема плавучей обстановки у пристани с двусторонним подходом. Пристань расположена на противоположном по отношению к транзитному судовому ходу берегу, и подход к ней имеется сверху и снизу. Пункты, где идущие к пристани суда отходят от транзитного судового хода, обозначают разделительными знаками, а подходы к причальной линии ограждают одиночными знаками.

Проектной схемой расстановки береговых знаков на реках определяется только состав и последовательность их расположения. Непосредственное место установки каждого знака выбирается с учетом ряда требований. Прежде всего, знак ставят так, чтобы он хорошо был виден с судов как при удалении от знака, так и при приближении к нему. Этому условию удовлетворяют знаки, основание которых возвышается над уровнем воды не более 10 м.

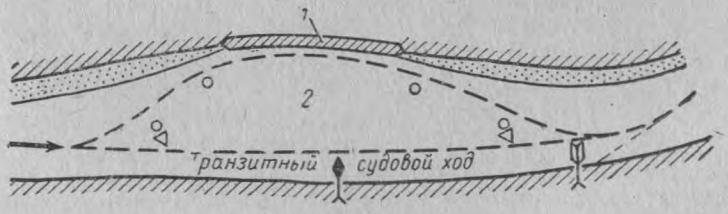


Рис. 213. Схема обстановки у пристани с двусторонним подходом:
1 — пристань; *2* — рейд

Створные знаки устанавливаются строго по направлению оси судового хода. Растительность впереди знака и на несколько метров за ним вырубается. Для знаков линейного створа вырубают полосу шириной не менее 10 м. Затем знак ставят так, чтобы он по возможности был легко доступен для обслуживания и не повреждался ледоходом.

§ 79. РАССТАНОВКА ЗНАКОВ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ И КАНАЛАХ

В береговой обстановке водохранилищ наибольшее значение имеют створные знаки. На реках эти знаки указывают направление сравнительно коротких прямолинейных судовых ходов, а на водохранилищах длина прямолинейных судовых ходов значительно больше. В связи с этим здесь ставятся не только линейные, но и щелевые створы.

Линейные створы на водохранилищах, как и на реках, имеют два знака (в темное время — два огня), которые выставляют на берегу по линии, являющейся продолжением оси судового хода. Задний знак устанавливают или делают выше переднего, и судоводитель, идущий по линейному створу, видит задний знак над передним. На рис. 214, *а* дан вид на створные линейные знаки, когда судоводитель идет точно по оси створа (знаки в створе), на рис. 214, *б* — когда он отклонился влево от оси створа (знаки в растворе) причем створ и раствор показан по створным полосам.

Щелевые створы имеют три знака (ночью три огня). В плане эти знаки образуют равнобедренный треугольник, обращенный основанием в сторону судового хода. Все три знака щелевого створа, в отличие от знаков линейного створа, имеют мало разнящуюся высоту. На рис. 215, *а* дан вид на створные щелевые знаки при движении судна по оси створа, на рис. 215, *б* — при движении судна у левой кромки ходовой полосы и на рис. 215, *в* — при выходе судна за правую кромку ходовой полосы.

На большинстве эксплуатируемых водохранилищ створные линии длиной до 10 км имеют линейные створы и длиной бо-

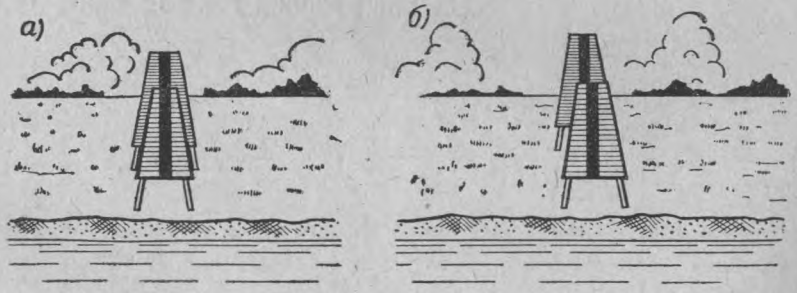


Рис. 214. Линейный створ:
а — знаки в створе; *б* — знаки в растворе

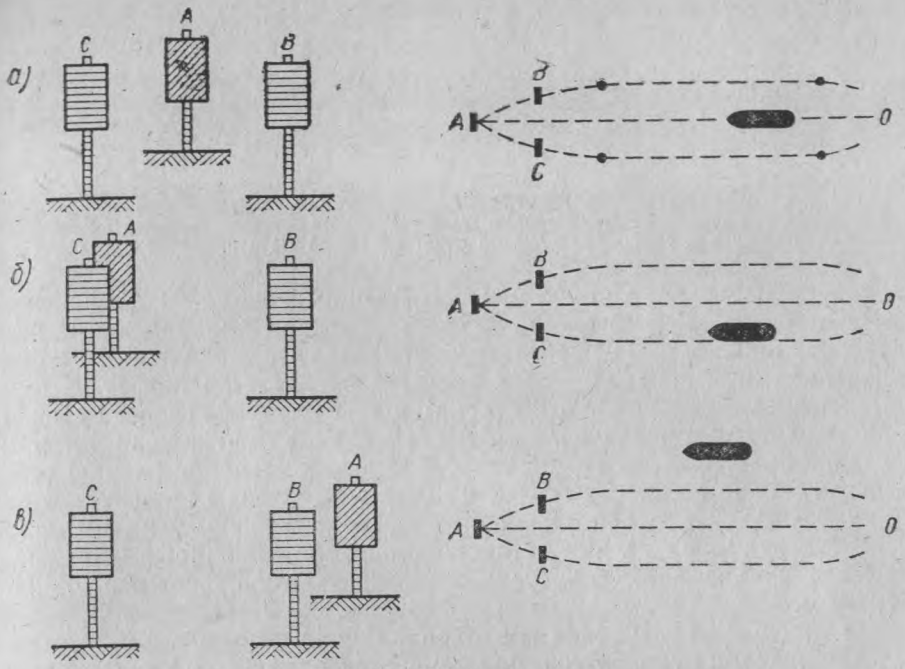


Рис. 215. Щелевой створ:
а — судно на оси створа; *б* — судно на створной полосе у ее левой кромки; *в* — судно вышло за правую кромку створной полосы

лее 10 км — щелевые створы. На новых водохранилищах щелевые створы ставят преимущественно на участках с ограниченной шириной судового хода.

Высота створных знаков и расстояние между ними должны устанавливаться по расчету. При дальности видимости до 15 км высота щитов створных знаков не превосходит 15 м, поэтому можно ставить стандартные щиты преимущественно III и IV типов. Для видимости же больше 15 км требуются щиты бóльших размеров.

Различие в ориентировке судоводителя по линейному и щелевому створам определяется разной чувствительностью этих створов. Чем чувствительнее линейный створ, тем при меньшем боковом уклонении судна от оси створа судоводитель будет видеть знаки створа не совмещенными на одной вертикали (в растворе). У людей с большой остротой зрения угол, под которым глаз способен два смежных предмета видеть раздельно, меньше, чем у людей с пониженной остротой зрения. В связи с этим судоводитель с пониженной остротой зрения позднее обнаружит расхождение знаков линейного створа, чем судоводитель с большей остротой зрения (т. е. при большем уклонении от оси створа), позднее изменит курс судна и может выйти из ходовой полосы.

Чем чувствительнее щелевой створ, тем при меньшем боковом уклонении судна от оси створа судоводитель будет видеть задний



Рис. 216. Буи латеральной и осевой систем:
а — сторон судового хода; *б* — поворота судового хода (*I* — левой стороны; *II* — правой); *в* — разделения и соединения судового хода; *г* — осевой (*I*) и поворотно-осевой (*II*)

знак не в середине щели между передними знаками. При этом судоводитель с пониженной остротой зрения, уклоняясь от оси створа, раньше заметит приближение заднего знака к одному из передних, чем судоводитель с большой остротой зрения (т. е. при меньшем уклонении от оси створа), раньше изменит курс судна и не выйдет из ходовой полосы. В этом случае пониженная острота зрения судоводителя не приводит к излишнему приближению судна к границе ходовой полосы, но ширина полосы используется не полностью. Благодаря ограничительным передним знакам при щелевом створе увеличивается ширина ходовой полосы и не требуется задний знак значительно повышать по сравнению с передним.

Плавучая обстановка водохранилищ и мелководных озер, ограждающая судовой ход, расставляется по латеральной или осевой системе, плавучая обстановка глубоководных озер — преимущественно по кардинальной системе. Каналы на мелководных озерах ограждаются по латеральной системе.

По латеральной системе плавучие знаки (буи и вехи) устанавливаются с двух сторон судового хода, как на реках, или с одной стороны. На левой стороне судового хода, считая по течению образовавшей водохранилище реки, ставят кромочные буи (рис. 216, *а*) преимущественно черные, в основном с белым проблесковым огнем, или белые вехи, а на правой стороне — красные буи с красным, в основном проблесковым, огнем или красные вехи с черным шаром.

В местах поворота судового хода ставят поворотные буи (рис. 216, б): на левой кромке — бело-черный буй, в основном с белым затмевающимся огнем, а на правой кромке — красно-черный буй с красным затмевающимся огнем. В местах разделения и соединения судовых ходов ставят разделительный буй (рис. 216, *в*), окрашенный вертикальными полосами, черными и красными, и с двумя, в основном проблесковыми, огнями — красным и зеленым, расположенными один над другим.

Плавучие знаки сторон судового хода расставляют преимущественно в шахматном порядке. Поворотные плавучие знаки, как правило, ставят одновременно по обеим сторонам судового хода в местах его поворота. В виде исключения поворотный знак ставят только на одной стороне судового хода в том случае, если на второй стороне хода имеются значительные глубины или место пово-

рота является одновременно местом разделения судового хода и на нем установлен знак разделения хода.

На каждый буй наносится его порядковый номер, четный на буи, стоящие по правой стороне судового хода, и нечетный — по левой; под этими номерами буи обозначаются на лоцманской или навигационной картах. Буи, выставляемые только на одной стороне судового хода или по оси судового хода, можно нумеровать подряд.

По осевой системе, применяемой на широких судовых ходах водохранилищ, плавучие знаки ставят не на кромках судового хода, а по его оси. На оси судового хода ставят бело-черные буи с двухпроблесковым белым огнем (рис. 216, *г*) или бело-черную веху с черным шаром. Осевые знаки оставляются судами слева по ходу и указывают судну путь следования со знака на знак.

Поворотный осевой буй имеет красно-черную окраску и белый трехпроблесковый огонь, а поворотная осевая веха — такую же окраску и черный шар. Поворотный осевой буй указывает, что у него надо сделать судну поворот на следующий осевой или поворотный осевой знак.

К судоходной обстановке водохранилищ предъявляются следующие требования: закрепление положения судового хода на всем его протяжении по возможности береговыми знаками; обеспечение ввода в действие обстановки одновременно с открытием навигации и бесперебойная ее работа до окончания навигации; обеспечение безопасности движения судов в светлое и темное время суток и в ясную и пасмурную погоду; возможность автоматизации действия светосигнальных приборов знаков обстановки для облегчения их обслуживания.

Указанным требованиям более всего удовлетворяет схема обстановки основных и дополнительных судовых ходов на всем протяжении последовательной цепью береговых створных и ходовых знаков с одновременным ограждением этих ходов также плавучими знаками.

На коротких створных линиях водохранилищ устанавливают односторонние створы, чтобы не увеличивать число створных знаков и огней, так как большое количество последних затрудняет ориентировку судоводителей. На длинных створных линиях (длина вместе с неходовой частью более 5—7 км) ставят двусторонние створы, чтобы при недостаточной видимости знаков переднего створа судоводитель мог ориентироваться по знакам заднего створа. Двусторонние или встречные створы должны быть видны не с середины створной линии, а с расстояния, равного $^2/_3$ ее длины. Если же один из берегов находится далеко от ходовой части створа и использование створных знаков на нем затруднительно, то и на длинных створных линиях ограничиваются односторонними створами.

Ходовые знаки на водохранилищах выставляют для указания расположения судового хода, идущего параллельно берегу, если

расстояние между кромкой судового хода и берегом не превышает 50 м. Если же ширина прибрежной полосы, в пределах которой плавание судов не разрешено, больше 50 м, то направление судового хода указывают створными знаками.

Ходовые знаки на участках водохранилищ, где судовой ход проходит вдоль берега на значительном протяжении, ставят один от другого на расстоянии не более 5 км при условии хорошей видимости со знака на знак. Если судовой ход вдоль берега не стеснен по ширине какими-либо препятствиями, то промежуточных плавучих знаков обычно не ставят.

Вдоль длинных прямолинейных участков судового хода, кроме створных знаков, устанавливают промежуточные плавучие знаки — буи и вехи. Эти плавучие знаки нужны для ориентировки судоводителей при плохой атмосферной видимости, когда с судна, удалившегося на значительное расстояние от береговых знаков, последние плохо различимы или совсем не видны, а также для ограждения примыкающих к судовому ходу отмелей и других подводных препятствий.

Практически дальность видимости щитов створных знаков, хорошо окрашенных и имеющих достаточные размеры, при хороших условиях не превышает 15 км, а при плохой погоде снижается примерно вдвое; видимость же днем при нормальных условиях даже озерных буев не превышает 5 км.

Приведенными дальностями видимости знаков обстановки определяются расстояния до знаков и между знаками на судовом ходу. Озерные и озерно-речные буи в качестве промежуточных знаков на длинных створных линиях как при латеральной, так и при осевой системах ставят обычно через 3—5 км один от другого, а речные буи — через 1,5—2 км.

На участках водохранилищ, где глубина на судовом ходу больше транзитной, а ширина судового хода достаточна для расхождения судов, промежуточные плавучие знаки устанавливают только по левой кромке судового хода и роль их сводится к указанию (в дополнение к береговым знакам) направления судового хода. Эти плавучие знаки при плохой видимости створных знаков могут и не освещаться, так как видимость створных огней лучше видимости самих створных знаков. В качестве таких плавучих знаков, особенно на дополнительных трассах, могут применяться вехи.

На тех же участках водохранилищ, где ширина судового хода ограничена расположенными около него мелкими местами или другими препятствиями, промежуточные плавучие знаки ставят на той кромке судового хода, к которой примыкают препятствия. Плавучие знаки, указывающие направление судового хода и ограждающие кромку судового хода со стороны препятствий, обязательно освещаются; в качестве их используются только буи.

При расстоянии от буя до берега, не превышающем 2 км, место установки буя фиксируется четырьмя закрепительными знаками на берегу. Когда же расстояние от буя до берега больше, положение буя закрепляется засечками углов на береговые створные зна-

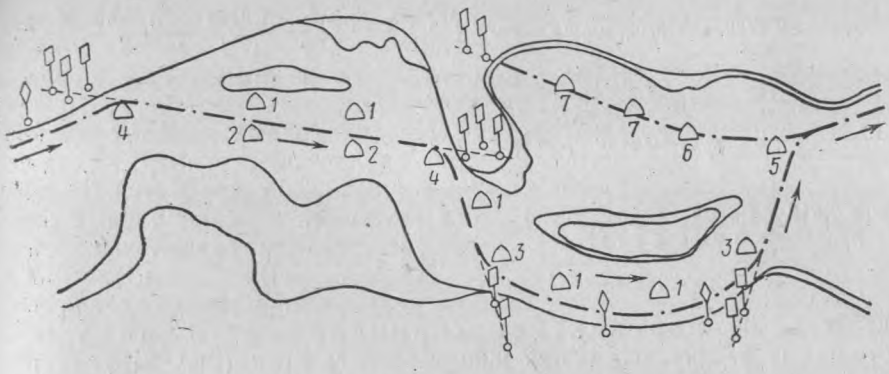


Рис. 217. Схема расстановки знаков на водохранилище:
1 — буи левой стороны; *2* — буи правой стороны; *3* — поворотные буи на левой стороне; *4* — поворотные буи на правой стороне; *5* — буи разветвления судового хода; *6* — поворотный осевой буй; *7* — осевые буи

ки и другие ориентиры. Такие закрепительные знаки необходимы для быстрого восстановления ограждения судовых ходов на водохранилищах после открытия навигации.

Комплексная обстановка судовых ходов водохранилищ береговыми и плавучими знаками при надлежащем выборе размеров знаков и силы света огней обеспечивает видимость их днем и ночью и от знака к знаку.

На рис. 217 дана схема расстановки знаков судоходной обстановки на водохранилище по латеральной системе. Один судовой ход на этой схеме обставлен по осевой системе (поворотный осевой буй *6* и осевые буи *7*).

Глубоководных озер с кардинальной системой расстановки плавучих знаков у нас очень мало, поэтому она дальше и не рассматривается.

На водохранилищах знаки обстановки расставляют в соответствии с их проектной схемой, разрабатываемой при составлении проекта обеспечения или улучшения судоходных условий на водохранилище.

Знаки на водохранилищах, как и на реках, прежде всего ставят так, чтобы они хорошо были видны с судов, когда последние находятся в зоне их действия. Для того чтобы знаки линейного створа были видны только по направлению створной линии, вырубается растительность на полосе шириной не менее 10 м. Для знаков щелевого створа вырубается растительность на всей площади образуемого ими треугольника.

На водохранилищах задний знак створа можно располагать на высоте 15 м и более над уровнем воды, т. е. выше, чем на реках, но при этом необходимо расчетом проверить видимость створа с судна, находящегося в наиболее близкой точке ходовой части створа. Вообще линейные и щелевые створы при дальности их действия больше 4 км рассчитываются, о чем будет сказано да-

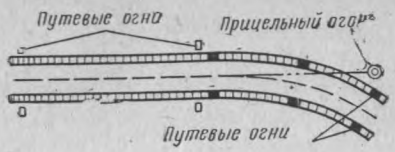


Рис. 218. Схема перспективно-прицельного створа на канале

лее, а при видимости до 4 км основные элементы створов можно определять по имеющимся расчетным таблицам.

На судоходных каналах в светлое время обстановки, как уже упоминалось, не требуется, в темное же время на специальных опорах зажигаются сигнальные огни.

На длинных прямолинейных участках канала судоводитель ведет суда по перспективно-прицельному створу, состоящему из путевых огней и прицельного огня (рис. 218). Путевые огни этого створа, точечные и постоянные, составляют цепь парных огней, расположенных один против другого на берме откоса канала. Эти огни устанавливают на одинаковой высоте (1,0—1,5 м над бермой) и на равном расстоянии от оси канала в каждой паре, а также на одинаковых расстояниях пара от пары (через 500 м) вдоль оси канала. На левом берегу канала путевые огни зеленые, на правом — красные.

Для того чтобы судоводителю легче было сохранить направление движения судна, путевые огни в конце створа дополнены прицельным огнем, стоящим на продолжении оси створа на берегу. Прицельный огонь, точечно-линейный и постоянный, размещают на сравнительно высокой металлической мачте, в верхней части которой цвет огня желтый, а на грани, обращенной к оси канала,— красный.

На криволинейных участках канала для обозначения оси судового хода тоже устанавливают парные путевые огни, но более часто — через 250 м пара от пары, считая по оси канала. Источником света в этих огнях служат электролампы, питаемые от береговой сети через трансформатор.

На всех шлюзах каналов и рек установлены двузначные односторонние светофоры железнодорожного типа с зеленым разрешающим и красным запрещающим огнями, горящими днем и ночью. Светофоры ближнего действия устанавливают на шлюзах справа по ходу судна к шлюзу (рис. 219), причем на каждой голове шлюза помещают два светофора, один — справа по ходу с лучом в сторону бьефа и другой — слева по ходу с лучом в сторону камеры. Кроме того, в подходных к шлюзу каналах, также справа по ходу, ставят по одному одностороннему светофору дальнего действия с лучом в сторону бьефа. Светофоры дальнего действия устанавливают на мачтах высотой 4—5 м на расстоянии 400 м от головы шлюза. Светофоры ближнего действия видны на расстоянии около

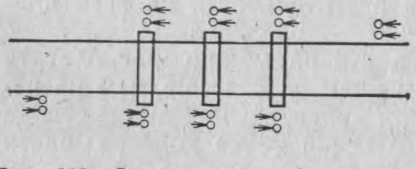


Рис. 219. Схема расположения светофоров на двухкамерном шлюзе

400 м, а светофоры дальнего действия — на расстоянии около 2 км.

На заградительных воротах, у концов палов, помещают односторонние светофоры, обращенные в обе стороны судового хода. Светофоры могут быть вделаны в парапет заградительных ворот или установлены на мачтах. У паромных переправ на обоих берегах канала на расстоянии около 100 м от оси переправы ставят два двусторонних светофора с лучами, обращенными в сторону бьефа и парома.

Светофоры шлюзов снабжают лампами и рассеивающими линзами. Управление светофорами шлюза сосредоточено на пульте управления. Кроме того, огни светофоров блокируют с механизмами так, что при закрытых воротах шлюза, закрытых заградительных воротах или при движущемся пароме автоматически гаснут разрешающие огни и загораются запрещающие.

Стоповые или остановочные огни указывают конец причальной линии на канале перед шлюзом и место, где должна быть в камере шлюза корма и нос судна. Эти огни устанавливают на обеих сторонах шлюза (встраивают в парапет) и перед шлюзом у начала причала. Источником света для них служит вертикальная неоновая трубка в камерах шлюзов и красный огонь иллюминаторного типа перед шлюзами.

При описанном расположении светофоров у шлюзов для входа судна в подходный канал необходимо разрешение зеленым огнем на светофоре при входе в канал, а для входа в шлюз — светофором на голове шлюза. Для выхода судна из шлюза в подходный канал требуется разрешение зеленым огнем светофором на голове, а в двухкамерных шлюзах для перехода судна из одной камеры в другую — светофором на средней голове.

