Г. Л. САДОВСКИЙ

С. 143

# ПОСОБИЕ ПО ТРАССИРОВАНИЮ ЗЕМЛЕЧЕРПАТЕЛЬНЫХ ПРОРЕЗЕЙ

001141101

БИБЛИОТЕКА
Новосибирского института
инженеров водного транспорта

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«РЕЧНОЙ ТРАНСПОРТ»
Москва 1960

В настоящей книге дается классификация перекатов различных типов рек с описанием режима их деформаций. Показано влияние на деформации перекатов различных гидрологических, геологических и топографических факторов. Далее даются рекомендации по трассированию прорезей и возведению выправительных сооружений, подкрепленные примерами из практики выправительных работ.

Книга предназначена в качестве руководства для прорабов путевых работ и может быть использована студентами вузов и техникумов, а также инженерами проектировщиками.

---

НОВ
5231
2/3

Редактор ГРИГОРЬЕВ С. Н.
Рецензенты: МАККАВЕЕВ Н. И., ПОПКОВ И. Ф.

Переплет художника ИБРАГИМОВА М. Р.

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Исторический XXI съезд КПСС утвердил контрольные цифры развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 гг., являющиеся величественной программой строительства коммунистического общества в нашей стране. В успешном осуществлении задач семилетнего плана ответственная роль принадлежит транспорту, в частности речному флоту.

Увеличение грузооборота более чем в 1,6 раза и пополнение в связи с этим транспортного флота судами большой мощности и грузоподъемности определяют необходимость всемерного улучшения судоходных условий на внутренних водных путях. Решая задачи реконструкции водных путей и одновременно повышения рентабельности работы речного флота, работники путевого хозяйства должны добиться резкого повышения эффективности путевых работ, в первую очередь дноуглубительных и выправительных, являющихся основой улучшения судоходных условий и увеличения габаритов пути на свободных реках.

Как показывает практика путевых работ за последние 15—20 лет, наиболее эффективным методом улучшения судоходных условий свободных рек является комплексное проведение капитального дноуглубления и выправления. Однако этот метод еще не занял ведущего положения, и удельный вес его в общем объеме транзитных дноуглубительных работ занимает сейчас только 15%, а остальные 85% приходятся на эксплуатационные землечерпательные работы. Эксплуатационное землечерпание позволяет поддерживать стабильное состояние водных путей, но становится совершенно неэкономичным и неэффективным там, где надо их улучшить.

Недостаточная эффективность путевых работ, кроме того, является следствием отставания разработки теоретических основ проектирования и расчета путевых работ, слабого обобщения опыта капитального дноуглубления и освещения его в технической литературе.

Настоящая книга имеет целью хотя бы частично восполнить указанный недостаток. На основании анализа большого материала русловых исследований проектирования и производ-

ства путевых работ в бассейновых управлениях пути Министерства речного флота в ней обосновываются практические рекомендации по трассированию прорезей и проектированию путевых работ на отдельных типах рек и перекатов.

В первой части книги кратко излагается теория руслового процесса, во второй — закономерности развития разных типов перекатов и в третьей даются рекомендации по трассированию прорезей и возведению выправительных сооружений.

В процессе работы над книгой автор пользовался материалами изысканий и анализа путевых работ ряда бассейновых управлений пути и ЦНИИЭВТа.

Автор выражает большую признательность докт. техн. наук проф. Н. И. Маккавееву, проф. Л. И. Кустову, канд. техн. наук И. Ф. Попкову, инженерам П. А. Леонову, М. П. Дедученко, П. К. Альферу, М. В. Мясникову, Б. М. Хижову за ценные замечания, учтенные им при работе над рукописью.

---

ГЛАВА I

# РУСЛОВОЙ ПРОЦЕСС

## § 1. СУЩНОСТЬ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Река является продуктом географической среды и одновременно активным фактором, способствующим ее непрерывному изменению [41].

Поток, протекающий в русле реки, находится в непрерывном взаимодействии с ее ложем. В результате этого взаимодействия осуществляются следующие механические процессы:

а) сток воды в речной долине;

б) размыв русла и берегов реки, перемещение продуктов размыва (наносов) и их отложение.

Первый из указанных процессов является ведущим, а остальные — производными, вытекающими из взаимодействия потока и русла.

Совокупность этих процессов составляет русловой процесс, т. е. процесс формирования рекою своего русла. Русловой процесс находится в непрерывной и тесной связи с геологическими, геоморфологическими, климатическими, почвенными, геоботаническими условиями бассейна реки и является, таким образом, физико-географическим понятием. Чтобы познать его, необходимо изучить распределение водных масс на земной поверхности во времени и связь этого распределения с другими факторами. Русловой процесс является также понятием динамическим; он требует изучения целого комплекса механических явлений, заключающихся в передвижении водных масс и твердых частиц потока.

Человек стремится использовать силу потока, а иногда оградить себя от его вредного воздействия. В результате гидротехнического строительства и проведения крупных путевых работ реки существенно изменяют свой режим и форму своих русел.

Надо подчеркнуть следующую специфическую особенность речного потока, отличающую его от искусственных потоков. В отличие от каналов, где поток заключен в искусственное неразмываемое русло и под влиянием его формирует свою гидравлическую структуру, речной поток в процессе своего движения сам

непрерывно воздействует на свое русло, размывая его в одних местах, перенося и откладывая наносы в других местах.

Влияние потока на русло и влияние русла на поток отличаются друг от друга, главным образом, величиной промежутка времени, потребного для реализации этого влияния. Влияние формы русла непосредственно, практически почти мгновенно, передается скоростному полю потока; влияние же скоростного поля потока на формирование русла осуществляется сравнительно медленно, в течение более или менее длительного промежутка времени, зависящего, главным образом, от физической структуры грунтов, слагающих русло, от их крупности и подвижности [9].

В естественных условиях на свободных реках степень проявления принципа взаимодействия русла и потока различна. На реках с трудно размываемым ложем преобладающая роль принадлежит форме русла, т. е. имеет место частное проявление принципа: «русло управляет потоком». Примером могут служить такие реки, как Нева, Ангара, Сухона и др. На других реках при большей подвижности русла возрастает роль потока и усиливается воздействие его на русловые формы.

По степени устойчивости русла реки можно разделить на ряд типов, и каждый из них имеет свои закономерности руслового процесса.

## § 2. ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ РУСЛОВОГО ПОТОКА

Характерным свойством движения жидкости в речных потоках является турбулентность, сущность которой заключается в том, что движение жидкости в потоке происходит не равномерно, а с пульсацией скорости, давления и других величин; в турбулентном потоке наряду с его поступательным движением внутри происходит непрерывное перемешивание жидкости из слоя в слой во всех направлениях.

Процессы внутреннего перемешивания жидкости, пульсации скорости и давления, свойственные турбулентному потоку, еще недавно рассматривались как беспорядочные процессы, не имеющие каких-либо закономерностей.

Только за последние годы благодаря трудам ряда ученых: проф. В. М. Маккавеева, М. А. Великанова, И. М. Коновалова, В. Н. Гончарова, А. Н. Колмогорова и других — теория турбулентности получила свое дальнейшее развитие. В настоящее время установлено, что в явлении турбулентности потока главнейшая роль принадлежит крупным возмущениям (вихри), которые имеют почти закономерный, весьма далекий от хаотического движения характер.

Неустойчивость крупных вихрей вызывает возникновение вихрей меньших размеров и т. д. Сейчас уже установлено, что именно эта крупномасштабная турбулентность, самые большие

вихри, размеры которых достигают величин, равных глубине всего потока, имеют решающее влияние на формирование русла.

Речной поток, кроме поступательного движения и турбулентного перемешивания, при известных условиях имеет еще ярко выраженные поперечные течения. Вследствие неразрывности потока жидкости эти течения имеют замкнутое (циркуляционное) направление и поэтому их называют также внутренними течениями.

Поперечные течения играют большую роль в создании потоком своего ложа и должны учитываться при всех мероприятиях по улучшению судоходных условий рек.

Еще в 1893 г. русский инженер Н. С. Лелявский в опубликованной им работе «О речных течениях и формировании речного русла» указал на наличие в реках двух типов внутренних течений — верхового сбойного сходящегося и донного расходящегося, веерного.

Дальнейшими исследованиями циркуляционных течений, выполненными советскими учеными Н. Е. Жуковским, А. Я. Миловичем, М. В. Потаповым, В. М. Маккавеевым, установлено, что поперечная циркуляция возникает в криволинейном русле вследствие центробежных сил и в прямолинейном — вследствие ускорения Кориолиса.

Кроме указанных течений, по мнению некоторых исследователей (М. Мёллер, А. И. Лосиевский и др.), в прямолинейных открытых потоках возникают и иные внутренние течения, причинами образования которых являются кривизна свободной поверхности потока в поперечном его сечении на спаде или на подъеме уровня воды или же несимметричное распределение сопротивлений по периметру поперечного сечения. Однако более поздние исследования не подтвердили наличия таких течений в прямолинейных потоках.

При движении потока по руслу, изогнутому в плане, не на все частицы жидкости действуют центробежные силы, стремящиеся отбросить эти частицы в радиальном направлении, т. е. от выпуклого берега к вогнутому. У поверхности потока продольные скорости течения больше, чем у дна, а поэтому и величина центробежной силы здесь больше. Поверхностный слой жидкости с большей силой отбрасывается к вогнутому берегу, где опускается вниз и отжимает придонный слой, испытывающий в меньшей степени действие центробежных сил, к выпуклому берегу; у последнего придонный слой поднимается кверху. Так, в изогнутом русле совместно с общим продольным течением возникают поперечные течения, придающие движению потока винтовой характер (рис. 1).

На рис. 2 представлен фотоснимок донных токов в изогнутом лотке лаборатории. Продольные донные скорости в местах нисходящего течения, т. е. у вогнутого берега, увеличиваются, а в местах восходящего течения (у выпуклого берега) умень-

шаются. В результате русло у вогнутого берега подвергается усиленному размыву, а вымытые частицы грунта переносятся отсюда донным течением к выпуклому берегу и здесь откладываются. Поперечное сечение русла принимает несимметричную форму; у вогнутого берега образуются большие глубины, у выпуклого — русло мелеет. Центробежная сила $\frac{v^2}{R}$ (на единицу массы жидкости) вызывает перекос уровня воды в плоскости поперечного сечения $i_y = \frac{v_{cp}}{R}$ (где $i_y$ — уклон уровня воды, $v_{cp}$ — средняя скорость течения, $R$ — радиус кривизны потока) и уравновешивается гидростатическим давлением, вызываемым этим перекосом, распределенным почти равномерно по вертикали.

Рис. 1. Живое сечение на изгибе потока с показанием циркуляционного течения

Разность $\frac{v^2}{R} - gi_y$, меняющая знак на глубине потока, является активной силой, вызывающей расслоение потока и возникновение поперечной циркуляции; она уравновешивается возникающими при этом силами вязкости.

При обычном распределении скоростей по вертикали поверхностный ток поперечной циркуляции направлен по радиусу кривизны, т. е. к вогнутому берегу, а сама циркуляция (если смотреть по направлению течения) направлена против часовой стрелки при изгибе потока направо и по часовой стрелке — при изгибе влево. Ускорение Кориолиса, возникающее под влиянием вращения земли вокруг своей оси, вызывает появление инерционных сил, направленных в северном полушарии всегда в сторону правого берега реки, независимо от направления ее течения.

Рис. 2. Донные токи в изогнутом лотке лаборатории

Под воздействием ускорения Кориолиса даже на прямолинейных участках рек возникает циркуляция, в процессе которой поверхностные слои воды движутся к правому берегу, а придонные — к левому.

Горизонтальная поперечная составляющая сил Кориолиса

$$P = 2\Omega v \sin\varphi,$$

где $\varphi$ — широта местности;

$\Omega$ — угловая скорость вращения Земли; $\Omega = 2:86\,400 = 7{,}27 \times 10^{-5}$ *сек.*

Соотношение между двумя формами циркуляции зависит от размеров потока. На малых реках с извилистым руслом и малыми радиусами закруглений преобладает циркуляция, определяемая фактором кривизны русла.

В больших потоках, таких, как Волга, Кама и т. д., существенное значение приобретает ускорение Кориолиса.

При движении речных потоков направления поверхностных и донных струй часто не совпадают. Рассмотренная выше схема образования поперечной циркуляции на повороте русла или под действием силы ускорения от вращения земли объясняет причину этого несовпадения. Вследствие различия в скоростях поверхностных и донных струй один и тот же элементарный импульс силы отклоняет векторы количества движения поверхностных и донных струй на разные углы от первоначального направления потока в русле.

Обычно указанный импульс силы создается градиентом давления. Если давления в живых сечениях распределяются по гидростатическому закону, то этот градиент давления совпадает с уклоном свободной поверхности. Вот почему направления донных струй обнаруживают тесную связь с рельефом водной поверхности во всех случаях, когда имеют место поперечные уклоны, например на изгибе потока, при разделении потоков и т. д.

На рис. 3 показаны изолинии свободной поверхности на изгибе потока, полученные при лабораторных опытах. Донные струи направлены в сторону депрессии свободной поверхности, образовавшейся у выпуклого берега.

Вращательные движения масс воды в речном потоке встречаются в виде вихрей с вертикальной и горизонтальной осями. Вихри с вертикальной осью известны под названием водоворотов или суводей. Они встречаются в местах обтекания потоком резких уступов берега или в местах слияния потоков, т. е. там, где имеет место разрыв в непрерывности распределения осредненных скоростей.

Для наиболее часто встречающихся русловых форм характерны следующие виды циркуляционных течений.

На изгибе русла формируются устойчивые односторонние поперечные циркуляции.

На перегибе русла поток, не прижатый ни к тому, ни к другому берегу, разбрасывается по всему руслу, отлагая наносы по всей его ширине. Здесь к основному поступательному течению присоединяется совокупность веерообразных вторичных течений. Наиболее ярко эти течения выражены на перекатах с развитой затонской частью. При перевале течения через гребень переката в подвалье здесь образуется мощный вихрь с горизонтальной осью, переносящей наносы вдоль подвалья с верхней косы на нижнюю и обеспечивающий устойчивое положение гребня переката. В зависимости от сложности рельефа русла на перекате изменяется и характер возникающих на нем внутренних течений.

Рис. 3. Рельеф водной поверхности на повороте русла

В местах разветвления динамической оси потока неизбежно возникают неустойчивые вихри с вертикальной осью, в совокупности образующие полузастойную зону, характерную усиленным отложением наносов.

При слиянии потоков образуется весьма сложная структура внутренних течений, зависящая, во-первых, от фазовой разности гидрографов сливающихся рек, во-вторых, от разности их водоносности и кинетической энергии, в-третьих, от угла слияния.

Наиболее интенсивные вторичные течения получаются при крутом угле слияния и большой разности скоростей течения, например, когда меньшая река с бо́льшим уклоном вливается в реку большего размера с меньшим уклоном (случай, который наблюдается на р. Волге после постройки Куйбышевской ГЭС в месте впадении в нее р. Самарки).

На реках со слабо устойчивым руслом при относительно больших скоростях течения и малом размере донных наносов, например, на Аму-Дарье, Зее, Сев. Двине и др., мы встречаемся довольно часто, особенно в половодье, с такими (временными) искажениями формы русла, которые неизбежно создают в потоке особые крупномасштабные возмущения типа двужущихся водоворотов с вертикальной осью. Размеры этих водоворотов

достигают иногда многих метров. Образование их вызывает резкие нарушения в распределении скоростей течения внутри живого сечения потока.

Если водоворот возник в месте расположения временного берегового выступа, он быстро затухает после того, как этот выступ будет смыт течением. На реках с неразмываемым ложем в местах неровного рельефа берегов нередко образуются постоянные водовороты.

Вопрос о неустойчивости первичных течений, соответствующих русловым формам, и о возникновении вторичных течений, влияющих на сохранение или, наоборот, на нарушение русловых форм, является одним из основных во всей теории руслового процесса, но на современном уровне его изучения решение конкретных количественных задач расчетами еще невозможно.

Если по морфологии речных русел уже имеется сравнительно богатый материал, то вопросы динамики течений изучены недостаточно. В этой области большое значение имели опыты, проведенные русловой лабораторией ЦНИИРФа под руководством канд. техн. наук А. И. Лосиевского в период 1950—1951 гг. Этими опытами была доказана связь и взаимная обусловленность продольных и поперечных течений в потоке от рельефа водной поверхности и установлено, что с изменением скоростной структуры речного потока изменяется рельеф водной поверхности и, наоборот, с изменением рельефа водной поверхности видоизменяется распределение придонных скоростей потока.

Точное нивелирование водной поверхности, проведенное как в лаборатории, так и в натуре специально разработанной аппаратурой, показало, что свободная поверхность потока имеет весьма сложный рельеф и этот рельеф обусловливается микрорельефом речного русла и продольными скоростями течения. Направления донных поперечных течений при исследовании во всех случаях совпадали с направлениями поперечных скатов водной поверхности.

## § 3. РУСЛОВЫЕ ФОРМЫ

Путем многочисленных наблюдений и экспериментальных исследований установлено, что движение наносов на дне реки в большей своей части осуществляется за счет поступательного перемещения образующихся особых песчаных волн, называемых застругами.

Хотя частицы грунта, входящие в состав тела отдельной гряды, и не связаны между собой, но они в равной степени участвуют в движении гряды.

Образование заструг на дне речных потоков — явление, аналогичное образованию песчаных дюн и барханов на земной поверхности в результате действия воздушных течений.

Во всякой заструге различаются два пространственных элемента: гребень и подвалье, расположенное всегда непосредственно ниже гребня по течению реки.

Кроме заструг, на реках распространены более сложные морфологические образования русла, называемые побочнями, перекатами, осередками, островами.

Побочнем называется песчаное скопление в русле, примыкающее своей наиболее возвышенной частью к берегу реки, обычно обсыхающее в межень. Длина побочней нередко превышает две-три ширины русла, а ширина иногда достигает трех четвертей ширины русла. Высота гребня побочня в корневой части доходит до уровня поймы.

Побочень, как и заструга, по выражению Н. Н. Жуковского, имеет свою «морфологическую пару» в виде противолежащей плесовой лощины, перемещающейся вместе с побочнем вниз по течению по мере смыва его приверха и нарастания ухвостья. Побочень является наиболее устойчивой формой скопления наносов в русле. В речном русле встречаются как одиночные побочни, так и групповые, расположенные в шахматном порядке у противоположных берегов.

Одиночный побочень в своем развитии имеет три стадии. Первая стадия — рост побочня под влиянием интенсивного притока наносов. В этот период побочень обычно находится в неподвижном состоянии.

Вторая стадия — сползание побочня вниз по течению реки после прекращения его роста. Это движение происходит за счет смыва верховых и средних его частей и наращивания береговых и низовых частей.

Для движения побочней характерно непрерывное перемещение их вдоль своего опорного берега.

Побочень при своем движении может несколько сокращаться в объеме вследствие смыва с него грунта течением. Надводная часть побочня может уменьшаться, если по мере перемещения побочень дойдет до пониженной части русла. При встрече раздвоенного русла побочень может спуститься в один из рукавов, перекрыть его и тем самым способствовать перемещению судового хода в другой рукав.

Встречая на пути местное уширение русла, побочень полностью или частично заполняет его и останавливается в движении, образуя местную отсыпь пойменного берега (это третья стадия).

В местах парного расположения побочней у противоположных берегов реки, вследствие вытеснения побочнями водных масс, получается перевал динамической оси потока от одного берега к другому.

Если побочни имеют высокие отметки и судовой ход относительно плавно переходит от одного берега к другому, то глубины на перевале обычно большие, и он не затрудняет судоходство.

Однако по мере спуска побочней вниз может начаться усиленный размыв берега, и приток наносов на побочень увеличится. Рост побочня вызовет размыв противоположного берега и отложение наносов на перевале и нижнем побочне. Вместе с этим происходит обмеление перевала, искривление его корыта и превращение перевала в затруднительный для судоходства перекат.

Каждый год отдельные части переката обычно меняют свое положение и очертания как в плане, так и по высоте; глубина на перекате также изменяется.

Прежде чем приступить к описанию закономерностей развития перекатных форм, необходимо остановиться на причинах образования перекатов. В натуре на реках, обладающих сложным русловым режимом, проследить первичное образование русловых форм и перекатов весьма затруднительно. Поэтому вопросы формирования перекатов относятся к наиболее сложным вопросам речной гидрологии.

По мнению французского ученого Фарга, перекаты образуются на участках русла, расположенных на прямолинейной вставке между двумя взаимно противоположными кривыми. На участках русла, имеющих определенную кривизну, под влиянием центробежной силы возникают поперечные циркуляционные течения, откладывающие наносы к выпуклому берегу. На расположенной между ними прямой вставке циркуляционные течения затухают, меняя свой знак на обратный, и поэтому здесь происходит интенсивное отложение влекомых рекой наносов, из которых и формируются образующие перекат отмели.

В. М. Лохтин, критикуя эти предположения Фарга, говорил, что они не могут правильно объяснить образование плесов и перекатов хотя бы потому, что устойчивые плесы часто расположены на прямых участках рек, пролегающих вдоль горного берега. Он утверждал, что причиной образования перекатов является не режим меженных течений, а уменьшение уклонов и транспортирующей способности потока вследствие подпорных явлений, наблюдающихся в период половодья.

Явления подпора в речном русле возникают в районах сужения поймы реки, при впадении притоков, а также непосредственно выше поворотов русла. Выклинивание подпора потока на повороте русла, т. е. на том же участке между двумя кривыми, который указывает и Фарг, создает благоприятные условия для отложения наносов и образования перекатов.

В качестве одной из причин образования перекатов В. М. Лохтин назвал также высыпки из оврагов и речек, создающие местные подпорные явления.

Н. И. Маккавеев, кроме указанных, устанавливает также следующие причины образования перекатов.

Распластывание волны половодья в месте расширения долины реки. При выходе потока во время половодья из горловины (узкого места) долины на участок рас-

ширенной поймы скорости течения воды вначале увеличиваются, а затем уменьшаются. В той части русла, где скорости в потоке возрастают, образуется глубокий плесовый участок, тогда как ниже, где скорости течения снижаются, формируется перекат. Образующиеся таким путем перекаты на наших реках встречаются не менее часто, чем описанные выше перекаты подпорного происхождения. В межень они имеют обычно относительно устойчивые судовые ходы. Это объясняется тем, что, формируясь во время паводков при наличии довольно больших скоростей течения, эти перекаты складываются из более крупнозернистых грунтов, чем перекаты, которые образуются в зонах подпоров при меньших скоростях течения воды.

Несовпадение течений в половодье и в межень. Резкое несовпадение направления паводкового потока с направлением меженного русла наблюдается, главным образом, на участках рек с широкой двусторонней поймой. Весенние воды, протекая по пойме, пересекают иногда основное русло под прямым и даже тупым углом, вызывая в нем ряд нарушений нормальной структуры течения воды. Несовпадение направлений течений при различных уровнях воды может привести к разветвлению русла, а последнее способствует возникновению местных подпоров течения. Возникающие в таких условиях перекаты отличаются неустойчивостью судовых ходов, меняющих свое положение ежегодно в зависимости от характера половодья.

Местное перенасыщение потока наносами. При достижении некоторой концентрации наносов в потоке наиболее крупные фракции их начинают переходить из взвешенного состояния во влекомое. Причины, вызывающие относительное перенасыщение потока наносами более крупных фракций, весьма разнообразны: а) интенсивный размыв дна или берега; б) впадение притока, имеющего значительные скорости течения и несущего более крупные, чем главная река, наносы; в) поступление наносов от временных потоков, текущих по дну оврагов и балок; г) перемещение песков ветром и т. д.