Опознавательные знаки предназначены для ограждения входа в канал при подходе с водохранилищ. Они представляют собой башни или пирамиды, помещаемые на концах дамб при входе с водохранилища и выходе в него, а на верху этих знаков установлен проблесковый огонь, красный по правому берегу и зеленый — по левому. На стороне знака, обращенной к каналу, помещается линейный огонь, тоже красный на правом берегу и зеленый — на левом.

§ 80. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ И ЩЕЛЕВЫХ СТВОРОВ

Створы могут быть, как уже упоминалось, из двух знаков — линейные, из трех знаков — щелевидные и из четырех знаков — кромочные; последние пока не получили широкого применения. Рассмотрим сначала основные параметры линейных и щелевых створов, а затем их расчет.

Горизонтальная прямая на воде, из любой точки которой середины створных знаков или огни линейного створа видны на одной вертикали, называется осью створа (створной линией). При

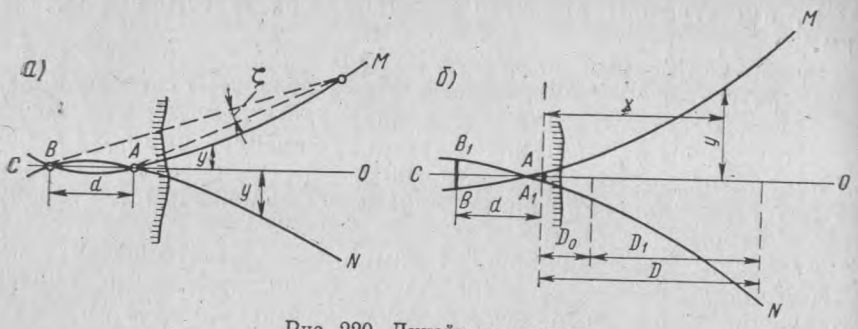


Рис. 220. Линейные створы:
а — из двух точек (огней); *б* — из двух знаков (щитов)

боковом уклонении от оси створа в любую сторону знаки днем и огни ночью будут видны на разных вертикалях, в растворе (см. рис. 214).

Достоинства линейного створа определяются следующими признаками: а) достаточной чувствительностью, когда при малейшем сходе судна со створа щиты знаков или их огни окажутся в растворе, причем чувствительность створа зависит от расстояния d между знаками (огнями), называемого разносом знаков, и чем больше последнее, тем чувствительнее створ; б) отчетливой видимостью щитов знаков (огней) из самой дальней точки ходовой части створа; в) постоянством вертикального схождения знаков (огней), когда на протяжении всей ходовой части створа передний знак всегда совмещается с задним, при этом верхняя кромка щита заднего знака превышает верхнюю кромку щита переднего знака, а задний огонь раздельно виден над передним.

Способность глаза видеть расстояние между двумя смежными точками называется разрешающей силой глаза, величина которой днем равна в среднем $1'$ дуги окружности. Две точки видны раздельно одна от другой, если угловое расстояние ζ между ними не меньше $1'$, в противном случае они совмещаются.

Геометрическим местом точек, из которых две створные точки B и A видны раздельно под постоянным углом ζ, являются две симметричные дуги окружностей BAM и BAN, опирающиеся на отрезок прямой между створными точками (на разнос d), как на хорду, и вмещающие угол ζ (рис. 220, *а*). Эти дуги называются визирными кривыми.

Область, лежащая внутри криволинейного треугольника MAN, называется створной полосой, потому что судоводитель, находясь внутри нее, будет видеть створные точки A и B всегда совмещенными и, следовательно, считать себя находящимся в створе, так как из любого места в этом промежутке горизонтальный угол, под которым будут видны створные точки, меньше разрешающей силы глаза ζ. Только выйдя за границы визирных кривых, судоводитель увидит створные точки A и B раздельно, что и считается моментом выхода из створа.

Вычисляя координаты визирных кривых и нанося их на план судового хода относительно оси проектируемого створа, которая обычно совмещается с осью судового хода, получим границы створной полосы и границы зоны судового хода между визирными кривыми и кромками судового хода, т. е. вне створной полосы.

В реальных условиях створ из двух точек судоводитель видит только ночью, когда он идет по створу из двух огней, расположенных один над другим; днем же плавание происходит по створу из двух щитов на знаках, имеющих вертикальные и горизонтальные размеры. При створе из двух щитов на знаках момент выхода из створа оценивается по моменту раздельной видимости противоположных кромок щитов знаков, когда между ними появится полоса фона местности (неба) другого цвета, чем щиты знаков.

Геометрическим местом точек, из которых каждые две противоположные кромки щитов створа из двух знаков будут видны раздельно под постоянным углом ζ, являются две симметричные визирные кривые BAM для кромок B и A и B_1A_1N для кромок B_1 и A_1 (рис. 220, *б*). При этом кривая BAM опирается на отрезок прямой между кромками B и A, как на хорду, и вмещает угол ζ, а кривая B_1A_1N — на отрезок прямой между кромками B_1 и A_1 и тоже вмещает угол ζ. В этом случае створная полоса на судовом ходу заключена между визирными дугами AM и A_1N.

Когда судоводитель находится близко к створным знакам, выход судна из створной полосы замечается легко, а по мере удаления от знаков способность улавливать выход судна из створа ослабевает, и на расстоянии видимости обнаружения судоводитель уже не может судить о своем положении в створной полосе. Выход за пределы створной полосы может случиться и при хорошей видимости знаков вследствие рыскливости судна из-за недостаточного внимания судоводителя и при расхождении судов. Расстояние P_0 от визирных кривых до кромок судового хода, оставляемое в запас при расчете створа на случай выхода судна из створной полосы, называется опасным уклонением.

Обычно суда идут по створам днем и ночью, поэтому и расчет створов должен производиться так, чтобы ими можно было пользоваться днем и ночью. Для одновременного удовлетворения условий дневного и ночного створа визирные кривые дневного створа с $\zeta \geqslant 1'$ (раздельная видимость знаков днем) должны по возможности совпадать с визирными кривыми ночного створа с $\zeta \cong 4'$ (раздельная видимость огней ночью).

Необходимо также отметить, что цвет огней имеет большое значение для бокового уклонения ночью от створа, так как цветные огни, понижая освещенность, повышают способность глаз к их раздельной видимости. В то же время светофильтры, используемые для получения цветных огней, понижают их яркость и уменьшают дальность пользования створом, что и является уже недостатком цветных огней.

Поскольку видимость знаков днем меньше, чем огней ночью, створы можно рассчитывать и раздельно для дальности действия

днем и ночью. В этом случае судовой ход за пределами дневной дальности действия створа должен быть обставлен дополнительными плавучими знаками.

Осью створа из трех знаков (щелевого) называется горизонтальная прямая на воде, из любой точки которой задний знак или его огонь видны в середине щели между передними знаками или их огнями (линия AO — см. рис. 215). Совмещение заднего знака или огня с одним из передних знаков или огней указывает крайнюю границу бокового уклонения от оси створа влево или вправо. Начало и конец ходовой части щелевого створа, как и линейного створа, обозначается парными плавучими освещаемыми знаками, что облегчает судовождение при плохом зрении или плохой видимости.

В щелевом створе расстояние $2s$ между передними огнями (серединами щитов передних знаков), называемое горизонтальной базой, выбирается так, чтобы судоводитель мог безопасно уклоняться в обе стороны от оси створа, пока задний огонь не совместится с одним из передних огней или пока одна из кромок щита заднего знака не совместится с ближайшей кромкой щита переднего знака. Визирной дугой в этом створе называется геометрическое место точек, из которых наблюдается раздельная видимость огней (кромок щитов) знаков A и B или A и C под постоянным углом ζ. При удалении по оси створа на значительное расстояние можно найти точку, из которой все три огня (три щита) будут казаться одним огнем (одним щитом), т. е. сольются.

Для расчета любого створа как линейного, так и щелевого прежде всего изучается план местности и планы русловых съемок на участке, где намечается створ. Эти планы и съемки необходимы для выбора направления оси проектируемого створа, установления начала и конца его ходовой части, определения ширины судового хода. По этим же планам намечают места установки переднего (передних) знаков и ориентировочно заднего знака створа и предварительно определяют дальность D действия створа. Ось створа должна по возможности совпадать с осью судового хода на застворивaемом участке, а передний знак (знаки) следует располагать как можно ближе к ходовой части створа.

Затем выбирается типовой размер щитов створных знаков, соответствующий установленной дальности действия створа, а высота знаков определяется расчетом при сохранении стандартных размеров щитов. Одновременно выбирается тип светосигнального прибора, тоже соответствующий дальности действия створа, и в зависимости от цвета огня — мощность источника света. Выбор размера щитов створных знаков и типа сигнального прибора облегчается имеющимися для этого таблицами, составленными Московским филиалом ЛИВТа.

При большой длине застворивaемого участка, когда устанавливаются преимущественно щелевые створы, может оказаться, что дальность действия стандартных щитов створных знаков будет меньше необходимой дальности действия створа, а дальность дей-

ствия створных огней достаточная. В этом случае для круглосуточного использования такого длинного створа потребуется, как уже упоминалось, дополнительная установка плавучих знаков, начиная с той части створной полосы, где заканчивается дальность видимости створных знаков.

Выбрав размер щитов знаков и тип светосигнального прибора, окончательно устанавливают или общую для дневных и ночных условий дальность D действия створа, или две дальности действия: дневную $D_д$ и ночную $D_н$.

После этого для основных типов судов и толкаемых составов, плавающих по данному участку пути, определяются величины их опасного уклонения P_0 от створной полосы по формуле

$$P_0 \cong 0{,}035(v_c t + l) + 0{,}6b + 0{,}2\frac{L^2}{R}, \qquad (300)$$

где v_c — скорость движения судна (толкаемого состава) относительно берега, м/с;

t — время движения судна (состава) по неправильному курсу вследствие зарыскивания, с;

l — расстояние от форштевня до рубки управления, м;

b — ширина судна (состава), м;

L — длина судна (состава), м;

R — средний радиус циркуляции судна (состава) при малых углах перекладки руля, м.

При наличии течения скорость движения судна относительно берега $v_c \cong v_0 \pm v_т$, где v_0 — скорость движения судна относительно воды, м/с; $v_т$ — скорость течения воды, м/с. Для времени t опасного уклонения принимаются следующие величины: для пассажирских и самоходных грузовых судов $\cong 20$ с, для больших толкаемых составов $\cong 50$ с, для судов на подводных крыльях типа «Ракета» $\cong 14$ с. При отсутствии данных испытаний по радиусу циркуляции принимают для водоизмещающих судов (составов) $R \cong 7L$, а для судов на подводных крыльях — 800 м.

Из нескольких величин опасного уклонения P_0, полученных по формуле (300), для разных судов (составов) принимается для последующих расчетов бо́льшая величина. Опасное уклонение, определенное по этой формуле для судов (составов) при $v_0 =$ $= 17$—25 км/ч, составляет 33—20 м, для судов на подводных крыльях при $v_0 = 70$—62 км/ч $\cong$ 12—13 м.

Затем определяют максимальное допустимое боковое уклонение Y_0 судна (состава) от оси створа по формуле

$$Y_0 \leqslant 0{,}5b_{сх} - P_0, \qquad (301)$$

где $b_{с.х}$ — ширина судового хода между изобатами гарантированной глубины, м; P_0 — опасное уклонение, м.

Величина максимального допустимого бокового уклонения Y_0 (максимальной ординаты визирной дуги) для линейного створа

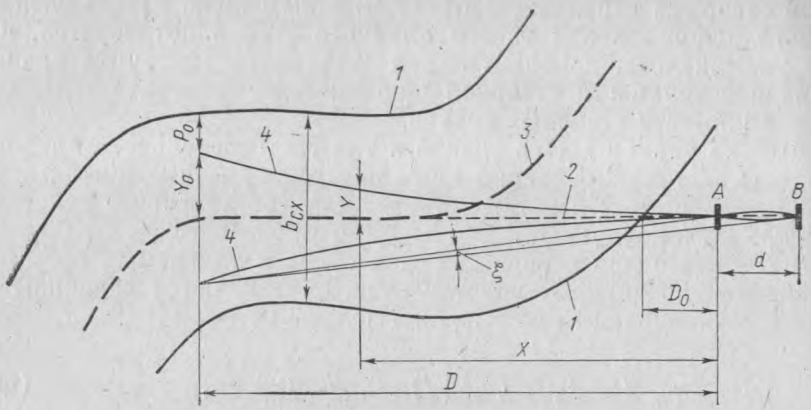


Рис. 221. Схема для расчета линейного створа:
1 — кромки судового хода; *2* — ось створа; *3* — ось судового хода; *4* — визирные кривые

находится в конце его ходовой части, а в щелевом створе это уклонение может быть и не в конце ходовой части (в общем случае ордината y визирной дуги есть непрерывная функция расстояния x по оси створа от переднего знака).

В тех случаях, когда ось створа делит ширину судового хода на неравные части, в формулу (301) вместо 0,5 $b_{с.х}$ подставляется меньшее из двух расстояний от оси створа до кромки судового хода.

Расчет линейного створа (рис. 221) после выбора размера щитов знаков и типа сигнального прибора, установления дальности действия створа, величин опасного и допустимого боковых уклонений ведется в следующем порядке.

1. Определяется разнос d створных знаков по формуле

$$d = \frac{0{,}29\zeta D^2}{Y_0 - 0{,}29\zeta D}, \qquad (302)$$

где D — длина по оси створа от переднего знака до конца ходовой части; ζ — разрешаемый угол, мин.

D и d берутся в километрах, Y_0 — в метрах [1].

Значения вертикального угла α между верхними кромками щитов знаков (между огнями) рекомендуются в пределах 3—15′. При этой рекомендации и отсутствии иррадиации разрешаемый угол ζ принимается равным 2′. Если же угол $\alpha > 15'$, то в расчетах принимают угол $\zeta = 3'$.

---

[1] В формулах для расчета створов расстояния по оси створов подставляются в километрах, поперек оси и в вертикальной плоскости — в метрах, углы — в угловых минутах.

Для створов дальностью действия D до 4 км величину разноса знаков можно определить по имеющимся таблицам. Так, при $D=2$ км и $Y_0=10—150$ м соответственно величина $d=263—16$ м, а при $D=4$ км и $Y_0=30—150$ м величина $d=336—63$ м.

После расчета величины разноса знаков d на плане участка уточняется место установки заднего знака, при этом действительное значение разноса знаков должно быть не меньше расчетного.

2. Определяется минимальное возвышение h верхней кромки щита (огня) переднего знака над расчетным уровнем воды (рис. 222). Для створов на водохранилищах за расчетный принимается нормальный подпорный уровень (НПУ), а для створов на реках — проектный уровень путевых работ.

Минимальное возвышение h переднего знака над уровнем воды рассчитывается по формуле

$$h=h_г+h_щ=(0{,}26D-\sqrt{a})^2+h_щ, \qquad (303)$$

где $h_г$ — возвышение видимого горизонта над уровнем воды, м;

$h_щ$ — высота щита выбранного по стандарту переднего знака, м (щит должен возвышаться над видимым горизонтом);

D — дальность действия створа, км;

a — высота глаза судоводителя над уровнем воды; принимается 5 м.

При этом высота h_1 (см. рис. 222) переднего знака над своим основанием должна быть не менее разности $h—h_0$, т. е. надо иметь $h_1 \geqslant h—h_0$, где h_0 — возвышение основания знака над уровнем воды.

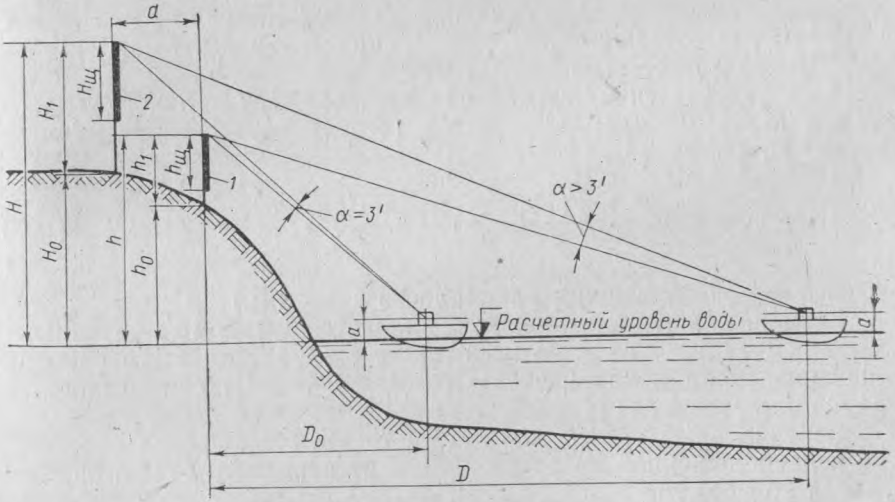


Рис. 222. Схема для расчета высоты знаков линейного створа:
1 — передний створный знак; *2* — задний створный знак

3. Определяется минимальное возвышение H (см. рис. 222) верхней кромки щита (огня) заднего знака над расчетным уровнем воды. Это возвышение вычисляется из условия обеспечения минимального вертикального угла α между верхними кромками щитов (огней) заднего и переднего знаков, равного 3′ при наблюдении из дальней и ближней точек ходовой части створа.

Минимальное возвышение H при наблюдении из дальней точки створа находится по формуле

$$H=(D+d)\left(0{,}29\alpha+\frac{h-a}{D}+0{,}06d\right)+a, \qquad (304)$$

где D — длина створа; α принимается 3′.

Минимальное возвышение H при наблюдении из ближней точки створа определяется тоже по приведенной формуле, но вместо величины D подставляется величина D_0 — длина неходовой части створной полосы.

Из полученных таким образом двух значений минимального возвышения H верхней кромки щита (огня) за расчетное принимается бо́льшее. При этом высота H_1 (см. рис. 222) заднего знака (огня) над основанием должна быть не менее разности между возвышением H этого знака и возвышением H_0 его основания, т. е. надо иметь $H_1 \geqslant H-H_0$.

Для створов дальностью действия $D \leqslant 4$ км минимальное возвышение H можно определять по имеющимся таблицам, путем прибавления к возвышению h верхней кромки щита переднего знака минимального превышения ΔH заднего знака над передним. Это минимальное превышение при $D=2$ км, $h=10$—16 м, $d=123$—24 м составляет 3,3—1,8 м; при $D=4$ км, $h=10$—16 м, $d=336$—95 м оно равно 5,9—3,7 м.

4. Определяется максимальное значение вертикального угла α_0 между верхними кромками щитов (огней) переднего и заднего знаков по формуле

$$\alpha_0=\frac{3{,}44\left(\sqrt{H-a}-\sqrt{h-a}\right)^2}{d}-0{,}23d. \qquad (305)$$

(Здесь все обозначения и размерности известны.)

Если полученная величина α_0 окажется более 15′, то определяют изменение угла α по всей длине створа. Для этого находят значения углов α для нескольких (4—5) точек по оси створа, а также для точек, где судовой ход сужен.

Вертикальный угол α для любой точки, лежащей на оси створа и расположенной на расстоянии x от переднего знака, определяется по формуле

$$\alpha=3{,}44\left(\frac{H-a}{x+d}-\frac{h-a}{x}\right)-0{,}23d. \qquad (306)$$

Максимальное значение вертикального угла α_0 будет на расстоянии X_0 от переднего знака, определяемого по формуле

$$X_0 = \frac{d\sqrt{h-a}}{\sqrt{H-a}-\sqrt{h-a}}. \qquad (307)$$

5. Проверяется допустимость боковых уклонений y от оси створа (ординат визирной дуги) на участках, для которых $\alpha > 15'$ и где имеется сужение судового хода, по формуле

$$y = 0{,}29\zeta\left(\frac{x}{d}+1\right)x, \qquad (308)$$

где x — расстояние от переднего знака до участка с $\alpha > 15'$ или до участка сужения, км;

ζ — разрешаемый угол, мин.

При этом на участках, где вертикальный угол $\alpha > 15'$, для определения величин y в приведенную формулу подставляют $\zeta = 3'$, а на участках сужения, где угол α лежит в пределах 3—15′,— подставляют $\zeta = 2'$.

Если хотя бы одно из двух полученных таким образом значений боковых уклонений окажется больше разности $(0{,}5b_{с.х} - P_0)$, то необходимо произвести расчет створа заново, увеличив разнос d створных знаков.

Расчет щелевого створа (рис. 223), после выбора типового размера щитов знаков и типа сигнального прибора, установления дальности действия и определения величины опасного уклонения P_0 ведется в следующем порядке.

1. Определяется минимальное расстояние $2s$ (см. рис. 222) между передними огнями (серединами щитов) знаков, т. е. гори-

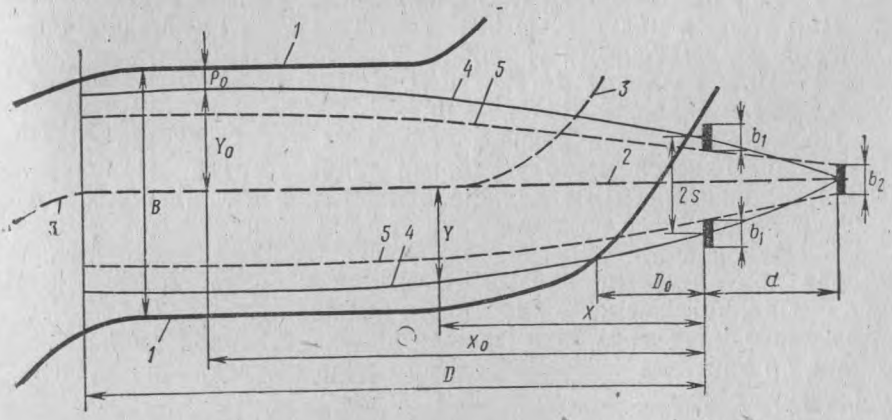


Рис. 223. Схема для расчета щелевого створа:
1 — кромки судового хода; *2* — ось створа; *3* — ось судового хода; *4* — визирные кривые ночного створа; *5* — визирные кривые дневного створа

зонтальная база створа. Это расстояние находится из условия обеспечения раздельной видимости огней и щитов знаков при наблюдении их из дальней точки ходовой части створа.

Если дальность действия дневного и ночного створов одинакова, то величина $2s$ рассчитывается по приведенным ниже формулам и из полученных двух значений принимается большее:

$$2s \cong 1{,}2D + b_1 + b_2; \tag{309}$$

$$2s \cong 2{,}0D. \tag{310}$$

Здесь b_1 и b_2 — ширина соответственно передних и заднего знаков, м.

Величина D берется в километрах, s — в метрах.

Если дальность действия дневного и ночного створов разная, то в первую из этих формул вместо величины D подставляется дальность действия дневного створа $D_д$, во вторую — дальность действия ночного створа $D_н$. Для дальнейших расчетов принимается бóльшее из полученных значений горизонтальной базы.

2. Вычисляется расстояние d по оси створа между передними и задним знаками (разнос знаков) по формуле

$$d = \frac{D(s - 0{,}29\zeta D)}{Y_0 - s + 0{,}29\zeta D}, \tag{311}$$

где ζ — разрешаемый угол, мин.

Величины D, d берутся в километрах; s и Y_0 — в метрах.

При неодинаковой дальности действия дневного и ночного створов в эту формулу подставляется дальность действия ночного створа $D_н$. При незначительном вертикальном угле между верхними кромками щитов (огнями) передних и заднего знаков ($\alpha = 0{,}5—1{,}0'$) разрешаемый угол ζ принимается равным $0{,}7'$.

Для створов дальностью действия D до 4 км величина d определяется по имеющимся таблицам. Так, при $D=2$ км, $s=23$ м и $Y_0=2—10$ м величина $d=62—12$ м, а при $D=4$ км, $s=46$ м и $Y_0=2—25$ м величина $d=262—19$ м.

После определения разноса знаков на плане участка окончательно выбирается место установки заднего знака. Получаемое при этом значение d не должно быть, как и в линейном створе, меньше полученного по расчету.

3. Производится проверка по длине ходовой части ночного створа допустимости боковых уклонений y судов (составов) от оси створа, которые не должны быть больше разности $(0{,}5b_{с.х} — P_0)$. Для этого в четырех-пяти поперечниках створной полосы, а также на участках сужения судового хода вычисляются значения y по формуле

$$y = \left(\frac{x}{d} + 1\right)(s - 0{,}29\zeta x), \tag{312}$$

где x — расстояния от передних знаков до поперечников и сужений. При незначительном угле α, как и в предыдущей формуле, принимается угол $\zeta=0{,}7'$.

Расстояние X_0 от передних знаков, на котором боковое уклонение ночью имеет максимальное значение Y_0, находится по формуле

$$X_0=0{,}5\left(\frac{s}{0{,}29\zeta}-d\right), \qquad (313)$$

где при незначительном угле α принимают тоже угол $\zeta=0{,}7'$.

Если расстояние X_0 получается меньше $D_н$, то по формуле для y следует рассчитать новую величину максимального бокового уклонения Y_0, подставляя вместо x полученное значение X_0.

По найденным значениям y при разных величинах x строятся визирные кривые ночного створа, при этом требуется, чтобы расстояние между кромкой судового хода и визирной кривой, т. е. величина $0{,}5\,b_{с.х}-y$, было равно или больше опасного уклонения P_0. Если хотя бы на одном из участков створной полосы указанное условие не выполняется, то рассчитывают створ заново, увеличив величину разноса d знаков.

4. Определяется минимальное возвышение h верхней кромки щита (огня) передних знаков над расчетным уровнем при одинаковой дальности дневного и ночного створов по формуле (303). При этом высота передних знаков над основанием h_1 должна быть не менее разности $h—h_0$, т. е. надо иметь $h_1 \geqslant h—h_0$.

При разной дальности действия дневного и ночного створов минимальное возвышение h определяется раздельно для верхних кромок щитов и для огней передних знаков. Минимальное возвышение верхней кромки щитов рассчитывается по формуле (303) в зависимости от дальности действия дневного створа $D_д$, а минимальное возвышение огня — в зависимости от дальности действия ночного створа $D_н$ по той же формуле, но без щита, т. е. при $h_щ=0$. Выбрав наибольшее из полученных двух значений возвышение h передних знаков, находят минимальную высоту h_1 передних знаков по соотношению $h_1=h—h_0$.

5. Определяется минимальное возвышение H верхней кромки щита (огня) заднего знака из условия обеспечения минимального вертикального угла α между верхними кромками щитов (огнями) заднего и передних знаков, равного примерно 0,5—1,0′, при наблюдении из дальней точки створной полосы по формуле (304) и из ближней точки — по той же формуле, но подставляя вместо D величину D_0. При этом, если дневная и ночная дальности действия створа различны, то за величину D в формулах для H принимается дальность $D_н$ действия ночного створа. Из полученных таким образом для дальностей D и D_0 двух значений возвышения H принимается бóльшее. При этом высота верхней кромки щита (огня) заднего знака H_1 от его основания должна быть не менее разности $H—H_0$, т. е. надо иметь: $H_1 \geqslant H—H_0$.

§ 81. НАВИГАЦИОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЗНАКОВ ОБСТАНОВКИ

Судоходная обстановка на реках, водохранилищах и каналах содержится техническими участками пути или районами гидросооружений. Основным производственным подразделением по содержанию знаков обстановки является *обстановочный участок*, возглавляемый путевым мастером. Обстановочный участок на водохранилищах и в устьевых частях больших рек называется *лоцмейстерской дистанцией*. Протяженность обстановочных участков колеблется от 50 до 250 км и более. Эта протяженность зависит от формы обслуживания обстановки, судоходной характеристики реки или водохранилища и интенсивности судоходства. На обстановочных участках в зависимости от объема обстановочных работ, подвижности русла, интенсивности и характера судоходства применяют следующие формы обслуживания обстановки: бригадную, постовую и бригадно-постовую.

При *бригадной* форме обслуживания работы по содержанию обстановки на обстановочном участке выполняет *бригада* во главе с путевым мастером, передвигающаяся на теплоходе или катере. При *постовой* форме обслуживания обстановочный участок реки делится на *обстановочные посты*, на которых работы по содержанию обстановки выполняются постовыми рабочими во главе с бригадиром поста или старшим постовым рабочим. При смешанной *бригадно-постовой* форме обслуживания в помощь бригаде на наиболее сложных перекатах обстановочного участка организуют дополнительно обстановочные посты.

Преимущественное распространение на наших реках получили бригадная и бригадно-постовая формы содержания обстановки, которые позволяют применять механизацию и автоматизацию работ и обеспечивают высокую производительность труда. На лоцмейстерских дистанциях водохранилищ применяется бригадное обслуживание обстановки.

Для передвижения обстановочных бригад используются теплоходы мощностью до 150 л. с. и более с площадкой для перевозки обстановочного инвентаря, оборудованные грузовой стрелой и имеющие станцию для зарядки аккумуляторов. В настоящее время эти суда оснащают приборами для механизации промерных и тральных работ. Знаки обстановки на водохранилищах крупнее и тяжелее речных, и поэтому выполнение операций по их установке, перестановке и ремонту сложнее, а в связи с волнением и штормами и более опасно.

---

[1] Организация обстановочных работ более подробно изучается в дисциплине «Организация и планирование путевого хозяйства»; здесь даются только самые необходимые сведения по этому вопросу.

Бригада обстановочного участка и дистанции имеет на берегу базу со служебным помещением и мастерской, жилыми зданиями и причалом, складским помещением для знаков и материалов и кладовой для светосигнальной аппаратуры, складом горючего и смазочных материалов. На базе бригады лоцмейстерской дистанции для вытаскивания на берег буев устраивается, кроме того, подъемник, оборудованный лебедкой и узкоколейным путем.

Обстановочные бригады работают посменно и по утвержденному графику. Во время рейса по участку бригадой выполняются промеры глубин по судовому ходу, перестановка знаков и их обслуживание, контроль за действием сигнальных огней и устранение недостатков, контроль за правильностью показаний вывесок глубин и ширин судового хода на реках, передача информации о габаритах пути. При этом на судне размещают обычно не более двух вахт.

На реках I и II групп с береговой и плавучей обстановкой бригада ежесуточно объезжает весь обслуживаемый участок; на реках III группы, а также на реках II группы с ограниченным количеством плавучих знаков бригада объезжает весь участок раз в 2—3 сут. При расположении базы бригады в конце обстановочного участка бригада за один рейс проезжает весь участок в одном направлении днем и в другом — ночью. Если же база находится в середине обстановочного участка, бригада объезжает его за два рейса с соблюдением тех же условий. На водохранилищах бригада объезжает лоцмейстерскую дистанцию один раз в течение 2—5 дней. Частота объезда бригадой своего участка или дистанции зависит от количества и сложности знаков, густоты движения и судоходных условий.

На обстановочных участках и дистанциях, где имеется много створных знаков, затруднительны подходы к ним от стоянки разъездного судна и где знаки лучше обслуживать с берега, в бригаду дополнительно включают для обслуживания сигнальных огней путевых обходчиков. Если на берегу имеются дороги, эти обходчики могут пользоваться мотоциклами или другими средствами передвижения. На обстановочных участках с питанием огней от аккумуляторов и при береговой зарядной станции в составе бригады может быть аккумуляторщик.

Для проведения на обстановочных участках тральных, дноочистительных, берегоочистительных и ремонтных работ в состав бригады дополнительно включают путевых рабочих, которые также участвуют в обслуживании знаков обстановки, в заготовке знаков и т. д.

Протяженность обстановочных участков при бригадной форме обслуживания колеблется: на реках I и II групп — от 50 до 80 км, на небольших реках с неинтенсивным судоходством и лимитирующими перекатами — от 80 до 100 км, на средних и больших реках с небольшим числом перекатов — от 100 до 200 км. Протяженность пути лоцмейстерской дистанции на речных частях водохранилищ и в бьефах шлюзованных рек колеблется от

100 до 200 км, а на озерных участках водохранилищ и в устьевых частях больших рек — от 150 до 250 км и более.

Штат бригады составляет на реках I и II групп 9—15 чел. и на других реках 6—14 чел. Число постов в бригаде на этих реках не более 3 при штате поста в 4 чел. Штат бригады на водохранилищах и в устьях крупных рек колеблется от 6 до 14 чел.

Смену или вахту обстановочной бригады возглавляет путевой мастер — старшина катера (капитан теплохода) или путевой мастер — помощник старшины (помощник капитана), которые во время дежурства отвечают за действие обстановки и сохранность судна. В состав бригады входят: механик, монтеры-мотористы, путевые рабочие-матросы, путевые обходчики, аккумуляторщик. На особенно сложных обстановочных участках бригаду возглавляет мастер пути, не несущий дежурства и не совмещающий обязанности судоводителя.

Постовая форма обслуживания обстановки применяется главным образом на реках I группы с развитым сплавом леса в плотах и при большом количестве затруднительных перекатов с плавучей обстановкой. Обстановочный пост имеет моторную и гребные лодки. Протяженность обстановочных участков при постовой форме обслуживания составляет 50—100 км. Протяженность постов на участках с лимитирующими перекатами колеблется от 5 до 12 км, а на плесовых участках и участках с нелимитирующими перекатами — от 8 до 16 км.

На водохранилищах обстановочные посты создаются только при некоторых рейдах и убежищах с большим количеством плавучих знаков. Эти посты имеют штат до 4 чел., несущих сменное дежурство по наблюдению за сохранностью и действием знаков. В распоряжении такого поста имеется катер.

Работа на обстановочном посту ведется по утвержденному графику. Траление судового хода и установка и перестановка береговых знаков выполняются всем составом поста.

Базой обстановочного поста на реках является домик с кладовой для инвентаря. На территории поста имеется помещение для хранения знаков, горючего и смазки. Постовой домик помещают на наиболее затруднительном участке реки и так, чтобы обеспечить наибольшую видимость по судовому ходу.

На участках рек с постовой формой обслуживания обстановки путевой мастер проверяет работу каждого поста не реже одного раза в течение 5 сут на реках I группы и раз в течение 7 сут на реках II группы. Путевой мастер выборочно измеряет глубины на судовом ходу и сверяет показания вывесок глубин и ширин с фактическими, проверяет правильность расположения знаков, действие сигнальных огней, состояние их источников питания и устраняет обнаруженные недостатки.

На обстановочных участках с постовой формой обслуживания и с питанием огней от аккумуляторов имеются зарядные станции, обслуживающие один или несколько участков. В техучастке

или районе гидросооружений организуется ремонтно-профилактическая база для ремонта моторных лодок и оборудования знаков.

Работники обстановки на реках ведут постоянное наблюдение за состоянием речного русла и в зависимости от переформирований последнего своевременно изменяют направление и границы судового хода. При этом соблюдаются следующие основные условия: глубину и ширину обставленного судового хода поддерживают не меньше плановой или заданной (с учетом необходимого запаса) для данного плеса на данный день; в пределах обставленного судового хода не оставляют подводных препятствий, глубина над которыми меньше транзитной глубины на плесе плюс запас.

Плановая для данного плеса на данный день глубина устанавливается по таблицам зависимости дифференцированных гарантийных глубин плеса от уровней воды на водомерном посту, а гарантийная ширина судового хода для плеса устанавливается или постоянной на всю навигацию, или дифференцированной, зависящей тоже от уровней воды.

Продуктивная работа транспортного флота требует поддержания на плесе прежде всего максимально возможной транзитной глубины, так как большие глубины на одних перекатах при малых глубинах на других перекатах того же плеса не могут быть использованы для судоходства.

Если на перекате ширина судового хода с плановой транзитной глубиной меньше заданной, немедленно принимаются меры к восстановлению плановой глубины на заданной ширине судового хода. Если на перекате в пределах обставленного судового хода глубина больше плановой по плесу на данный день, то судовой ход расширяют, передвигая обстановку до плановой глубины.

В целях определения положения судового хода и его габаритов работники обстановки на лимитирующих перекатах рек с неустойчивым руслом ежедневно промеряют глубины на судовом ходу. На реках с устойчивым руслом промеры глубин на перекатах производят раз в течение 2—5 сут. Систематические сплошные промеры русла на перекатах выполняют для наблюдения за переформированием их русла и для своевременного определения возможности и необходимости перемещения судового хода и перестановки знаков.

На сигнальных мачтах вывешивают фактические минимальные глубины и ширины судового хода. Только на участках рек с песчаным ложем, имеющих отдельные каменистые перекаты, глубину вывешивают на 5 см меньше фактической. Сигнальные знаки на мачтах вывешивают или меняют сразу же после окончания промера судового хода. На затруднительных перекатах с большими деформациями русла во время быстрого изменения уровней воды промеры судового хода и изменение вывесок глубин производят два-три раза в сутки.

Сигнальные знаки глубины и ширины судового хода начинают вывешивать при появлении на спаде весеннего паводка хотя бы

на одном из перекатов данного участка реки глубины, равной 1,25 осадки наибольших плавающих здесь судов.

На водохранилищах судовые ходы более устойчивы, чем на реках, и поэтому основная задача работников обстановки здесь заключается в обеспечении сохранности знаков и исправного действия светосигнальной аппаратуры на них.

Работники обстановки, кроме содержания знаков и огней на них, обеспечивают технические участки пути и районы гидросооружений сведениями об условиях плавания и о состоянии пути. В сведениях указываются: габариты судового хода на перекатах, состав обстановки, изменения в положении судовых ходов и обстановки, результаты траления на судовом ходу и т. д.

Между обстановочными участками, лоцмейстерскими дистанциями, постами, техучастком или районом гидросооружений имеется селекторная связь, а все обстановочные суда оборудованы приемо-передаточными коротковолновыми станциями. Все это дает возможность осуществлять полную взаимную информацию о состоянии пути и позволяет при надобности принять быстрые меры для восстановления сбитых или уничтоженных знаков, для ремонта поврежденной светосигнальной аппаратуры, а также для траления судового хода.

Технические участки пути и районы гидросооружений используют сведения работников обстановки для информации судоводителей и работников эксплуатации о состоянии судовых ходов на реках и водохранилищах и об условиях плавания на них, а также для оперативного руководства путевыми работами.

Глава XIII

ТРАЛЬНЫЕ И РУСЛООЧИСТИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

§ 82. ЗАДАЧИ И СОСТАВ ТРАЛЬНЫХ И РУСЛООЧИСТИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

В русле рек, на дне водохранилищ и судоходных каналов нередко встречаются различные подводные предметы и препятствия, представляющие опасность для проходящих судов и могущие привести к пролому их корпусов и даже затоплению.

Причины появления таких предметов в водоемах различны. Наиболее часто попадают в русло рек деревья, растущие на подмываемых берегах. Иногда они тонут на месте обрушения берега, но чаще течением или ледоходом выносятся на нижележащие участки, где из-за намокания древесины опускаются на дно. При этом корневая часть, как более тяжелая, опускается раньше и заносится грунтом. Дерево остается в наклонном состоянии и может вызвать аварию наскочившего на него судна. Не меньшую опасность представляют топляки — затонувшие бревна при молевом сплаве или при плохой счалке плотов и авариях с ними.

При переформированиях речного русла на судовом ходу могут оказаться каменные гряды, камни-одинцы или выступы твердой глины, ранее находившиеся в толще аллювиальных отложений или берегов. Некоторые камни выносятся на судовой ход во время ледохода, когда они попадают на лед при обвалах берега или вмерзают в него в прибрежной полосе. В последнем случае во время весеннего подъема уровня воды лед поднимается, увлекая со дна вмерзшие в него камни, и плывет вниз по течению, пока не растает. Камни вновь погрузятся на дно, но уже в новом месте. Иногда камни выносятся ледоходом из притоков или ливневыми водами из оврагов.

На водохранилищах препятствиями иногда являются остатки зданий и деревьев, не убранные при подготовке территории к затоплению, а также всплывшие блуждающие острова из торфа.

Засорение судового хода может произойти в результате аварий с судами и плотами, при затоплении предметов во время погрузочно-разгрузочных операций. Довольно частое явление — утеря якорей и лотов с судов и плотов или при уборке и перестановке лесосплавных бонов и молеуловителей. Серьезным препятствием для судоходства могут явиться остатки ранее существовавших выправительных сооружений, водозаборов и мостов.

Руслоочистительные работы складываются из *отыскания препятствий путем траления и извлечения найденных предметов* с последующим их удалением на берег за пределы затопляемой и размываемой зоны. Цель руслоочисти-

тельных работ — обеспечение условий безопасного плавания речных судов и составов с определенной осадкой.

Выполняются тральные и руслоочистительные работы техническими участками управлений пути и районами гидросооружений управлений каналов.

Руслоочистительные работы делятся на *дноочистительные*, в результате которых извлекаются препятствия из-под воды, и *берегоочистительные*, по профилактической уборке препятствий с береговой полосы, которая может быть размыта или затоплена. Дноочистительные работы, как правило, выполняются в навигационный период *дноочистительными кранами*. Берегоочистительные работы производятся в течение всего года специальными бригадами, обеспеченными подъемными кранами и механизированным транспортом.

§ 83. ТРАЛЫ

Подводные препятствия визуально без специального оборудования обнаружить почти невозможно, за исключением случаев, когда над затопленными на небольшой глубине предметами появляется характерная рябь, по которой можно зафиксировать их местоположение для последующей уборки. Поэтому для подводного обследования чистоты судового хода применяют специальное оборудование, так называемые *тралы* различных систем, делящиеся на две конструктивно различные группы,— *гибкие* и *жесткие*.

Гибкий трал (рис. 224) представляет собой металлический оцинкованнный 10—12 миллиметровый трос с прикрепленными к нему грузами, а иногда и поплавками. Длина гибкого трала в зависимости от ширины судового хода или русла, подлежащего тралению, составляет 100—200 м. При длине трала в 200 м ширина протраливаемой полосы не превышает 120—150 м. Концы гибкого трала закрепляют на двух катерах или двух лодках (см. рис. 224). Катера при тралении по возможности идут вверх по реке, лодки же, наоборот,— вниз, так как им преодолеть течение трудно.

Участок, пройденный тралом по прямой линии в одном направлении, называется *тральным галсом*, площадь, обследованная тралением по одному галсу, — *протраленной полосой*. Если ширина участка траления превышает ширину, захватываемую гибким тралом, то траление производят параллельными галсами так, чтобы границы отдельных ходов перекрывались. Это предупредит пропуски на протраливаемом судовом ходу. При тралении гибким тралом перекрытие состав-



Рис. 224. Гибкий трал

ляет от 0,3 до 0,5 ширины протравливаемой полосы. Для обозначения границ отдельных галсов по кромкам протраленной полосы устанавливают вехи или буйки.

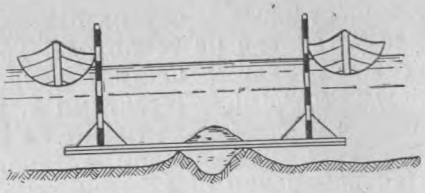


Рис. 225. Тральная рама (жесткий трал)

При тралении катера или лодки движутся по кромкам протраливаемой полосы, а трос мягкого трала волочится по дну между судами. При задевании трала за подводное препятствие суда сближают и меняют местами для образования петли; затем оба судна подтягивают к обнаруженному предмету, где с тральщиков шестами определяют характер препятствия и глубину воды над ним, устанавливают веху или сбрасывают буек для фиксации местоположения препятствия.

К недостаткам гибкого трала относятся провисание троса и образование большой колышки (петли); она затрудняет перемещение трала и сокращает площадь, обследуемую за один галс. Кроме того, такой трал соскальзывает с камней, погруженных в грунт или имеющих округленную форму. Поэтому гибкий трал непригоден для работы на каменистых участках. Часто тралом не захватываются и топляки, когда один их конец погружен в грунт, а другой направлен в сторону движения трала. Гибкий трал можно применять лишь для отыскания случайных, но достаточно определенных препятствий (якорей, лотов и т. п.), а также на участках, засоренных карчами, пнями и т. п.