Все эти причины могут вызывать местное перенасыщение реки наносами и их отложение в русле. Формирующиеся из скоплений наносов перекаты образуются как в половодье, так и в межень в различных местах русла и имеют самые разнообразные формы.

А. И. Лосиевский объясняет образование переката как следствие перекоса заструги, по той или иной причине сформировавшейся в потоке и под действием течения воды непрерывно перемещающейся вниз по течению. Скорость движения отдельных частей заструги зависит от величины скорости течения на соответствующих участках русла. Вследствие больших скоростей у стрежня и меньших у берегов, заструга с течением времени неизбежно начнет перекашиваться по отношению к оси потока и в результате займет наклонное к ней положение.

Одновременно заструга приобретает следующее совершенно новое важное свойство: после перекоса заструги вращательное движение воды в ее подвалье преобразуется в винтовое, так как ось вращения расположена теперь под острым углом к направлению течения потока и продольная составляющая этого вращательного движения вызовет поступательное перемещение вращающейся массы воды.

Рис. 4. Работа вальца *A* в подвалье заструги

Такое преобразование вращательного движения воды в винтовое при повороте заструги А. И. Лосиевский наблюдал в лабораторных условиях. В естественных условиях это явление проявляется менее наглядно, но результаты его, выражающиеся в движении и отложении наносов, вполне совпадают с лабораторными. Они заключаются в том, что при наличии винтового движения в подвалье заструги наблюдается не только удержание наносов на крутом откосе ее, но и медленное, постепенное сползание их под действием водяного винта вдоль подошвы заструги и по направлению от берега к стрежню.

Перекошенная заструга начинает продвигать наносы на стрежень, в результате чего наблюдается прежде всего удлинение самой заструги и происходит засорение наносами стрежневой части потока.

На рис. 4, заимствованном из труда А. И. Лосиевского [30], наглядно видна работа вальца в подвалье заструги по ее наращиванию и засорению судового хода.

В результате указанного процесса перемещения и нарастания не одной, а большого числа заструг в русле реки формируется перекат.

Таким образом, по мнению А. И. Лосиевского, для образования переката совершенно не обязательно наличие изгиба потока, сужения или расширения русла, или наличия весеннего подпора. Он не отрицает образования перекатов на криволинейных участках, однако считает, что сам перегиб русла в районе переката является следствием наличия здесь косой заструги (вала переката), образовавшейся по описанной выше схеме. Вода, переливающаяся через вал переката, расположенного под углом к течению, направляется к берегу нижней плесовой

лощины и размывает его. Интенсивный местный размыв берега вызывает искривление береговых очертаний русла и приводит в конечном итоге к общему изгибу потока.

Не отрицая возможности образования заструг и перекатов вследствие всех изложенных причин, кандидаты технических наук К. И. Росинский и И. А. Кузьмин полагают, что первоисточником зарождения заструг и перекатных форм является само взаимодействие речного потока с песчаным ложем. Перекатная форма свойственна русловому потоку, несущему большое количество наносов. Существует много перекатов на прямых участках рек, сложенных из песка и имеющих настолько широкую пойму (например, р. Днепр от устья р. Припяти до Киева), что влияние коренных берегов на русло практически не может существенно сказываться. Необходимо отметить, что именно на таких участках перекаты расположены непосредственно друг за другом в шахматном порядке и являются наиболее затруднительными.

О причинах формирования заструг в прямолинейном русле ответ дают опыты Россинского и Кузьмина, проведенные в прямом лотке с дном, сложенным из песка. Дно такого лотка под воздействием течения воды покрывается грядами, имеющими форму дюн и располагающимися при определенном соотношении глубины к ширине лотка в шахматном порядке то у одной, то у другой стенки потока.

Гряды появляются тотчас же, как только движение песка по дну становится достаточно интенсивным для более или менее заметного деформирования дна. Они не остаются неподвижными, а перемещаются вниз по течению. Если обратиться к деталям рельефа, то в лотке можно обнаружить все морфологические элементы песчаных перекатов, наблюдаемых на прямолинейных речных участках. Каждая гряда-дюна, соответствующая побочню переката, имеет в качестве морфологической пары углубленную часть русла — плесовую лощину, размещающуюся у противоположной стенки потока. Между двумя соседними плесовыми лощинами имеется повышенная часть дна, образующая вал переката. Гребень переката тянется наискось, поперек потока, от верхней гряды побочня к нижней.

Форма дна простейшего потока, полученного в лотке (рис. 5), весьма схожа с естественным рельефом дна перекатного участка в реке. Докт. техн. наук И. М. Коновалов [19] говорит, что К. И. Россинский и Н. А. Кузьмин правильно обратили внимание на наличие в самой природе речного потока тех внутренних сил, которые вызывают его переформирование. Своими опытами они подтвердили еще раз, что шахматное расположение побочней является исходной формой русловых образований. Однако в их работе нельзя все же найти объяснения, почему это так происходит и какое «шахматное» расположение побочней в данных конкретных условиях будет устойчивым.

Последовательности развития форм речного русла, указанные Россинским и Кузьминым, не являются обязательными, а в тех случаях, когда имеется ряд причин, вызывающих отклонение потока от его первоначального направления (мысы, высыпки, печины и пр.), они совсем не имеют места. В лаборатории ЛИИВТа под руководством И. М. Коновалова в 1938 г. впервые были проведены опыты по исследованию динамики формирования речного русла в большом объеме. В лотке с песком средней крупности (0,35 *мм*) с помощью косого подвода воды было сформировано речное русло с расположенными в шахматном порядке побочнями и перекатами. При моделировании паводков, их спада и наступления межени перекаты на модели имели те же деформации, что и перекаты на реках с образованием мощной водоворотной зоны у противоположного препятствию (побочню) берега.

Рис. 5. Форма потока в лотке лаборатории

Водоворотная зона, отмеченная выше, вызывает сжатие потоков, весьма близкое к тому, которое было осуществлено при расположении в русле препятствия. Это дает основание полагать, что описанная кинематическая картина, при определенных условиях (уклоны, соотношение между шириной и глубиной русла, расходы) должна повторяться вновь ниже по течению.

В результате получается поток с шахматным расположением вихревых зон, поочередно у одного и другого берега.

Анализ натурных данных, проведенный докт. техн. наук И. М. Коноваловым и канд. техн. наук В. В. Баланиным, показал, что у некоторых рек в отдельных сечениях имеет место сжатие русла до значения $m=0{,}75$, при которых, согласно расчетам, отрыв пограничного слоя может происходить и от берега. У такой реки должны образоваться весьма мощные побочни, занимающие три четверти русла по ширине, так как в пределах водоворотной зоны создаются благоприятные условия для отложения наносов.

Исходя из теории турбулентных струй и теории турбулентного пограничного слоя, И. М. Коновалов раскрыл физику явлений и дал им объяснение, основанное на строгих математических закономерностях. Теоретическая схема процесса формирования речного русла, по И. М. Коновалову, сводится к следующему.

При появлении на пути прямолинейного речного потока преграды в виде сооружения, мыса, побочня и др., струи воды оттесняются к одному из берегов, а скорости течения возрастают. В створе препятствия возникают размывы, поток насыщает-



БИБЛИОТЕКА

ся наносами и транспортирует их вниз по течению. В результате турбулентного обмена между транзитной струей и массой воды ниже препятствия образуется циркуляционная зона. Транзитный поток на значительном протяжении циркуляционной зоны расширяется весьма медленно, и лишь вблизи конца этой зоны происходит довольно резкое расширение потока с одновременным уменьшением скоростей и повышением давления. При этом

Рис. 6. Поле скоростей и линии тока за преградой в прямоугольном русле

донные скорости уменьшаются значительно быстрее поверхностных. В результате описываемого явления в отдельных зонах потока у дна и берега, противоположного препятствию, при определенных условиях происходит отрыв пограничного слоя.

Путем гидравлических расчетов для прямоугольного русла И. М. Коновалов получил поле (рис. 6) скоростей и вскрыл закономерности в развитии зон отрыва пограничного слоя в зависимости от степени сжатия потока $m=\frac{b}{B}$, где $b$ — ширина сжатого сечения и $B$ — ширина несжатого сечения. При степени сжатия $m=0{,}2$ зона отрыва $KK^1$ пограничного слоя наблюдается лишь у дна и на небольшом протяжении. Далее по мере увеличения сжатия потока отрыв увеличивается и распространяется на всю глубину потока.

При степени сжатия $m=0{,}75$ эта зона примыкает к берегу, и здесь наблюдается отрыв $KK^1$ пограничного слоя.

## § 4. ПОДВИЖНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЛА

Речной поток, протекающий по размываемому руслу, в процессе взаимодействия с ним создает естественную наиболее присущую ему форму русла. Эта форма должна обладать в большей или меньшей степени устойчивостью.

Рассмотрим сначала более простой случай, когда расход воды постоянный, грунт русла однородный и легко поддается размыву при существующих скоростях течения и уклоне реки под влиянием поперечной циркуляции; в местах возрастания скоростей течения будет происходить размыв русла, а в местах затухания скоростей — отложение вымытых частей грунта. В результате русло принимает извилистую форму, которая в свою очередь способствует усилению поперечной циркуляции. Следовательно, процесс образования извилистости русла будет усиливаться, однако до определенного предела.

Чем больше извилистость реки, тем больше становится длина ее участка между двумя какими-нибудь определенными пунктами, а так как падение между этими пунктами постоянное, то уклон реки с увеличением ее извилистости постепенно уменьшается.

Возможны два варианта дальнейшего развития руслового процесса. Первый — увеличение извилистости русла, что приведет к уменьшению уклона до величины, при которой скорости будут уже едва достаточными для передвижения наносов. Это будет случай относительно устойчивого состояния русла. Второй вариант — если даже при максимальном развитии меандров скорости течения все же будут слишком велики для данного грунта, тогда между меандрами образуются прорывы, и руслообразующий процесс начинается заново. Если речной поток не приходит в процессе развития своего русла к тому уклону, который создает для него условия динамического равновесия, то форма его русла будет подвержена постоянным изменениям.

В обратном случае мы имеем реки сравнительно устойчивой формы. Таким образом, устойчивость русла определяется, с одной стороны, уклоном реки и, с другой, — степенью подвижности того грунта, в котором он протекает.

Руководствуясь этими соображениями, В. М. Лохтин в своей монографии «О механизме речного русла» для определения степени устойчивости русла предложил вычислять соотношение между средней крупностью частиц грунта и уклоном водной поверхности. Коэффициент устойчивости русла $\gamma$ он выразил следующей простой формулой:

$$\gamma = \frac{d}{I},$$

где $d$ — средний диаметр частиц грунта донных отложений в *мм*;

$I$ — падение в *м* на 1 *км*.

Для определения величины $d$ В. М. Лохтин рекомендует брать пробы грунта в пределах судового хода, ближе к стрежневой зоне течения, в возможно большем количестве.

Лохтин подсчитал коэффициенты устойчивости русла для ряда рек. Для Вислы у г. Варшавы коэффициент составил 2,1, Днепра у г. Киева — 6,2, Дона у г. Ростова — 5,3, Волги близ г. Горький — 12,6, Немана у г. Гродно — 23,3.

В течение 1940—1950 гг. русловыми изыскательскими партиями бассейновых управлений пути были собраны пробы грунта на большом числе перекатов судоходных рек. Полученные сведения, пополненные материалами из ежегодников гидрометслужбы с данными Главгидростроя, позволили ЦНИИЭВТу определить коэффициенты Лохтина для 900 перекатов.

В результате исследования этих данных Н. И. Маккавеев пришел к следующим выводам:

1. Наиболее крупная река Русской равнины — Волга характеризуется коэффициентом Лохтина более высоким, чем реки менее крупные, такие как Днепр, Дон, Северная Двина и Кама.

Особенно высокой устойчивостью русла отличается верхняя Волга. Наименьшая устойчивость русла Волги наблюдается в зонах переменного подпора, вызванного впадением крупных притоков (на участке Пучеж — устье Оки и Вязовые — устье Камы), что, очевидно, вызвано скоплениями мелкозернистого грунта, оседающего в русле и на пойме в период паводков.

2. Реки Дон, Днепр, Вычегда, Северная Двина и Кама характеризуются близкими значениями коэффициента Лохтина. Вследствие неравномерного падения Днепра показатель устойчивости по длине этой реки заметно изменяется; относительно малое значение коэффициента Лохтина наблюдается в районе между Витачевым и Черкассами, а также на участке, примыкающем к порогам. Интересной особенностью р. Дон является постоянное возрастание коэффициента Лохтина к устью.

3. Коэффициент Лохтина в основном зависит от характера грунта. Но наряду с этим его значение уменьшается с уменьшением размеров реки.

Это объясняется влиянием больших уклонов на малых и средних реках. Так, например, на нижней Каме при меньшей крупности наносов, чем на Белой, коэффициент Лохтина равен 4 (на Белой он составляет 0,97). Это вызвано тем, что падение р. Белой — 30 *см* на километр, а Камы — только 7 *см* на километр. На интенсивность русловых деформаций большое влияние оказывает форма русла. С ростом относительной глубины площадь соприкасания потока с грунтом становится меньше, и вертикальная составляющая скорости течения убывает, соответственно снижается и интенсивность деформации русла.

Коэффициент Лохтина влияние форм русла не учитывает. Он отражает изменение устойчивости русла равнинных рек только в общих чертах, а для более точных определений степени

устойчивости следует пользоваться показателем, учитывающим морфологию и шероховатость русла.

Докт. техн. наук В. М. Маккавеев предложил принять за меру устойчивости русла коэффициент

$$k_y = \frac{d}{TI},$$

где $d$ — средняя крупность донных отложений;

$T$ — средняя глубина потока;

$I$ — поверхностный уклон.

Для сравнительной оценки абсолютных величин русловых деформаций проф. М. А. Великанов предложил следующее соотношение:

$$\eta = \frac{gD}{v^2},$$

где $g$ — ускорение силы тяжести;

$D$ — диаметр частицы грунта;

$v$ — скорость потока.

Учитывая изложенные выше соображения о влиянии формы русла на интенсивность деформаций, б. МОЦНИИРФ ввел в эту формулу морфологический параметр, заключающийся в отношении глубины $H$ русла к его ширине $B$.

Таким образом, приближенное значение показателя устойчивости приобрело следующий вид:

$$\eta = \frac{gDH}{Bv^2}.$$

Подставляя значение скорости течений из формулы Шези и приняв $R=H$, получим

$$\eta = \frac{gD}{BC^2I},$$

где $C$ — коэффициент Шези.

Инж. Х. М. Полин подметил интересную зависимость крутизны кривой связи расхода воды с уровнем $(Q=f(H))$ от интенсивности русловых переформирований русла.

На тех реках, где кривая связи расходов с уровнями более крутая, при одном и том же расходе воды река имеет большие глубины, и русловые процессы происходят медленнее, чем на тех реках, где кривая связи расходов воды с уровнями более пологая.

На рис. 7, заимствованном из статьи Х. М. Полина «Принципы водно-путевой классификации плесов», приведены кривые связи расходов с уровнями воды для ряда судоходных рек (по данным измерений расходов за 1935 г.). При рассмотрении их Х. М. Полиным было установлено, что на реках, где кривые связи расходов с уровнями пологие, поддерживаются меньшие судоходные глубины, и для этого требуется больший объем путе-

вых работ, чем на реках с крутой кривой связи расходов с уровнями воды.

Количественной оценкой крутизны кривой связи расхода с уровнями воды $Q=f(H)$ является тангенс угла $\alpha$, образованного касательной, проведенной к кривой, с осью абсцисс. Тангенс этого угла равен производной расхода воды по уровню воды:

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{dQ}{dH}\,Q'.$$

Эта производная характеризует влияние уклона и степени изменчивости формы русла реки в зависимости от уровня воды. Исходя из того, что глубина определяется уровнем воды, получаем: глубина воды обратно пропорциональна величине производной расхода по уровню воды, т. е. чем больше значение этой производной, тем меньше глубина при одних и тех же расходах воды, и наоборот.

Рис. 7. Кривая связи расходов с уровнем воды $Q=f(H)$:

*1* — на Оке у Касимова; *2* — на Оке у Мурома; *3* — на Туре у Тюмени; *4* — на Волге у Кинешмы; *5* — на Волге у Чкаловска; *6* — на Волге у Горького

При рассмотрении вопроса об устойчивости русла был условно принят установившийся, неизменный гидрологический режим реки. В действительности неустановившийся характер движения водных масс, смена высоких и низких уровней и расходов воды, продолжительность паводка, а также интенсивность подъема и спада уровней воды имеют большое значение в процессах формирования русла и, следовательно, в достижении той или иной степени его устойчивости.

Деформация русла паводками находится в большой зависимости не только от скорости нарастания расхода воды при паводке, но и от длительности паводковой волны. Более длительный паводок производит более существенные переформирования русла. Короткий и резкий паводок успевает лишь захватить в одном месте большое количество наносов и отложить их в дру-

гом, иными словами, произвести беспорядочную деформацию русла, которую лишь последующий меженный поток окажется в состоянии переработать в новое плавное русло.

Явления размыва русла в паводок сосредоточиваются преимущественно на плесовых участках реки, а явление отложения наносов — на перекатах.

После прохождения паводка обычно начинается обратная деформация русла. В местах, где в паводок произошло повышение дна, наращенного отложением наносов, при спаде паводка образуется большой уклон, и меженный поток в этом отложении наносов прорабатывает одну или несколько бороздок, а продукты размыва сбрасывает в нижележащий плёс. Здесь вследствие подпора, образуемого нижележащим перекатом, происходит уменьшение скоростей течения и обратный процесс отложения наносов и повышения дна.

По степени устойчивости русла все реки могут быть разделены на пять главнейших категорий:

1. Реки с ничтожным количеством наносов и слабым влечением их по дну, наибольшей устойчивости, протекающие в скалистых грунтах, а отчасти (равнинные реки) в крупном галечном грунте. Примером рек этой категории могут служить Енисей, Томь, Ангара, Нева, Сухона и др.

2. Реки, в которых наращивание дна и его углубление осуществляются периодически на одних и тех же местах, причем величина паводкового наращивания перекатов приблизительно равняется величине их меженного углубления. Перекаты поэтому имеют относительно постоянную форму и размер и подвержены лишь периодическим колебаниям около некоторого среднего значения. Примером таких рек являются Волга, Кама, Днепр, Иртыш и др.

3. Реки, которые развиваются путем меандрирования, т. е. медленного перемещения береговой линии в плане. Перекаты на них остаются относительно неизменными. Это равнинные реки малой устойчивости, например, Припять, Березина, Десна, Ветлуга, Сура, Тура, Чулым и др.

4. Реки, протекающие в легкоразмываемых грунтах. На них паводок изменяет не только глубины русла, но зачастую и самое его очертание. Из отлагающихся продуктов размыва в русле возникают такие образования, справиться с которыми меженный поток может иногда лишь путем промыва нового русла в другом направлении.

К наиболее устойчивым рекам этой группы относятся Большая Северная Двина, Зея, верхняя Обь, к менее устойчивым — Аму-Дарья.

5. Реки, в которых подвижность русла во время паводка достигает таких пределов, что самое разграничение «поток и русло» теряет значение. Такое русло изменяется со скоростью са-

мого потока. Сюда относятся селевые потоки. Среди судоходных рек таких потоков не встречается.

В зависимости от степени устойчивости русла рек находятся многие характеристики их микрорельефа, в частности образование плесов и перекатов, изгибов и перегибов и закономерность их деформаций.

## § 5. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Режим рек очень разнообразен и зависит в основном от соотношения трех ведущих факторов: водности реки, грунта дна и берегов, рельефа местности, по которой протекает река.

Различные сочетания этих факторов определяют режим и характер деформации речных русел.

При легкоразмываемом грунте дна и берегов, больших уклонах и больших расходах воды русло будет подвергаться сильным деформациям, т. е. будет неустойчивым. Наоборот, при трудноразмываемом грунте и малых уклонах независимо от величины расхода воды деформации русла будут весьма незначительными.

Например, р. Селенга при галечном грунте с преобладанием частиц диаметром 4—5 *мм* и уклоне 0,0004—0,0005 имеет интенсивное переформировывающееся русло, а р. Ока при мелком песчаном грунте и примерно при тех же расходах, но при уклонах 0,00004—0,00005 имеет относительно устойчивое русло.

Степень устойчивости русла оказывает решающее влияние на его формы и на закономерности их образования. Легкоподвижные реки (Аму-Дарья, Северная Двина, верхняя Обь, Зея и др.) имеют широкие мелководные русла, разбивающиеся на ряд рукавов; реки средней устойчивости (Припять, Ветлуга, Кура, Тура, Тобол. Чулым и др.) обычно текут в одном русле, сильно изгибаясь в плане и образуют массу излучин (меандр).

Реки более устойчивые (Волга, Кама, Днепр и др.) имеют относительно слабую криволинейность русла и незначительное разделение на рукава.

К. И. Россинский и И. А. Кузьмин в зависимости от соотношения трех описанных выше факторов, т. е. в зависимости от степени устойчивости реки, различают следующие три типа формирования русла:

1) периодическое расширение;
2) развитие излучин (меандрирование);
3) блуждание.

На реках, где побочни, составляющие основной рельеф русла, в силу подвижности донных отложений быстро смещаются вниз по течению, а берега, напротив, по геологическим причинам подмываются не очень интенсивно, русло реки в процессе деформаций не успевает искривляться.

Побочни по мере движения вниз по реке, прикрывая от размыва то один участок берега, то другой, обусловливают более или менее равномерное по длине разрушение берегов и в результате происходит постепенное расширение русла.

Длительный процесс расширения в конце концов сменяется кратковременным процессом сужения русла: чрезмерно расширившись, поток отторгает побочни от одного из берегов и прокладывает себе прямое и первоначально узкое русло. Отторгнутые побочни обращаются в осередки и затем в острова, разбивающие реку на рукава.

Рис. 8. Фазы периодического расширения русла

Острова в процессе заиления отмирающих рукавов соединяются с берегом, обычно противоположным отторжению, и образуют новую линию берега, как бы выдвинутую в сторону реки.

Этим завершается сужение русла, после чего возобновляется процесс его расширения.

В условиях периодического расширения река сохраняет прямолинейное или слабо криволинейное очертание своего русла. Процесс периодического расширения реки оставляют на пойме следы в виде прямолинейных или слабо вогнутых стариц.

Состояние русла реки на различных фазах описанного процесса представлено на рис. 8.

Сравнение приведенных на рис. 8 планов, снятых в 1878, 1933 и 1941 гг., показывает, что общая ширина участка в 1933 г. в сравнении с шириной 1878 г. уменьшилась более чем в два раза, потому что побочни стали частью поймы.

После 1933 г. процесс расширения русла начался снова и к 1941 г. была воспроизведена та общая картина расположения побочней и перекатов, которая наблюдалась более чем 60 лет назад.

Регулирование ширины русла нередко протекает путем отторжения части, а не всего побочня в целом, как это было указано выше. Однако, являясь частным случаем одного и того же процесса, этот путь не меняет общего характера последнего.

На реках, где смещение песчаных масс (побочней, гряд) вниз по течению происходит медленно, а берега деформируются относительно быстро, русло искривляется раньше, чем двигающиеся побочни смогут этому воспрепятствовать. В этом случае начинается развитие излучин—меандрирование реки, которое, как и процесс расширения, носит периодический характер.