Более надежно обнаруживаются подводные препятствия при тралении жесткими тралами. Простейшим жестким тралом является тральная рама (рис. 225), состоящая из тралящей части в виде трубы или уголка, опускаемой на заданную глубину с помощью штанг.

При тралении жестким тралом тралящую часть устанавливают на определенную, заданную глубину и в таком положении трал перемещают по обследуемому участку. Тралящая часть задевает за предметы, находящиеся выше глубины траления.

Ширина протраленной жестким тралом полосы равна длине тралящей части. Перекрытие галсов требуется на 0,1—0,15 длины тралящей части.

Недостатками жестких тралов-рам являются малая ширина протраливаемой полосы (не более 10 м), трудность контроля за перекрытием галсов и неточность траления при волне. Поэтому одиночную жесткую раму для траления используют редко, а чаще тралят тралами-сцепами системы Богова или другими.

Кроме рассмотренных простейших тралов, для траления судовых ходов применяются и более совершенные гибкие, жесткие и полужесткие тралы, некоторые из конструкций которых рассматриваются ниже.

Трал Котельникова (рис. 226), используемый для тра-

ления судовых ходов на озерах и водохранилищах, предназначен для установки на теплоходе. Трал состоит из горизонтального ригеля — тралящей части *1* длиной 18 м, соединенного с судном двумя трубами — штангами *2,* жестко скрепленными с трубчатой балкой *3;* последняя лежит на бортах судна и в середине поддерживается подшипником, установленным на специальной катушке. При изменении положения ригеля *1* балка *3* вращается. Для определения глубины траления имеется градуированный сектор, показывающий глубину в зависимости от угла наклона штанг, идущих от ригеля. Для бо́льшей жесткости трала ригель соединен с носовой частью судна четырьмя стальными тросами *4.* Для предохранения от обрыва при сильном задевании трала за подводные препятствия тросы прикрепляют к борту судна крючками, разгибающимися при задевании; это дает возможность ригелю автоматически приподниматься. Трал поднимается из воды подъемными тросами *5,* проходящими через ролики, укрепленные на стреле *6;* верх этой стрелы соединен с мачтой судна. Подъем трала производят лебедкой.

В момент, когда ригель задевает за препятствие, автоматически сбрасывается в воду буек. Для этого на корме имеется вращающаяся площадка, на которой свободно лежит буек с грузом; при задевании за препятствие выдергивается чека, закрепляющая площадку в горизонтальном положении, площадка вследствие этого принимает вертикальное положение, и буек падает. После этого площадку вновь устанавливают горизонтально и на нее укладывают новый буек. Скорость передвижения трала Котельникова зависит от типа судна, на котором он установлен, и достигает 10 км/ч.

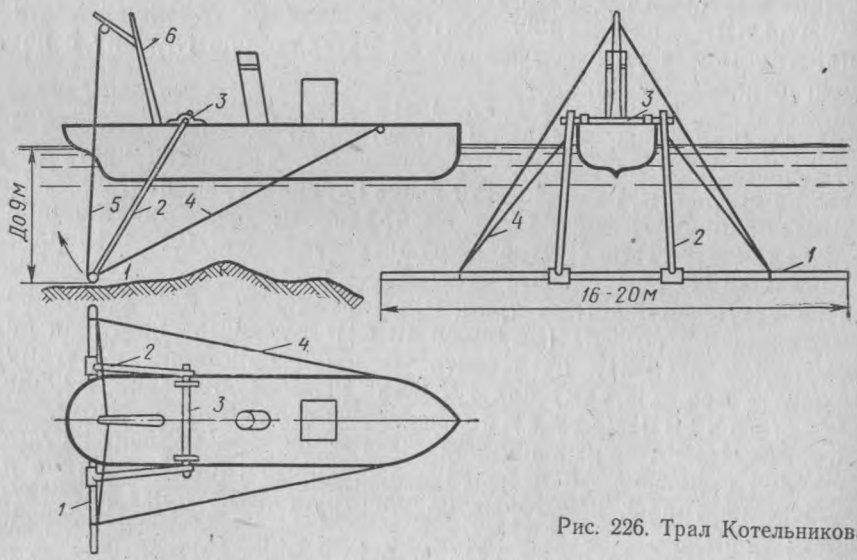


Рис. 226. Трал Котельникова

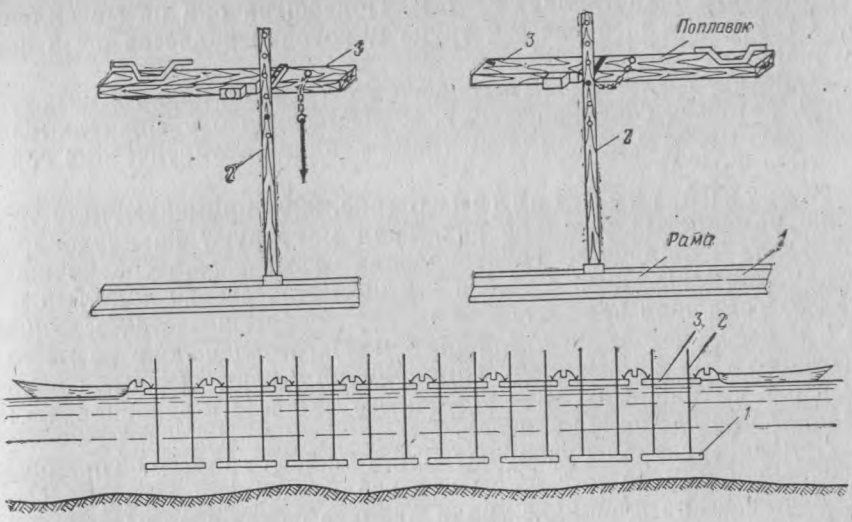


Рис. 227. Трал-сцеп Богова

Трал-сцеп Богова (рис. 227) широко применяется на реках при глубине траления до 4 м. Трал состоит из звеньев — жестких рам, соединяемых на такую длину, какая требуется для траления судового хода заданной ширины.

Каждое звено состоит из тралящей металлической части *1*, изготовленной из тонкой трубы, или металлического угольника. Тралящая часть шарнирно закреплена на штангах *2*, которые подвешены на деревянном поплавке *3*.

Штанги поддерживают тралящую часть на заданной глубине путем закрепления их на поплавке специальными штырями, закладываемыми в отверстия штанг, расположенных по высоте через 5 см.

Этот трал-сцеп буксируют вниз по течению гребными или моторными лодками на малой скорости. С контрольных лодок, следующих за тралом, замечают места нахождения препятствий по отклонению штанг трала от вертикального положения и сбрасывают там буйки.

Трал-сцеп Павловского (рис. 228) применяют для траления рек и каналов. Тралящая часть его и ось вращения изготовлены из металлической тонкой трубы; штанги могут быть деревянными. Длина тра-

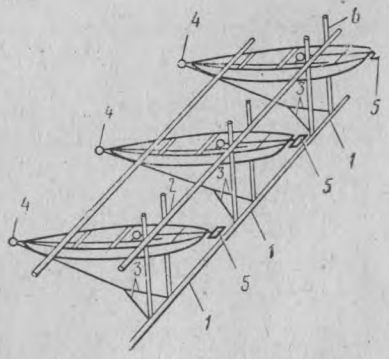


Рис. 228. Трал-сцеп Павловского

лящей части *1* составляет 6—7 м. Подвешена она на металлических трубчатых штангах *6* к трубе *2*, которая является осью вращения.

Такелаж трала-сцепа Павловского состоит из двух тяговых тросов *3*, которые, соединяясь, идут к носу лодки и удерживаются с помощью блока *4*. В комплект трала входит автоматический сбрасыватель буйков *5*.

Жесткий трал Тесленко (рис. 229) применяют для траления каменистых участков рек. Трал монтируют на двух парах поплавков *1* плавучего грунтопровода землесоса, соединенных между собой жесткими рамами *2* и имеющих сверху дощатый настил *3*. Тралящая часть состоит из двух боковых частей *4* длиной по 5 м и средней части *5* длиной 6 м. Изготовлена она из металлического уголка, соединенного шарнирно с вертикальными штангами *6* и оттяжками *7* из уголкового железа, закрепленными шарнирно на площадке понтона.

При работе трал буксируют или толкают катером. Тралящая часть волочится по дну, указывая все изменения его рельефа. Находящиеся на площадке трала рабочие фиксируют наименьшие глубины и места обнаруженных препятствий.

Широкозахватный трал НФ ЦТКБ. Одним из наиболее совершенных в настоящее время является широкозахватный трал, спроектированный Новосибирским филиалом ЦТКБ. Этот трал устанавливается на самоходном дноочистительном кране или другом судне и обеспечивает полную механизацию тральных работ, включая автоматический сброс буйков при обнаружении подводных препятствий.

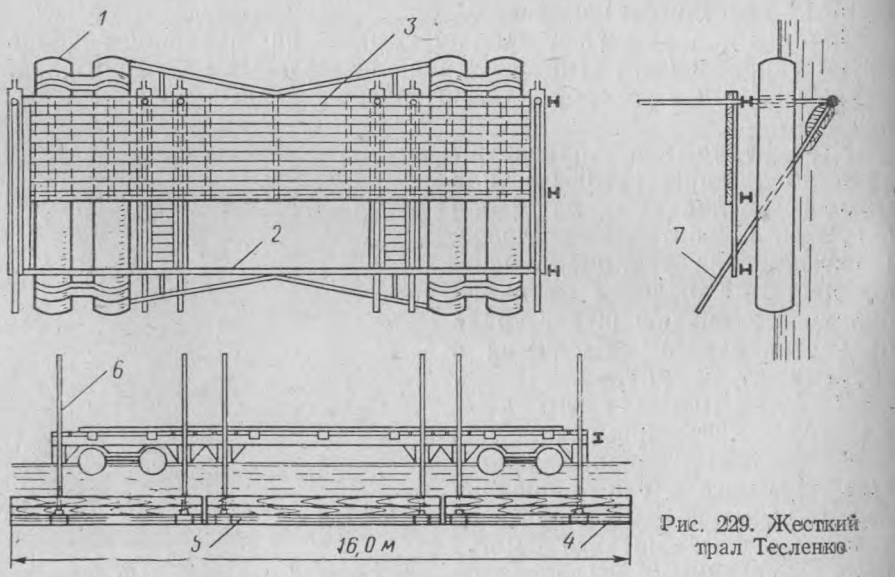


Рис. 229. Жесткий трал Тесленко

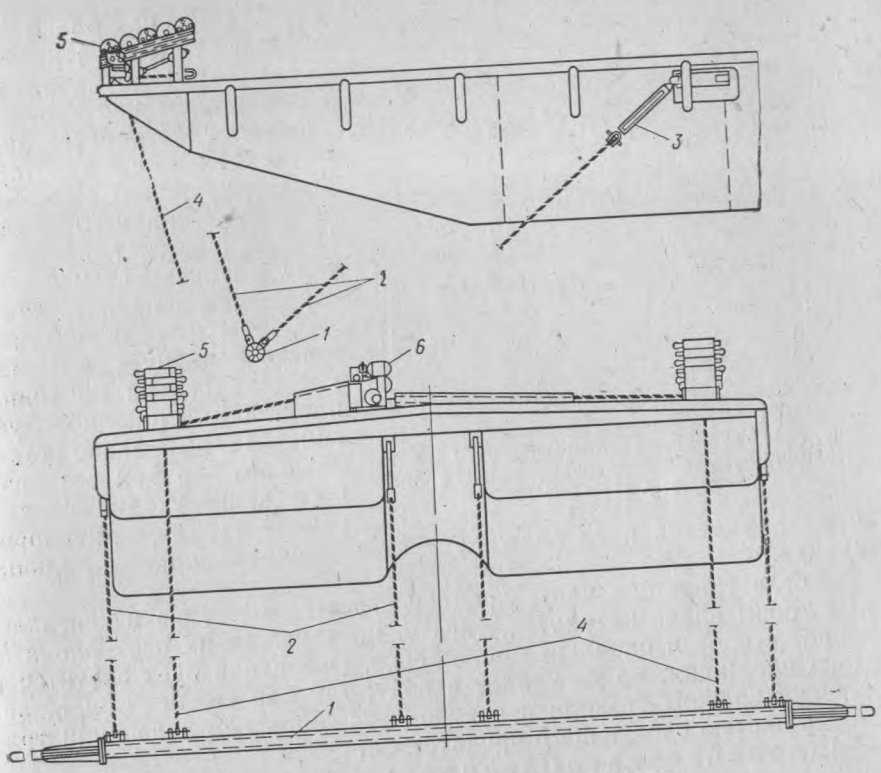


Рис. 230. Широкозахватный трал НФ ЦТКБ

Рассматриваемый трал (рис. 230) состоит из тралящей части *1*, изготовленной из трубы длиной 15,5 м, диаметром 190 мм и подвешенной к корпусу судна на четырех тяговых тросах *2*. Для предупреждения обрыва тросов при задевании тралящей частью за препятствие тросы подсоединены не жестко, а через амортизаторы *3*. Опускание и подъем тралящей части осуществляются на тяговых тросах лебедкой *6*. Параллельно наружным, т. е. вертикальным, тяговым тросам к тралящей части присоединены два сигнальных троса *4*, которые через системы блоков проходят к устройству для автоматического сброса буйков *5*. Это устройство (рис. 231) представляет собой наклонную площадку *3*, на которую укладываются буйки *2*, удерживаемые от скатывания стопором с крюком *1*.

При производстве тральных работ тралящая часть на тяговых тросах опускается на заданную глубину. Одновременно вытравливают и сигнальные тросы, но так, чтобы они не имели слабины. Судно движется по заданным тральным галсам. При задевании тралящей частью за подводное препятствие труба несколько приподнимается и натяжение сигнальных тросов *7* ослабевает, что

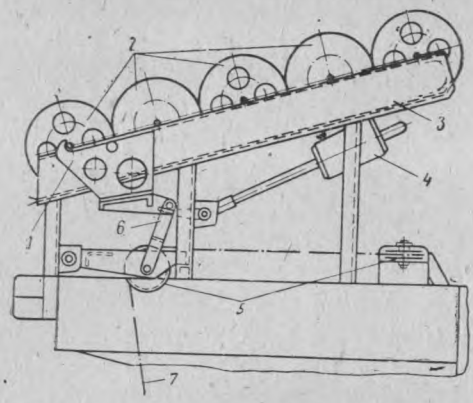


Рис. 231. Устройство автоматического сбрасывания буйков широкозахватного трала НФ ЦТКБ

передается на блоки устройства автоматического сбрасывания буйков. Под воздействием противовеса *4* стопорное устройство поворачивается на некоторый угол и крюк его высвобождает ось крайнего буйка. Последний скатывается в воду и фиксирует место обнаруженного препятствия.

Чтобы в воду скатился только один буек, а остальные остались на наклонной площадке, стопорное устройство выполнено таким образом, что при его повороте крюк уходит вниз, а задняя грань, наоборот, приподнимается и загораживает путь к скатыванию остальных буйков.

Когда тралящая часть пройдет через препятствие и сигнальные тросы вновь натянутся, тяга *6*, насаженная на ось блока *5*, вернет стопор в начальное положение. Очередной буек скатится к краю площадки, но не упадет в воду, так как его ось будет захвачена крюком стопора и освободится лишь при задевании тралящей частью следующего препятствия.

Широкозахватный трал, используемый на Волго-Балтийском водном пути имени В. И. Ленина (рис. 232), является тралом, устройство которого мало отличается от устройства описанного выше широкозахватного трала Новосибирского филиала ЦТКБ, но конструкция облегчена и упрощена. Тралы на Волго-Балте монтируются на обычных понтонах плавучего грунтопровода землесоса и по устройству имеют ряд отличий. Например, трал,

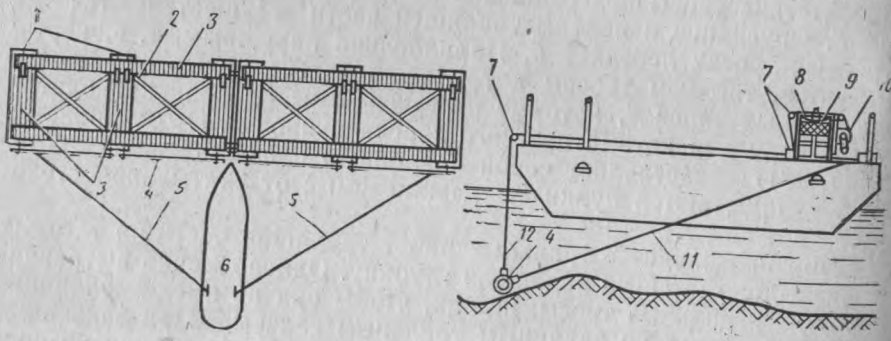


Рис. 232. Широкозахватный трал Волго-Балта

эксплуатирующийся на р. Свири, состоит из двух секций длиной по 20 м, что обеспечивает ширину протраливаемой полосы 40 м. Каждая секция состоит из трех понтонов *1* (см. рис. 232), соединенных трубчатыми связями *2*. По верху понтонов уложены переходные мостики *3*. Секции между собой соединяются автосцепными замками.

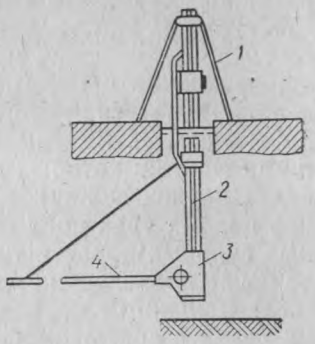


Рис. 233. Трал Палкина

Тралящая часть устройства *4* представляет собой трубы диаметром 170 мм, подвешенные на тросе *12*, который проходит через систему блоков *7* на стойку *8*. На конце троса прикреплен груз-противовес *9*, что позволяет держать его всегда натянутым без слабины независимо от изменения глубины, а следовательно, и местоположения тралящей части, т. е. трубы. Опускание и подъем трубы при начале или окончании траления обеспечивается лебедками *10*. Имеется тяговый трос *11*.

Трал перемещается при производстве работ теплоходом *6* мощностью 150 л. с., который счаливается с ним автосцепом и двумя тросами-растяжками *5*. Скорость траления 5—7 км/ч, производительность 0,2—0,3 км^2/ч протраленной площади.

Трал Палкина (рис. 233) предназначен для зимнего траления подо льдом. Трал состоит из вертикальной деревянной штанги *2*, треноги *1*, трех обойм *3* и тральной полосы из уголкового железа *4*. Трал в наклонном положении опускают в просверленную во льду лунку и устанавливают тральную полосу на заданной глубине. Подводные препятствия, на которых глубина меньше заданной, обнаруживают при вращении трала.

§ 84. ПРОИЗВОДСТВО ТРАЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с «Технической инструкцией по содержанию судоходной обстановки на внутренних водных путях» различают следующие виды тральных работ: периодическое сплошное траление судовых ходов; местное траление, выполняемое на отдельных участках водных путей, требующих особенно тщательного наблюдения (на каменистых перекатах, порогах, подходах к портам, пристаням, рейдам, затонам и т. п.); аварийное траление, связанное с отысканием различных предметов, попавших в русло в результате аварий судов и плотов или утерянных судами и плотами (якоря, лоты, цепи и т. п.).

Сплошное траление выполняется специальными тральными бригадами, которые оснащаются мотолодками или теплоходами мощностью 90—150 л. с. и тралами-сцепами различных типов. В зависимости от условия работы и технической оснащенности бригады ее состав колеблется от 3 до 6 чел. Работы по

тралению ведутся в соответствии с графиком, устанавливаемым техническим участком пути или районом гидросооружений. При составлении графика предусматривают, что первое сплошное траление должно производиться сразу же после открытия навигации и заканчиваться до наступления транзитной глубины, в 1,5 раза превышающей максимальную осадку плавающих судов. На реках и каналах, на которых навигация открывается при низких уровнях воды, первое сплошное траление должно быть выполнено в течение первых трех дней после окончания ледохода. На дополнительных судовых ходах и тиховодах плавание судов разрешается только после проведения тральных работ.

В меженный период сплошное траление всех судовых ходов на реках с освещаемой обстановкой и развитым лесосплавом проводится раз в две недели, а на остальных реках с освещаемой обстановкой — раз в месяц. На реках с неосвещаемой обстановкой сплошное траление производится два раза в навигацию.

На водохранилищах и озерах сплошное траление выполняется каждые два месяца и только на тех участках судовых ходов, на которых глубины не превышают полуторной магистральной осадки плавающих судов (при минимальном навигационном уровне). Если навигация на водохранилище открывается при низком уровне воды, то последнее траление должно быть произведено непосредственно перед закрытием навигации.

На временно эксплуатируемых водных путях сплошное траление производится в зависимости от сроков навигации по согласованию с управлениями пароходств.

Чтобы исключить возможность попадания препятствий на судовой ход в результате переформирований речного русла или перемещения знаков судоходной обстановки, ширина протраливаемой полосы назначается больше ширины судового хода. Если участок реки обставлен плавучими знаками, то с обеих сторон судового хода в зависимости от его ширины протраливается полоса шириной 10—20 м. При обозначении судового хода створными знаками протраливается полоса шириной, в 2,5—3,5 раза превышающая гарантированную. Если судовой ход обставлен перевальными и ходовыми знаками, то ширина траления должна быть не менее 3,5 гарантированных ширин судового хода. На подходах к перекатам должна протраливаться вся акватория возможного разворота судов и составов.

На озерах и водохранилищах ширина протраливаемой полосы принимается равной ширине судового хода с запасом в обе стороны 50—100 м.

Для проведения работ по сплошному тралению, помимо тральной бригады, привлекается обстановочная бригада или работники обстановочных постов того участка, на котором ведется траление. Работами по тралению руководит прораб путевых работ или его помощник по судоходной обстановке, которые задают глубину траления, ширину протраливаемой полосы и устанавливают порядок выполнения работ.

Глубина траления на плесовых участках принимается равной гарантированной глубине плюс превышение рабочего уровня над проектным (срезка), плюс запас, равный 20—50 см. На перекатах глубина траления принимается равной транзитной глубине данного переката. Бригадир тральной бригады ежедневно ведет рабочий журнал, в котором записывает все выполненные работы.

Работу тральной бригады принимает путевой мастер, на участке которого произведено траление. В акте приемки работ, кроме протраленной площади, указывается тип трала, который применялся при тралении, и количество обнаруженных и удаленных препятствий. Акт о приемке и сдаче работ тральной бригадой составляется в трех экземплярах: один вручается путевому мастеру, принявшему работу; второй вместе с нарядом-заданием направляется в технический участок; третий остается в делах бригады. Помимо этого, результаты каждого траления записываются в обстановочный журнал бригады или поста.

Местное траление выполняется в периоды между сплошными тралениями на всех перекатах, порогах, подходах к портам и пристаням, на участках подмываемых берегов, а также в местах, где возможно засорение судового хода такелажем, бревнами и т. п.

Регулярное местное траление должно начинаться при наступлении глубин, в 1,5 раза превышающих максимальную осадку плавающих судов, и выполняется в сроки, установленные календарным графиком. Последний составляется для каждой обстановочной бригады или каждого обстановочного поста в зависимости от формы обслуживания судоходной обстановки. При этом следует иметь в виду, что местное траление перекатов с песчаным ложем должно производиться не реже одного раза в 5—10 дней, а перекатов и подходов с каменистым ложем и порогов — не реже раза в 3—5 дней. Для каждого конкретного обстановочного участка периодичность местного траления устанавливается бассейновым управлением пути (управлением канала) по согласованию с управлением пароходства и судоходной инспекцией.

График местных тралений у причалов портов, пристаней и на рейдах составляется техническим участком пути совместно с руководством порта или пристани. В этом графике должна быть указана последовательность производства работ и установлен порядок освобождения причалов и рейдов для беспрепятственного производства тральных работ.

Аварийное траление выполняется в тех случаях, когда в пределах какого-либо участка водного пути утоплен якорь, лот или другой предмет, в случае аварии с судном или плотом, либо если поступили сведения о наличии карчей или топляков, опасных для плавающих судов.

К работам по аварийному тралению привлекаются в первую очередь работники обстановочной бригады данного участка, ближайших обстановочных постов, а также, в случае необходимости, команды судов технического флота и работники изыскательских

партий. К аварийному тралению по отысканию утопленных с судов и плотов якорей, лотов и других предметов обязательно следует привлекать представителя того судна или плота, с которого был утоплен данный предмет.

Если во время производства тральных работ обнаружено какое-либо подводное препятствие, то работники тральной бригады или работники обстановки должны принять все меры к извлечению его своими силами. Если это не удается, то обнаруженное препятствие ограждается знаками судоходной обстановки и о нем сообщается в технический участок (район гидросооружений).

Учет результатов местного траления ведется путевым мастером (при бригадном обслуживании обстановки) или старшим постовым рабочим (при постовом обслуживании). Результаты каждого траления записываются в обстановочном журнале с указанием даты траления, обнаруженных препятствий, их местоположения и принятых мер.

На каждое аварийное траление составляется акт с указанием причин, вызвавших необходимость траления, принятых мер, участков траления, объемов выполненных работ и результатов траления. Если необходимость аварийного траления возникла по вине проходящего судна или плота, то один экземпляр акта передается в судоходную инспекцию.

§ 85. ПРОИЗВОДСТВО РУСЛООЧИСТИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Руслоочистительные работы выполняются дноочистительными снарядами (кранами) различных конструкций. На реках наиболее распространены дноочистительные снаряды: несамоходный грузоподъемностью 10 т (рис. 234) и винтовой самоходный грузоподъемностью тоже 10 т (рис. 235). Для извлечения подводных препятствий на озерах и водохранилищах используют самоходный дноочистительный снаряд с водометным движителем грузоподъемностью 20 т. Дноочистительные снаряды имеют собственное тральное устройство с автоматическим сбрасывателем буйков и водолазное оборудование.

Дноочистительные снаряды закрепляются за прорабским участком, в пределах которого имеется необходимость ежегодного производства дноочистительных работ. В связи с высокой строительной стоимостью современных дноочистительных снарядов и большими расходами по их содержанию работают они по 1,5—2,0 смены в сутки.

Командиру дноочистительного снаряда и старшине водолазной станции выдается наряд-задание на производство работ, в котором указывается протяженность участка реки, подлежащего очистке, и ширина очищаемой полосы русла; количество подводных препятствий, обнаруженных предварительным тралением и под-

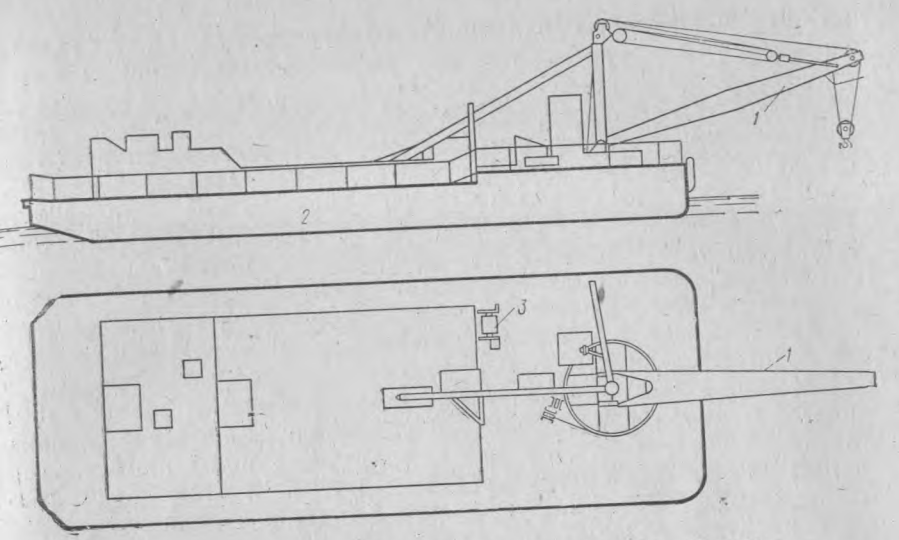


Рис. 234. Схема несамоходного дноочистительного снаряда:
1 — стрела; *2* — корпус судна; *3* — лебедка

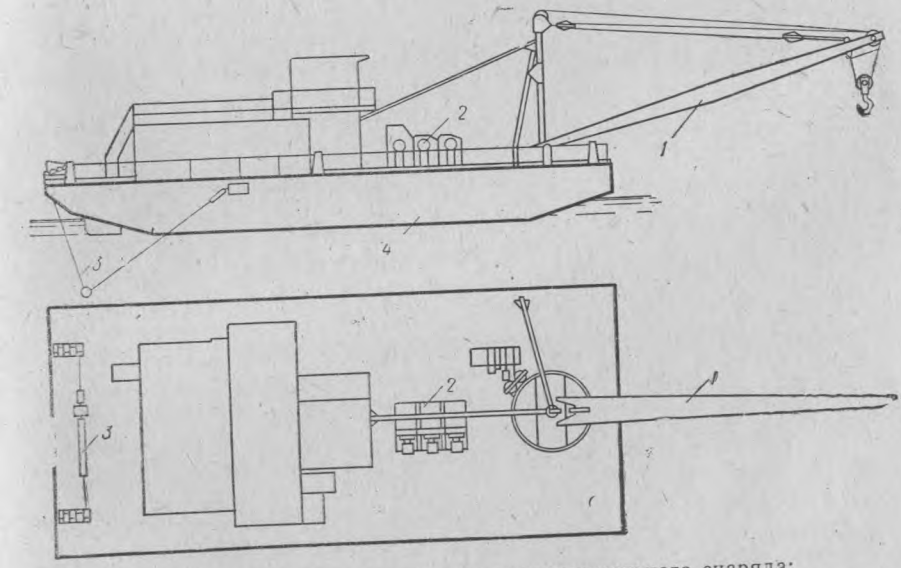


Рис. 235. Схема самоходного дноочистительного снаряда:
1 — стрела; *2* — лебедка; *3* — тральное устройство; *4* — корпус судна

лежащих удалению; сроки производства работ. Наряд-задание подписывается прорабом путевых работ, его помощником по судоходной обстановке или путевым мастером того участка, на котором будет работать дноочистительный кран.

В большинстве случаев работа дноочистительных снарядов организуется таким образом, что снаряд сплавом (если он не самоходный) или своим ходом (если он самоходный) проходит по участку и извлекает все обнаруженные при тралении препятствия. Количество выполненных работ проверяется путем контрольного траления, производимого командой дноочистительного снаряда, после чего очищенный участок сдается по акту путевому мастеру. В акте указывается объем выполненных работ и границы очищенного участка.

Кроме плановых профилактических руслоочистительных работ, имеются и аварийные работы: по удалению препятствий, появившихся на судовом ходу в результате аварий судов и плотов, утопленных якорей или других предметов и т. п. В этом случае дноочистительный снаряд получает наряд-задание на уборку отдельных конкретных предметов.

Глава XIV

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПУТЕВЫХ РАБОТ НА НАВИГАЦИЮ

§ 86. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРИОДЫ ПРОИЗВОДСТВА ПУТЕВЫХ РАБОТ

В комплексе путевых работ по улучшению судоходных условий на водных путях основными являются дноуглубительные и выправительные работы, а также судоходная обстановка. Назначение путевых работ — обеспечение устойчивых судовых ходов, имеющих заданные габариты и удовлетворяющих требованиям безаварийного судоходства.

Все судоходные пути подразделяются на пути с гарантированными габаритами судового хода и без гарантированных габаритов. Гарантированные габариты судового хода (глубина, ширина и радиус закруглений) устанавливаются как минимальные навигационные или (по предложению Л. И. Кустова) как дифференцированные, т. е. в зависимости от высоты уровней воды. Гарантированные минимальные габариты судового хода должны быть выдержаны в течение всей навигации независимо от высоты уровней воды. Дифференцированные глубины и ширины задаются по кривым зависимости глубин и ширин судового хода от высоты уровней воды (рис. 236), или, как принято их называть,— по кривым дифференцированной гарантии глубин и ширин.

Дифференцированные габариты устанавливаются различные для периода спада весеннего паводка (для подготовки перекатов к межени) и для периода межено-осеннего, когда на разработанных перекатах при тех же уровнях можно поддерживать глубины бо́льшие, чем в начале навигации.

Поддержание гарантированных габаритов судового хода — основная задача путейских работников. От габаритов пути в значительной степени зависит использование транспортного флота и выполнение плана перевозок.

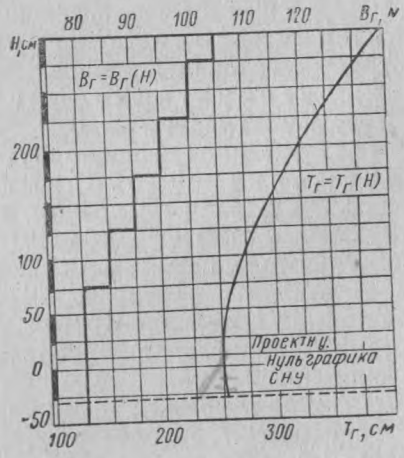


Рис. 236. Кривые дифференцированной гарантии глубин $T_г = T_г(H)$ и ширин $B_г = B_г(H)$ плеса
(H — уровень на опорном водомерном посту; $B_г$ — минимальная ширина судового хода; $T_г$ — минимальная глубина на плесе)

Минимальные гарантированные габариты судового хода поддерживаются при проектном и более низких уровнях воды. Положение проектного уровня относительно нуля графика водомерного поста указывается в задании на габариты судового хода. За проектный уровень воды принимают один из низких уровней, имеющий установленную многолетнюю навигационную суточную обеспеченность. Величина этой обеспеченности принимается: для I группы путей с интенсивностью судоходства в сутки (в обоих направлениях) более 30 судовых или 5 плотовых составов — 95—99%; для II группы с интенсивностью не более 30 судовых или 5 плотовых составов — 90—95% и для III группы с неинтенсивным судоходством — 80—90%.

Для водного пути или его участка с одинаковыми габаритами судового хода проектный уровень на всех водомерных постах должен иметь одинаковую обеспеченность. Проектный уровень является основным ориентиром при проектировании и производстве путевых работ. По каждому водомерному посту проектный уровень устанавливается на длительный срок и изменяется только при значительном росте перевозок, а также при снижении уровней воды в результате углубления русла.

Проектный уровень служит исходным нулем для всей технической документации по путевым работам — от него отсчитывают уровни воды, приводимые в информационных и отчетных материалах, и к нему привязывают планы съемок на водных путях.

В настоящее время на транзите наших судоходных путей можно выделить два основных направления путевых работ (дноуглубительных и выправительных):

1) капитальные работы для коренного улучшения судоходных условий на наиболее затруднительных участках;

2) эксплуатационные работы для поддержания существующих судовых ходов.

Главным направлением путевых работ является коренное улучшение судоходных условий, при котором активным воздействием на русло и поток комплекса капитальных дноуглубительных и выправительных работ обеспечиваются на продолжительный период устойчивые судовые ходы, увеличение габаритов пути и благоприятные условия для безаварийного судоходства. Для сохранения судовых ходов, создаваемых этими работами, обычно требуются лишь небольшие ремонтные работы в течение навигации.

В состав путевых работ при коренном улучшении судоходных условий входят разработка всех видов капитальных прорезей, возведение выправительных сооружений и береговых укреплений, удаление береговых выступов и скалоуборочные работы.

В состав путевых работ для поддержания существующих судовых ходов входят разработки снарядами эксплуатационных прорезей (восстановительных и ремонтных) с заданными габаритами, т. е. удаление с этих ходов паводковых и меженных отложений наносов. Для закрепления эксплуатационных прорезей грунт, из-

влеченный из них, укладывают в виде выправительных сооружений. При эксплуатационных работах по возможности тоже обеспечивается устойчивый судовой ход.

Дноуглубительные и выправительные работы независимо от их направленности ведут с таким расчетом, чтобы ежегодно сокращалось количество лимитирующих перекатов и участков пути с односторонним движением, уменьшались объемы этих работ и уничтожались свальные течения на перекатах. При любой направленности путевых работ на транзите рек обязательны дноуглубительные работы по подготовке перекатов к низкой межени, т. е. по удалению паводковых отложений наносов.

Путевые работы на свободных реках европейской части Союза, у которых весенний паводок наступает вследствие таяния снегов, выполняются в три периода: 1) весенний; 2) подготовительный на спаде паводка; 3) меженно-осенний (рис. 237).

Весенний период начинается на подъеме паводка, сразу после открытия навигации, продолжается на пике паводка и заканчивается на его спаде при наступлении рабочих уровней дноуглубления, когда максимальная глубина $H_ч$ опускания грунтозаборных устройств снарядов становится достаточной для разработки прорезей до проектного или заданного дна. Проектное дно прорезей устанавливают с расчетом обеспечения для плеса минимальной гарантированной глубины $T_г$ от проектного уровня. Заданное для разработки дно прорези может находиться выше проектного дна и ниже него в зависимости от особенностей руслового режима перекатов и наличия технических средств.

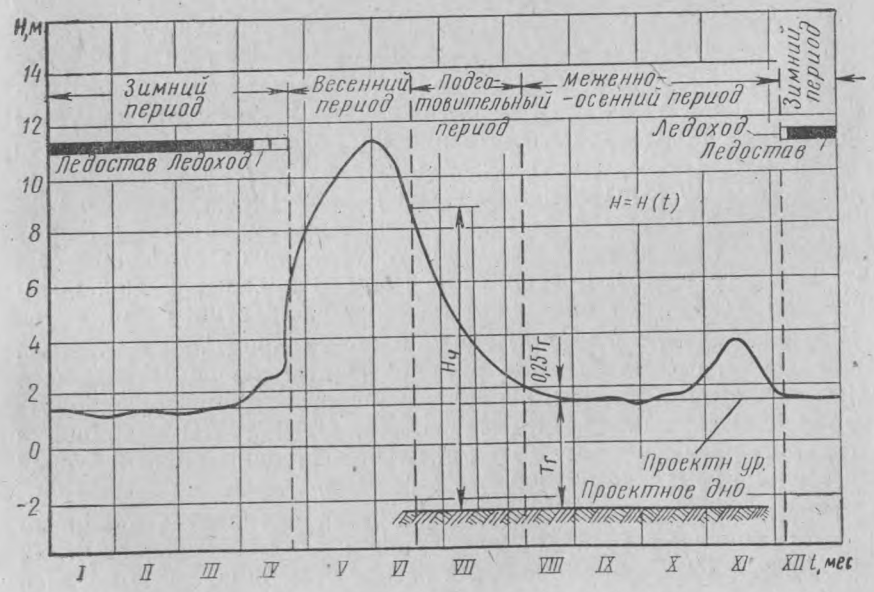


Рис. 237. Периоды путевых работ на реках европейской части СССР

В весенний период выполняют в основном внетранзитные дноуглубительные работы (т. е. не связанные с обеспечением габаритов судового хода на транзите) и работы по выправлению русла (намыв сооружений, засыпка проток, подрезка берегов, побочней и т. д.), а также разрабатывают капитальные прорези. Разработка восстановительных прорезей на существующих судовых ходах в этот период преждевременна (прорези может занести паводком), а в ряде случаев и невозможна, потому что черпаки или всасывающие приемники снарядов не достают не только до проектного дна, но также и до более высокого заданного дна разработки.

Весенний период путевых работ характеризуется большими объемами отдельных работ, выполнением их по плану-графику и редкими перебуксировками снарядов. В это время отсутствуют вывески глубин на сигнальных мачтах перекатов (информация о глубинах), поскольку глубины по всему пути значительно превышают осадку плавающих судов. В начале этого периода дноуглубительные снаряды выводят из затонов и акваторий судоремонтных заводов, где они зимовали и ремонтировались, и буксируют к местам первых работ.

Подготовительный период путевых работ начинается на спаде паводка, с наступлением рабочих уровней дноуглубления, и заканчивается при меженных уровнях, близких к проектному. Начало подготовительного периода зависит от трех факторов: наибольших глубин опускания рам снарядов, высоты уровней на спаде паводка и положения проектного или заданного дна прорези. Концом подготовительного периода считается наступление уровня, превышающего проектный на величину, равную 25—30% минимальной гарантийной глубины, но не больше чем на 0,5 м.

В подготовительный период разрабатывают восстановительные прорези на перекатах по существующим судовым ходам, занесенным преимущественно на подъеме и пике паводка и зимой, а при возможности выполняют и капитальные прорези. Кроме того, после появления вывесок глубин (информации о глубинах) поддерживают дифференцированные габариты пути. Этот период — главный в транзитном дноуглублении на свободных реках для подготовки к наступлению межени судовых ходов, которые разрабатываются преимущественно до проектного дна.

В тех случаях, когда при спаде паводка происходит размыв дна переката, прорези можно разрабатывать не до проектного дна; если же на спаде дно переката заносится, прорези приходится разрабатывать ниже проектного дна. От работы снарядов в подготовительный период в значительной степени зависит успех поддержания гарантийных глубин в межень.

Разработка восстановительных прорезей начинается с наступлением рабочих уровней дноуглубления и по мере освобождения снарядов от работ, выполняемых в весенний период, но не позднее сроков, установленных планом-графиком.

План-график разработки прорезей в подготовительный период, составленный еще зимой, при производстве работ приходится корректировать, так как проектные предположения не всегда совпадают с действительными условиями работ. До появления вывесок глубин (информации о глубинах) план-график корректируют по фактическим уровням на спаде паводка и по предварительным съемкам перекатов, намеченных к ранней разработке. После появления вывесок глубин план-график корректируют в соответствии с глубинами, которые необходимо поддерживать по кривой дифференцированной гарантии.

На равнинных реках продолжительность подготовительного периода сравнительно мала и обычно колеблется от одного до двух месяцев. В этот срок не всегда удается разработать все необходимые восстановительные прорези имеющимися дноуглубительными снарядами. Для удлинения подготовительного периода рекомендуется у новых дноуглубительных снарядов делать рамы с бóльшей глубиной опускания.

Меженно-осенний период путевых работ начинается с наступлением уровней, близких к проектному, и продолжается до конца навигации. В этот период основная задача дноуглубления сводится к поддержанию на плесе заданных дифференцированных габаритов пути, в особенности глубин, а при возможности ведутся работы и по коренному улучшению затруднительных участков.

В течение меженного периода выполняют ремонтные работы на частично занесенных восстановительных и капитальных прорезях, разработанных в подготовительный период. Кроме того, если требуется, разрабатывают восстановительные прорези на перекатах, которые в подготовительный период не разрабатывались и были занесены уже в его конце или после спада паводка.

Очередность разработки прорезей на перекатах в меженный период устанавливают в зависимости от показаний вывесок глубин (от состояния переката) и заданных дифференцированных гарантийных глубин. При недостаточных средствах дноуглубления или при ожидаемых высоких меженных уровнях разработку прорезей можно вести по методу выравнивания глубин на плесе. По этому методу прорези разрабатывают не до проектного дна, а на такую глубину, которая имеется в данный период на большинстве перекатов плеса, но не меньше глубины, задаваемой кривой дифференцированной гарантии глубин.