Рис. 9. Фазы деформаций излучины русла

Со временем излучина сильно искривляется, образуя почти замкнутую петлю. Между началом и концом петли остается малый промежуток суши, который размывается потоком. Отрезанная при этом петля реки постепенно заносится наносами и обращается в старицу.

Образовавшиеся при прорыве перешейка спрямления перекрываются прибрежными отмелями-грядами и процесс искривле-

ния начинается снова. Состояние меандрирующего русла на разных фазах описанного процесса показано на рис. 9.

Блуждание русла наблюдается у рек с очень подвижными берегами. Русло реки, не будучи в состоянии сохранить правильную форму, сильно развивается в ширину. Песчаные скопления в русле образуются преимущественно в виде осередков, которые развиваются в острова и разбивают реку на протоки, непрерывно меняющие свои очертания (рис. 10).

Процесс периодического расширения наблюдается преиму-

Рис. 10. Участок реки с блуждающим руслом:
1 — коренной берег; 2 — главное русло; 3 — второстепенные рукава; 4 — острова; 5 — старицы

щественно на крупных реках с песчаным дном и высокой поймой, верхняя часть которой сложена из суглинков и покрыта растительностью. Таким рекам свойственны длительные половодья, наличие летних и осенних паводков.

Развитию излучин способствуют невысокие песчаные поймы с растительностью, наличие гравелистых, галечных или илистых включений в песках донных отложений, короткие половодья и затяжные межени.

Процесс меандрирования обычно распространен на малых реках, но встречается и на таких крупных реках, как Миссисипи.

Решающее значение для характера русловых деформаций имеет степень подвижности ложа и берегов реки, т. е. соотношение размываемости грунта и уклона реки.

Реки, берега и дно которых сложены из одинаковых легкоразмываемых грунтов, со слабой растительностью на поймах, с затяжными многопиковыми половодьями, обычно деформируются путем блуждания русла.

Деформация естественных рек не всегда относится к какому-либо из описанных выше типов. Геологические, гидрологические, а также и топографические факторы придают строению русла индивидуальные черты, свойственные отдельным речным

участкам. Однако на реках везде возможно проследить элементы рассмотренных выше трех основных процессов: периодического расширения, меандрирования и блуждания.

Участки русел рек сложного геологического строения, состоящие из грунтов различной степени подвижности, могут отличаться от русел, проложенных в однородных грунтах, как формами дна, так и характером руслового процесса. Если дно реки покрыто песчаными отложениями малой мощности, лежащими на плотных грунтах, побочни (гряды) в реке могут не образовываться.

В таких случаях часто встречаются так называемые «россыпи», рельеф русла которых состоит из большого числа относительно мелких заструг. Побочни в тех местах, где они образуются, отличаются неполнотой своих форм и почти всегда неподвижны.

На рис. 11 приведены для сопоставления рельефа участок р. Белой, имеющий сложное геологическое строение с песчано-гравелистыми отложениями на подстилающих глинистых слоях и участок р. Днепра с легкоразмываемым песчаным руслом.

Русла сложного строения в результате неподвижности побочней развивают меандры даже в суглинистых или глинистых берегах.

Рис. 11. Участки русла:
*а* — р. Белой; *б* — р. Днепра

Вследствие затруднительности глубинной эрозии в них происходит образование островов, медленно изменяющих свою форму и привязанных к определенным местам реки.

Острова часто появляются на таких участках реки, где берега размываются сильнее, чем на лежащих выше и ниже участках, а дно реки подстилается плотным грунтом.

На некоторых крупных реках с руслом сложного геологического строения имеются участки, сплошь покрытые системой островов, разбивающих реку на многочисленные рукава.

Реки, текущие в трудноразмываемых грунтах, в большинстве случаев не имеют пойм. Очертания русел таких рек в плане обычно совпадают с очертанием речной долины и определяются, прежде всего, особенностями топографии прилегающей местности и ее геологического строения.

Размеры речного русла, определяемые его шириной и глубиной, зависят, главным образом, от расходов воды, уклона реки, ширины и высоты поймы, крупности донных отложений, а также от типа руслового процесса данной реки.

В ходе руслового процесса ширина и, соответственно, глубина русла все время изменяются, колеблясь около некоторых средних значений. Наименьшие отношения ширины и глубины русла $\frac{B}{H}$ свойственны меандрирующим руслам, причем это отношение тем меньше, чем круче излучины.

Наибольшими отношениями $\frac{B}{H}$ отличаются блуждающие реки. Реки, испытывающие периодические расширения русла, занимают промежуточное положение. В трудноразмываемых грунтах соотношение поперечных размеров русла определяется относительной прочностью склонов и дна долины.

Описанные типы деформаций речных русел подтверждаются практикой и имеют большое значение при проектировании путевых мероприятий на водных путях.

Например, реки Аму-Дарья, нижняя Зея, Большая Северная Двина, верхняя Обь как по форме русла, так и по закономерностям руслового переформирования значительно отличаются от таких рек, как Волга, Кама, Днепр и им подобных.

Первые имеют широко разветвленные русла, разделенные на ряд рукавов и проток. На этих реках происходит быстрое переформирование русла: один рукав отмирает, другие развиваются, перекаты очень быстро образуются и, быстро отмирая, появляются в новых местах. Судовой ход часто меняет свое положение, переходя из одной протоки в другую. Поддержание судоходных условий на этих реках встречает большие трудности.

На р. Аму-Дарье интенсивность блуждания протекает весьма быстро, так что фарватер от одной стороны долины к противоположной переходит часто в течение 10—20 суток.

На Северной Двине, Зее, Оби процесс блуждания протекает медленнее, но и на них прослеживаются те же явления.

Реки Волга, Кама, средний и нижний Днепр и др. на протяжении большей части своей длины не имеют участков с блуждающим и меандрирующим руслом. На этих реках в относительно слабо изогнутом русле перекаты находятся между расположенными в шахматном порядке побочнями. Деформации этих

рек происходят путем периодических расширений русла, как это описано выше.

Типичными меандрирующими реками являются такие, как Припять, Березина, верхний Днепр, Ветлуга, Сура, Тура, Тобол, Чулым, нижний Иртыш, протекающие в широких поймах и имеющие грунт берегов, более размываемый, чем грунт дна.

В дальнейшем при разработке мероприятий по улучшению перекатов мы будет рассматривать отдельно перекаты на участках блуждающего, меандрирующего русла и русла, деформирующегося путем периодического расширения, так как эти перекаты имеют неодинаковый режим и для их улучшения требуется часто совершенно различный подход.

## § 6. РЕЧНАЯ ПОЙМА[1]

Характерной особенностью рек, русло которых деформируется путем периодического расширения и меандрирования, является наличие поймы.

Образование поймы связано с многовековой работой рек по эрозии в верхнем течении и переносу размытого материала на нижние участки, а также с периодическими деформациями русла (меандрирование и расширение) в многолетнем разрезе.

Скопления наносов, слагающих пойму, постепенно перемещаются речным потоком, при этом отдельные участки поймы непрерывно размываются в процессе размывов меженных берегов или непосредственно в половодье. Несмотря на то, что перемещение пойменных берегов происходит относительно медленно, со скоростью нескольких метров в год, общий объем поступающих в русло наносов от подмыва берегов очень велик и в несколько раз превышает объем твердого стока воды. Наносы, поступающие в реку от подмыва берегов и в особенности от обвалов подмытых снизу яров, оседают на ближайших побочнях и не перемещаются на значительное расстояние в течение навигации.

По подсчету ряда авторов примерный объем ежегодных размывов пойменных берегов на 1 *км* длины реки составляет: на нижней Миссисипи 55 тыс. $м^3$, на нижней Волге — 36 тыс. $м^3$, на среднем Днепре — 12—15 тыс. $м^3$. Из сказанного видно, что между пойменными и русловыми отложениями происходит постоянный обмен материалом и что пойма является не только местом аккумуляции речных наносов, но и источником их пополнения.

В поперечном разрезе долины равнинной реки (рис. 12) различают: 1) меженное русло; 2) прирусловые пески; 3) пойму.

---

[1] Материалы и рисунки для этого параграфа заимствованы из трудов ЦНИИЭВТа. Выпуск VIII «Русловые процессы и путевые работы на свободных реках» (глава VII, написанная Н. И. Маккавеевым и Н. А. Ржаницыным), а также и сборник «Русловые процессы», изд. АН СССР, статьи К. И. Россинского, И. А. Кузьмина и Н. С. Шарашкиной.

Прирусловые пески (обычно побочни) после половодья заметно изменяются, так как их поверхностные слои в половодье приходят в движение.

Пойма является малоподвижным элементом долины реки. Ее поверхность обычно покрыта лугами, кустарником или даже лесом.

Иногда на пойме у самого коренного берега имеется полоса озер и болот. Пойма обычно бывает отделена от прирусловых песков довольно крутым уступом—яром. Там, где прирусловых песков нет, меженное русло непосредственно проходит вдоль яра.

Рис. 12. Поперечный разрез речной долины: *1* — наиболее высокий уровень; *2* — средневысокий весенний уровень; *3* — среднеизкий уровень; *4* — наинизший уровень; *5* — высокая пойма; *6* — яр; *7* — низкая пойма

Пойма по длине реки имеет различную ширину. Долина любой реки состоит из чередующихся сужений и расширений. В пределах долины река, последовательно подходя то к одному, то к другому коренному берегу, разделяет пойму на изолированные массивы длиной на крупных реках до нескольких десятков километров.

В верховой части такого массива обычно наблюдается размыв берега и отступление его вниз по течению, а в низовой части — аккумуляция и наращивание.

Рельеф поймы характерен тем, что продольный уклон ее поверхности больше, чем уклон поверхности реки. Поэтому высота яра в верхней части пойменного массива обычно равна нескольким метрам, а в нижней части яр почти отсутствует и отметка поймы близка к меженному уровню. Поперечный уклон поймы направлен от яра в сторону коренного берега.

Такой рельеф поймы создается в результате деятельности весеннего потока, когда часть продуктов размыва яров поступает на пойму и откладывается в непосредственной близости от берега.

На пойме меандрирующих рек наглядно видны остатки ранее спрямленных и отмерших излучин (рис. 13) в то время, как пойма рек, периодически расширяющихся, обычно характерна наличием продольно расположенных отмерших проток (рис. 14).

Между меженным руслом и поймой происходят следующие процессы. С нарастанием весеннего паводка начинается перелив воды из русла в пойму, причем из-за большого уклона поверхности поймы ее емкости нередко заполняются водой, вначале с низовой стороны, вследствие чего на пойме в это время возникают обратные течения. В этот период на пойму поступает много наносов. Когда уровень воды в реке начинает снижаться, происходит обратный слив воды из поймы в главное русло. Как

показали исследования ЦНИИЭВТа, указанные процессы оказывают большое влияние на формирование речного русла и режим перекатов особенно в меандрирующем русле.

Рис. 13. Пойма меандрирующей реки

В высокое половодье в протоках, проходящих через шейку излучин, образуется быстрое течение. Вследствие резкого отвлечения части расхода воды на пойму, транспортирующая способность потока в основном русле убывает, вследствие чего на прямых вставках между излучинами нередко образуются перекаты

Рис. 14. Пойма реки с периодически расширяющимся руслом

(см. рис. 9). Н. И. Маккавеев указывает на следующие характерные особенности руслового процесса при различных русловых типах пойм.

1. Поток течет в прямолинейном русле, имеющем двустороннюю пойму постоянной ширины и высоты.. При подъеме уровней

вода после затопления бровок начинает поступать из русла на пойму, постепенно заполняя всю пойменную емкость (рис. 15, *а*). При этом отток воды будет симметричным по отношению к оси потока и вызовет образование расходящихся поверхностных течений, которые могут вызвать у крутых обрывистых берегов циркуляции с донными, сходящимися к оси потока течениями и, как следствие, занос главного русла в паводок.

Рис. 15. Поперечные сечения речного потока на участке с двусторонней поймой

На спаде половодья происходит слив воды из поймы в коренное русло. Рассматривая его как движение воды через водослив с широким порогом в зависимости от соотношения глубин воды на пойме и в русле, Н. И. Маккавеев обнаружил два возможных гидравлических режима—поверхностный и донный.

При большой глубине на пойме создается поверхностный режим (рис. 15, *б*) и, как следствие, направление внутренних течений, способствующее размыву фарватера; при малой глубине — донный режим и соответствующие ему внутренние течения (рис. 15, *в*), способствующие отложению наносов по оси русла.

Рис. 16. Нессиметричное расположение поймы

2. Русло реки также прямолинейное, но с несимметричными правобережным и левобережным пойменными массивами (рис. 16). В этом случае через правый берег происходит слив осветленной воды с поймы, а левобережная пойма принимает воду из русла, т. е. через левый берег происходит отток воды на пойму.

Гидравлический режим левобережного пойменного потока аналогичен рассмотренному выше режиму на подъеме половодья (см. рис. 15, *а*), а режим правобережного потока аналогичен режиму на спаде паводка (рис. 15, *б* и *в*) и, следовательно, он будет зависеть от соотношения глубин на пойме и в русле.

При малых глубинах на правобережной пойме будет иметь место донное пересечение двух потоков, обусловливающее направление донных течений в сторону низовой поймы. При больших глубинах — поверхностное пересечение, когда пойменный поток, пересекая русловой поток на поверхности последнего, со-

здает (при достаточно крутых берегах) водоворотную зону в придонной области.

В этом случае определяющим становится уже не русловой поток, а пойменный, и меженное русло играет ту же роль, что и прорезь, протрассированная наискось русла. На таких участках главное русло сильно заносится в паводок.

3. Русло представляет излучину в пойменных берегах (рис. 17). При значительном слое воды на пойме в паводок основной поток пересекает излучину, двигаясь параллельно коренным берегам. На участке *I* крутой вогнутый берег отклоняет придонные слои жидкости и тем самым возбуждает циркуляционные течения в придонной области, которые еще более усиливаются сливом верхней части вод на пойму. Направление этих циркуляционных течений сохраняется и в межень. На этом участке в течение всего года формирование русла идет в направлении размыва вогнутого берега.

Рис. 17. Излучина в пойме

На участке *II*, где руслоформирующая деятельность меженных и паводковых вод различна, происходит общее ухудшение судового хода из-за занесения его оседающими из потока наносами.

Характерной особенностью *III* участка, расположенного за плечом извилины, является образование в период половодья теневой зоны в связи с плохим обтеканием пойменного массива. Здесь происходит затухание циркуляционных течений и оседание наносов.

Таким образом, излучина в пойменных берегах характеризуется тем, что руслоформирующая деятельность потока в половодье и межень способствует поддержанию плесовой лощины вдоль лобовой (по отношению к весеннему потоку) части вогнутого берега.

При расположении на участке нескольких излучин, следующих одна за другой, описанная схема явлений может несколько измениться. В этом случае неизбежно влияние и взаимодействие циркуляционных течений, возбужденных на двух смежных излучинах.

На рассмотренных выше трех характерных участках реки ширина поймы была неизменной.

Ниже рассматриваются участки с изменяющейся шириной поймы.

4. Долина реки сужается вниз по течению (рис. 18, *а*). При подъеме уровня и выходе воды на пойму пропускная способность суженной части долины начинает оказывать все более существенное влияние на поток, создавая подпор в расширенной части русла, достигающей максимума при пике паводка. Следствием подпора является уменьшение транспортирующей способности русла и выпадение наносов как в русле, так и на пойме.

5. Долина расширяется вниз по течению (рис. 18,*б*). При плавном расширении долины происходит постепенное, ограниченное берегами растекание потока, а при резком расширении — свободное растекание потока. Вступая в постепенно расширяющуюся долину, поток, уменьшая скорости течения, снижает свою транспортирующую способность и откладывает наносы.

Рис. 18. Участки с изменяющейся широкой поймой:
*а* — суженная пойма; *б* — расширенная пойма

На общий характер процесса оказывает влияние угол расхождения коренных берегов. Если поток свободно растекается (угол 160°), то струя, вытекающая из узкой долины на широкую пойму, не приобретает устойчивого положения. Как показывает опыт, поток теряет прямое направление и примыкает к одному из ведущих берегов. В этом случае часто вдоль обоих коренных берегов образуются два потока, затрудняющие судоходство.

ГЛАВА II

# АНАЛИЗ РЕЖИМА И ДЕФОРМАЦИЙ ПЕРЕКАТОВ

## § 7 КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕКАТОВ

Для анализа режима и деформаций перекатов в целях разработки мероприятий по улучшению их судоходных условий необходимо прежде всего подразделить перекаты на группы.

Многочисленные попытки классифицировать перекаты не вскрывали существа типичных процессов деформации перекатов и тех причин и условий, которые вызывают деформацию. И. Ф. Попков классифицировал перекаты по морфологическим признакам и в своей классификации правильно заметил отдельные характерные формы перекатов. Однако, если проследить влияние на состояние перекатов фактора времени, то мы увидим, что разные типы перекатов, по классификации И. Ф. Попкова, являются различными формами одного и того же переката, но на различных стадиях его развития.

Различные периоды формирования переката на пойменном участке с подвижным ложем, рассматриваемые ниже, как раз соответствуют различным типам перекатов по классификации И. Ф. Попкова. Так, первый период формирования переката отвечает характеристике перекатов I типа, называемых И. Ф. Попковым перевалами. Состояние переката после отторжения нижнего побочня (V период формирования переката) совпадает с описанием V типа переката у острова.

Классификация перекатов, которую дал Н. И. Маккавеев, правильно отражает влияние форм долины реки на деформацию перекатов, но не учитывает различные типы деформаций перекатов в зависимости от степени устойчивости рек.

С этой точки зрения, более удачной является генетическая классификация перекатов судоходных рек по причинам их образования, предложенная К. И. Россинским и И. А. Кузьминым. Однако в этой классификации недостаточно четко отражено влияние на деформацию перекатов форм русла (коренных берегов и поймы), которые приняты за основу в классификации Н. И. Маккавеева.

При составлении помещенной ниже классификации перекатов автор принял за основу генетическую классификацию Россинского и Кузьмина с добавлением к ней перекатов, образующихся на участках блуждающего русла. Каждый тип переката рассматривается раздельно в условиях, когда он расположен на участке реки с двусторонней или односторонней поймой, а также на беспойменных участках с преобладанием глубинной эрозии (как это делает Н. И. Маккавеев) Отдельно выделены перекаты на участках сужения и расширения поймы.

С нашей точки зрения, использование и объединение принципов, заложенных в трех классификациях, позволяет наиболее полно вскрыть все характерные особенности развития перекатных форм.

Предлагаемая классификация предусматривает девять типов перекатов.

I тип — перекаты, расположенные на прямолинейных или слабокриволинейных участках равнинных рек, с руслом, деформирующимся путем периодического расширения. Этот тип имеет три разновидности:

IА — перекаты на участке с двусторонней поймой;

IБ — перекаты на участке с односторонней поймой с прямолинейным или вогнутым коренным берегом;

IВ — перекаты на участке без поймы или со слаборазвитой поймой высокого уровня, редко затопляемой паводками.

Перекаты первой разновидности наиболее часто встречаются на наших равнинных реках с песчаным руслом. Располагаются они как в одиночку (рис. 19, *а*), так и группами между побочнями, образовавшимися в шахматном порядке у противоположных берегов (рис. 19, *б*).

Характерная особенность перекатов второй разновидности (рис. 19, *в*) состоит в том, что у них происходит односторонний размыв берегов и побочни растут неодинаково, побочень, расположенный у неразмываемого берега, растет значительно медленнее, чем побочень противоположного, размываемого берега, В ряде случаев происходит самоотторжение побочня, расположенного у неразмываемого берега.

На перекатах этой разновидности, расположенных на крупных реках, у вогнутых или правых прямолинейных коренных берегов, под действием центробежных сил, или сил Кориолиса, развиваются устойчивые односторонние поперечные циркуляционные течения. Они способствуют углублению перекатов, но полностью справиться с надвигающимися сверху массами песка не в состоянии.

Такие перекаты встречаются значительно реже, чем предыдущие.

Они обычно не возникают непосредственно на данном участке реки, а перемещаются сюда с расположенных выше участков с двусторонней поймой.

На перекатах третьей разновидности (рис. 19, *г*) вследствие плохой размываемости берегов и, следовательно, отсутствия перенасыщения потока наносами побочни не растут так сильно, как на перекатах пойменных участков, и не могут оказать значительного влияния на размыв противоположного берега. Поэ-

Рис. 19. Перекаты I типа

тому гипертрофия русла и искривление судового хода, как это бывает у перекатов первой разновидности, в данном случае не происходит и не наблюдается периодическое отторжение нижнего побочня. Перекаты этой разновидности имеют достаточно пологий судовой ход, затонская часть и побочни развиты слабо. Они характеризуются относительной устойчивостью рельефа и постепенным, весьма медленным перемещением всего переката вниз по течению.

II тип — перекаты, возникающие вследствие местного изгиба в плане одного из берегов у выходов весенних проток, у выступов берегов и т. д. (рис. 20).

Рис. 20. Перекат II типа

Встречаются такие перекаты на реках с руслом, деформирующимся путем периодического расширения. Они образуются возле ухвостья острова, расположенного в месте впадения в главное русло протоки, работающей только в паводок, или возникающего при отторжении общего побочня у двух соединенных перекатов.

Рис. 21. Перекат III типа

Рис. 22. Перекат IV типа

Процесс деформаций перекатов II типа заключается в развитии кос.

III тип — перекаты, расположенные в местах расширения или сужения поймы (рис. 21). На формирование этих перекатов большое влияние оказывает подпор от расположенного ниже сужения долины, или растекание речного потока при расширении поймы. Режим заметно отличается от режима перекатов в районах двусторонней или односторонней поймы.

IV тип — перекаты в районе впадения притоков (рис. 22). Он имеет две разновидности:

IVА — перекат при слиянии двух рек примерно одинаковой величины;

IVБ — перекат при впадении в реку относительно меньшего притока. Режим этого типа перекатов очень сложен, так как зависит от соотношения амплитуд уровней в главной реке и притоке, сроков половодий, мутности и гидравлической крупности наносов и т. д.

V тип — перекаты-россыпи (рис. 23), сложенные целиком из песчаных грунтов или имеющие под песком неразмываемую подстилку.

Рис. 23. Перекат V типа

Формы россыпей весьма разнообразны и случайны, в них не наблюдается той правильности, которая свойственна перекатам других типов.

Рис. 24. Перекат VI типа

VI тип — перекаты на участках раздвоенного русла у относительно устойчивых не блуждающих рек (рис. 24) имеют специфический режим, несмотря на одинаковые в ряде случаев с другими типами перекатов морфологические формы.

VII тип — перекаты, образующиеся вследствие плохой местной обтекаемости русла, срывов течения и завихрений (рис. 25). Такие срывы течений и завихрения возникают в районах высыпок из оврагов и балок, за выдающимися в реку мысами, печинами, неудачно построенными выправительными сооружениями. Перекаты этого типа относительно быстро размываются рекой, как только ликвидирована причина их возникновения.

Рис. 25. Перекат VII типа

VIII тип — перекаты, образующиеся в меандрирующем русле (рис. 26). Они разделяются на четыре разновидности:

VIIIА — перекаты в пойменных берегах (рис. 26,*а*) на переходных прямых участках между двумя кривыми обратной кривизны (в меандрах);

VIIIБ — перекаты, расположенные в излучине с одинаковой кривизной (рис. 26,*б*);

VIIIВ — перекаты, в излучине возле коренного берега (рис. 26,*в*);

Рис. 26. Перекаты VIII типа

VIIIГ — перекаты на участках с пологими извилинами.

IX тип — перекаты на участках рек с блуждающим руслом (рис. 27), имеющие три разновидности:

IXА — перекаты в начале судоходного рукава;

IXБ — перекаты в середине судоходного рукава;

IXВ — перекаты на выходе из судоходного рукава.

Рис. 27. Перекат IX типа

Кроме характера участка русла и поймы как основного фактора классификации перекатов, на режим их влияет геологическое строение речной долины. Поэтому, помимо разделения на типы, перекаты делятся еще на следующие четыре группы в зависимости от слагающего их материала:

I группа — песчаные перекаты;

II группа — песчано-гравелистые перекаты;

III группа — перекаты с валом, сложенным из песка с подстилающими тяжелыми грунтами;

IV группа — перекаты, вал которых сложен из трудноразмываемых грунтов.

## § 8. ПЕРЕКАТЫ НА ПОЙМЕННЫХ УЧАСТКАХ РАВНИННЫХ РЕК (ТИП IА)

На участках рек с широко развитой поймой, песчаным дном и берегами, не меандрирующих и не блуждающих, а развивающихся по принципу периодического расширения русла, перекаты

встречаются наиболее часто и представляют серьезные затруднения для судоходства. В разные периоды своего развития эти перекаты имеют разные морфологические формы и поэтому с первого взгляда кажется, что между ними нет ничего общего. Однако при подробном изучении можно установить, что это один и тот же тип переката, но только в разные периоды формирования.

Описание режима и деформаций следует начать с наиболее простой разновидности I типа перекатов — одиночного переката (разновидности IA), расположенного на участке с двусторонней поймой (см. рис. 19, *а*).

Рис. 28. Сезонные деформации переката I типа:

*а* — в период паводка; *б* — на спаде паводка; *в* — поперечный слив в затонскую часть

В течение года перекат имеет сезонные деформации, показанные на рис. 28, заимствованном из работ проф. Л. И. Кустова.

В период паводка на пойменных участках, вследствие расширения русла при выходе потока из меженных берегов, удельные расходы воды уменьшаются и замедляются скорости течения. Это явление служит причиной отложения наносов на перекате. Так как поток движется параллельно берегам, через побочни, и никаких поперечных течений в районе переката не наблюдается, интенсивное отложение наносов происходит на корыте переката, его верхнем побочне и в затонской части. Чем выше паводок, тем интенсивнее происходит этот процесс.

Величина намыва на площади седловины переката не одинакова. Представляя гребень переката, как косой водослив, нужно отметить, что величина весеннего намыва дна на перекате уменьшается вниз по течению, т. е. намыв больше в районе верхнего побочня и меньше в районе нижнего побочня.

На спаде паводка дно переката начинает размываться, а скопившиеся на перекате наносы перемещаются в лежащий ниже плесовый участок, где изменение уклонов обычно происходит в обратном порядке, т. е. по мере спада паводка уклоны в плесе уменьшаются.

С убылью воды и уменьшением глубин седловина переката по сравнению с плесовыми лощинами в значительно большей степени увеличивает сопротивление движению воды. Вследствие

этого гребень переката подпирает верхнюю плесовую лощину, в которой создается поперечный уклон в затонскую часть переката через затопленную часть верхнего побочня, вызывающий перелив поверхностных слоев потока из верхней плесовой лощины в затонскую часть.

По мере понижения уровня, район местных интенсивных переливов воды перемещается по косе вверх, уклоняясь все более и более от весеннего направления и создавая веерообразное течение на перекате.

При среднемеженных уровнях воды область интенсивных переливов сосредоточивается в одном месте и часто происходит промыв из верхней плесовой лощины через верхний побочень переката в его затонскую часть. Одновременно происходит ухудшение основного судового хода на перекате.

Размеры промыва через верхний побочень зависят от емкости затонской части и мощности самого побочня, а также от уровня воды в межень. При высокой межени сливы незначительны, при низкой более интенсивны.

В ряде случаев, в зависимости от развития отдельных морфологических частей переката, промывы верхнего побочня переката могут быть настолько интенсивны, что через них проходит большая часть меженного расхода воды.

Удобный и устойчивый в межень судовой ход через верхний побочень создается только в том случае, если затонская часть имеет большую емкость, а побочень относительно невелик и невысок. Судовые ходы через верхний побочень, сохраняясь неплохо в межень, обычно полностью заносятся следующим весенним паводком.

Описанный цикл сезонных деформаций переката повторяется ежегодно с разной интенсивностью в зависимости от величины половодья и высоты меженных уровней воды. В годы с высокими паводками и при высокой межени лучше сохраняются пологие судовые хода через нижний побочень, в годы с низкими паводками и при низкой межени сильнее развиваются крутые хода через верхний побочень.

Кроме описанных выше сезонных деформаций, происходящих в течение годового цикла, в многолетнем разрезе также происходят определенные деформации, носящие периодический характер. Они показаны на рис. 29.

Перекат, изображенный на этом рисунке, расположен в прямолинейном или слабо криволинейном русле с двусторонней поймой. Побочни переката слабо развиты, даже в меженный период не обсыхают (I период).

В таком состоянии перекаты в меженный период не представляют значительных затруднений для судоходства, так как судовой ход на них плавный, а корыто переката короткое. Сезонные деформации при таком состоянии переката также относительно невелики, вредное влияние затонской части, даже в

межень, почти не ощущается. Однако на реках со значительным количеством наносов и размываемыми берегами ежегодное отложение наносов на перекате в паводок постепенно из года в год увеличивает размеры побочней (II период).

Рис. 29. Периодические деформации переката I типа

Растущий верхний побочень в большей мере начинает оттеснять поток к противоположному яру. Размыв яра и плесовой лощины, по мере усиленного вытеснения воды побочнем, вследствие прогрессивно возрастающей центробежной силы и усиливающейся поперечной циркуляции становится все более и более интенсивным.

Наносы, поступающие в реку от подмыва и обвала противоположного верхнему побочню яра, перенасыщают речной поток, который, не справляясь с транспортированием наносов, отлагает их в непосредственной близости от размываемого берега, формируя и наращивая второй нижний побочень. Этот процесс роста побочней и размыва яра происходит сначала медленно, но с течением времени усиливается. Развитие идет неравномерно, в годы с высокими паводками более интенсивно и при низком половодье — замедленно.

Постепенно побочни и корыто переката приобретают характерные, явно выраженные формы, начинает зарождаться затонская часть переката (III период).

С этого периода верхний побочень, а часто и все элементы переката начинают перемещаться вниз по реке. При этом верхняя по течению часть корыта переката и верхний по-

бочень перемещаются несколько быстрее низовых частей переката. Это приводит с течением времени к повороту оси корыта переката (из более пологого положения она приходит в более крутое), а также к искривлению судового хода.

Неравномерность перемещения верхней и нижних частей переката вызвана тем, что ухвостье верхнего побочня и затонская часть переката находятся в зоне пониженных скоростей и ослабленных живых сил. Движения наносов здесь нет, а происходит их аккумуляция. В то же время та часть верхнего побочня, которая соприкасается с верхней плесовой лощиной, находится в зоне относительно больших скоростей и более мощных живых сил, размывающих ее и транспортирующих продукты размыва на корыто переката.

Искривлению корыта переката способствуют также описанные выше сезонные периодические деформации элементов переката под влиянием поперечных течений в затонскую часть переката из верхней плесовой лощины через верхнюю косу.

Максимальное искривление получается, когда угол между корытом переката и местным направлением берегов составляет приблизительно 90° (IV период). В этом случае корыто в плане получает вид буквы S и становится неустойчивым и трудно проходимым для судов.

Для поддержания судового хода по корыту переката в таком состоянии несколько раз в навигацию требуется проводить большие землечерпательные работы, в состав которых, кроме углубления дна непосредственно по корыту переката, приходится включать большие подрезки как верхнего, так и нижнего побочня для обеспечения возможности захода судовых составов на перекат.

По мере поворота и искривления корыта переката в корневой части нижнего побочня начинает развиваться выбоина верхней плесовой лощины, а также появляются отдельные ямы в пределах средней части побочня. По направлениям изобат на плане сразу становится заметным понижение отметок корневой части нижнего побочня. Причиной этого явления служит все большее и большее несовпадение оси корыта переката с динамической осью весеннего потока, в результате чего высокие воды, проходя через нижний побочень, размывают его. Начавшийся размыв корневой части нижнего побочня происходит в течение нескольких лет совершенно незаметно. Однако по истечении определенного времени изменения накопляются и приводят к тому, что в течение одного высокого паводка корневая часть побочня бурно размывается, и здесь образуется судовой ход. Старое корыто обмелевает, а отторгнутая часть нижнего побочня постепенно присоединяется к верхнему побочню.

Резкое ухудшение состояния старого судового хода после его искривления само по себе уже говорит о том, что начался процесс, хотя еще слабый, образования на перекате нового корыта.

После отторжений побочня новое корыто переката приобретает прямолинейную, удобную для судоходства форму. Это последний, V период рассматриваемого цикла.

Объем землечерпательных работ на перекате после этого на тот или иной период времени резко сокращается, а иногда землечерпания совершенно не требуется.

В дальнейшем в новом прямолинейном русле, обычно в нижнем его конце, постепенно вновь образуются два побочня, по мере роста которых корыто переката начинает искривляться, и процесс деформаций переката повторяется.

Однако вследствие продолжавшегося перемещения побочней вниз по течению перекат развивается уже на другом месте.

Вышеописанные явления могут не повториться или протекать с некоторыми отступлениями, если геологические и морфологические условия изменяются: в некоторых местах появляются трудноразмываемые грунты, русло подходит к коренным берегам.

На ход русловых переформирований часто влияет ряд факторов, ускоряя, замедляя или изменяя их. Главными факторами, влияющими на режим деформаций на перекате, являются:

1) состав грунтов и степень устойчивости речного русла;
2) гидрологический режим реки;
3) расположение и очертание пойменных и коренных берегов;
4) характер поймы и движение вод по ней в весенний период;
5) состояние вышележащего и нижележащего участков реки;
6) влияние уклонов свободной поверхности потока;
7) влияние боковых емкостей и ряд других, более мелких факторов.

Рассмотрим влияние каждого вышеуказанного фактора в отдельности.

На реках с устойчивым руслом, сложенным из песчано-гравелистых и гравелистых грунтов, передвижение наносов происходит медленнее, чем на реках с песчаными грунтами.

Например, побочни на нижней Каме, сложенные из песчано-гравелистого грунта, имеют удлиненную форму с относительно меньшей шириной и высотой, чем побочни волжских перекатов, сложенных из песчаных грунтов. Направление судового хода на песчано-гравелистых перекатах гораздо положе, чем на перекатах с песчаным грунтом. Это объясняется, в первую очередь, большей устойчивостью русла, медленным и неинтенсивным ходом русловых переформирований. В руслах со значительным содержанием гравия или глины почти не происходит периодическое расширение, и отторжение побочней в них не наблюдается. Перекаты и побочни здесь в течение длительного времени находятся на своих местах и не спускаются вниз по реке. Они

имеют только сезонные изменения, зависящие, главным образом, от величины и длительности паводка и межени.

Высокие и значительные паводки, а также высокая межень развивают и поддерживают судовые ходы в более пологом направлении. Наоборот, низкие паводки и мелководные межени способствуют выработке фарватера с меньшим радиусом закругления.

Анализ деформаций типовых перекатов рек с большой устойчивостью русла, к которым относятся, например, реки Ока и Белая, показывает, что спуск перекатов вниз по течению и периодические отторжения нижних кос или их частей здесь несколько отличаются от подобных процессов на реках с менее устойчивым руслом.

Рис. 30. Лента планов Литвиновского переката

На рис. 30 представлена лента планов Литвиновского переката р. Оки за 1921—1935 гг. Это тот самый перекат, который был принят А. И. Лосиевским и И. Ф. Попковым за образец переката II типа [32].

Здесь происходит также рост верхней косы, но вследствие малого поступления наносов сверху, косы (как верхняя, так и нижняя) не превращаются в относительно высокие и мощные побочни. Пополнение верхней косы наносами приводит к отклонению динамической оси потока к выпуклому берегу и к продвижению верхней плесовой лощины в глубь нижнего побочня с одновременным ростом затонской части переката.

Вследствие малой сопротивляемости нижнего побочня, в данном случае не получается того характерного S-образного поворота русла, который свойствен перекатам I типа на реках с малоустойчивым руслом. Мы описывали выше 4-й период его деформаций. Однако по мере того, как растущая верхняя коса отжимает поток в сторону нижнего побочня, динамическая ось потока, особенно в паводок, приближается к выпуклому берегу, так как на повороте в его сторону создается уклон водной поверхности. Из года в год продвижение верхней плесовой лощины в глубь нижнего побочня усиливается, и наконец в один из

паводков происходит прорыв нижнего побочня и перемещение сюда судового хода.

Отторжение в части нижнего побочня на Литвиновском перекате в 1925 г. привело к полному размыву переката и установлению плавного и глубокого судового хода. И только через 5—7 лет, вследствие дальнейшего роста верхней и нижней кос, ниже старого местоположения переката начал формироваться новый перекат. Процесс его деформаций повторяется.

И. Ф. Попков проанализировал деформации ряда перекатов р. Оки (Нижне-Литвиновский, Нижне-Чудской, Нижне-Копановский, Гаретовский, Нижняя Глинка, Зоринский, Ардабьевский и др.) за 20-летний период и установил, что деформации их отвечают описанной выше закономерности.

По мере врезания верхней плесовой лощины в нижний побочень и удлинения затонской части судовой ход под верхней косой становится неудобен для судоходства и подвергается быстрому заносу.

В целях ускорения процесса отторжения нижнего побочня И. Ф. Попков предлагает трассировать прорези нижнего положения.

Внешним признаком целесообразности и своевременности переноса судового хода в пологое направление с отторжением нижнего побочня может служить продвижение верхней плесовой лощины в корневую часть нижнего побочня до середины его выпуклости. На р. Оке путем отторжения нижнего побочня при указанных условиях ряд перекатов был выведен из числа лимитирующих и переведен в перевалы на относительно длительный период (7—15 лет).

Следует отметить, что веерообразное течение в затонскую часть на этих перекатах не так резко выражено, так как вследствие низких отметок верхнего побочня разница уровней воды на фарватере и в затонской части небольшая.

Прорези через нижний побочень на перекатах этого типа хорошо сохраняются даже без закрытия затонской части, однако и для этих перекатов И. Ф. Попков все же рекомендует свалку грунта укладывать в затонскую часть.

На р. Белой, где песчано-галечный грунт, русловые деформации происходят медленно. Как и на Оке, здесь не образуется мощных верхнего и нижнего побочней и характерного S-образного изгиба судового хода.

На рис. 31 изображен Верхне-Разбойный перекат р. Белой, по морфологии и характеру деформаций сходный с Нижне-Литвиновским перекатом р. Оки.

На этом перекате наблюдается рост и спуск вниз верхнего побочня, искривляющего корыто переката. Процесс образования и развития выбоины в корневой части побочня происходил очень медленно из-за трудноразмываемости грунта. Ускорение этого процесса переформирования переката путем отторжения

нижнего побочня с помощью землечерпания позволило получить пологий и глубокий судовой ход и вывести перекат в число перевалов.

Характерным для перекатов этого типа является слабо развитый верхний побочень и сильнее развитый нижний побочень.

Рис. 31. Планы Верхне-Разбойного переката:
*а* — по съемке 1933 г.; *б* — по съемке 1938 г.

На деформации перекатов влияют многие явления гидрологического режима и в числе их характер прохождения паводков.

В годы с низкими паводками и низким стоянием меженных уровней воды интенсивность процесса периодических деформаций перекатов во многих случаях уменьшается, а в годы с высокими паводками и высокой меженью этот процесс в значительной степени ускоряется.

Влияние коренных берегов на деформации перекатов может быть показано на следующих примерах. Перекат после ряда периодических деформаций значительно спускается вниз по реке и попадает на участок русла, где один берег неразмываемый и незатопляемый. После этого режим переката резко меняется. Вследствие неразмываемости одного берега рост побочня, прижатого к нему, сильно уменьшается, процесс деформации замедляется, становясь почти незаметным, и судоходные качества переката улучшаются.

Иногда наблюдаются случаи постепенного улучшения переката и превращения его в перевал после того, как перекат под действием сил Кориолиса или вследствие центробежных сил переместится на участок, где создаются циркуляционные тече-

ния, способствующие размыву нижнего побочня переката и замедляющие спуск верхнего побочня.

Нередки случаи, когда сила Кориолисова ускорения, центробежные силы и вызванная ими односторонняя поперечная циркуляция недостаточны для полного самоуглубления переката. Поэтому встречаются перекаты даже у вогнутых коренных берегов, особенно на средних и малых реках, где указанные силы относительно невелики.

Степень улучшения переката при подходе его к коренному берегу может быть различна в зависимости от ряда гидроморфологических факторов.

В местах сужения долины реки и подхода берегов близко друг к другу перекаты не только замедляют свои деформации, но в большинстве случаев быстро размываются и прекращают свое существование. Это объясняется, во-первых, отсутствием подмыва и обвала берегов и, во-вторых, сужением русла в результате чего в паводок в этом месте не происходит отложений.

Очертание берега, вдоль которого располагается русло на подходе к перекату, является одним из элементов, учитываемых при выборе направления судового хода. Судовой ход устойчив, если он идет вдоль ведущего берега, независимо от того, является ли этот берег коренным или пойменным.

Местная выпуклость ведущего берега отрицательно влияет на развитие вдоль него судового хода, а поэтому при выполнении комплекса мероприятий по перенесению к данному берегу судового хода следует смягчить это влияние. Наличие выше переката у противоположного берега вдающегося в русло плеча может оказать положительное влияние на русловые процессы, так как часть струй потока будет отклоняться к стрежню и создадутся условия для отложения ниже плеча наносов.

Характер и форма поймы также влияют на ход деформаций перекатов.

Общее направление пойменных озер, стариц, высота поймы с учетом расположения коренных берегов и в зависимости от высоты паводков по-разному влияют на заносимость переката.

Растекание весенних вод из русла в пойму или, наоборот, слив их из поймы в русло вызывают в большинстве случаев ослабление деятельности потока на перекате, оседание наносов и образование кос у того из меженных берегов, у которого происходит растекание или слив весенних вод. В тех случаях, когда направления потока главного русла и поймы близки друг к другу, заносимость переката в весенний период, как правило, значительно меньше.

При проектировании мероприятий по улучшению судоходных условий на перекатах необходимо иметь данные о высоте и рельефе поймы, составе слагающих ее грунтов, направлении пойменных течений и т. д.

Наличие выше рассматриваемого переката глубокого и большого по длине плёса, как правило, замедляет деформации переката из-за уменьшения притока наносов и способствует поддержанию прямолинейных судовых ходов. Наоборот, наличие выше переката сильно размываемого берега и поступление на перекат большого количества наносов ускоряет процесс нарастания побочней. На деформации рассматриваемого переката в сильной степени влияет изменение гидроморфологии смежных перекатов, расположенных выше и ниже.

Обмеление и искривление лежащего ниже переката вследствие подпора улучшает состояние рассматриваемого переката, судовой ход на котором становится более пологим и глубоким. Разработка же нижележащего переката землечерпанием часто приводит к обмелению рассматриваемого переката и искривлению его корыта из-за увеличения уклонов и, как следствие, усиленного поступления наносов на перекат из верхнего плёса.

## § 9. СЛОЖНЫЕ ПЕРЕКАТЫ

К сложным перекатам отнесены групповые перекаты разновидностей IА и IБ.

Чаще всего встречаются два переката между тремя побочнями, расположенными в шахматном порядке, причем нижний побочень верхнего переката служит верхним побочнем нижнего переката. Однако можно встретить три переката и более, расположенных один за другим. На больших реках такая непрерывная цепь перекатов тянется иногда на 10—20 *км*.

При изучении сложных перекатов обращают на себя внимание следующие явления.

В меженный период гребень нижнего переката подпирает течение на вышележащих перекатах. При углублении землечерпанием нижнего переката создаваемый им подпор уменьшается, и в результате вышележащие перекаты за счет спуска воды быстро обмелевают.

Состояние верхнего и нижнего перекатов в разные периоды времени различное. Когда верхний перекат находится в хорошем состоянии и имеет пологое направление судового хода, нижний перекат обычно имеет круто изогнутое корыто и затруднителен для судоходства (рис. 32,*а*), и наоборот (рис. 32,*б*).

Это явление отмечает Н. И. Маккавеев в своей книге «Русловой режим рек и трассирование прорези».

При сильном размыве правого берега плесового участка, лежащего выше верхнего переката, происходит рост правобережного (нижнего) побочня на верхнем перекате. Это, в свою очередь, приводит к размыву левобережного яра плесовой лощины между верхним и следующим перекатом и росту нижележащего левобережного побочня. Таким образом нижележащий перекат проходит те же фазы деформаций, которые указаны выше для одиночного переката.

При относительно небольшом пополнении наносами верхнего левобережного побочня движение его вниз по реке почти незаметно, в то время как нижний побочень спускается вниз довольно быстро.

В результате верхний перекат в паводок имеет относительно пологое направление, оседание наносов на нем незначительное, и глубины на спаде и в межень хорошие.

С течением времени, после того, как побочни нижнего переката чрезмерно вырастут и корыто переката получит S-образную форму, происходит отторжение части нижнего побочня, и судовой ход спрямляется. В связи с этим подпор, создаваемый нижним перекатом, уменьшается, и на верхнем перекате увеличивается уклон.

В весенний период основная масса наносов начинает откладываться уже на верхнем перекате и он интенсивно формируется. При этом, чем круче и затруднительней для судоходства становится верхний перекат, тем больше углубляется нижний перекат.

После искривления верхнего переката, на нем также происходит отторжение части нижнего побочня, вследствие чего перекат коренным образом улучшается. Судовой ход на нем становится более пологим, с достаточными глубинами и не требует землечерпания. После улучшения состояния верхнего переката происходит опять ухудшение нижнего переката и т. д.

Рис. 32. Взаимная связь состояния верхнего и нижнего перекатов

Благодаря периодическим процессам отторжения нижних побочней верхнего и нижнего перекатов вся группа перекатов в целом вместе с побочнями перемещается вниз по течению реки.

Если на участке не два, а более перекатов, то деформации средних перекатов также подчиняются описанным выше явлениям, но менее ярко выражены. Лучшее состояние глубин на участке в целом наблюдается в тех случаях, когда корыта всех

перекатов имеют приблизительно одинаковую ориентировку по отношению к общему направлению русла.

В случае, если центральный побочень придвинется к коренному берегу (рис. 33,*а*), указанный выше порядок деформаций может измениться, особенно при продолжающемся интенсивном росте верхнего побочня и наползании его на верхний перекат. Тогда происходит непропорциональное развитие побочней.

Рис. 33. Деформации сложного переката, образованного побочнем у коренного берега

Правый неразмываемый берег не дает материала для роста правого побочня, а весенний поток, проходя вдоль коренного берега, размывает корневую часть правого побочня, образуя в ней побочневую протоку. Относительно сильное пополнение наносами верхнего левобережного побочня приводит к созданию перемычки на судовом ходу и обмелению верхнего переката (рис. 33,*б*).