Положительная сторона метода выравнивания — поддержание ограниченными средствами бóльшей транзитной глубины на плесе, чем при разработке перекатов до проектного дна. Однако при этом методе затрудняется поддержание на плесе гарантированной глубины при падении уровней до проектного и ниже, когда требуется одновременная разработка ряда перекатов до проектного дна и ниже. Вследствие этого метод выравнивания глубин применяется только при незначительных дноуглубительных средствах и надежных прогнозах уровней.



Рис. 238. Периоды путевых работ на реках с летним паводком в восточной части СССР

В случае ожидаемого падения меженных уровней ниже проектного разработку перекатов ведут на минимальную гарантийную глубину от ожидаемого меженного уровня, т. е. ниже проектного дна.

В межень расстановку дноуглубительных снарядов для ремонтных работ надо осуществлять так, чтобы лимитирующие глубину на плесе перекаты были разработаны возможно быстрее и перебуксировки снарядов с переката на перекат не отнимали много времени. Практически такая расстановка снарядов не всегда удается, так как меженный период характеризуется малыми объемами выемок на отдельных перекатах и поэтому частыми перебуксировками снарядов.

Осенью, при установившихся уровнях воды, обычно несколько повышенных против межени, разрабатывают главным образом капитальные прорези для новых судовых ходов на перекатах и ведут внетранзитные работы по углублению входов и акваторий затонов. Эти работы выполняют в сроки, установленные планом-графиком, составленным на осенний период. Если же в течение осеннего периода стоят низкие уровни воды, то часть снарядов остается на плесе для проведения ремонтных работ, т. е. для поддержания гарантийных габаритов. В конце же этого периода дноуглубительные снаряды отводят в затоны и на судоремонтные заводы на зимовку и ремонт.

На свободных реках восточной части СССР, не имеющих весеннего паводка, но характеризующихся высокими летне-осенними паводками от таяния льдов в горах или от дождей, различают следующие периоды производства путевых работ: 1) весенний; 2) летне-осенний; 3) подготовительный — на спаде осеннего паводка (рис. 238).

Весенний период здесь начинается сразу после открытия навигации и продолжается до наступления летних паводков. Он характеризуется низкими уровнями. По режиму глубин на перекатах и по характеру дноуглубительных работ этот период похож на меженный период рек с весенним паводком, но отличается от него более частыми и резкими колебаниями уровней. В течение весеннего периода для поддержания гарантийных габаритов судового хода выполняются ремонтные работы на прорезях, разработанных на спаде осеннего паводка предыдущего года и частично занесенных зимой, а при возможности разрабатываются и капитальные прорези.

Летне-осенний период путевых работ, характерный сравнительно высоким стоянием уровней, начинается с наступлением

летних паводков и продолжается до начала спада осеннего паводка. Судоходные глубины в это время обычно достаточны, поэтому все дноуглубительные снаряды или бóльшая их часть могут быть использованы на капитальных и внетранзитных работах.

Подготовительный период начинается на пике осеннего паводка или на его спаде и заканчивается с закрытием навигации. В этот период разрабатывают восстановительные прорези на перекатах, занесенных во время летне-осенних паводков, а при возможности — и капитальные прорези. Прорези разрабатывают до проектного дна или ниже и как показывает практика, в течение зимы они мало заносятся и поэтому большинство их сохраняется к наступлению низких весенних уровней.

§ 87. РАСЧЕТНЫЕ ГРАФИКИ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ВОДЫ И ГРАФИКИ ГЛУБИН НА ПЕРЕКАТАХ

Для проектирования производства путевых работ на судоходных путях используются: маршрутники, лоции и лоцманские карты рек; многолетние данные об уровнях и расходах воды; паспорта и планы перекатов (затруднительных участков); данные по скоростям течения, движению наносов, уклонам водной поверхности, грунтам в русле и т. д.; отчеты о выполненных путевых работах.

Кроме того, пользуются следующими графическими материалами: 1) расчетными графиками колебаний уровней по опорным водомерным постам на спаде весеннего паводка $H=H(t)$; 2) графиками зависимости глубин на перекатах от уровней воды на водомерных постах $T=T(H)$; 3) кривыми дифференцированных гарантийных глубин плесов $T_г=T_г(H)$. В настоящем параграфе рассматриваются только расчетные графики колебаний уровней на спаде паводка $H=H(t)$ и графики зависимости глубин на перекатах от уровней воды $T=T(H)$.

Расчетные графики колебаний уровней $H=H(t)$ используются в основном при составлении проекта производства путевых работ на предстоящую навигацию, причем по этим графикам устанавливается время разработки перекатов, если известны уровни разработки. В проекте производства путевых работ указывают время разработки отдельных перекатов только для подготовительного периода, и поэтому в качестве расчетного пользуются графиком колебаний уровней на спаде весеннего паводка.

Расчетный график колебаний уровней на спаде весеннего паводка строят следующим образом:

1) на графиках спада паводка за 10—15 последних лет отбивают низкую условную плоскость сравнения, например. уровень конца подготовительного периода (рис. 239, *а*);

2) высоту H пика паводка над этой условной плоскостью на каждом графике спада разбивают на 10 равных частей;

3) на каждом графике спада измеряют время t, прошедшее от пика паводка до наступления каждого десятого уровня;

4) вычисляют для каждого десятого уровня спада расчетное время t его наступления после пика паводка, имеющее в убывающем ряду за последние годы обеспеченность 75%;

5) для расчетного графика спада за расчетную высоту $H_р$ пика паводка и за расчетное время $t_р$ его наступления принимают их средние за последние годы значения или с обеспеченностью 50% (рис. 239, *б*);

6) для построения расчетного графика спада паводка разбивают расчетную высоту его пика на 10 равных частей;

7) против каждого десятого уровня расчетного графика спада откладывают расчетное время t наступления этого уровня после пика паводка, т. е. с обеспеченностью 75%;

8) концы расчетных отрезков времени t соединяют плавной кривой спада.

Построенный таким образом расчетный график спада паводка будет фиктивным, так как среди реальных графиков спада паводка обычно не имеется графика, полностью соответствующего такому расчетному. На фиктивном расчетном графике спада паводка, сглаженном по сравнению с реальными, отсутствуют дополнительные колебания уровней, которые имеются в действительности и оказывают влияние на режим перекатов на спаде.

Для учета этих дополнительных колебаний уровней в качестве расчетного принимают такой график колебаний уровней на спаде реального года, который по общим очертаниям кривой спада наиболее близок к фиктивному. На действительном расчетном графике спада паводка отбивают уровень и дату начала подготовительного периода, и тогда определится и расчетная продолжительность подготовительного периода $t_п$.

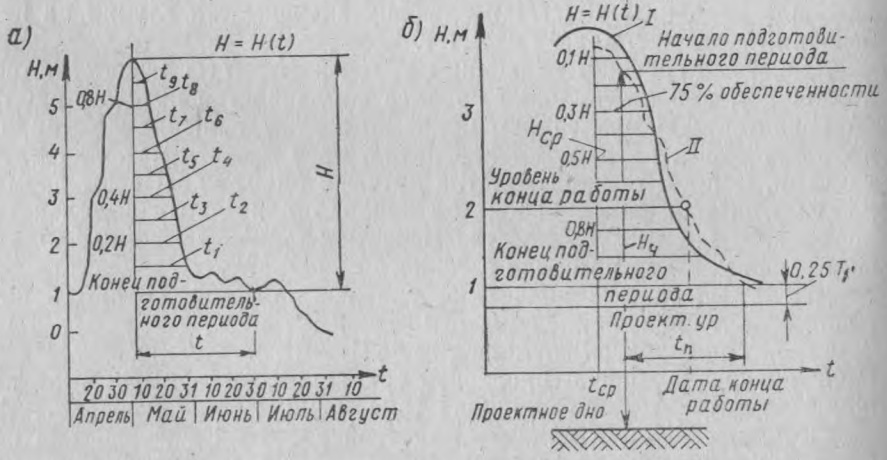


Рис. 239. Построение расчетного графика колебаний уровней на спаде весеннего паводка:

а — график спада паводка за отдельный год; *б* — фиктивный *I* и действительный *II* расчетные графики спада паводка; *H* — уровни на водомерном посту

В результате получается расчетный график колебаний уровней на спаде весеннего паводка, имеющий следующую характеристику: средний пик паводка, среднюю дату его наступления и среднекороткие продолжительности наступления отдельных уровней спада после пика паводка.

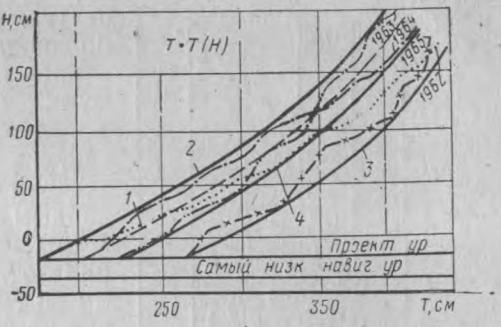


Рис. 240. Перекатные графики зависимости глубин от уровней воды на спаде паводка для нескольких навигаций (схематизированные):
1 — расчетный; *2* — верхний пограничный; *3* — нижний пограничный; *4* — средний

Совершенно естественно, что ряд навигаций будет иметь фактические графики спада паводка, в той или иной мере отличающиеся от принятого расчетного графика. Для того чтобы еще более приблизить расчетный график спада паводка к фактическому, необходимо пользоваться долгосрочными прогнозами высоты пика паводка и времени его наступления, а также времени наступления характерных уровней спада, получаемыми от Гидрометеослужбы. При наличии долгосрочных прогнозов для построения расчетного графика спада паводка целесообразно принимать расчетную высоту пика паводка и расчетную дату его наступления по средним значениям соответствующего прогноза.

Графики зависимости глубин на перекатах от уровней на водомерном посту, или перекатные графики $T=T(H)$, тоже используются при составлении проекта производства путевых работ на предстоящую навигацию. По этим графикам определяется уровень воды, к наступлению которого данный перекат должен быть разработан. Эти же графики $T=T(H)$ используются для анализа состояния переката и оценки результатов выполненных на нем путевых работ.

Перекатные графики $T=T(H)$ строят на основании ежедневных сведений об уровнях воды на водомерном посту и о глубинах на перекатах. При построении графика $T=T(H)$ на вертикальной оси откладывают за каждый день высоту H стояния уровня на водомерном посту, а на горизонтальной оси — за тот же день наименьшую или нормирующую глубину T на судовом ходу переката. Точки связи уровней и глубин соединяют в календарной последовательности кривой или ломаной линией, которая и является графиком $T=T(H)$. На рис. 240 показаны схематизированные графики $T=T(H)$ для нескольких навигаций. При построении таких графиков анализируют исходные данные об уровнях и глубинах и исключают ошибочные или сомнительные.

Перекатные графики $T=T(H)$ строят только для периода спада весеннего паводка, начиная с момента появления первых вывесок глубин (информации о глубинах) на перекатах и кончая

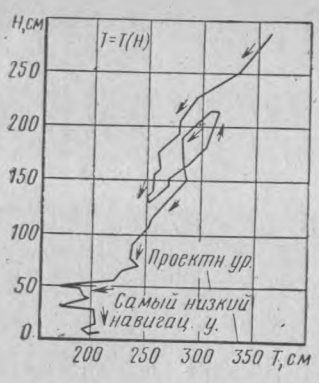


Рис. 241. Перекатный график зависимости глубин от уровней воды на спаде паводка для одной навигации (фактический)

наступлением меженных уровней. Для большинства равнинных рек именно этот период является подготовительным к межени, когда и производятся основные разработки перекатов. На равнинных реках, за исключением некоторых нижних течений больших рек и рек с зарегулированным стоком, в период подъема весеннего паводка вывесок глубин (информации о глубинах) еще не имеется, а поэтому и графики $T=T(H)$ для этого периода не строят. В меженный период навигации из-за сравнительно малого изменения уровней и глубин связи между ними не получается.

Поскольку на спаде весеннего паводка происходят не только понижения, но и неоднократные повышения уровней, то и линии перекатных графиков $T = T(H)$ тоже могут опускаться и подниматься, образуя иногда петли. На рис. 241 показан фактический перекатный график для одной навигации. Для каждого переката графики $T=T(H)$ строят за несколько последних навигаций, а затем пополняют и корректируют данными текущей навигации.

В результате построения получается несколько ежегодных перекатный график для одной навигации. Для каждого переката точкам этих графиков можно провести верхнюю и нижнюю огибающие, или пограничные линии (см. рис. 240), а также среднюю линию. Последнюю проводят по направлению наибольшего скопления ежегодных графиков или, при их разбросанности, как среднюю между ними. Верхняя пограничная линия показывает для разных уровней воды наименьшие значения нормирующих глубин, а нижняя — наибольшие значения этих глубин на перекате за период спада паводков нескольких навигаций.

Если бы дно переката на спаде паводка не размывалось и не намывалось, то с понижением уровня на перекате на величину ΔH уменьшилась бы и глубина на такую же величину, а при повышении уровня, наоборот, повысилась. В этом случае график $T=T(H)$ представлял бы прямую линию, наклоненную к осям под углом 45°.

В действительности же дно переката меняется по высоте по мере падения уровня (намывается и размывается) и редко бывает стабильным. Кроме того, при одном и том же уровне на спаде паводка, но в годы с разной интенсивностью спада дно переката может иметь разное положение: при быстром и коротком спаде — более высокое, а при медленном и продолжительном — более низкое.

В связи с этим при построении перекатных графиков за ряд навигаций связующие точки уровней и глубин располагаются не

на одной линии, ломаной или кривой, а в пределах целого поля, между пограничными линиями ежегодных графиков $T=T(H)$. При одном и том же уровне воды на графиках $T=T(H)$ в пределах пограничных линий можно получить для разных навигаций различную нормирующую глубину на перекате, т. е. между уровнями и глубинами существует только корреляционная связь. Правда, при обычных переформированиях переката разница в нормирующих глубинах при одном и том же уровне в разные годы сравнительно небольшая. Если же разница в глубинах получается большая, это указывает на значительные переформирования переката, которые могут привести к разработке потоком нового судового хода.

Для наиболее правильного установления связи $T=T(H)$ необходимо не только глубины, но и уровни отсчитывать на самом перекате, т. е. иметь на последнем водомерный пост. Однако на перекатах, как правило, водомерных постов нет и поэтому уровни приходится отсчитывать на водомерном посту плеса, обычно удаленном от переката. Для правильного установления связи $T=T(H)$ надо выбирать водомерный пост, на котором колебания уровней наиболее соответствуют колебаниям уровней на перекате.

Необходимо отметить, что наименьшие глубины на перекате, используемые для построения графика $T=T(H)$, кроме уровня, зависят еще от других факторов, которые и обусловливают разбросанность связующих точек. Так, при одном и том же уровне нормирующая или наименьшая глубина на судовом ходу переката зависит: от ширины и направления обставленного знаками судового хода; от формирующей деятельности потока, связанной с высотой и продолжительностью подъема и спада паводка; от выполненных дноуглубительных работ на перекате и т. д.

При одном и том же уровне на спаде паводка нормирующую глубину на перекате можно увеличить, если уменьшить ширину судового хода перестановкой знаков обстановки или перенести судовой ход на новое направление, где имеются бо́льшие глубины, или если разработать на перекате дноуглубительную прорезь.

При построении графиков $T=T(H)$ влияние дноуглубительных работ на спаде паводка можно устранить тем, что глубины после разработки прорези не принимать во внимание и кривые после дноуглубительных работ проводить как продолжение этих линий до производства работ. Хотя ширина и направление судового хода будут влиять на построение перекатных графиков и результаты их использования, но при большом числе данных о глубинах ошибки имеют место в ту и в другую сторону и графики $T=T(H)$ получаются близкими к действительности.

При проектировании производства путевых работ пользоваться несколькими ежегодными графиками $T=T(H)$ на одном перекате неудобно, и поэтому для каждого переката устанавливается расчетный график $T=T(H)$. В качестве расчетного принимается один из следующих графиков: 1) средний график, про-

веденный по ежегодным графикам; 2) график, близкий к нижней пограничной линии; 3) график, близкий к верхней пограничной линии.

Если ежегодные перекатные графики $T=T(H)$ последовательно сдвигаются вправо (рис. 242, *а*), т. е. глубина на перекате при всех уровнях из года в год увеличивается, за расчетный график $T=T(H)$ принимают график, близкий к нижней пограничной линии. Если же графики $T=T(H)$ перемещаются влево, за расчетный график $T=T(H)$ принимают график, близкий к верхней пограничной линии.

Если ежегодные графики $T=T(H)$ переплетаются между собой и достаточно тесно расположены относительно их средней линии (рис. 242, *б*), за расчетный график $T=T(H)$ принимают эту среднюю линию. При этом необходимо предостеречь против осреднения ежегодных графиков $T=T(H)$, соответствующих разным знакам деформации, которые для одной навигации показывают на спаде паводка намыв переката, а для другой, наоборот, размыв. В результате осреднения подобных графиков можно получить неправильный расчетный график с наклоном около 45° к координатным осям, свидетельствующий о стабильном дне переката.

Таким образом, нельзя строить и выбирать расчетные перекатные графики $T=T(H)$ без анализа ежегодных графиков и в отрыве от действительного состояния переката к моменту их построения. Кроме того, надо использовать долгосрочные прогнозы весеннего паводка на предстоящую навигацию, что поможет приблизить расчетный график $T=T(H)$ к фактическому.

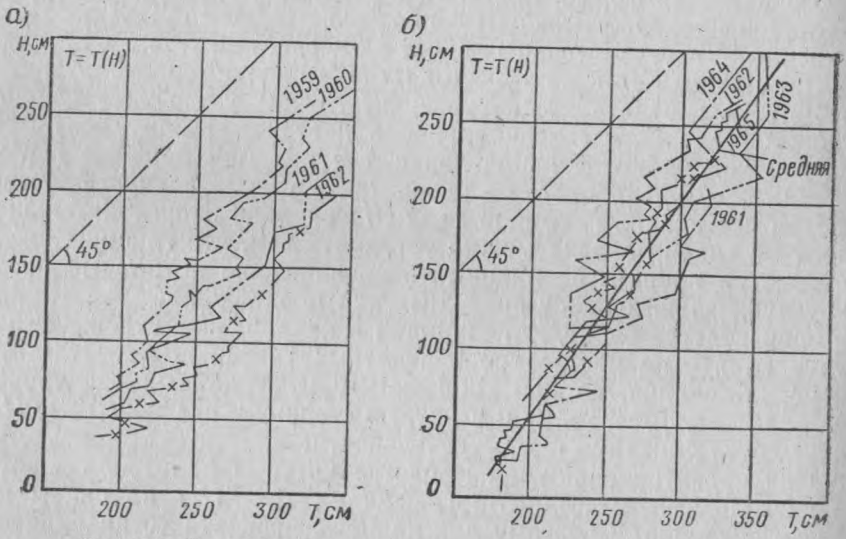


Рис. 242. Перекатные графики зависимости глубин от уровней:
а — последовательное увеличение глубин из года в год; *б* — тесное расположение глубин относительно средней линии; H — уровни на водомерном посту; T — глубина

Для наблюдения при разных уровнях за положением дна на перекатах и для производства путевых работ, кроме перекатных графиков $T=T(H)$, желательно строить перекатные графики $Z=Z(H)$, где Z — нормирующая отметка дна переката на судовом ходу, или относительная глубина, отсчитываемая от проектного уровня. При этом положительными отметками или положительными глубинами считаются те, которые соответствуют положению дна переката ниже проектного уровня, а отрицательными — выше проектного уровня.

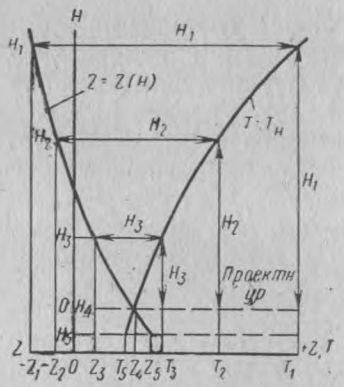


Рис. 243. Построение перекатного графика зависимости относительных глубин от уровней

Графики $Z=Z(H)$ можно получить из графиков $T=T(H)$, если от глубин на последних снять соответствующие им превышения (срезки) уровней над проектным (рис. 243). Так, если при уровне H_1 с соответствующей ему глубиной T_1 после снятия срезки H_1 получена относительная глубина $(-Z_1)$, это значит, что дно переката было выше проектного уровня на величину Z_1. Если при уровне H_3 и глубине T_3 получена относительная глубина $(+Z_3)$, это значит, дно переката находилось ниже проектного уровня на величину Z_3.

При проектном уровне H_4 срезка равна нулю и поэтому абсолютная и относительная глубины численно равны между собой: $T_4=Z_4$. При уровне H_5 ниже проектного срезка получается отрицательной, а поэтому относительная глубина переката больше абсолютной, т. е. $Z_5>T_5$.

Графики $Z=Z(H)$ по сравнению с графиками $T=T(H)$ более наглядно показывают происходящие переформирования на перекате в пределах судового хода при спаде паводка: размыв, намыв или стабильное положение.

§ 88. КРИВЫЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ГАРАНТИРОВАННЫХ ГЛУБИН ПЛЕСА И ГРАФИКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУТЕВЫХ РАБОТ

Особенность путевых работ заключается в поддержании на судовом ходу дифференцированных гарантированных глубин, величина которых задается в зависимости от высоты стояния уровня на опорном водомерном посту. Кривая, показывающая эти глубины (см. рис. 236), носит название, как уже говорилось, кривой дифференцированной гарантии глубин: $T_г=T(H)$.

Если на горизонтальной оси откладывать за каждую навигацию не ежедневные глубины одного переката, а ежедневные наи-

меньшие глубины на всем плесе, независимо от того, какому перекату они принадлежат, то аналогично перекатным графикам $T=T(H)$ получим графики зависимости наименьших глубин на плесе от уровней на опорном водомерном посту, или плесовые графики: $T_{пл}=T_{пл}(H)$.