Постепенное наползание верхнего левого побочня на перекат увеличивает сопротивление русла. В то же время после каждого паводка наблюдается медленное, но неизменное развитие побочневой протоки. Это продолжается до того момента, когда в один из больших весенних паводков побочневая протока полностью отторгнет побочень от правого берега и станет возможным перенести судовой ход во вновь образованное русло в обход двух или более перекатов (рис. 33, *в*).

Старый судовой ход после этого обычно быстро обмелевает в верхней части. Новый судовой ход, прямой и глубокий, благодаря тому, что проходит вдоль незатопляемого и неразмываемого берега, бывает обычно устойчив в течение длительного времени. Однако иногда с течением времени, в нижней части нового, спрямленного хода происходит частичное обмеление за счет вытягивания косы от ухвостья отторгнутого побочня. Это явление наблюдается в тех случаях, когда на выходе нового судового хода имеется большая емкость, оставшаяся от старого судового хода. При сильном росте ухвостья отторгнутого побочня у коренного берега с течением времени может сформироваться новый побочень, а у его приверха и ухвостья — два новых перекатa, которые вновь будут подвергаться описанным выше деформациям, если не изменятся гидрологические условия.

## § 10. ПЕРЕКАТЫ НА УЧАСТКАХ РЕК С ОДНОСТОРОННЕЙ ПОЙМОЙ (ТИП 1Б)

а) Перекаты, расположенные ниже выпуклости ведущего коренного берега.

На участках рек с односторонней поймой в местах, где ведущий берег неразмываемый и не затопляется высокими водами, обычно расположены плесы, а перекаты встречаются только в местах перегиба коренного берега, ниже вершины его выпуклости (рис. 34). В этом месте русло отходит от коренного берега и за его плечом образуется побочень или пойменный остров, отделенный от коренного берега чаще всего мелкой протокой. В ухвостье побочня или пойменного массива, где русло опять

Рис. 34. Перекат ниже выпуклости коренного берега

подходит к коренному берегу, также может образоваться перекат.

Примерами перекатов этого типа на участке Волги от Горького до Казани являются перекаты: Зименско-Безводнинские, Кадницкий, Татинско-Юркинские, Поздняковские, Сумские, Мумарихинско-Сенной и др.

Верхний из перекатов рассматриваемой разновидности находится на одном и том же месте и только испытывает сезонные деформации в течение навигации, описанные выше, в § 11, и периодические изменения в зависимости от водности паводка и межени. В многоводные годы судовой ход обычно формируется по пологому направлению, а в маловодные годы по крутому направлению.

Положение нижнего побочня переката за плечом коренного берега обусловливает постоянство его расположения и сохранность от полного или частичного отторжения. Нижний перекат, расположенный у ухвостья побочня или пойменного острова, кроме сезонных деформаций, так же, как перекат в двусторонней пойме (тип IA), претерпевает в многолетнем разрезе деформации, заключающиеся в периодическом отторжении нижнего побочня и перенесении судового хода в нижнее положение. В то же время верхний побочень, опускаясь по реке, удлиняет затонскую часть, отклоняя фарватер от коренного берега.

б) Перекаты на участках русла с вогнутым коренным берегом.

На участках рек с малой кривизной (радиус кривизны больше трехкратной ширины русла), в отличие от прямолинейных участков, русло обычно имеет плесовый характер. Циркуляционное движение воды в изогнутом русле подчиняется общему искривлению потока и систематически отводит наносы к выпуклому берегу. Это придает поперечному профилю русла асимметричную форму. Под вогнутым берегом размещается глубокая часть русла, а под выпуклым непрерывно тянется прибрежная мель. Перекаты на таких участках образуются лишь в верхней части кривой, на входе потока в изогнутое русло, и ниже ее, там, где искривленный участок сопрягается с прямолинейным.

На крупных реках, в местах прижима потока к правому коренному берегу, можно встретить плесы на участках прямолинейного русла. Они возникают под воздействием односторонне направленных циркуляционных течений, вызываемых ускорениями Кориолиса и преобладающими ветрами.

В рассматриваемых условиях перекаты являются аномальным явлением. Они формируются в месте сопряжения плеса с расположенными выше перекатными участками реки или, сформировавшись выше плеса, в процессе спуска вниз по течению вторгаются в его пределы. Недостаточная мощность циркуляционных течений, возбуждаемых ускорениями Кориолиса, не в состоянии противодействовать этому вторжению. Реже пе-

рекаты формируются в самом плесе, обычно в местах образования мощных кос, вызванных выносами из близлежащих балок, ручьев, речек или проток. В этих условиях обычно формируются двойные перекаты—у приверха и ухвостья побочня, примыкающего к вогнутому берегу (рис. 35). Лабораторные и натурные исследования такого типа перекатов показали, что в период паводка, когда побочень затоплен, основной поток идет вдоль вогнутого коренного берега и здесь создаются устойчивые поперечные циркуляционные течения, отметающие наносы в сторону меженного судового хода. Поэтому в весенний период оба переката, расположенные у приверха и у ухвостья побочня вместе с разделяющей их плесовой лощиной, сильно заносятся. Заносу их способствует также ослабление скоростей течения в меженном русле вследствие чрезмерно расширенного живого сечения и подпорного влияния нижележащего вогнутого берега.

Рис. 35. Перекаты у побочня вогнутого берега

На спаде паводка по мере обсыхания побочня, расход воды и скорости течения в меженном русле относительно увеличиваются, начинается смыв наносов, отложившихся в весенний период. Но так как размыв значительно отстает от падения уровня воды, перекаты начинают лимитировать судоходство еще при средней межени. Продукты размыва верхнего переката откладываются на нижнем перекате, ухудшая его состояние и частично в плесовой лощине между перекатами, где в ряде случаев к меженному периоду создается еще один дополнительный перекат. Особо неустойчивое положение с глубинами обычно бывает на нижнем перекате. Почти ежегодно приходится разрабатывать землечерпанием как нижний, так и верхний перекаты. Перекаты двигаются вместе с побочнем вниз по течению. В случае наличия достаточной поперечной циркуляции иногда происходит постепенный размыв и уменьшение побочня. Побочень «тает» обычно с верхней своей части, случаи самоотторжения побочня редки.

## § 11. ПЕРЕКАТЫ НА УЧАСТКАХ РЕКИ СО СЛАБОРАЗВИТОЙ ПОЙМОЙ[1] (ТИП IВ)

На беспойменных участках реки или на участках со слаборазвитой поймой высокого уровня перекаты встречаются гораздо реже, чем на пойменных участках. Здесь они менее затруднительны для судоходства и более устойчивы.

Перекаты этой разновидности встречаются на участках с преобладающей глубинной эрозией, располагаются как на поворотах русла, так и на прямых отрезках и имеют самые разнообразные формы. Преобладающая часть имеет прямолинейный судовой ход без затонской части или со слаборазвитой затонной (рис. 36).

Рис .36. Перекат на участке со слаборазвитой поймой

Побочни на перекатах слабо выражены, и даже в межень они почти не обсыхают. Часто встречаются одиночные побочни, имеющие значительную ширину и оттесняющие судовой ход к одному берегу. Подвалья перекатов, как правило, пологие; крутые подвалья встречаются редко. Перекаты отличаются устойчивостью местоположения и рельефа. Периодические и сезонные деформации на них весьма незначительные, судовой ход обычно устойчив и сохраняет свое положение в течение ряда навигаций. Намыв гребня переката в паводок обычно весьма небольшой, поэтому отметка его дна остается почти постоянной, изменяясь лишь на 20—25 *см*.

Причинами устойчивости перекатов этого типа являются: во-первых, наличие у многих из них в основании уступов коренного дна, на которых скопляются переносимые рекой наносы, во-вторых, слаборазвитость и высокие отметки поймы на этих участках, вследствие чего направление речного потока при раз-

---

[1] Описание переката этой разновидности заимствовано из книги Н. И. Маккавеева «Русловой режим рек и трассирование прорезей».

личных уровнях воды остается почти постоянным; в-третьих, своеобразный режим уклонов в районах глубинной эрозии, при котором на перекатах при паводке уклоны возрастают, а в межень убывают. Из-за этого в паводок не происходит больших отложений наносов на перекате, как это имеет место на пойменных участках реки. В меженный период вследствие малых уклонов формирующая деятельность потока весьма слаба и деформация рельефа переката также незначительна.

## § 12. ПЕРЕКАТЫ В РАЙОНЕ ВПАДЕНИЯ ВЕСЕННЕЙ ПРОТОКИ (II ТИП)

На участках рек с односторонней поймой нередко встречаются косы, вытянутые под углом 25—35° от пойменного к коренному берегу. В ряде случаев эти косы, сужая судовой ход, проходящий под коренным берегом или полностью его перекрывая и образуя перекат (см. рис. 20), затрудняют судоходство. Такие косы обычно возникают от стрелки в месте впадения в реку протоки, работающей в половодье. Подпор, образующийся весной при слиянии двух потоков, способствует отложению наносов и образованию косы. Величина ее зависит от мощности побочневой протоки и от обилия наносов в этом месте реки. При средней и низкой межени весенняя протока не работает или работает слабо, и ее устье в это время представляет собой обычную затонскую часть переката.

В весенний период основной расход воды проходит в центральной части русла параллельно коренному берегу. Ближе к пойменному берегу имеется некоторый минимум скоростей течения и расхода, а еще дальше, вдоль самого пойменного берега, движется поток, поступающий из протоки. На спаде паводка расход в протоке уменьшается быстрее, чем в главном русле, и чем он быстрее уменьшается, тем сильнее создаются поперечные течения поверхностных струй в затонскую часть переката. По мере падения уровня воды течения, направленные из главного русла в затонскую часть, постепенно меняют направления, перемещаясь вверх, ближе к основанию косы.

При среднемеженных уровнях воды, когда падение их замедляется под влиянием сосредоточенных в одном месте перетоков, в верхней части косы нередко образуются прораны, вплоть до создания иногда здесь второго судового хода. Таким образом, на перекате рассматриваемого типа всегда в той или иной мере выражены два направления динамический оси потока: первое — вдоль коренного берега и второе — под ухвостьем косы. Соответственно и судовой ход может быть затрассирован по двум направлениям: по прямому, вдоль коренного берега, или через косу от коренного к пойменному берегу.

В период высоких весенних паводков обычно размывается прямой ход вдоль коренного берега, при многоводной межени

он хорошо сохраняется. При низкой межени этот ход в естественных условиях обмелевает и развивается крутой ход через косу.

Кроме описанных сезонных деформаций в многолетнем разрезе, перекат вместе со всей косой постепенно спускается вниз по течению.

При выборе направления судовой трассы через описанный перекат желательно придерживаться коренного берега, так как у него благодаря действующим циркуляционным течениям насыщенность воды наносами относительно малая, и это способствует сохранности прорезей. Однако ограничиваться только этими положениями при выборе направления прорези нельзя. Необходимо иметь в виду, что в ряде случаев при низкой межени для создания устойчивых глубин на длинном прямом ходу вдоль коренного берега требуется большой объем меженных подчисток землечерпанием, особенно если горный берег имеет в месте примыкания косы некоторую выпуклость, нарушающую устойчивые циркуляционные течения, отметающие наносы к пойменному берегу.

Пример влияния морфологии переката на его состояние при разных уровнях воды приведен на рис. 37, где изображен Красновидовский перекат р. Волги. В 1940—1941 гг. на перекате поддерживался прямой судовой ход вдоль правого берега, а извлеченный землечерпанием грунт укладывался в затонскую часть переката, где было установлено четыре ряда елочных завес (рис. 37, *а*, *б*).

Перекат в это время находился в хорошем состоянии и не требовал крупных и тем более повторных землечерпательных работ.

Из рассмотрения кривых $T=f\ (H)$ для Красновидовского переката за эти годы (рис. 38) можно установить, что в верхней части кривые идут, примерно под углом 45° (глубины уменьшаются пропорционально убыли воды), а в нижней части даже круче, значит, имеется некоторый, хотя и незначительный, размыв корыта переката.

В 1941—1945 гг. левобережная коса пополнялась наносами, поступающими сверху, и спускалась вниз по реке, удлиняя затонскую часть переката (рис. 37, *в*, *г*). Постепенно, по мере удлинения затонской части, елочные завесы, поставленные в 1940 г., перестали работать и на перекат опять стали влиять вредные перетоки поверхностных вод в затонскую часть.

Ухудшению состояния переката, кроме того, способствовала укладка грунта при разработке прорези вдоль правого берега на обе кромки прорези. Отвал грунта увеличивал гидравлические сопротивления на перекате, подпор и перекос водной поверхности в сторону затонской части, что усиливало ее вредное влияние.

Рис. 37. Планы Красновидовского переката по съемке:
*а* — 1940 г.; *б* — 1941 г.; *в* — 1943 г.; *г* — 1945 г.; *д* — 1951 г.

При рассмотрении кривых $T=f\ (H)$ для этого переката за 1943—1945 гг. видно, что они отошли резко влево против 1940—1941 гг. и характер их изменился. В верхней части они по-старому продолжают идти примерно под углом 45°, в средней части становятся более пологими (угол менее 45°), значит, на корыте переката происходит замыв, являющийся следствием перетоков осветленных вод в затонскую часть переката и оседания наносов из придонных слоев потока, проходящих по корыту переката.

Рис. 38. Кривая $T=f(H)$ для Красновидовского переката

В эти годы состояние глубин на перекате очень неустойчиво, в межень требуются повторные подчистки. Заход на перекат судовых составов, особенно снизу, затруднен из-за свальных течений, вызывающих рыскливость барж. На перекате в это время нередко происходили случаи посадки судов на отвалы грунта.

В целях коренного улучшения судоходных условий в 1948 г. вдоль правого берега была выполнена капитальная прорезь, шириной в 1,5 раза больше гарантийной и с переуглублением. Извлеченный грунт был уложен в виде сплошной дамбы по наи-

большим отметкам косы. Это мероприятие, ликвидировавшее подпор на перекате и перекос водной поверхности в сторону затонской части, сразу же сказалось на состоянии глубин судового хода, что видно по кривой $T=f(H)$ за 1948 г.

В последующие 1949—1951 гг. и позднее поддерживалась новая прорезь и подсыпалась дамба на косе. В результате состояние переката значительно улучшилось (рис. 37, *д*), кривые $T=f(H)$ значительно отодвинулись вправо, примерно к кривым 1940—1941 гг., и характер их также изменился. Ликвидация вредного влияния затонской части переката в данном случае коренным образом улучшила состояние переката.

## § 13. ПЕРЕКАТЫ, РАСПОЛОЖЕННЫЕ В МЕСТАХ РАСШИРЕНИЯ ПОЙМЫ (III ТИП)[1]

В местах резкого расширения поймы обычно встречаются очень затруднительные перекаты. Особенностью гидравлического режима участка реки с расширяющейся поймой в половодье является: при плавном расширении долины — постепенное, ограниченное коренными берегами растекание потока, а при резком расширении — свободное растекание потока в массе жидкости.

Если расширение поймы постепенное (5—10°) и коренные берега очерчены плавными линиями, то перекатов на этом участке либо совсем нет, либо они не представляют больших затруднений для судоходства. Трассирование прорезей здесь не вызывает затруднений, и они хорошо сохраняются в течение навигации.

Рис. 39. Перекат в месте расширения поймы

Устойчивости прорези и некоторому саморазмыву ее в межень способствует то обстоятельство, что выше, в пределах горловины долины, расположен обычно глубокий плёс, и поступающие с него при низких уровнях воды мало насыщены наносами.

В случае резкого расширения долины, как правило, образуется перекат или группа перекатов, непосредственно у начала расширения или несколько ниже.

Если расширение долины симметричное, то перекат имеет форму бара (рис. 39).

---

[1] Описание этого типа переката заимствовано из книги Н. И. Маккавеева «Русловой режим рек и трассирование прорезей».

Если же сток вод половодья направлен преимущественно в сторону одного из коренных берегов, то перекат (см. рис. 21) имеет сложную форму и два или три направления стока вод.

Часто непосредственно у начала расширения русло раздваивается и образуются длинные рукава, идущие вдоль обоих коренных берегов долины. Основная причина развития рукавов, протоков и ответвлений на таких участках заключается в том, что динамическая ось потока при резком расширении берегов может испытывать незакономерные отклонения от первоначального направления. Вследствие этого весенний поток может поддержать любое направление трассы, если радиус поворота фарватера не отличается значительно от оптимального радиуса динамической оси потока.

Сезонные деформации переката, показанного на рис. 21, проходят в такой последовательности.

Весенний поток при паводке направляется вдоль высокого правого берега до его поворота. Этому способствуют и оттоки вод в правобережную пойму ниже этого поворота.

По направлению весеннего потока вытягивается правая часть гребня переката и размывается ложбина *А* у правого берега.

Меженное течение следует вдоль коренного берега только до того места, где вогнутость его переходит в выпуклость, а отсюда поворачивает влево, переваливая к левому берегу. При этом происходит размыв ложбины *Б* в верхней части косы переката.

Таким образом, на гребне переката, сформированного в паводок, образуются две ложбины (корыта), а пространства между ними заполняет осередок, обсыхаемый в меженный период. В зависимости от многоводности навигации одно или другое корыто переката улучшается: в маловодные навигации лучше выглядит крутое направление, а в многоводные навигации — пологое.

## § 14. ПЕРЕКАТЫ В РАЙОНЕ ВПАДЕНИЯ ПРИТОКОВ (IV ТИП)

Выше, в § 7, были перечислены факторы, определяющие режим участков русла в районе слияния двух рек (см. рис. 22). Рассмотрим подробнее каждый из них.

1. Соотношение амплитуд уровней определяет общие условия подпора: чем амплитуда уровня у притока больше амплитуды уровней главной реки, тем меньше вероятность его подпора. Проходящий без подпора по устьевому участку пик паводковой волны должен распластаться до уровня воды в главной реке, т. е. создается линия спада. По мере приближения к устью уклоны и скорости растут по закону параболы, что создает благоприятные условия для глубинной эрозии. В таких случаях устье притока обычно сильно углубляется и может стать более

глубоким, чем русло главной реки. Такие типы устья Н. И. Маккавеев называет бесподпорными. Характерными особенностями их являются: малые скорости течения в межень, большая ширина и глубина меженного русла и слабое развитие высокой поймы.

Если амплитуда уровней на главной реке больше, чем на притоке, последний в той или иной фазе половодья испытывает подпор.

В результате подпора в устьевом участке притока оседает много наносов, поэтому дно у него заметно выше, чем дно главной реки. Это в свою очередь сказывается на характере меженного потока, получающего большие уклоны и иногда значительные скорости течения.

Например, при низких уровнях Волги в устьевом участке ее притока — р. Самарки скорости меженного потока настолько сильно увеличиваются, что становится трудно заводить судовые составы в находящуюся в этом месте гавань.

Подобный тип устья является подпорным и наиболее распространен среди наших рек. Он характеризуется в геоморфологическом отношении тем, что высокая пойма имеет значительную ширину; меженные берега крутые, иногда обрывистые; высота их возрастает к устью; меженное русло узкое и расширяется только на участке слияния с главной рекой, где часто можно наблюдать разделение фарватера на рукава.

При рассмотрении вопроса о перекатах в районе впадения притоков надо учитывать масштабы сливающихся рек и количество наносов, которые несет поток. Если приток небольшой, то независимо от того, когда на нем проходит паводок, существенного влияния на главную реку он не окажет. Если приток большой, но слабо насыщен наносами или эти наносы мелких фракций, то при подпоре вод главной реки его воды окажут положительное воздействие на ее перекаты, расположенные ниже места слияния потоков. Если приток насыщен наносами так же, как и главная река, то при подпоре главной реки ее перекаты, расположенные ниже места слияния, получат примерно такое же количество наносов, как и в том случае, когда главная река не была подперта.

Если водность притока больше водности главной реки или насыщение наносами вод притока больше насыщения вод главной реки, то перекаты, расположенные ниже устья притока, будут усиленно питаться наносами. Они будут ухудшаться за счет наносов главной реки, отложившихся при подпоре, и наносов, пришедших в движение с устранением подпора. Это говорит о необходимости учитывать соотношение не только паводковых расходов воды главной реки и притока, но и послепаводковых.

2. Соотношение времени прохождения пика половодья также оказывает значительное влияние на формирование устьевого участка. Если паводок на притоке проходит раньше, чем на

главной реке, то значительная часть наносов из притока выносится за пределы устья и откладывается ниже его в виде побочней и кос.

Такие отложения образует Ока, пик половодья которой проходит в среднем раньше, чем на Волге, вследствие чего она энергично эрозирует собственное устье и пополняет наносами Борский, Никольский и другие перекаты р. Волги.

Рис. 40. Узел слияния потоков

Половодья на притоках, проходящие совместно с половодьем на главной реке или позднее его, содействуют формированию типичных подпорных устьев.

3. Соотношение твердого расхода и гидравлической крупности наносов сливающихся потоков определяет характер формирования русла в этих местах.

В узле слияния потоков возникают три зоны с пониженными уровнями воды, к которым направляются придонные течения. На рис. 40 эти зоны заштрихованы.

Одна из них располагается в месте слияния потоков, где происходит отрыв струй от стрелки *1*. Оседающие здесь наносы наращивают косу, спускающуюся от стрелки.

Ниже слияния благодаря обратному изгибу сливающихся потоков появляются местные депрессии водной поверхности *2* и *3* у берегов основного русла; здесь возникают донные токи, направленные к берегам, и образуются песчаные отложения. От того, насколько интенсивно будет пополняться наносами та или иная область депрессии, зависит интенсивность роста кос и общая конфигурация узла слияния.

Если в притоке мутность воды и гидравлическая крупность наносов меньше, чем в главной реке, устье притока будет глубокое. Если же мутность и гидравлическая крупность в притоке значительно больше, чем в главной реке, стрелка и побочни будут расти, особенно в районах депрессии. Если мутность и гидравлическая крупность в обоих потоках примерно одинаковы, то будет расти только стрелка.

4. Характер прохождения ледохода в обеих сливающихся реках оказывает большое влияние на формирование устья, особенно на северных реках.

В тех случаях, когда ледоход начинается раньше на притоке, все устье его забивается льдом. Заторы, подпирая течение на фарватере, вызывают увеличение скоростей течения на пойме и способствуют образованию обходных рукавов.

Доцент А. К. Пязоке, исследовавший участок слияния рр. Оки и Волги, пришел к следующим выводам:

1. Соотношения продольных уклонов и скоростей течения на участках выше слияния рек зависят от соотношения их расходов. Если превалирует расход Оки, то в ее низовьях наблюдается явление спада (уклоны и скорость течения возрастают вниз по течению), тогда как на Волгу распространяется подпор.

Рис. 41. Влияние соотношения расходов воды Оки и Волги на гидрологический режим в устье р. Оки:

*а* — кривые зависимости поверхностных скоростей течения от соотношения расходов; *б* — кривая зависимости продольных уклонов от соотношения расходов

На рис. 41 показана зависимость уклона и скоростей течения Волги и Оки от величины отношения их расходов. Увеличение относительного расхода одной из рек вызывает убывание уклона и скорости в другой.

2. В зоне слияния рек линия, разделяющая волжские и окские воды, смещается по ширине русла в пределах 700 *м*, приближаясь к правому или левому берегу в зависимости от соотношения расходов.

В связи с положением линии раздела в половодье меняется конфигурация переката «Мели р. Оки». В 1945 г., когда расходы воды в Оке в половодье превышали волжские и раздельная линия располагалась ближе к левому берегу, перекат «Мели р. Оки» сильно разросся, образовав подводную перемычку, перекрывшую русло Волги выше устья р. Оки (рис. 42, *а*). В 1954 г. когда в половодье волжские расходы воды превышали расходы Оки, и линия раздела сместилась ближе к правому берегу, сильно укоротилось ухвостье Гребновских песков, и мель, перегораживающая русло Волги, исчезла (рис. 42, *б*).

3. Состояние перекатов на Волге, расположенных ниже впадения Оки (Верхне-Борский, Никольский и др.), ухудшается в годы, когда расходы воды в Оке превышают расходы Волги. Это является следствием увеличения выноса наносов Окой при больших расходах, увеличенных уклонах и скоростях. Выносы

из Волги оказывают меньшее влияние на состояние нижележащих перекатов.

Исследования А. К. Пязоке показали, что в узле слияния создаются сложные условия, ежегодно меняющиеся в зависимости от сочетания расходов воды сливающихся рек. Однако приближенный прогноз состояния перекатов, необходимый для планирования путевых работ, возможен, если русловой режим данного узла изучен и своевременно анализируются данные водомерных постов по обеим рекам.

Очень сильные переформирования происходят в месте впадения притоков заметно меньших размеров, чем главная река, после зарегулирования стока главной реки. Например, после постройки Рыбинской ГЭС и уменьшения паводковых расходов Волги у устья р. Унжи паводок последней проходит при уровнях вод на Волге на 5—6 *м* ниже, чем были раньше.

Вследствие этого подпора от волжских вод не стало и в устье р. Унжи получилась линия спада с повышенными уклонами и скоростями. Эта река, имеющая песчаное русло и пойму, резко усилила свою эрозионную деятельность, и ее выносы стали оседать на участке Волги от устья Унжи до самого устья Оки, поскольку этот участок полностью или частично находится в подпоре во время половодья на Оке.

Особенно значительные изменения морфологии перекатов наблюдаются непосредственно ниже устья Унжи. На стрелке этой реки выросла массивная мель, отжавшая фарватер Волги к правому берегу.

Рис. 42. Устье р. Оки:
*а* — по съемке 1945 г.; *б* — по съемке 1954 г.

На расстоянии 2 *км* ниже впадения Унжи в ранее глубоком плесе образовался новый перекат — Юрьевецкие пески, на котором ежегодно пришлось проводить дноуглубительные работы.

Длина многих перекатов на участке Волги от устья Унжи до Горького увеличилась на 25% и более (Гусеницкий, Ильинский, Переломский, Юговский и др.).

В то же время устьевая часть р. Унжи значительно углубилась. Находившийся там перекат превратился в глубокий плёс.

Явления примерно того же характера наблюдаются теперь, после постройки Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, в устье р. Са-

марки, впадающей в Волгу на 60 *км* ниже створа Куйбышевской плотины.

На состояние глубин в районе слияния двух рек влияет также форма очертания берегов. Если приток впадает со стороны вогнутого берега, русло около которого всегда глубокое, а течение имеет значительные скорости, то мелей у устья обыкновенно не бывает, а если в редких случаях и бывают, то река успевает их размыть до наступления межени. Если река впадает со стороны выпуклого берега, где расположено место отложения наносов главной реки, то наносы притока увеличивают эту отмель.

Влияние на отложение наносов на устьевом участке имеет и угол примыкания притока к основной реке.

Впадая под прямым или почти под прямым углом, приток как бы врезается в течение основной реки и вызывает в нем значительные нарушения внутренних течений, способствующие усилению оседания наносов. Наиболее благоприятным является впадение притока под острым углом от 20 до 25°.

## § 15. ПЕРЕКАТЫ-РОССЫПИ (V ТИП)

Перекаты типа россыпи (см. рис. 23) подробно исследовали в лаборатории и в натуре А. И. Лосиевский, И. Ф. Попков и Н. И. Маккавеев, чьи материалы использованы ниже.

Перекатом типа россыпи называется участок реки, не имеющий отчетливо выраженных типичных форм переката — плесовых лощин, побочней и подвалья, но создающий затруднения для судоходства из-за недостаточных глубин на фарватере.

Формирование перекатов типа россыпи, развивающихся на прямолинейных участках с двусторонней поймой, объясняется слабостью или отсутствием поперечных течений. Центробежное ускорение здесь равно нулю вследствие прямолинейности русла, и Кориолисово ускорение в паводок лишь отгоняет воду на правобережную пойму.

Анализ плановых материалов натурных перекатов-россыпей, выполненный канд. техн. наук И. Ф. Попковым, позволил установить, что обычно россыпи возникают в местах образования весенних подпоров воды, уменьшающих местные скорости течения, на участках реки с достаточно обильным поступлением наносов.

С уменьшением подпора верхняя часть россыпи начинает размываться, но в то же время ухудшаются ее средняя и нижняя части. Периодические изменения россыпи состоят в том, что россыпь в течение нескольких лет, обычно в годы с низким паводком, превращается в сложный перекат, иногда даже с хорошо устойчивыми глубинами. Затем плесовые лощины между отдельными гребнями исчезают, и перекат снова сохраняет рельеф типичной россыпи.

Россыпи возникают также на участках реки с неразмываемым грунтом, покрытым небольшим слоем песка, так как побочни здесь не могут сформироваться из-за малого слоя песчаного грунта и на дне образуются только небольшие шалыги.

Длина россыпей обычно больше, чем других перекатов, и составляет в среднем 8—10 ширин русла. На россыпях фарватер не постоянен, и поэтому на них трудно наметить положение судового хода и обеспечить требуемые его габариты.

Движение донных наносов на россыпях имеет хаотический характер, дно россыпи в изобилии покрыто шалыгами, беспорядочно движущимися вниз по течению, что указывает на отсутствие устойчивых циркуляционных течений. Если плесовым участкам реки соответствуют устойчивые циркуляционные течения, в большинстве случаев односторонние, а перекаты расположены преимущественно там, где происходит изменение направления циркуляции, то россыпям соответствуют циркуляционные течения промежуточного, смешанного типа.

Если принять во внимание неустойчивость таких течений, то станет вполне понятной неопределенность движения донных наносов и формирования русла на россыпях.

Перекаты-россыпи характеризуются сложными очертаниями изобат, определяемыми изломами небольших заструг, вытянутых вниз по течению, под некоторым углом к оси потока. Такие отклонения заструг особенно ясно выражены в прибрежной полосе потока.

Заструги способствуют выносу наносов из береговых зон к стрежню потока и вызывают обмеление судового хода. Если имеется детальный план россыпи, то по расположению заструг на ней можно установить наличие участков их концентрации или распыления, которым соответствуют зоны отложения и размыва наносов.

Для выправления участка реки с таким беспорядочным движением наносов, необходимо искусственно изменить структуру потока или форму русла и создать внутренние течения, обеспечивающие транспортирование и отложение наносов на определенных участках русла.

Исследования ЦНИИЭВТа (А. И. Лосиевский), проведенные в лаборатории на моделях перекатов-россыпей р. Оки, показали, что в каждом отдельном случае можно подобрать такие выправительные сооружения, с помощью которых достигается размыв россыпи по требуемому направлению и удаление наносов в такие места, где их отложение не ухудшает судоходные условия участка. Однако такое решение может быть приемлемо лишь для определенного переката и не может быть рекомендовано как типовое решение, так как россыпи очень сильно отличаются друг от друга как своей морфологией, так и структурой скоростного поля потока.

## § 16. ПЕРЕКАТЫ В РАЗВЕТВЛЕННОМ РУСЛЕ (VI ТИП)

Участки рек, где русло делится на рукава и протоки, представляют обычно наибольшие затруднения для судоходства, и так как разветвления русла на равнинных реках СССР встречаются часто, вопрос об улучшении таких участков имеет очень важное значение.

Н. И. Маккавеев объясняет образование разветвлений речного русла рядом геоморфологических условий, главнейшими из которых являются: наличие легкоразмываемых грунтов, расширение речной долины и уменьшение в связи со снижением уклонов транспортирующей способности потока, несовпадение динамической оси потока при разных уровнях стояния воды в реке.

Участки разветвленного русла большей частью встречаются в средних течениях рек, где в связи с уменьшением уклонов выпадает большое количество наносов, поступающих с верхних участков. Влияние перелома продольного профиля на образование разветвлений особенно ярко выражено на реках, берущих начало в горах, при выходе на равнину. Примерами могут служить р. Обь выше г. Барнаула, р. Иртыш в районе г. Павлодара, р. Енисей при выходе из Саянских гор и др.

Из разнообразных форм разветвлений речного русла можно выделить два основных типа: раздвоение русла и сложные разветвления.

Формы разветвлений русла зависят от того, что послужило причиной их образования — отторжение побочней, прорывы меандр или же разнородность геологического строения речной долины и др.

При разветвлении русло делится иногда на два равноценных рукава. В ряде случаев главное русло спрямляется более прямым и коротким рукавом или, наоборот, боковым ответвлением является староречье, длина которого больше, чем длина основного рукава.

Сложные разветвления имеют три и более рукава, состояние которых обычно неустойчиво, часто в течение одного-двух лет фарватер меняет свое положение, переходя из одного рукава в другой. Кроме основных рукавов, в разветвлениях имеются еще несколько мелких отмирающих или нарождающихся проток.

Сложные разветвления характерны для рек с легкоподвижным ложем с блуждающим руслом и для отдельных участков более устойчивых рек.

На участках разветвления русла судоходный рукав обычно бывает уже, чем русло до разделения на рукава, и имеет меньшие радиусы закругления. Для поддержания по нему судоходных глубин приходится ежегодно выполнять в больших объемах землечерпательные работы, особенно когда один из второстепенных рукавов развивается и ухудшает состояние судоходного рукава.

На протяжении длительного времени среди гидротехников было распространено мнение, что наиболее эффективный способ улучшения судоходных условий на раздвоенных участках рек — перекрытие второстепенных рукавов глухими запрудами. Но этот принцип нельзя считать универсальным. К закрытию вторых рукавов необходимо прибегать лишь в тех случаях, когда меженные глубины в основном русле недостаточны для судоходства и когда имеются основания предполагать, что сосредоточение потока в одном русле повлияет на увеличение глубин.

Закрытие второстепенного рукава может принести пользу в тех случаях, когда оба рукава находятся в стабильном состоянии и тенденций к их отмиранию или развитию не имеется, и в то же время для поддержания заданных габаритов пути требуется значительный объем эксплуатационного землечерпания.

При сложных разветвлениях, когда русло делится на три и более рукава, необходимость в заграждении второстепенных рукавов может возникнуть чаще, так как при таком положении ни один из рукавов даже с помощью интенсивного землечерпания не может обеспечить нужды судоходства. Нередко можно наблюдать, как периодически улучшается то один рукав, то другой. Судовой ход в одну навигацию приходится поддерживать в одном рукаве, а в следующую навигацию уже в другом.

Закрывая рукав на реках с легкоразмываемым ложем необходимо возводить запруду обязательно в нижней части рукава для того, чтобы верхнюю его часть использовать для отложения наносов. Заграждение рукава следует также производить не сразу на полную высоту, а постепенно, с тем чтобы ослабить интенсивность размыва русла в судоходном рукаве.

В ряде случаев закрытие вторых рукавов может только ухудшить состояние судоходного рукава, так как увеличение в нем расхода воды, а следовательно, и скоростей течения повлечет значительный размыв русла и отложения наносов в нежелательных местах.

Если один из рукавов естественно отмирает, то заграждение его в целях создания единого меженного русла также будет нецелесообразно, так как отмирающий рукав является естественным складом поступающих в него наносов. При заграждении такого рукава откладывавшиеся в нем ранее без вреда для судоходства наносы будут направлены в судоходный рукав. Увеличение в последнем расхода воды и скоростей не гарантирует еще транзитный пропуск дополнительно поступающих в рукав наносов.

Типичным примером может служить заграждение левого рукава и постройка полузапруд у правого берега судоходного рукава на Усть-Гаревских перекатах р. Камы. Несмотря на достигнутое увеличение расхода воды и скоростей течения в правом судоходном рукаве в меженный период, судоходные условия на нем не улучшились.

При улучшении участков с разветвленным руслом большое значение имеет правильный выбор рукава для судоходства. Необходимо стремиться к тому, чтобы с наименьшей затратой средств обеспечить необходимые судоходные условия.

Распределение меженного расхода по рукавам далеко еще не дает характеристики их судоходных качеств. Натурные исследования, проведенные Н. И. Маккавеевым, М. П. Дедученко, Н. А. Поповым с целью изучения гидрологического режима рукавов при разветвлении русла, показывают, что с повышением уровней соотношение расходов воды по рукавам не остается постоянным. Как правило, в одном рукаве (там, где были большие расходы в межень), относительное сопротивление движению потока возрастает, в то время как в другом рукаве оно понижается. В связи с этим доля общего расхода реки, протекающего по первому рукаву, понижается, в то время как другой рукав становится относительно более мощным. Для решения вопроса о выборе судоходного рукава необходимо подробно изучить гидравлический режим при различных уровнях воды и прежде всего в период половодья.

Н. И. Маккавеев отметил, что русловой режим разветвленных участков зависит от высоты весеннего половодья. Высокие паводки часто углубляют прямые рукава и рукава, расположенные у выпуклых коренных берегов. Низкие паводки, наоборот, углубляют более длинные обходные рукава, расположенные у вогнутых коренных берегов.

Большое влияние на режим рукавов оказывает поток половодья, идущий по пойме. Если направление весеннего пойменного потока совпадает с направлением потока в одном из рукавов, то этот рукав развивается более энергично.

На процесс развития рукавов влияет твердый расход потока и геологические условия в районе разветвления. Чем больше насыщенность поступающего сверху потока наносами и чем податливее грунты ложа и берегов, тем скорее будет заноситься и отмирать старый (боковой) рукав и развиваться новый прямой рукав.

Для рек, несущих большое количество наносов (Большая Северная Двина, Вятка, Печора, Зея и др.), особенно в зонах, где преобладают аккумулятивные процессы, характерна малая устойчивость разветвленных участков русла. Наоборот, на реках с малым количеством взвешенных наносов, особенно в зонах с преобладанием эрозийных процессов, параллельно с относительно быстрым развитием новых рукавов отмирание старых рукавов происходит медленно.

Развитие рукавов зависит и от геометрических форм их русла. Плавный безвихревой заход в рукав значительно способствует его развитию, но только в том случае, если гидравлические условия протекания потока на всем протяжении рука-

ва удовлетворительные, т. е. в нем нет участков с большими сопротивлениями движению воды, создающих подпор.

Кроме затруднений для судоходства в самих рукавах, затруднительными являются также перекаты, расположенные у приверха и ухвостья острова, разделяющего русло на рукава.

Перекаты, расположенные на заходе в судоходный рукав у приверха острова или высокого осередка, обсыхающего при среднемеженных уровнях воды, образованы небольшой косой и островом или осередком (рис. 43). Они обычно находятся на одном месте, но имеют значительные сезонные деформации. В период высоких вод, когда верхняя коса переката затоплена большим слоем воды, поток протекает более или менее прямолинейно, параллельно берегу. При этом под действием увеличенной, против межени, живой силы потока происходит усиленный спуск косы и занос переката. На спаде паводка по мере уменьшения глубин на верхней косе, последняя отклоняет поток от берега и изгибает его при заходе в судоходный рукав. Происходящий в это время размыв переката отстает от спада уровней воды, и перекат даже при среднемеженных уровнях может лимитировать плёс.

Рис. 43. Перекат у приверха острова

Режим переката на приверхе острова связан с состоянием несудоходного рукава. Если последний начинает развиваться, перекат ухудшается. В случае отмирания второстепенного рукава перекат улучшается.

Перекаты, находящиеся у ухвостья острова при слиянии двух рукавов, имеют сложный режим.

Если один из рукавов развит больше другого, на режим переката влияет, с одной стороны, перекос водной поверхности в районе слияния рукавов и отжим стрежня слабого рукава водами более мощного рукава, с другой.

Наличие разницы скоростей течения в рукавах создает взаимные подпоры. В рукаве с большими скоростями течения у слияния его с другим рукавом происходит замедление течения и подъем уровня воды.

В рукаве с меньшими скоростями течения наоборот создается ускорение течения и падение уровня. В результате образуется поперечный уклон водной поверхности в сторону рукава с малыми скоростями течения. Как следствие перекоса создается веерообразное течение, ухудшающее состояние переката.

Соотношение скоростей течения в рукавах в отдельные периоды навигации бывает разное, соответственно изменяется и уклон водной поверхности. Максимальный уклон обычно наблю-

дается в низкую межень, когда в одном из рукавов расход воды сильно уменьшается.

При слиянии неравноценных рукавов стрежень более мощного потока стремится передвинуться ближе к середине русла, отжимая менее мощный поток к берегу. Соотношение расходов воды в рукавах меняется также во времени, одновременно изменяется и динамическая ось потока.

При слиянии двух рукавов с одинаковыми расходами воды и скоростями течения явления подпора и отжима потока не имеют места, но в данном случае на состояние участка влияют центробежные силы, возникающие при изгибе сливающихся струй, и характер обтекания ими ухвостья острова.

Центробежные силы способствуют образованию бугра водной поверхности у стрелки, под влиянием которого донные течения отклоняются к берегу. Плохое обтекание ухвостья острова, создавая отрыв струй от стрелки, влечет за собой понижение водного рельефа, как бы притягивающего к себе донные течения. Если обтекание стрелки хорошее и сливающиеся потоки имеют достаточно крутой изгиб, транзитные наносы направляются донными струями к берегам, а максимальные глубины поддерживаются возле ухвостья острова; если же ухвостье обтекается плохо, то транзитные наносы направляются донными течениями к ухвостью острова, оседают здесь и вытягивают спускающуюся с него косу. Стрежень в этом случае отклоняется от острова. Влияние этих явлений на русловой режим значительно слабее, чем влияние явлений, наблюдающихся при слиянии разных по масштабам рукавов. На слиянии двух равноценных потоков перекаты встречаются редко.

## § 17. ПЕРЕКАТЫ НИЖЕ ВЫСЫПКИ ИЗ БАЛКИ ИЛИ МЫСА (VII ТИП)

Выше было указано, что плохо обтекаемые очертания берегов, вдающихся в русло реки, влекут за собой срывы течения, завихрения и образования кос. На рис. 44 приведен характерный перекат, образовавшийся в результате высыпки из оврага. На ряде рек и в особенности на верхнем Дону такие перекаты встречаются очень часто.

Выносы из балок на Дону бывают очень значительные после сильных ливней в меженный период и в этих случаях расположенные у высыпки перекаты быстро мелеют и создают большие затруднения для судоходства. Многие авторы рекомендуют трассировать прорези на таких перекатах в стороне от высыпок. Однако работы, не устраняющие причин обмеления реки, не долговечны. Разработанные прорези быстро заносятся. Между тем при устранении причины возникновения переката, т. е. мыса или высыпки, такой перекат быстро углубляется и полностью исчезает.

Если причиной образования переката является мыс, следует рекомендовать ликвидацию его черпаковым земснарядом, если же перекат расположен ниже высыпки из оврага, надо провести кальматационные работы в овраге — перекрыть его в нескольких местах двойным плетнем или другими сооружениями.

Рис. 44. Перекат ниже высыпки из оврага

Высыпку также следует срезать земснарядом и создать плавный проход потоку. Во многих случаях уборка высыпки земснарядом весьма эффективна даже без кальматажа оврага, так как образование высыпки происходит постепенно в течение ряда лет. Объем работ по ее уборке нередко значительно меньше, чем ежегодные работы по уборке песчаных отложений на перекате, образующихся вследствие наличия высыпки. Систематически подчищая через несколько лет высыпку и не давая ей образоваться, можно при затрате меньших средств создать удобные условия для судоходства на этом участке и ликвидировать перекат.

Такого же типа перекаты иногда образуются за неправильно поставленными выправительными или другими сооружениями, выдвинутыми в реку. При уборке сооружений можно быстро улучшить судовой ход на этих участках.

## § 18. ПЕРЕКАТЫ НА УЧАСТКАХ РЕК С МЕАНДРИРУЮЩИМ РУСЛОМ (VIII ТИП)

Извилистость русла представляет большие затруднения для судоходства: малые радиусы закругления ограничивают габариты плавающих судов, частые извилины удлиняют путь движения, проводка составов на извилистых участках реки требует в ряде случаев уменьшения скорости движения.

Стремление спрямить русло и уничтожить извилины прослеживается с давних пор, еще с первого периода развития выправительных работ на реках. Однако недостаточность знания за-

конов речной гидрологии иногда приводила к тому, что при спрямлении излучин не получалось желаемых результатов. Обобщая опыт того времени, инж. Водарский в своем труде «Выправление рек» пришел к выводу, что борьба с извилистостью бесполезна, что излучина реки, выражаясь словами Фарга, дана нам природой на предмет подражания. Это распространенное среди гидротехников мнение до последних лет сильно тормозило дело улучшения судоходных условий на извилистых реках. Часто выражалось опасение, что после спрямления излучины фарватер значительно испортится и судовой ход трудно будет поддерживать.

За последние 10—15 лет на наших водных путях были удачно спрямлены ряд излучин на Дону, Припяти, Белой, Днепре, Десне, Вятке и др.

Извилистость русла является характерной морфологической особенностью речного русла. Различают два основных типа естественного изгиба рек: извилины и излучины.

Извилинами реки называют изгибы, образуемые не только руслом, но и всей долиной реки. Излучинами называют изгибы реки, образуемые руслом на пойменных участках в границах прямолинейного отрезка долины.

Извилины наиболее распространены на относительно устойчивых больших равнинных реках типа Волги, Камы, Днепра и т. п. Изменения извилин происходят медленно и практически на переформирование перекатов влияния не оказывают. Переформирование перекатов на реках этого типа, как было сказано выше, зависит от закономерности развития и движения побочней, происходящего в результате периодического расширения и сужения русла в границах извилины реки.

Излучины или меандры располагаются в пределах пойменных участков рек.

Меандричность русла зависит от грунтовых условий и уклона реки. Наиболее правильную форму имеют излучины при однородном песчаном или глинистом грунте, слагающем пойму. На реках с коэффициентом Лохтина менее 2—2,5 правильные излучины образуются редко. Так, меандричность русла не характерна для большей части р. Аму-Дарьи. С другой стороны, при очень больших коэффициентах Лохтина, порядка 8—9 и более, т. е. при малых уклонах реки и относительно тяжелых грунтах, характерные излучины также встречаются редко.

Образование излучин в значительной мере зависит от количества влекомых рекой наносов. Если приток наносов большой, развитие излучин происходит интенсивно. При незначительном количестве наносов в реке меандричность слабо выражена или ее может совсем не быть.

По данным ряда авторов (Хюльстрем, Н. И. Маккавеев, Н. А. Ржаницын и др.), реки, вытекающие из бассейнов, не имеют излучин на первых километрах пути, и только после того,

как речной поток вследствие размыва дна и берегов получит некоторое количество наносов, он начинает формировать излучины.

Большие уклоны и грунтовые условия полугорных рек, таких как Селенга, верхний Иртыш и др., и относительно небольших равнинных рек, таких как Припять, Десна, Сож, Кеть, Чулым, Ветлуга, Сура, и отдельных участков Днепра, Оки, Вятки, Белой, Дона и др. наиболее благоприятны для развития излучин.