Плесовые графики строят за несколько последних навигаций и используют для построения кривой дифференцированной гарантии глубин плеса и оценки результатов путевых работ за ряд навигаций, а также для наблюдения за состоянием плеса в течение навигации.

При построении кривой дифференцированной гарантии глубин, кроме использования ежегодных плесовых графиков $T_{пл}=T_{пл}(H)$, необходимо принимать во внимание потребность судоходства в увеличении глубин, а также учитывать возможность поддержания глубин имеющимися техническими средствами.

В настоящее время на всех водных путях, где проводятся путевые работы, уже имеются дифференцированные кривые глубин $T_г=T_г(H)$, и задача заключается главным образом в их корректировке, но для этого надо знать и их построение.

Используемые для наблюдения за состоянием плеса и построения или корректировки кривой $T_г=T_г(H)$ плесовые глубины на спаде весеннего паводка зависят не только от высоты стояния уровней, но и от характера паводка, а также от объема и распределения по времени выполненных работ на плесе. Поэтому на одном и том же плесе при одинаковом характере паводка, но при разных объемах и распределении путевых работ, можно поддерживать различные плесовые глубины. Точно так же при одинаковых объеме и распределении путевых работ, но при различном характере паводка возможно поддержание разных плесовых глубин.

В связи с изложенным при корректировании кривой дифференцированной гарантии глубин на предстоящую навигацию и учитывают предполагаемый характер паводка, объемы намечаемых путевых работ и предполагаемое их распределение по времени.

При построении графиков $T_{пл}=T_{пл}(H)$ необходимо проанализировать, насколько плесовые вывески глубин (информация о глубинах) отражают наименьшие глубины на плесе. Величина глубин на плесе в отдельные навигации может определяться глубинами одного-двух перекатов, случайно и длительно лимитирующих плес, и не отражать глубин на характерных для плеса перекатах. Построенная по таким случайным данным кривая дифференцированной гарантии глубин будет задавать глубины, заниженные по сравнению с теми, которые можно поддерживать имеющимися техническими средствами. В связи с этим случайные плесовые глубины при построении ежегодных графиков $T_{пл}=T_{пл}(H)$ исключаются.

Аналогично ежегодным перекатным графикам $Z=Z(H)$ можно построить ежегодные плесовые графики $Z_{пл}=Z_{пл}(H)$, показыва-

ющие зависимость отметок дна плеса или относительных глубин на плесе от уровней воды.

Кривые дифференцированной гарантии глубин плеса $T_г = T_г(H)$ для подготовительного периода с учетом уровней на спаде паводка и технических средств можно построить по способу, предложенному Н. А. Доманевским.

При этом способе сначала выбирают расчетную навигацию, за которую принимают одну из ближайших навигаций с фактическим графиком $H=H(t)$, близким к расчетному графику уровней на спаде паводка.

Если в подготовительный период этой расчетной навигации путевые работы проводились в объеме, соответствующем имеющимся техническим средствам, то ее фактический график плесовых глубин $T_{пл}=T_{пл}(H)$, превращенный в плавную линию, принимается за кривую $T_г=T_г(H)$ без изменений или с некоторым увеличением задаваемых глубин за счет наметившегося улучшения судоходных условий.

Если же в принятую за расчетную навигацию путевые работы выполнялись в меньшем объеме, чем позволяли технические средства, или эти средства в проектируемую навигацию будут увеличены, то строится кривая $T_г=T_г(H)$, соответствующая намечаемому использованию технических средств. В этом случае на поле с пересекающимися осями (рис. 244) накладывают за расчетную навигацию: в первом квадранте — фактический график I зависимости плесовых глубин от уровней воды $T_{пл}=T_{пл}(H)$ на спаде паводка; во втором квадранте — фактический график колебаний уровней $H=H(t)$ на спаде паводка; в третьем квадранте — фактический интегральный график 1 объема грунта $V=V(t)$, удаляемого на плесе по мере спада паводка. Затем в первом квадранте по графику глубин $T_{пл}=T_{пл}(H)$ строят график относительных глубин $Z_{пл}=Z_{пл}(H)$, после чего в четвертом квадранте строят фактический график I технической эффективности путевых работ на плесе $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ для принятого расчетного года.

Для построения в четвертом квадранте графика $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ выбирают в первом квадранте на графике $Z_{пл}=Z_{пл}(H)$ характерные точки его излома и сносят их горизонтальными линиями во второй квадрант на график $H=H(t)$; затем эти точки из второго квадранта с графика $H=H(t)$ переносят вертикальными линиями в третий квадрант на график $V=V(t)$. После этого в четвертый квадрант тоже вертикальными линиями сносят упомянутые выше характерные точки с графика $Z_{пл}=Z_{пл}(H)$ из первого квадранта и горизонтальными линиями — характерные точки с графика $V=V(t)$ из третьего квадранта. Наконец, точки пересечения этих вертикальных и горизонтальных линий, перенесенные в четвертый квадрант, соединяют ломаной линией I, которая и будет фактическим графиком технической эффективности работ $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ для расчетной навигации.

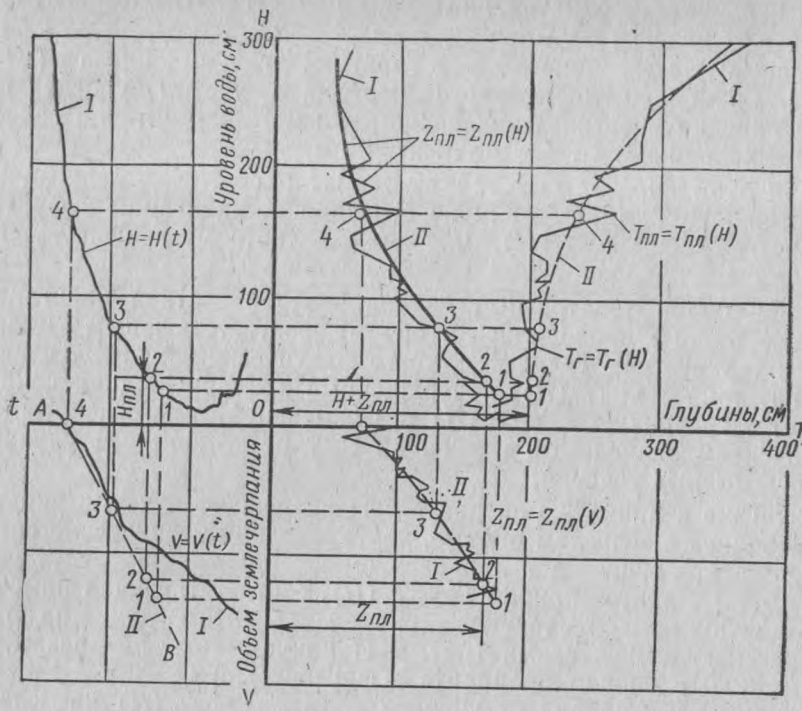


Рис. 244. Построение графика $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ и кривой $T_г=T_г(H)$:
I — фактическая кривая расчетной навигации; *II* — расчетная кривая проектируемой навигации

Для построения кривой $T_г=T_г(H)$ на проектируемый год в четвертом квадранте на фактическом графике $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ расчетной навигации проводится путем осреднения плавная кривая *II* расчетного графика $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ для проектируемой навигации. Затем в третьем квадранте рядом с фактическим графиком $V=V(t)$ расчетной навигации строят по данным о производительности намечаемых технических средств и времени их работы расчетный график *II* объема удаляемого грунта $V=V(t)$ для проектируемой навигации.

После этого характерные точки расчетного графика $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ из четвертого квадранта переносят по горизонтали в третий квадрант на расчетный график $V=V(t)$, а с него — во второй квадрант по вертикалям на график $H=H(t)$ расчетной навигации, который уже принят за расчетный для проектируемой навигации. Затем характерные точки с расчетного графика $Z_{пл}=Z_{пл}(V)$ четвертого квадранта переносят по вертикалям в первый квадрант и туда же — по горизонталям характерные точки с расчетного графика $H=H(t)$ из второго квадранта.

Точки пересечения этих вертикальных и горизонтальных линий в первом квадранте соединяют плавной кривой *II* и получают

расчетный график $Z_{пл} = Z_{пл}(H)$ для проектируемой навигации. После этого, учитывая срезки уровней над проектным, строят кривую II дифференцированных гарантированных глубин плеса $T_г = T_г(H)$ на проектируемый год (см. рис. 244). Последняя кривая при проектном и более низких уровнях должна корректироваться утвержденной для плеса наименьшей гарантированной глубиной.

Полученная таким образом кривая дифференцированной гарантии глубин $T_г = T_г(H)$ может служить заданием на проектируемый год, причем возможность поддержания глубин по этой кривой обосновывается учтенными при ее построении расчетным графиком спада паводка $H = H(t)$ и техническими средствами.

Использованный для построения кривой $T_г = T_г(H)$ фактический график технической эффективности путевых работ $Z_{пл} = Z_{пл}(V)$, если он построен за ряд лет, имеет и самостоятельное значение.

Этот график предназначается также для оценки результатов работ, выполненных на плесе, и правильности использования технических средств.

По ежегодным графикам $Z_{пл} = Z_{гл}(V)$ судят об успешности проведения путевых работ и о влиянии на результаты этих работ колебаний уровня и календарного распределения объемов извлеченного грунта. При одном и том же графике колебаний уровней, но при разных интегральных графиках $V = V(t)$, т. е. при различных объемах и распределении по времени извлеченного грунта, графики $Z_{пл} = Z_{пл}(V)$ будут разные. Чем положе график $Z_{пл} = Z_{пл}(V)$, т. е. чем меньше угол его наклона к горизонтальной оси, тем лучше были результаты путевых работ или условия навигации.

При нормальном ходе выполнения путевых работ в подготовительный период по мере разработки перекатов с наименьшими глубинами дно плеса понижается и его относительная глубина увеличивается.

Одновременно количество перекатов, определяющих наименьшую глубину плеса, тоже увеличивается.

В связи с этим график $Z_{пл} = Z_{пл}(V)$ должен показывать уменьшение эффективности путевых работ по мере их роста, т. е. снижение увеличения относительных глубин на плесе по мере увеличения объема путевых работ.

Разработка на плесе отдельных перекатов ведется в такой последовательности, чтобы в результате получилось увеличение относительной глубины по всему плесу в целом, а не только на разработанных перекатах. Поэтому в первую очередь разрабатывают перекаты с наименьшей глубиной, т. е. лимитирующие транзитную глубину плеса.

Для меженно-осеннего периода в качестве кривой дифференцированной гарантии глубин $T_г = T_г(H)$ принимают среднюю кривую — между кривой для подготовительного периода и прямой, проведенной под углом 45° к координатным осям.

§ 89. ПРОЕКТ ПРОИЗВОДСТВА ПУТЕВЫХ РАБОТ НА НАВИГАЦИЮ

Проект производства путевых работ на каждую навигацию составляют исходя из перспективной схемы улучшения судоходных условий и в соответствии с производственным и финансовым планами. В проекте производства путевых работ на навигацию: а) устанавливаются необходимые мероприятия и технические средства для поддержания заданных габаритов судового хода и его коренного улучшения, а также для обеспечения безопасных условий плавания; б) определяются объемы, сроки и способы выполнения намеченных мероприятий по отдельным объектам.

Технические участки и районы гидросооружений разрабатывают проекты путевых работ по отдельным плесам, а управления пути и каналов — по всем водным путям, находящимся в их ведении.

Проект производства путевых работ на навигацию состоит из следующих основных частей: 1) перечня водных путей, обслуживаемых техническим участком или районом сооружений; 2) ведомости капитальных работ и технических проектов по коренному улучшению затруднительных участков; 3) ведомости эксплуатационных работ по подготовке перекатов к межени; 4) календарного графика расстановки технических средств по этим работам; 5) ведомости использования дноуглубительных снарядов в меженный период; 6) ведомости внетранзитных работ.

К проекту производства путевых работ на навигацию прилагаются: а) анализ режима перекатов; б) кривые дифференцированных габаритов судового хода; в) расчетные графики колебаний уровней по водомерным постам; г) интегральные кривые зависимости объема дноуглубительных работ и количества разрабатываемых перекатов от уровней воды за подготовительный период.

В ведомость капитальных работ включают все работы по коренному улучшению судоходных условий на затруднительных участках, предусмотренные перспективной схемой на предстоящую навигацию. Эти работы намечаются к выполнению преимущественно в осенний и весенний периоды, но при возможности могут выполняться и в подготовительный период. Капитальные работы в зависимости от необходимых сроков их выполнения делятся на очереди.

Один из основных документов проекта производства путевых работ на навигацию — это ведомость эксплуатационных работ по подготовке перекатов к межени или разработке перекатов в подготовительный период. Перекаты считаются подготовленными к межени в том случае, если на них ко времени наступления проектного уровня обеспечиваются минимальные гарантированные габариты судового хода.

В ведомости подготовки к межени по каждому перекату, подлежащему разработке, указывают: а) род грунта; б) объем дноуглубления — средний за последние три — пять лет, подсчитанный

по плану переката и принятый к выполнению; в) дату нормирования плеса перекатом, дату начала работы и превышение уровня воды в начале работы над проектным; г) способ разработки и удаления грунта; д) среднюю толщину снимаемого слоя, среднюю глубину опускания рамы и глубину разработки от проектного уровня; е) коэффициенты использования технической производительности и времени снаряда; ж) название снаряда для разработки, его техническую и расчетную производительности; з) продолжительность разработки, дату конца работы и превышение уровня воды в конце работы над проектным.

Как видно из содержания ведомости подготовки перекатов к межени, при ее составлении приходится решать следующие вопросы: устанавливать надобность разработки переката в подготовительный период; выбирать направление судоходной прорези; назначать глубину ее разработки; определять уровень воды, к наступлению которого перекат должен быть разработан; подсчитывать объем выемки на прорези; выбирать способ разработки переката и конкретный снаряд; устанавливать продолжительность и срок разработки переката.

Для решения этих вопросов необходимо проанализировать русловой режим каждого переката за ряд предыдущих лет. Анализ режима переката выполняется на основании изучения: а) сопоставленных и совмещенных планов русловых съемок; б) количества ежегодных разработок и объема выполненных дноуглубительных и выправительных работ; в) графиков колебаний уровней на водомерном посту и глубин на перекате, особенно величин наименьших уровней и глубин, а также наибольших уровней весеннего паводка; г) перекатных кривых $T=T(H)$. В состав перекатов, подлежащих углублению в подготовительный период, включают главным образом такие, которые за последние три — пять навигаций лимитировали гарантийные глубины на плесе и поэтому их приходилось углублять.

Предварительное установление надобности разработки переката в подготовительный период может быть также выполнено совмещением расчетного перекатного графика $T=T(H)$ с кривой дифференцированной гарантии глубин плеса $T_г=T_г(H)$, отнесенных к одному и тому же водомерному посту. Если точка пересечения кривой дифференцированной гарантии с перекатным графиком $T=T(H)$ окажется выше уровня конца подготовительного периода, то перекат нуждается в разработке в этот период (рис. 245). Если же точка пересечения кривой дифференцированной гарантии с графиком $T=T(H)$ будет ниже уровня конца подготовительного периода, то перекат не нуждается в разработке в этот период. Глубина разработки восстановительной прорези от проектного уровня устанавливается по каждому перекату в отдельности на основании анализа руслового режима и в зависимости от наличия технических средств. Восстановительные прорези в зависимости от результатов этого анализа разрабатывают до проектного дна, ниже его или не до проектного дна.



Рис. 245. Определение уровня конца разработки переката в подготовительный период:
H — уровень на водомерном посту; T — глубина на перекате.

На большинстве рек, где спад паводка происходит интенсивно и ежегодно наступает низкая межень, перекаты разрабатывают в один слой. При послойной разработке перекатов толщину слоя устанавливают исходя из полного использования производительности снаряда. Практически при составлении проекта производства путевых работ на навигацию разработку перекатов не назначают более чем в два слоя.

Уровень, при наступлении которого перекат будет лимитировать глубину на плесе и к наступлению которого разработка переката должна быть закончена, предварительно можно установить совмещением перекатного графика $T=T(H)$ с кривой дифференцированной гарантии глубин плеса. Точка пересечения дифференцированной гарантии глубин с перекатным графиком покажет этот уровень (см. рис. 245). Перенося установленный уровень на расчетный график колебаний уровней на спаде $H=H(t)$, получим расчетную дату окончания восстановительной разработки переката.

Выполнив эту операцию для намеченных к разработке перекатов и учтя по каждому из них результаты анализа переформирований, можно определить расчетные даты окончания разработок всех этих перекатов, а следовательно, и их очередность.

Объем выемки восстановительной прорези подсчитывают для каждого переката по плану, снятому в предыдущие годы при уровне, близком к намечаемому уровню его разработки. Этот объем выемки сопоставляют с объемами выемок за предшествующие годы и при надобности корректируют. Если не имеется съемок переката, близких к намечаемому уровню разработки, для определения объема выемки на восстановительной прорези используют данные о фактических объемах за прошлые годы и за расчетный принимают средний из этих объемов.

Способ разработки переката устанавливают на основе анализа руслового режима переката. На выбор способа разработки также влияют род грунта, объем прорези, срок ее разработки, толщина снимаемого слоя, наличие технических средств.

Перекаты с намываемым на спаде паводка дном, перекаты с размываемым дном при повышенных уровнях спада и намываемым—при пониженных обычно разрабатываются ниже проектного дна или до проектного дна плеса. Отвал грунта оформляется

по возможности в виде выправительного сооружения, защищающего прорезь от заносимости. На этих перекатах в первую очередь намечаются и более капитальные выправительные сооружения.

Перекаты с намываемым дном при повышенных уровнях спада и размываемым при пониженных, перекаты с меняющимся на спаде расположением судового хода и перекаты с размываемым на спаде паводка дном (особенно с усиливающимся размывом) разрабатываются не до проектного дна.

При выборе конкретных дноуглубительных снарядов для разработки перекатов учитывают род грунта, объем выемки, условия отвала грунта и наличие имеющихся на плесе снарядов.

Рефулерный способ отвода грунта нецелесообразно назначать в тех случаях, когда вероятен размыв отвала и попадание из него грунта в прорезь или когда возникает опасность навала на него судов, а также если возможно снижение устойчивости прорези из-за разделения потока отвалом.

Продолжительность восстановительной разработки переката устанавливается по объему выемки и по технической производительности планируемого для этой работы снаряда с учетом коэффициента использования его по производительности и по времени. Коэффициент использования снарядов по времени принимают одинаковым для всех перекатов и равным плановому среднемесячному, за исключением отдельных случаев, когда он может резко отклоняться от среднемесячного значения.

В план-ведомость работ по подготовке перекатов к межени вносят все перекаты, разрабатываемые дноуглубительными снарядами. Одновременно составляют календарный график расстановки технических средств на плесе по этим работам, который значительно облегчает заполнение планаведомости. По вертикали на левой стороне календарного графика выписывают названия перекатов и других объектов работ на плесе и их расстояния от устья реки (рис. 246). По горизонтали откладывают время: месяцы и дни подготовительного периода, а также начала меженного периода. По вертикали с правой стороны графика против каждого переката или другого объекта работ выписывают объемы выемок V.

Для построения календарного графика против каждого переката наносят полученную по графику $H=H(t)$ расчетную дату окончания его разработки или сигнальную точку; при разработке переката в два слоя наносят две сигнальные точки (на рис. 246 сигнальные точки показаны кружками). После этого влево от каждой сигнальной точки откладывают продолжительность разработки переката и получают расчетную дату начала каждой разработки.

Толстой горизонтальной линией против каждого переката, левее сигнальной точки, обозначена плановая продолжительность и срок его разработки; наклонными тонкими линиями, близкими к вертикальным, показаны направления буксировок снарядов с одного объекта на другой, а их горизонтальными проекциями — про-

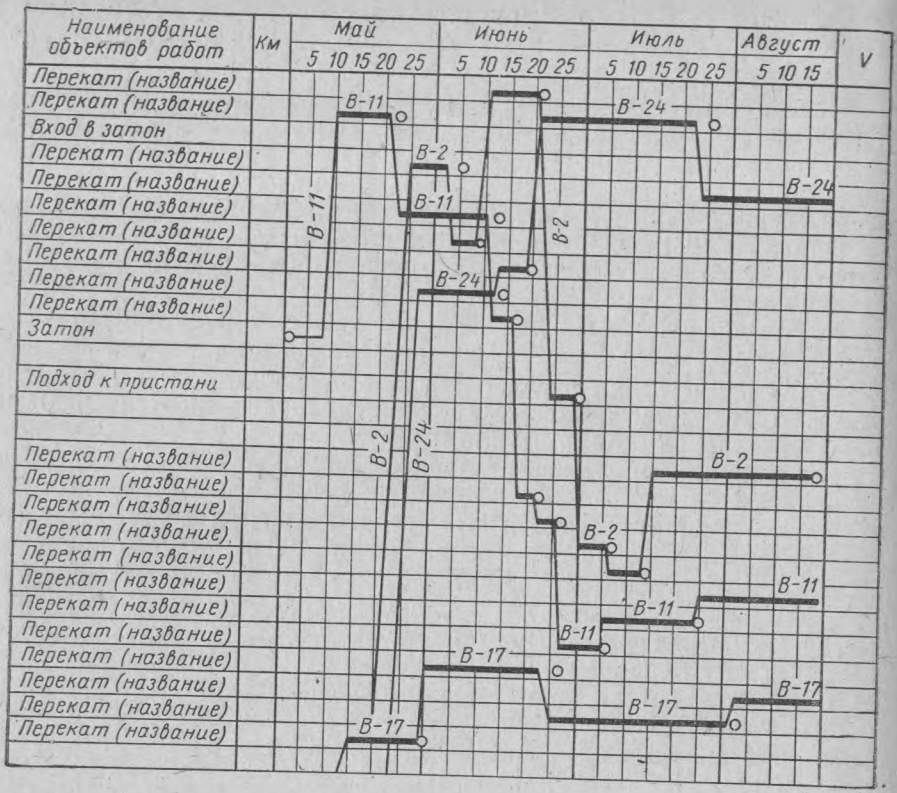


Рис. 246. Примерный календарный график расстановки дноуглубительных снарядов на плесе

должительности буксировок. Поверх толстых линий проставлены наименования снарядов, намечаемых для разработки перекатов (на рис. 246 В-2, В-11 и т. д.).