На этих реках деформации русла происходят несколько иначе, чем на участках и реках с более устойчивым руслом. Для них основной формой русловых деформаций является не передвижение побочней, а образование в результате роста побочней излучин в пойменных берегах и их изменения. Превращение побочней в излучины на участках рек с меньшей устойчивостью русла можно объяснить тем, что приток наносов сверху, определяющий рост побочней и размыв противоположного берега, происходит здесь значительно интенсивней. В результате побочни не спускаются вниз, а, отжимая противоположные им плесовые лощины, все более и более продвигаются в глубь материка. Это перемещение, как и рост побочня, вызывает изменения в направлении местного течения, что в совокупности с прочими обстоятельствами приводит к превращению коренных частей побочней в отсыпи пойменного берега, продвигающиеся все дальше и дальше по направлению к противоположному отступающему берегу.

По мере развития излучин длина пути движущегося по ним потока воды возрастает и поэтому постепенно увеличивается общее сопротивление русла. Энергия потока на единицу длины в пределах излучины уменьшается, и при достижении определенной длины излучины этой энергии оказывается уже недостаточно для перемещения наносов от размываемого берега до нижележащего участка русла. В результате дальнейшее развитие излучины все более и более замедляется, а на прямых вставках, которые располагаются между соседними излучинами, при условии достаточного поступления наносов сверху образуются перекаты.

Процессу дальнейшего формирования излучины в значительной мере помогают центробежные силы, возникающие при движении потока на повороте русла и прогрессивно усиливающиеся по мере увеличения кривизны поворота.

Сравнения живых сил на прямом участке реки и на изгибе, проведенные ЦНИИЭВТом (Л. В. Поборчая), показали, что живые силы в излучине в паводок в два раза, а в межень на 25% больше, чем на прямом участке реки.

Под влиянием центробежных сил всякая излучина, первоначально имевшая малую кривизну, по мере своего развития постепенно приобретает все большую и большую кривизну. Бла-

годаря этому и получается типичная меандровая форма излучин, при которой они имеют больший размах в вершине и меньшую ширину у основания.

Рассматриваемый процесс роста кривизны в поворотах излучины является причиной ее гибели, так как приводит к взаимному сближению двух последовательно расположенных, противоположных по кривизне излучин, прорыву отделяющей их луки и спрямлению русла в обход излучины.

Прорыв луки излучины под влиянием энергии паводковых вод происходит значительно раньше полного сближения корневых ее частей.

По мере роста излучины резко увеличивается сопротивление движению вод в русле и при паводке значительный расход идет уже не по направлению главного русла излучины, а по прямому направлению через луку, постепенно размывая здесь протоку.

Медленный размыв луки в паводки, длящийся ряд лет, приводит к тому, что в один из больших паводков происходит бурный прорыв луки и весь поток устремляется по новому руслу, спрямляя излучину. Прорыв луки и спрямление излучин — завершающий этап ее развития.

В многолетнем разрезе деформации русла меандрирующих рек также носят периодический характер, т. е. на месте спрямленного русла с течением времени снова образуются излучины. Однако, как нами установлено при изучении большого числа излучин за длительный период, выявляется определенная тенденция к уменьшению амплитуды излучин и к уменьшению коэффициента извилистости реки за счет спрямления многих меандр.

Это явление в известной мере можно объяснить увеличением крупности и плотности грунтов в процессе глубинной эрозии реки, но главной причиной его является воздействие проводимых гидротехнических мероприятий. За истекшие 60—100 лет было произведено много спрямлений русла, в то же время развитие новых излучин происходит очень медленно. Кроме того, на спрямление русел ряда рек, по-видимому, оказала влияние вырубка лесов, повлекшая увеличение мощности половодья.

Несмотря на то, что за эти годы наши главнейшие судоходные реки заметно уменьшили свою извилистость, никаких плохих последствий это не повлекло за собой. Для примера на рис. 45 и 46 приведены совмещенные планы двух меандрирующих участков рр. Припяти и Оки.

На участке Припяти от села Шепеличи до хутора Янов (54—64 *км* от устья) за период с 1877 по 1946 гг. амплитуда меандр сократилась почти вдвое. Процесс отмирания излучин продолжается до сих пор. Излучины у хутора Янов и у с. Семиходы в ближайшее время совсем отомрут, и амплитуда меандр сократится еще больше. Образования новых излучин за рассматриваемый период времени не обнаружено.

Рис. 45. Совмещенные планы участка р. Припяти

Рис. 46. Схема участка р. Оки

На схеме р. Оки от г. Елатьмы до с. Шиморского виден ряд отмерших излучин. Основное русло на этом участке расположено сейчас вдоль левого края долины, и только в районе с. Шиморского имеется одна Казневско-Шиморская излучина. Эта излучина давно бы прорвала свою луку (в ней еще в 20-х годах развилась мощная прорва), если бы в связи с необходимостью сохранения Шиморского затона, расположенного у нижней части основания излучины, не были проведены крупные выправительные работы по закрытию прорвы и закреплению берегов излучины.

С отмиранием излучин русло становится более устойчивым.

По данным Н. И. Маккавеева, излучина в легко размываемых грунтах становится неустойчивой, когда длина ее по стрежню в 1,5 раза превысит длину по оси долины. В этом случае искусственное спрямление можно выполнить сравнительно легко.

Рис. 47. Развитие Петровской излучины

Как характерный пример деформаций меандрирующего русла можно привести случай естественного спрямления в 1957 г. Петровской излучины р. Вятки, расположенной на плесовом участке. Пойменные берега излучины сложены из супесчаных и суглинистых грунтов, покрыты лугами с кустарником, и возвышаются над низким уровнем на 4—5 *м*.

На рис. 47 показана динамика изменения излучины за период с 1914 по 1957 г. Характерно, что развитие излучины протекало в основном за счет верхней ее ветви. Паводковые воды ежегодно размывали правый берег на участке *АБ;* русло при этом искривилось и переместилось в направлении высоких весенних вод. Средняя величина размыва за год составляла 10 *м*. Продукты размыва из зоны *АБ* перемещались потоком к вершине излучины и откладывались на участке *БВ*. Одновременно с этим происходил процесс размыва вогнутого берега в изгибе излучины и перемещение ее вершины.

За период 1914—1957 гг. произошли следующие изменения:

| | 1914 г. | 1940 г. | 1957 г. |
|---|---|---|---|
| Общая длина излучины в *м* | 6480 | 7800 | 8500 |
| Длина луки излучины в *м* | 700 | 360 | 250 |
| Перемещение вершины излучины по отношению к 1914 г. в *м* | — | 400 | 600 |

Постепенные деформации излучины привели к тому, что в 1957 г. высоким паводком (близким к максимальному) была размыта прорва и по истечении 10 дней в нее был перенесен судовой ход.

В результате спрямления излучины длина судового хода сократилась на 4,8 *км*. Движение судовых составов и плотов по спрямлению затруднений не встречало.

Гораздо сложнее протекают деформации в излучине, когда выше ее расположен перекатный участок или из-за размыва берегов на нее поступает большое количество наносов с верхнего участка. В этом случае после сформирования излучины и увеличения сопротивлений движению воды в ее русле образуются перекаты. Перекаты в излучинах образуются в трех местах (см. рис. 26):

а) в пойменных берегах на переходных прямых участках между двумя кривыми обратной кривизны, т. е. в меандрах (тип 8А);

б) в вершине излучины (тип 8Б);

в) в местах подхода к коренному берегу (тип 8В).

## § 19. ПЕРЕКАТЫ НА УЧАСТКАХ РЕК С БЛУЖДАЮЩИМ РУСЛОМ (IX ТИП)

Типичной рекой с блуждающим руслом является Аму-Дарья. К этому же типу можно отнести ряд участков рек Большой Северной Двины, Печоры ниже г. Печоры, Оби от места образования до г. Барнаула, Нижней Зеи и др. На этих реках деформации перекатов происходят не так, как на реках с более устойчивым руслом. Периодические расширения и меандрирования в том виде, как они описаны выше, здесь встречаются редко. Деформации перекатов на реках с легкоподвижным ложем происходят более интенсивно путем «блуждания» русла.

Характерным перекатным участком для этого типа рек является участок с тремя и более рукавами (рис. 48). Выше такого участка главное русло реки течет у одной стороны долины, а ниже — у другой. При переходе от одной стороны долины к другой в широкой легкоразмываемой пойме образуется несколько рукавов (большей частью три).

Процесс развития и отмирания рукавов зависит, главным образом, от песчаных побочней, попадающих на перекатный участок в результате спуска их вдоль обоих берегов русла или образующихся непосредственно на этом участке. При большом поступлении взвешенных и влекомых наносов побочни, спускающиеся вдоль того или другого берега, «вползают» в один из рукавов и сокращают его пропускную способность, создавая подпор на вышележащем участке; в других рукавах происходит размыв.

Предположим, что в настоящее время судоходным рукавом является крайний правый рукав № 1. Спустившийся сверху или образовавшийся на участке выше места начала разделения русла на рукава побочень *А* постепенно сужает заход в правый рукав. Ход становится все круче и круче, прижимаясь к приверху острова.

Рис. 48. Перекат на участке разветвления русла на три рукава:
*а* — план; *б* — схема

Для обеспечения захода судов в правый рукав и поддержания в нем гарантийных глубин приходится ежегодно проводить крупные эксплуатационные землечерпательные работы по подрезке побочня. Однако в период следующего паводка корыто переката полностью заносится, побочень, спускаясь ниже, еще больше ухудшает состояние переката. Одновременно вследствие усиленного подпора вышележащего участка увеличивается перепад в рукав № 2, который начинает усиленно развиваться.

В период паводка, кроме того, начинается размыв борозды в корневой части побочня *А*. В случае, если русло рукава № 2 имеет тяжелые грунты, процесс размыва борозды через корневую часть побочня может завершиться отторжением его от берега. Однако в большинстве случаев процесс развития рукава № 2 в естественных условиях опережает отторжение побочня. Такие переформирования нередко встречаются на Северной Двине, Печоре и Оби ниже Новосибирска.

Процесс развития рукава № 2 происходит довольно бурно. Вследствие увеличения расхода воды происходит интенсивный размыв русла, из продуктов размыва формируются побочни и перекаты в этом же рукаве. Часто сформировавшийся в верхней части рукава побочень по мере спуска вниз по тече-

нию уменьшает пропускную способность рукава № 2. В этом случае может начаться развитие рукава № 3. В такой или аналогичной последовательности судовой ход переходит («блуждает») по всем рукавам.

На приток наносов, рост и движение побочней сильно влияет водность паводков. В годы высоких и долго продолжающихся паводков переформирования происходят быстрее, при низких паводках — медленнее.

Таким образом, на участках блуждающего русла все время происходит борьба между отдельными рукавами и, как правило, всегда имеется не менее трех рукавов с разной степенью водоносности.

Процесс развития и отмирания рукавов на таких участках в значительной мере определяется и ледовыми условиями в период весеннего ледохода. Образование затора в судоходном рукаве способствует развитию второстепенных рукавов, так как при этом происходит размыв последних мощным весенним потоком. Это явление часто наблюдается на Большой Северной Двине. В частности, можно указать на перекаты Котласского узла, где в результате частых заторов в основном русле произошло развитие левобережных проток в довольно значительные рукава, причем в настоящее время расход Межниковского рукава равен расходу правого судоходного русла.

Если при рассмотрении деформаций меандрирования и периодического расширения прослеживается определенная тенденция развития процесса и можно предугадать его направление, то при рассмотрении «блужданий» реки такой прогноз делать значительно труднее.

В зависимости от ряда обстоятельств (объем и расположение побочней, величина паводков, весенних ледяных заторов и т. д.) главное русло в течение одной навигации может переместиться из одного рукава в другой, причем весьма часты случаи возвращения судового хода в ранее действовавшую и отмершую в настоящее время протоку. В нашем примере (см. рис. 48) судовой ход из рукава № 3 может вновь переместиться в рукав № 1. Такие интенсивные и беспорядочные деформации на участках блуждающего русла создают особые трудности при разработке и осуществлении мероприятий по улучшению судоходных условий реки.

---

ГЛАВА III

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОРЕЗЕЙ И ВЫПРАВИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

## § 20. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

**Требования судоходства к трассе.** Прежде чем перейти к рекомендациям по трассированию прорезей и выправительных сооружений для отдельных типов перекатов, необходимо остановиться на некоторых общих принципиальных вопросах проектирования судоходной трассы.

Нередко по прорези, имеющей гарантийную глубину и ширину, и хорошо сохраняющейся от заноса, движение судов и в особенности большегрузных составов и плотов весьма затруднено. По-видимому, при проектировании такой прорези не были учтены в должной степени требования судоходства и в основу было положено лишь достижение заданной глубины и устойчивости прорези с минимальным объемом путевых работ.

Удобство и безопасность прохода судов и плотов через перекаты в первую очередь удовлетворяются:

а) прямолинейными очертаниями судового хода в плане;

б) удобными для захода судов сопряжениями судового хода с верхней и нижней плесовыми лощинами, определяющимися надлежащими радиусами поворота;

в) отсутствием поперечных, так называемых свальных течений и равномерными скоростями течения в пределах судового хода;

г) постепенным, а не внезапным изменением глубин вдоль судового хода.

Необходимость прямолинейного очертания судового хода в плане вызывается тем, что скорость движения большегрузных составов по криволинейным траекториям уменьшается, а при ограниченных габаритах прорезей, имеющих место в межень, создается и постоянная угроза посадки судов на кромки судового хода.

Судовой ход на перекате необходимо стремиться делать прямолинейным, а если избежать поворотов нельзя, последние дол-

жны быть пологими, очерченными радиусом, равным 5—6 $L$, но не меньше 3 $L$ ($L$ — максимальная длина судна).

Сопряжение судового хода с верхней и нижней плесовыми лощинами должно быть очерчено радиусами закруглений не меньшими 5—6 $L$, для того чтобы при заходе на перекат сверху устранить возможность навала судов на приверх нижнего побочня и возможность удара их о берег при выходе в нижнюю плесовую лощину. При движении снизу необходимо дать возможность судовому составу подойти к подвалью переката по направлению течения, а не под некоторым углом к нему, что часто имеет место при крутых поворотах и приводит к посадке барж на верхний побочень. Требование удобного захода на перекат является одним из важнейших, предъявляемых к прорези.

Не менее важным требованием является отсутствие на судовом ходу поперечных свальных течений. При весьма незначительных запасах воды под днищами судов по сравнению с их осадкой сопротивление судов при движении по перекату сильно возрастает; поэтому даже небольшой поворот под влиянием поперечного к направлению судового хода течения вызывает сильную рыскливость буксируемых судов и посадку их на кромки судового хода.

Особенно трудно проводить через перекаты со свальным течением плоты, даже при помощи вспомогательных судов.

При наличии на перекате свального течения прорезь необходимо располагать по направлению этого течения или так, чтобы она изменяла течение, направляя его по судовому ходу. В месте укладки грунта, вынутого при разработке судового хода землечерпанием, нельзя создавать осередков, которые могут представлять угрозу судам и особенно плотам.

Неравномерность течения и глубин на прорези увеличивает рыскливость судов, вследствие чего они могут сесть на мель. Поэтому для удобства прохода через перекат рекомендуется углублять нижнюю часть прорези сверх нормы (предложение Г. А. Бородзич). Благодаря этому удается в значительной мере сгладить разницу в глубинах и скоростях течения на выходе с корыта переката в нижнюю плесовую лощину и улучшить условия прохода судов через перекат.

Таковы основные требования к судовому ходу, которые в первую очередь должны учитываться при трассировании прорезей.

**Учет морфологических изменений, происходящих на соседних участках.** При улучшении судоходных условий нельзя рассматривать изолированно отдельный перекат. Необходимо изучить весь затруднительный участок (перекатный участок) от вышележащего устойчивого плеса до нижележащего устойчивого плеса и разработать мероприятия для его улучшения. Это требование обусловлено тем, что подчас незамеченные переформирования на соседнем участке приводят к неприятным последствиям,

уничтожая результаты работы на улучшаемом участке. В других случаях проводимые мероприятия, отрицательно влияя на состояние соседних участков реки, могут создать непредвиденные затруднения для судоходства, что потребует проведения крупных работ.

Для иллюстрации сказанного ниже приведены несколько примеров из практики дноуглубления последних лет.

Рис. 49. Группа Бектяжско-Подвальских перекатов

На рис. 49 изображена группа Бектяжско-Подвальских перекатов р. Волги. В верхнем конце этого участка судовой ход стал настолько крутым, что судоходство через перекат было весьма затруднено.

Проведенная работа по отторжению нижнего побочня переката *А* коренным образом изменила направление судового хода и улучшила его состояние. Однако автором проекта не было учтено, что переформирование повлияет на состояние нижележащего участка, в частности на перекаты *Б* и *В*, расположенные в правом бывшем судоходном рукаве.

Вследствие переноса судового хода на верхнем перекате к правому берегу и направляющего влияния на поток этого берега, динамическая ось потока ниже новой прорези отклонилась к левому берегу, что повлияло, особенно в весенний период, на развитие левого рукава. Наоборот, состояние правого рукава стало ухудшаться и объемы землечерпательных работ на перекатах *Б* и *В* резко возросли. На второй год после разработки капитальной прорези на верхнем перекате перекаты *А* и *Б* на-

столько ухудшились, что в течение навигации их пришлось трижды разрабатывать. Несмотря на это, в конце навигации было принято решение перенести судовой ход в левый рукав, где перекаты настолько углубились, что потребовалась только незначительная их подчистка.

При своевременной разработке перекатов левого рукава можно было бы избежать ухудшения судоходных условий в нижней части участка и увеличения землечерпательных работ.

Рис. 50. Усть-Боровская излучина и нижележащий участок Камы

Описываемый случай как будто бы представляет общеизвестную истину, тем не менее даже в последние годы такие ошибки повторяются на ряде участков Волги, Днепра, Оби и других рек.

Другим характерным примером влияния переформирования русла может служить участок р. Камы в районе Усть-Боровской излучины (рис. 50).

Естественное спрямление Боровской излучины, имевшей длину 10 *км*, образовало перепад уклонов в этом районе, что вызвало интенсивное переформирование русла в районе спрямления. В результате размыва дна и берегов образовались песчаные скопления, которые за несколько лет, спускаясь вниз по реке, достигли расположенного на 2—5 *км* ниже спрямления Городищенско-Кобылинского переката.

До спрямления Боровской излучины судовой ход на Городищенско-Кобылинском перекате поддерживался по левому рукаву. После спрямления излучины левый рукав стал заметно ухудшаться и для поддержания глубин в нем потребовалось ежегодное проведение крупных землечерпательных работ. В это время заметно начал развиваться правый рукав. После очистки его от карчей и разработки прорези в тяжелом грунте, сюда был

перенесен судовой ход, который хорошо развился, и с тех пор перекат не требовал землечерпания.

Приведенные примеры не единичны; поэтому данному вопросу необходимо уделить особое внимание, и при трассировании прорезей изучать и учитывать те переформирования, которые происходят на соседних участках реки.

**Проектирование трассы.** Прежде чем приступить к проектированию прорезей и выправительных сооружений на затруднительных перекатах, необходимо для всего улучшаемого участка реки в целом определить ширину выправительной трассы и нанести трассу на план улучшаемого участка реки. Определение ширины трассы производится методами, изложенными в «Руководстве по расчету выправительных сооружений» (ЛИИВТ, 1959). При проектировании трассы надо учитывать следующие соображения.

На больших равнинных реках у незатопляемых и трудноразмываемых берегов располагаются преимущественно плесовые участки русла, и побочни здесь встречаются редко. Известно, кроме того, что плесовые участки образуются только там, где имеются условия для развития в потоке общего и одностороннего циркуляционного движения воды. Какие же силы вызывают и поддерживают устойчивые циркуляционные течения на участках рек с односторонней поймой?

Н. Н. Жуковский объясняет это явление законом привлечения вод неразмываемым берегом. Эту закономерность он объясняет тем, что в неразмываемой части русла энергия потока не тратится на размыв и транспортирование наносов и поэтому большая ее часть идет на поддержание движения. Пропускная способность этой части русла больше, чем части русла с размываемым берегом и дном. Вследствие неравномерности распределения пропускной способности по живому сечению русла в нем неизбежно возникает поперечное движение поверхностных вод в сторону неразмываемого берега и, соответственно, обратное движение донных струй к размываемому берегу.

Таким образом, создается односторонняя циркуляция, вырабатывающая треугольный профиль живых сечений русла. В известных условиях эта поперечная циркуляция может нарушаться под воздействием определенных сил, и тогда у горных берегов могут располагаться мелкие места.

Такие явления происходят под влиянием высыпки из оврага или ручья, отклоняющей поток от коренного берега, или осередка, спустившегося к коренному берегу с вышележащего пойменного участка.

По мнению Н. Н. Жуковского, в Северном полушарии на участках рек с односторонней поймой и правым коренным берегом циркуляционные течения усиливаются, кроме того, постоянно действующими силами Кориолисова ускорения, возникающими при вращении земли.

Н. И. Маккавеев, не отрицая влияния сил Кориолисова ускорения, считает, однако, что, кроме них, большое значение на создание односторонней циркуляции в речном потоке имеет направление господствующих ветров в период прохождения формирующих расходов воды.

В тех случаях, когда направление действия Кориолисова ускорения совпадает с направлением господствующих ветров, а коренным берегом, вдоль которого расположено русло, является правый берег, русло имеет плесовый характер. Это относится к рекам нижней Волге, Днепру, Дону и др., поскольку весной в южной половине Русской равнины господствуют ветры восточных румбов. Наоборот, в бассейнах рек Северной Двины и Печоры летом преобладают ветры северных румбов, т. е. вдоль долины. Поэтому у этих рек нет отчетливо выраженной тенденции придерживаться правого берега, хотя местами русло проходит возле него на значительном расстоянии.

Пользуясь описанной выше закономерностью, Н. Н. Жуковский предложил специальную систему регулирования речного русла, названную им «Гидрологической системой регулирования рек».

Сущность ее заключается в том, что русло реки путем отторжения побочней и пойменных массивов приближается к коренному незатопляемому берегу (на р. Волге — к правому). В тех же местах русла, где ведущий берег затопляется в паводок, предусматривается устройство незатопляемых укрепленных валов. Таким образом, искусственно на всем протяжении выправляемого участка создается ведущий коренной берег, и русло переносится к нему, а емкости старого русла в тех местах, где они вредно влияют на состояние нового русла, подлежат перекрытию сооружениями.

Н. Н. Жуковским в 1928 г. был составлен проект регулирования русла р. Волги от г. Нижнего Новгорода до Астрахани, с обеспечением минимальной транзитной глубины 8 *м*. Для выполнения этого проекта необходимо было бы извлечь свыше 1200 млн. $м^3$ грунта, насыпать 160 млн. $м^3$ грунта в оградительные валы и выполнить большие объемы по возведению выправительных сооружений и берегового крепления. На рис. 51 приведен участок реки, улучшаемый по указанному проекту.

Осуществление проекта Н. Н. Жуковского вряд ли экономически выгодно, особенно имея в виду строительство гидростанций на наших крупных реках.

Однако основную идею гидрологической системы Н. Н. Жуковского, заключающуюся в использовании коренного берега в качестве одной из сторон судоходной трассы, необходимо применять при улучшении судоходных условий на затруднительных участках свободных рек.