Получив расчетные даты начала и конца восстановительных разработок по всем перекатам плеса, надо так расставить имеющиеся дноуглубительные снаряды, чтобы можно было начать каждую работу в расчетный срок или раньше этого срока и закончить к расчетному сроку или раньше.

В календарном графике (см. рис. 246) сроки окончания восстановительных разработок некоторых перекатов не совпадают с их сигнальными точками или с расчетными сроками, что объясняется недостатком технических средств. Для того чтобы своевременно разработать большее число перекатов ограниченным количеством технических средств, приходится часть перекатов разрабатывать ранее расчетных сроков, полученных по расчетному графику $H=H(t)$.

Помимо расстановки дноуглубительных снарядов, на календарном графике показывают также объекты работ и передвижение

изыскательских партий. На рис. 246 для упрощения графика показана расстановка только дноуглубительных снарядов.

По данным ведомости подготовки перекатов к межени строят интегральные кривые объемов дноуглубительных работ и количества перекатов, которые должны быть разработаны с начала подготовительного периода и до наступления того или иного уровня спада. Интегральные кривые используются для контроля за ходом работ по подготовке плеса к межени.

Ведомость и график подготовки перекатов к межени целесообразно уточнять после получения долгосрочных прогнозов о высоте и дате наступления пика паводка. Более же надежное уточнение можно сделать после прохода пика паводка, когда уже наметится характер верхней части кривой спада весеннего паводка.

Ведомость и график работ в подготовительный период на водохранилище зависят от отметок его наполнения весенним паводком и составляются на основании прогноза объема стока паводка. Для участков рек с зарегулированным стоком, в соответствии с тем же прогнозом, за расчетный принимается согласованный с другими водопользователями график попусков воды из водохранилища. При хорошей изученности зарегулированных участков уровни лимитирования глубин на них отдельными перекатами могут быть заранее известны и не требуется их ежегодное определение. На очередность разработки перекатов на таких участках рек влияет также наличие притоков.

План-ведомость использования дноуглубительных снарядов на разработке перекатов в меженный период составляют только для установления степени их загрузки и выявления возможного к выполнению в этот период объема внетранзитных и капитальных транзитных работ.

В первой части ведомости использования снарядов в меженный период указывают: общий объем грунта, намеченный к извлечению в подготовительный период на восстановительных прорезях; общий объем ремонтных работ в меженный период; даты начала и конца меженного периода и его расчетную продолжительность; установленные коэффициенты использования снарядов по времени и производительности; общую потребную техническую производительность снарядов.

Во второй части этой ведомости по каждому снаряду, намеченному к использованию в меженный период, указывают: техническую производительность; даты и продолжительность его работы; коэффициенты использования по времени и производительности; расчетную производительность; объем извлекаемого грунта.

Объем ремонтных работ в межень устанавливают в процентном соотношении к объему восстановительных работ, причем это соотношение принимается средним между наибольшим и средним за последние три — пять навигаций. При выборе этих навигаций исключают навигации с очень многоводной меженью и навигации с продолжительными срывами гарантированных глубин в межень.

Ведомость использования дноуглубительных снарядов в меженный период согласовывается с ведомостями внетранзитных и капитальных работ.

В ведомость внетранзитных дноуглубительных работ включают все платные внетранзитные работы по заявкам и работы, выполняемые управлениями пути и каналов за счет их эксплуатационной сметы (подходы и акватории портов-пристаней и затонов). Общее количество внетранзитных работ, принимаемое к производству, определяется в зависимости от загрузки дноуглубительных снарядов транзитными работами.

Внетранзитные работы по назначению могут быть трех видов:

1) работы на подходах и в акваториях основных портов и пристаней, судоремонтных заводов, мастерских и отстойных пунктов, а также работы, производимые по постановлениям правительства и в соответствии с приказами министра речного флота;

2) работы на подходах к пристаням и отстойным пунктам местного значения и на внутрипортовых судовых ходах;

3) работы по добыче грунта, насыпке и намыву территорий, рытью котлованов и траншей и т. д.

Внетранзитные работы, связанные с капитальным строительством на водных путях, относят к тому или иному виду в зависимости от их важности.

Объемы внетранзитных работ указывают в плане предварительно по заявкам организаций и уточняют при рассмотрении технических проектов производства работ. Объемы внетранзитных работ, выполняемых за счет эксплуатационной сметы управлений пути и каналов, устанавливают на основании предварительных съемок.

В состав проекта производства путевых работ на навигацию, составляемого техническим участком или районом сооружений, также входят: а) ведомость и график распределения дноуглубительных снарядов, вспомогательных судов и других средств по всем видам путевых работ; б) план обслуживания судоходной обстановки; в) ведомость рабочего состава дноуглубительных снарядов и плановых измерителей их работы.

При распределении вспомогательных судов по видам работ (дноуглубление, выправление, изыскания и др.) в первую очередь обеспечиваются самоходными и несамоходными судами дноуглубительные снаряды. Потребное количество буксировщиков устанавливается в зависимости от типа и мощности снарядов, протяженности плеса, вида топлива и расстояний между топливными базами. Практически в большинстве случаев один буксировщик обслуживает 2—3 снаряда. Для брандвахт изыскательских партий специальные буксировщики не намечаются, так как брандвахты обслуживаются плесовыми буксировщиками.

В сводный проект производства путевых работ на навигацию, составляемый управлением пути или канала, входит еще ведомость и график расстановки всех технических средств по техническим участкам и районам гидросооружений.

§ 90. ЗАДАЧИ ДАЛЬНЕЙШЕГО УЛУЧШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПУТЕВЫХ РАБОТ

Изложенная в предшествующем параграфе методика составления проекта путевых работ на подготовительный период не дает гарантии того, что принятое решение является оптимальным, т. е. того, что при некотором ином распределении снарядов по объектам работ и несколько иной последовательности работы снарядов нельзя добиться бо́льших транзитных глубин плеса или иметь меньший суммарный объем дноуглубления.

Составление оптимального графика работы снарядов в подготовительный период представляет собой сложную задачу, которая, однако, может быть решена с помощью современных методов динамического планирования и использования ЭВМ. При этом необходимо будет отказаться от построения условных «расчетных» графиков спада уровней и исходить либо из гидрологического прогноза, либо из представления о ходе спада как случайной функции времени. Методы динамического планирования могут быть с пользой применены и в организации меженных (ремонтных) дноуглубительных работ. Разработка способов оптимизации дноуглубительных работ на судоходном плесе уже начата в научно-исследовательских организациях речного транспорта.

Решая задачу оптимизации, важно располагать обоснованной и достоверной оценкой технической эффективности путевых работ. В настоящее время эта оценка производится двумя способами. Первый из них основан на рассмотрении описанных в § 88 кривых $Z_{пл} = Z_{пл}(H)$. Недостаток этого способа состоит в том, что он не позволяет отделить влияние, оказываемое на состояние плеса путевыми работами, от влияния гидрологических особенностей навигации. Во втором способе, разработанном Н. А. Ржаницыным и Е. К. Рабковой, оценка эффективности ведется на основе эмпирических связей между интегральными показателями состояния плеса и объемом дноуглубительных работ. Степень воздействия путевых работ на транзитную глубину плеса оценивается отношением наименьшей транзитной глубины плеса за данную навигацию к преобладающей глубине, наблюдавшейся на перекатах плеса в естественном его состоянии (до начала путевых работ):

$$\alpha = \frac{T_{наим}}{T_{прк\ ест}} > 1. \ldots$$

Степень сохранности результатов путевых работ характеризуется особым «коэффициентом плеса», значения которого подсчитаны для ряда судоходных плесов. На реках европейской территории Союза значения «коэффициента плеса» меняются в границах от 0,4 с/м (нижнее течение р. Большой Северной Двины) до 4,7 с/м (Верхний Дон). Чем выше значения «коэффициента плеса», тем дольше сохраняются судовые ходы, тем меньше повторяемость дноуглубительных работ.

Объем W (тыс. м^3) дноуглубительных работ, потребный для обеспечения минимальной навигационной глубины $T_{наим}$, определяется по эмпирическому соотношению

$$W = 240 L_{пл} b_{пр} \frac{(\alpha-1)^2}{K_{пл}}, \qquad (314)$$

где $L_{пл}$ — длина судоходного плеса, км; $b_{пр}$ — ширина прорезей, м; $K_{пл}$ — «коэффициент плеса», с/м.

Если фактический объем работ $W_ф$, при котором была обеспечена глубина $T_{наим}$, равен или меньше объема, рассчитанного по приведенной формуле, работы считаются эффективными. Чем меньше отношение $W_ф/W$, тем более эффективны путевые работы.

Эмпирический характер связей обязывает к некоторой осторожности при пользовании методом Ржаницына и Рабковой за границами той совокупности плесов, которая была ими изучена. Не вполне ясный физический смысл «коэффициента плеса», являющегося к тому же размерной величиной, заставляет думать о замене его более представительным показателем или системой показателей, отражающих особенности руслового режима плеса. Возможно, что такие показатели придется дифференцировать по типам руслового процесса (движение побочней, меандрирование, ветвление). Нельзя считать также, что мы располагаем сегодня точной формулировкой самого понятия эффективности путевых работ.

Отсюда видно, что вопрос об эффективности путевых работ, так же как вопросы проектирования и организации работ, должен стать в ближайшее время предметом нового цикла научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтунин С. Т. Регулирование русел рек. М., Сельхозгиз, 1956. 366 с.

Гиляров Н. П. Моделирование речных потоков. Л., Гидрометеоиздат, 1973. 200 с.

Григорьев С. Н., Кусков Л. С. Общая лоция водохранилищ и нижних бьефов гидроузлов. М., «Речной транспорт», 1959. 123 с.

Гринько Р. И., Розовский И. Л. Теория и опыт капитальных выправительных работ на Днепре. Киев. АН УССР, 1962. 128 с.

Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеоиздат, 1969. 428 с.

Гришанин К. В. Теория руслового процесса. М., «Транспорт», 1972. 216 с.

Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. Л., Гидрометеоиздат, 1974. 144 с.

Дегтярев В. В. Выправительные сооружения из грунта. М., «Транспорт», 1970. 248 с.

Дегтярев В. В. Выправление рек. М., «Транспорт», 1968. 192 с.

Доманевский Н. А. Дноуглубление. М., «Транспорт», 1971. 272 с.

Инструкция по содержанию судоходной обстановки на внутренних водных путях. М., «Транспорт», 1974. 160 с. (Министерство речного флота РСФСР).

Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Л., «Энергия», 1972. 30 с. (Минэнерго СССР).

Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Л., Гидрометеоиздат. 1960. 392 с.

Кондратьев Н. Е. и др. Русловой процесс. Л., Гидрометеоиздат, 1959. 371 с.

Крицкий С. Н., Менкель М. Ф., Россинский К. И. Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. М.-Л., Гидроэнергоиздат, 1947. 155 с.

Кусков Л. С. Водное хозяйство гидроэлектростанций. М.—Л., «Энергия», 1964. 192 с.

Кустов Л. И. и др. Водные пути и порты. Изд. 2-е. М., «Транспорт», 1974. 336 с.

Леви И. И. Динамика русловых потоков. М., Госэнергоиздат, 1957. 252 с.

Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., АН СССР. 1955. 347 с.

Методика расчета выправительных сооружений на судоходных реках. М., «Речной транспорт», 1959. 226 с. (Министерство речного флота РСФСР).

Михайлов А. В. Внутренние водные пути. М., Стройиздат, 1973. 328 с.

Попов И. В. Деформация речных русел и гидротехническое строительство. Л., Гидрометеоиздат, 1969. 363 с.

Проектирование судовых ходов на свободных реках. Под ред. Н. И. Маккавеева. М., «Транспорт». 1964. 263 с.

Ржаницын Н. А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л., Гидрометеоиздат, 1960. 238 с.

Розовский И. Л. и др. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. Киев, «Наукова Думка», 1967. 276 с.

Руководство по проектированию коренного улучшения судоходных условий, на затруднительных участках свободных рек. Л., «Транспорт», 1974 (Министерство речного флота РСФСР).

Руководство по расчету деформаций русла и прорезей на перекатах судоходных рек. М., «Транспорт», 1965. 148 с. (Министерство речного флота РСФСР).

Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации выправительных сооружений из грунта. М., «Транспорт». 1971. 192 с. (Министерство речного флота РСФСР).

Серебряков А. В. Русловые процессы на судоходных реках с зарегулированным стоком. М., «Транспорт», 1970. 128 с.

Силин Н. А., Коберник С. Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. Киев, АН УССР, 1962. 215 с.

Силин Н. А. и др. Гидротранспорт. Киев, АН УССР, Институт гидромеханизации, «Наукова Думка», 1971. 157 с.

Стариков А. С. Технология работы речных земснарядов. М., «Транспорт», 1969. 240 с.

Техническая инструкция по производству землечерпательных работ. М., «Транспорт», 1968. 120 с. (Министерство речного флота РСФСР).

Чекренев А. И. Водные пути. Ч. I. М., Водтрансиздат, 1953. 511 с.

Чекренев А. И., Гришанин К. В. Водные пути. Ч. II. М., «Транспорт», 1964. 319 с.

Чекренев А. И. Дноуглубление. М., «Транспорт», 1967. 304 с.

Чертоусов М. Д. Гидравлика. Специальный курс. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962, 630 с.

Шамов Г. И. Речные наносы. Л., Гидрометеоиздат, 1954. 348 с.

Шкундин Б. М. Землесосы и землесосные снаряды. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961. 336 с.

Юфин А. П. Гидромеханизация. Изд. 2-е. М., Стройиздат, 1974. 224 с.

Чернышов Ф. М. Повышение эффективности путевых работ на многорукавных участках судоходных рек. Новосибирск, НИИВТ, 1973. 326 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От авторов 3
Глава I. **Водные пути и методы их улучшения для судоходства** . . 5
§ 1. Водные пути Советского Союза и их развитие 5
§ 2. Методы улучшения и поддержания судоходных условий на водных путях 9
§ 3. Транспортная классификация водных путей и перспективная схема улучшения их судоходных условий 13
Глава II. **Речной поток и его русло** 16
§ 4. Общие сведения о речном потоке и русле 16
§ 5. Уравнения одномерного движения 17
§ 6. Сопротивление естественных русел 19
§ 7. Движение паводка 21
§ 8. Установившееся движение. Расчет кривых свободной поверхности 25
§ 9. Турбулентность речных потоков 27
§ 10. Движение речного потока на изгибе русла 29
§ 11. Деление потоков 33
§ 12. Речные наносы 36
§ 13. Неразмывающая скорость. Коэффициенты устойчивости донных частиц 37
§ 14. Движение влекомых наносов 40
§ 15. Движение взвешенных наносов 43
§ 16. Уравнение деформации 47
§ 17. Виды речных русел и типы руслового процесса . . . 48
§ 18. Перекаты 53
Глава III. **Водохранилища и реки с зарегулированным стоком** . . 59
§ 19. Регулирование речного стока водохранилищами . . . 59
§ 20. Водный режим водохранилищ 63
§ 21. Русловой режим водохранилищ 71
§ 22. Водный режим рек с зарегулированным стоком . . . 74
§ 23. Влияние регулирования стока на русловой процесс и судоходные глубины 80
§ 24. Ледовый режим водохранилищ и нижних бьефов . . . 86
Глава IV. **Судоходные прорези на реках и судовые ходы на водохранилищах** 89
§ 25. Определение минимальных габаритов судовых ходов для расчетных составов судов и плотов 89
§ 26. Основные требования к судоходным прорезям и значение отвалов грунта 92
§ 27. Трассирование судоходных эксплуатационных прорезей . 96
§ 28. Состав проекта капитальной прорези. Исходные данные . 100
§ 29. Примеры капитальных прорезей 102
§ 30. Построение планов течений 108
§ 31. Оценка устойчивости капитальной прорези 115
§ 32. Проектирование судовых ходов на водохранилищах . . 117
Глава V. **Выправление рек для судоходства и выправительная трасса** 122
§ 33. Выправление как метод улучшения судоходных условий . 122
§ 34. Схемы выправления (коренного улучшения) затруднительных участков 124

§ 35. Состав проекта выправления затруднительного участка и исходные данные для него 135
§ 36. Выправительная трасса и расчет ее ширины 136
§ 37. Расчет радиуса кривизны выправительной трассы и принципы ее проложения в русле 147
Глава VI. **Работа выправительных сооружений в речном потоке и их расчет** 156
§ 38. Работа полузапруд в потоке 156
§ 39. Расчет полузапруд 167
§ 40. Работа запруды в разветвлении русла и выбор створа для нее 176
§ 41. Работа запруды как водослива и ее расчет 182
§ 42. Продольные сооружения из грунта и их расчет 193
§ 43. Спрямления пойменных извилин и их расчет 203
§ 44. Береговые укрепления на реках и их расчет 207
§ 45. Расчет выправительных сооружений на ледовые нагрузки . 213
Глава VII. **Грунты при дноуглублении, задание снарядам и способы их перемещения по прорези** 219
§ 46. Грунты и их влияние на дноуглубление 219
§ 47. Задание дноуглубительному снаряду на работу 222
§ 48. Перемещение землесосов и многочерпаковых снарядов по прорези 227
§ 49. Системы ориентации землесосов на прорези и их действие . 232
Глава VIII. **Извлечение и удаление грунта землесосами** . . . 238
§ 50. Основные понятия и термины. Процесс работы землесоса . 238
§ 51. Работа грунтового насоса 242
§ 52. Движение гидросмеси в напорном трубопроводе 248
§ 53. Движение смеси во всасывающем трубопроводе 258
§ 54. Натурные испытания землесосов 260
§ 55. Выбор расчетной производительности землесоса 263
§ 56. Забор несвязного грунта при траншейном способе разработки прорезей 270
§ 57. Забор грунта землесосами с механическим разрыхлителем . 276
§ 58. Управление работой землесосов 280
§ 59. Удаление грунта рефулированием в воду 293
Глава IX. **Извлечение грунта черпаковыми снарядами** 298
§ 60. Забор грунта многочерпаковыми снарядами при работе на тонких слоях 298
§ 61. Забор грунта многочерпаковыми снарядами при работе на толстых слоях 305
§ 62. Подъем грунта черпаками на верхний барабан и их опорожнение 311
§ 63. Производительность многочерпаковых снарядов и управление их работой 314
§ 64. Удаление грунта шаландами 320
§ 65. Извлечение грунта одночерпаковыми снарядами 326
§ 66. Дноуглубительные работы в скальных грунтах 331
Глава X. **Выправительные сооружения — русловые и береговые, их возведение** 337
§ 67. Русловые сооружения из каменной наброски 337
§ 68. Русловые сооружения из грунта 342
§ 69. Свайные и свайно-грунтовые сооружения 356
§ 70. Береговые укрепления 355
Глава XI. **Знаки судоходной обстановки и светосигнальные приборы для них** 366
§ 71. Разновидности судоходной обстановки 366
§ 72. Береговые знаки и огни на них 368
§ 73. Расчет дальности видимости береговых знаков 374
§ 74. Плавучие знаки и огни на них 377
§ 75. Оптика и источники света в светосигнальных приборах обстановки 381
§ 76. Светосигнальные приборы обстановки 385

§ 77. Автоматы и источники питания светосигнальных приборов 390
Глава XII. **Расстановка знаков и их навигационное обслуживание** . 396
§ 78. Расстановка знаков на реках 396
§ 79. Расстановка знаков на водохранилищах и каналах . . 406
§ 80. Расчет линейных и щелевых створов 413
§ 81. Навигационное содержание знаков обстановки . . . 424
Глава XIII. **Тральные и руслоочистительные работы** 429
§ 82. Задачи и состав тральных и руслоочистительных работ . 429
§ 83. Тралы 430
§ 84. Производство тральных работ 437
§ 85. Производство руслоочистительных работ 440
Глава XIV. **Проектирование производства путевых работ на навигацию** 443
§ 86. Основные направления и периоды производства путевых работ 443
§ 87. Расчетные графики колебаний уровней воды и графики глубин на перекатах 449
§ 88. Кривые дифференцированных гарантированных глубин плеса и графики технической эффективности путевых работ . . . 455
§ 89. Проект производства путевых работ на навигацию . . 460
§ 90. Задачи дальнейшего улучшения производства путевых работ 467
Список литературы 468

Алексей Иванович Чекренев
Кирилл Владимирович Гришанин

ВОДНЫЕ ПУТИ

Редактор *Г. Н. Лаговский*
Переплет художника *Е. Н. Волкова*
Техн. редактор *В. А. Бодрова*
Корректор *И. А. Мушникова*

Сдано в набор 16/XII-1974 г. Подписано к печати 25/VII-1975 г. Бумага 60×90¹/₁₆ типографская № 2. Печатных листов 29,5. Учетно-изд. листов 32,99. Тираж 3500. Т-09378. Изд. № 1-1/12. № 4859. Зак. тип. 3663. Цена 1 р. 38 к.
Изд-во «Транспорт», Москва, Басманный туп., 6а.

Тип. изд-ва «Коммунар», г. Тула, ул. Ф. Энгельса, 150.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

к книге Чекренева

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
452	24-я снизу	перекатный график для одной навигации. Для каждого переката	рекатных графиков $T=T(H)$, после чего по крайним характерным

Тула. Тип. изд-ва «Коммунар». Тир. 3500 Зак. 3915—75