Произведенный автором анализ большого числа выполненных капитальных дноуглубительных и выправительных работ на

Рис. 51. Улучшение участка р. Волги по проекту Н. Н. Жуковского:

*а* — план; *б* — поперечный разрез; *1* — прорезь через пойму; *2* — прорезь через побочень; *3* — укрепленный берег; *4* — оградительный вал; *5* — запруда; *6* — кальматирующее сооружение; *7* — зимнее водостеснительное устройство; *8* — кустарник; *9* — лесонасаждение; *10* — наивысший горизонт; *11* — средний меженный горизонт; *12* — наинизший горизонт; *13* — проектная глубина; *14* — наибольшая глубина.

ряде рек позволил установить, что там, где положение выправительной трассы не было согласовано с общим направлением руслоформирующей деятельности реки и трасса располагалась на извилистом меженном русле, нередко уходя в пески от опорных берегов, эффект выправления был весьма незначительным и недолговечным. Многие сооружения быстро разрушались или оказывались в судовом ходу, что вызывало необходимость их разборки.

Чтобы избежать в дальнейшем подобных ошибок, при проектировании судовых ходов необходимо везде, где возможно, использовать ведущие берега (левый и правый) в качестве одной из сторон выправительной трассы. Берег является мощным естественным сооружением, равного которому мы еще не можем построить.

При такой схеме расположения выправительной трассы, во-первых, достигается ее устойчивость в плане и создается гарантия того, что выправительные сооружения (установленные у противоположного берега) никогда не окажутся в судовом ходу, во-вторых, достигается заметная экономия средств по сравнению с тем случаем, когда выправительные сооружения расположены у обоих берегов. Н. И. Маккавеев в результате исследования выправительных работ на рр. Вятке и Северной Двине пришел к тем же выводам.

В качестве ведущего берега может быть выбран не только коренной берег, но и пойменный яр, особенно если он суглинистый, а пойма покрыта зарослями леса или кустарника. Если ведущий берег имеет местные неровности, то надо предусмотреть работы по его выравниванию путем срезки мысов взрывными работами, землечерпанием или посредством перекрытия выбоин короткими полузапрудами.

Перемещение судового хода к ведущему берегу должно достигаться в основном посредством капитальных землечерпательных прорезей. Однако в ряде случаев, особенно на больших реках (Волга, Северная Двина, Обь и др.), размеры побочней или пойменных массивов, подлежащих отторжению, настолько велики, что эти операции в настоящее время не могут производиться в широких масштабах. В будущем при пополнении технического флота более мощными экономичными земснарядами, или в случае более благоприятного развития русловых переформирований представится возможным осуществить такой перенос судового хода. Поэтому следует по возможности избегать постановки выправительных сооружений в местах, где они могут повлиять на разрастание песков, отклоняющих судовой ход от ведущего берега.

Когда судовой ход нельзя перенести к ведущему берегу из-за наличия возле него каменистых гряд, мощных высыпок из действующих оврагов или мощных побочней, необходимо использовать мыс коренного или пойменного берега в качестве струе-

направляющего сооружения для обеспечения устойчивости судового хода, переваливающего от одного ведущего берега к другому. Судовой ход в этом случае необходимо располагать по направлению продолжения плеча ведущего берега.

Гораздо труднее решить проблему обеспечения устойчивости судового хода, огибающего высокий выпуклый берег.

При переносе судового хода к выпуклому коренному берегу и при наличии значительного поперечного уклона в сторону старого судового хода (что можно обнаружить по траекториям движения поплавков) рекомендуется перекрывать старый судовой ход запрудой. Она будет способствовать ликвидации поперечного уклона и созданию нормальных условий захода воды в новый судовой ход. Пример улучшения участка реки описанным способом приведен на рис. 52.

Рис. 52. Улучшение переката за изгибом коренного берега:

*1* — тюфячная запруда; *2* — дамба из рефулированного грунта; *3* — прорезь

В тех местах, где ведущий берег затопляется весенними водами, следует, как это рекомендует Н. Н. Жуковский, возводить незатопляемый береговой вал, который должен предотвращать занос судового хода в паводок. Увеличить влияние берега на формирующую деятельность потока можно также путем посадки леса и кустарника. Полоса растительности в известной мере заменяет сооружение.

Рис. 53. Создание обтекаемого захода в прорезь

**Обтекаемость захода в прорезь.** Из гидравлики известно, что выдвинутые в поток препятствия и сооружения нарушают плавность прохода струй жидкости, вызывают срывы течения, завихрения и отложения наносов. Выступающие в русло заструги, косы и шалыги часто являются причиной обмеления переката. Однако при проектировании прорезей им не всегда уделяется внимание.

Примером служит приведенный на рис. 53 план одного типичного переката р. Волги с затонской частью. Трассы поплавков образуют характерный веер струй течения в подвалье переката. Эти струи переносят наносы с верхнего побочня на нижний, образуя седловину переката как раз по направлению течения.

В проекте землечерпательной прорези на перекате были допущены две ошибки: во-первых, при подрезке в верхней части левого побочня грунт был уложен по пути транспорта наносов с верхнего побочня на нижний и, во-вторых, при разработке на корыте переката прорези вдоль нижнего побочня была оставлена часть песчаной перемычки у верхнего побочня и на нее уложен извлеченный грунт. Не были приняты меры к уменьшению переноса наносов с верхнего побочня на нижний, но свалкой грунта на пути их движения этот процесс был усилен. В результате вполне закономерно последовал быстрый занос корыта переката, который виден на плане, снятом после разработки прорези.

Рис. 54. Оставление кос на кромках прорези: *а* — план до разработки прорези; *б* — план после разработки прорези

В данном случае прорезь надо было разработать вдоль верхнего побочня, не оставляя от него заструг и кос, а грунт уложить также на верхнем побочне валом, прекратив тем самым перетоки с верхнего побочня на нижний и направив течение по корыту переката. При подрезке побочня в верхней части переката грунт следовало укладывать с помощью удлиненного рефулера на среднюю повышенную часть побочня.

На рис. 54 показано, как оставление кос на кромках прорези приводит к образованию перемычек на судовом ходу. Эти, на первый взгляд незначительные, косы многими производственниками не учитываются, и в результате имеет место преждевременный занос прорези. Поэтому при проектировании и разработке прорезей необходимо стремиться подрезать выступающие в судовой ход косы и заструги, нарушающие плавность прохода по прорези и создающие завихрения в потоке.

Еще чаще наблюдаются случаи появления шалыг, остав-

шихся от перерезаемой на перекате косы или естественно образовавшихся в русле. Над шалыгой создается местное повышение скоростей, влияющее на увеличение рыскливости судов и плотов.

С другой стороны, за шалыгой, как и за косой, создаются винтообразные течения, выносящие наносы на судовой ход, что способствует его обмелению. Поэтому оставление шалыг на судовом ходу недопустимо, и если по тем или иным соображениям шалыга не попадает в пределы проектируемой прорези, необходимо произвести специальные работы по ее подрезке.

Рис. 55. Перекат с боковыми емкостями русла

**Закрытие боковых емкостей русла.** На рис. 55,*а* приведен план характерного переката с боковыми емкостями русла по съемке 1953 г. Взаимные подпоры отдельных частей русла на перекате этого типа создают поперечные уклоны и веерообразные течения, ухудшающие состояние судового хода.

В результате на длинном участке реки получается извилистый и неудобный судовой ход с неустойчивыми глубинами. В меженный период на этом перекате приходится производить подчистки вытягивающихся в том или ином месте кос.

В рассматриваемом случае землечерпательные прорези выполнялись у правого берега (прорези № 1 и № 2), однако устойчивости судового хода достигнуто не было и приходилось в межень производить несколько подчисток.

Причиной этому являются левобережные боковые емкости, расслаивающие поток и привлекающие часть поверхностного потока к себе, в то время как насыщенные наносами донные слои направляются по судовому ходу.

Правильным решением на этом перекате была бы разработка прорези № 3 с подрезкой левобережных отмелей и с укладкой отвалов грунта в боковые левобережные емкости с целью постепенного их закрытия, так как закрытие левобережных емкостей при разработке правого хода очень трудоемкое дело.

Для быстрейшего улучшения судового хода на перекате такого типа необходимо рекомендовать, кроме укладки грунта в боковые емкости, перекрытие их в нескольких местах выправительными сооружениями.

При систематическом выполнении указанного комплекса работ перекаты такого типа можно быстро превратить в перевалы с большими глубинами. На рис. 55,*б* показан тот же перекат (съемка 1957 г.) после того, как на нем в течение четырех лет производились работы по подрезке левобережной косы и закрытию боковых емкостей. Перекат теперь имеет пологий, широкий и глубокий судовой ход и не требует крупных ежегодных землечерпательных работ.

**Учет взаимосвязи между рельефом русла и рельефом водной поверхности.** Благодаря поперечным уклонам водной поверхности в русле реки образуются поперечные циркуляционные течения, вызывающие размывы, перенос и отложение наносов. Детальными лабораторными исследованиями на ряде типовых участков русла А. И. Лосиевский установил связь рельефа водной поверхности с рельефом русла.

Рис. 56. Обтекание осередка

Например, на участке русла с осередком (рис. 56) рельеф водной поверхности формируется следующим образом. У приверха осередка происходит подъем водной поверхности и растекание струй, в средней части осередка водная поверхность понижается от берегов в сторону осередка и наибольшее понижение имеет место в его ухвостье. Соответственно и донные течения отклоняются в сторону осередка и перемещают сюда транзитные наносы, которые, оседая, наращивают его ухвостье.

Исследованием рельефа водной поверхности на перекате (рис. 57) обнаружено, что при затопленных побочнях наибольшие поперечные уклоны наблюдаются над побочнями, а повышенные участки водной поверхности соответствуют плесовым участкам.

Рис. 57. Связь рельефа дна и рельефа водной поверхности на перекате:
*а* — план переката в изобатах; *б* — план водной поверхности в изолиниях

На плане с изолиниями водной поверхности отчетливо видно повышение уровня воды в средней части корыта переката, где глубины больше, чем на примыкающих побочнях.

Водная поверхность как бы зеркально отображает характер донного рельефа переката.

Правильность своих лабораторных выводов А. И. Лосиевский доказал планами свободной поверхности реальных перекатов, полученными им на основании точной нивелировки водной поверхности в натуре с помощью специально сконструированного прибора «уклонографа».

Рис. 58. Схема выправления Воютинского переката

Имея в виду, что в районах больших уклонов водной поверхности происходит размыв дна, а в районе малых уклонов — аккумуляция наносов, инженер И. А. Шадрин предложил для улучшения перекатов принцип регулирования потока путем уравнения уклонов свободной поверхности потока. Для искусственного изменения уклона поверхности воды может быть использована постановка выправительных сооружений, создающих дополнительное сопротивление движению потока. Перераспределение поверхностных уклонов должно производиться с расчетом, чтобы нужные нам участки из заносимых превратились в зону размыва. Для пояснения указанного принципа регулирования на рис. 58 приведен разработанный И. А. Шадриным проект выправления Воютинского переката р. Оки. Этот перекат расположен на прямолинейном участке в месте раздвоения русла островом на два рукава. Точным нивелированием было установлено, что уровень воды вдоль правого берега в естественном состоянии выше, чем вдоль левого, т. е. что от правого берега к левому имелся поперечный уклон.

Вследствие такого распределения уклона значительная часть поверхностных вод потока в период межени проходила за осередком вдоль левого берега, а донные слои потока, насыщенные наносами, проходили преимущественно основным руслом реки вдоль правого берега.

В основу проектной схемы выправления Воютинского переката были положены следующие соображения. Если выше острова у левого берега поставить сооружение № 1 в виде полу-

запруды, направленной вверх по течению под углом 70°, то перед ним образуется подпор, необходимый для выравнивания поперечного уклона в верхней части переката. В результате этого подпора поток будет отжат от левого берега к середине русла, и его энергия будет сосредоточена вдоль судового хода для работы по перемещению наносов. За сооружением должна образоваться зона пониженных горизонтов воды, в которую будут засасываться донные течения, насыщенные наносами, и, следовательно, русло левого рукава должно стать зоной аккумуляции наносов.

Если далее у ухвостья острова в левом рукаве установить сооружение № 2, то выше его также создаются подпор и зона отложения наносов, транспортирующихся по левому рукаву. Тем самым будет предотвращен вынос наносов на фарватер в нижней части правого рукава. Кроме того, понижение отметок водной поверхности ниже сооружения № 2 в левой части русла будет способствовать сливу основной части потока в этом направлении и поддержанию глубокой борозды на перевале. С целью предотвращения растекания потока в теневую зону за плечом правого берега предусматривалась постановка сооружения № 3, чтобы создать динамический подпор до плеча правого берега, который будет способствовать отклонению основной массы потока к левому берегу.

Полученные результаты в полной мере подтвердили правильность проектных предложений, изложенных выше. Однако необходимо учитывать, что если осередок быстро спускается вниз по реке, построенные сооружения могут оказаться с течением времени на фарватере. Поэтому осуществление предложения т. Шадрина наиболее эффективно на перекатах, постоянно находящихся на одном месте.

## § 21. УЛУЧШЕНИЕ ПЕРЕКАТОВ ТИПА IA

Улучшение судоходных условий рассматриваемого типа перекатов может осуществляться одним из следующих способов.

1. Разработка прорези по существующему корыту переката с удалением грунта шаландами (рис. 59,*а*):

а) в выбоину верхней плесовой лощины *1;*

б) в затонскую часть переката *2.*

2. Разработка прорези по существующему корыту переката с удалением грунта рефулером (рис. 59,*б*):

а) на нижний побочень *1;*

б) на верхний побочень *2;*

в) на центральную часть побочней переката с целью их наращивания и закрепления.

3. Полное или частичное перекрытие затонской части нижней плесовой лощины (рис. 59, *в, г*) путем:

а) постройки выправительного сооружения *1,* непосредственно закрывающего затонскую часть;

б) рефулирования дамбы *2* вдоль верхнего побочня, которая перекрывает в нем промоины и повышает его отметку. Затонская часть при этом может быть перекрыта или оставлена без перекрытия.

4. Отторжение полностью или частично нижнего побочня с закрытием или без закрытия затонской части.

5. Отторжение полностью или частично верхнего побочня.

6. Отторжение общего побочня у смежных двух перекатов с локализацией боковых емкостей.

Рис. 59. Разработка прорези по старому корыту переката

Рассмотрим каждое из вышеприведенных мероприятий в отдельности.

**Прорезь по существующему корыту переката.** Трасса прорези обычно намечается по максимуму глубин, ближе к верхнему побочню, так как прорези, расположенные у верхнего побочня, более устойчивы, чем расположенные у нижнего побочня, и, кроме того, они удобнее для судоходства. Чаще всего суда садятся именно на нижнюю косу переката, что наиболее опасно. Посадка на верхнюю косу — явление более редкое, а снятие судна с мели в этом случае значительно облегчается тем, что этому помогает течение. Опасаясь навала на нижнюю косу, судоводитель всегда отдает предпочтение прорези, расположенной у верхнего побочня.

При удалении грунта шаландами укладывать его следует или в затонскую часть переката, или в выбоину верхней плесовой лощины, чтобы заглушить ее. Укладка туда грунта из прорези сама по себе служит средством выправления переката.

Предварительно следует проверить наличие на перекате поперечных течений и их направление. Если слив направлен из затонской части, укладывать в нее грунт не следует во избежание выноса его на судовой ход. В этом случае грунт лучше уложить на побочни.

Отвал грунта в выбоину верхней плесовой лощины следует допускать тогда, когда глубины в затонской части и на центральных частях побочней не позволяют отвозить его сюда шаландами, а также если необходимо сохранить затонскую часть переката для судоходных целей (подход к причалам, затону и т. п.).

Грунт, сложенный в выбоину верхней плесовой лощины, часто выносится паводком и не способствует выправлению переката.

Грунт, удаляемый при помощи рефулера, укладывают по возможности на верхний побочень, повышая его отметку и уменьшая переливы в затонскую часть, что способствует устойчивости прорези.

Отвал грунта, уложенный на подводный нижний побочень, препятствует движению судов и плотов, особенно в период летних и осенних паводков, когда развиваются свальные течения. Кроме того, сползая в нижнюю плесовую лощину, этот грунт сужает и искривляет ее. Уменьшение пропускной способности нижней плесовой лощины создает подпор на перекате и переливы через нижний побочень, способствуя образованию протоки в корневой его части.

В качестве примера вредного влияния отвала грунта на устойчивость судового хода можно привести Нижне-Теньковский перекат р. Волги. В 1938—1941 гг. на этом перекате вследствие спуска верхнего побочня происходило искривление и резкое ухудшение судового хода с одновременным развитием побочневой протоки через нижний побочень. Перекат имел очень неудобный судовой ход, неустойчивые глубины и требовал больших ежегодных объемов землечерпательных работ (1939 г. — 168 тыс. $м^3$, 1940 г. — 138 тыс. $м^3$).

В 1941 г. была выполнена капитальная прорезь с частичным отторжением нижнего побочня с объемом 142 тыс. $м^3$ и отвалом грунта на оставшуюся часть нижнего побочня. В первое время новый судовой ход, имеющий большой радиус закруглений и прямолинейное течение, был весьма удобен для судоходства, однако вскоре он начал ухудшаться, а объем землечерпательных работ стал возрастать.

В сильно удлиненную затонскую часть переката, отделенную от верхнего плеса затопленными даже в межень верхними песками, происходили громадные перетоки поверхностных вод, а на судовой ход направлялись нижние, насыщенные наносами слои потока. Перекат сильно заносился.

Оставшаяся часть нижнего побочня, на которую ежегодно производились отвалы грунта, быстро вновь разрослась в мощный побочень, который, спустившись вниз, сильно сузил нижнюю плесовую лощину переката. Судовой ход искривился, и под влиянием подпора, вызванного недостаточной пропускной способностью нижней плесовой лощины, поток начал усиленно разрабатывать корень нижнего побочня (рис. 60,*а*). В результате за очень короткий период времени, с 1941 г. по 1945 г., судовой ход настолько искривился, что в 1945 г. вторично пришлось отторгнуть часть нижнего побочня, чтобы создать нормальные условия для судоходства. К сожалению, и в этот раз удаленный грунт положили на оставшуюся часть нижнего побочня (рис. 60, *б*). Последующие годы подтвердили неправильность этого мероприятия, так как эксплуатационное землечерпание на перекате осталось весьма большим. Этого можно было избежать, если бы положить извлеченный грунт на верхний побочень в виде дамбы.

Рис. 60. План Нижне-Теньковского переката:
*а* — по съемке 1943 г.; *б* — по съемке 1945 г.

При рассмотрении планов перекатов с выполненными на разных реках за последние годы прорезями был обнаружен ряд случаев раздвоения судового хода на перекате как результат неправильно уложенного грунта при разработке прорези. В особенности эти недостатки имеют место в Обском бассейне. Ниже приведены для примера два переката на р. Оби.

На рис. 61 изображен Мочинский перекат. По съемке 1955 г. судовой ход проходит на нем у левого берега. При подрезке нижнего побочня переката для расширения судового хода отвал грунта укладывался на нижний побочень.

В результате работ, проведенных в 1955 и 1956 гг., из этого грунта образовался осередок, раздвоивший судовой ход на перекате и образовавший два корыта, причем оба мелкие в межень.

На рис. 62, изображен Нижне-Кругликовский перекат. До 1958 г. судовой ход на нем проходил под верхним побочнем по

Рис. 61. Совмещенный план Мочинского переката

направлению *аб*. Вдоль правого берега протоки не было. Весенним паводком 1956 г. замело старый ход и в значительной мере размыло протоку вдоль правого берега по направлению *вг*.

Рис. 62. План Нижне-Кругликовского переката:
*1* — съемка до разработки; *2* — съемка после разработки прорези

На спаде паводка 1958 г. была разработана прорезь по вновь развивающемуся направлению *вг*, а отвал грунта был уложен по линии *де* (между двумя ходами) в виде осередка на перекате. После спада паводка на перекате вновь происходит размыв старого судового хода и ухудшение нового. Состояние переката в период межени изображено на нижнем рисунке. На перекате параллельно существуют два судовых хода, в равной мере требующие землечерпания.

На обоих рассмотренных перекатах вследствие отвала грунта в виде осередка на середине живого сечения русла обычный ход русловых деформаций был нарушен. Осередок, уменьшая живое сечение русла, усилил подпор на перекате, отчего начался усиленный размыв через нижний побочень новой протоки. В результате в период межени на перекатах было два судовых хода, не имеющих устойчивых и достаточных глубин.

Какой бы из двух ходов ни был разработан, емкость второго хода ухудшает состояние переката. Единственный выход из сложившегося положения — закрытие старого хода дамбой из рефулированного грунта.

На Мочинском перекате (см. рис. 61) извлеченный грунт необходимо было уложить на верхний побочень, а если по каким-то особым причинам этого сделать было нельзя, то следовало, работая на длинный рефулер, уложить грунт к нулевой изобате у самого корня нижнего побочня. Это необходимо было сделать даже в том случае, если бы для этого потребовалась лишняя перевалка грунта.

На Кругликовском перекате наиболее рациональным решением была бы укладка извлекаемого грунта на нижнюю косу. Тогда она не увеличивала бы подпор на перекате и не сужала бы нижнюю плесовую лощину.

На перекатах, не имеющих развитой затонской части, извлеченный из прорези грунт, можно укладывать на нижний побочень в большем числе случаев, чем на перекатах с затонской частью. Примером переката, не имеющего развитой затонской части, может служить Средне-Ревякский перекат р. Волги (рис. 63). Выше переката вдоль левого берега спускается песчаная коса *А*, которая соединяется с верхним побочнем переката и засоряет судовой ход.

В этих условиях назначение прорези под верхней косой (прорезь № 1), безусловно, является неправильным, так как здесь она будет занесена спускающейся косой. Прорезь необходимо трассировать вдоль нижнего побочня (прорезь № 2), а извлеченный из нее грунт желательно укладывать рефулером или шаландами в ухвостье верхнего побочня; лишь в крайнем случае извлеченный грунт можно укладывать в корневую часть нижнего побочня.

Для перекатов без затонской части или со слаборазвитой затонской частью можно рекомендовать отвал грунта частично на приверх нижнего побочня и придавать ему форму продольной дамбы на продолжении ведущего яра (рис. 64). Нижний конец дамбы не должен спускаться ниже траверза наиболее повышенной части побочня. Струенаправляющее действие дамбы, усиливающей циркуляционные течения в верхней плесовой лощине, весьма полезно для поддержания глубин на перекате в межень. Широкое применение подобных дамб на р. Оке дало

положительные результаты: способствовало устойчивому поддержанию глубин в межень и сократило повторность эксплуатационного землечерпания. Однако в паводок дамбы трудно сохранять, и к следующей межени приходится возводить их заново.

Рис. 63. План Средне-Ревякского переката

**Закрепление нижнего побочня.** Для углубления перекатов рассматриваемого типа инженер Н. С. Лелявский предложил и применил в своей практике постановку струенаправляющей

Рис. 64. Струенаправляющая дамба на приверхе нижнего побочня

дамбы № 1 на нижней побочне по направлению продолжения ведущего берега (рис. 65). Благодаря этой дамбе и полузапрудам № 2, 3, 4, закрепляющим нижний побочень, на перекате получается довольно крутой перевал судового хода. При этом обес-

печивается довольно быстрое увеличение глубин, так как создаются условия для односторонней циркуляции в верхней плесовой лощине.

Лабораторные исследования А. И. Лосиевского показали, что повышение и укрепление нижнего побочня приводят к радикальному изменению гидравлического режима переката и развитию внутренних течений, способствующих углублению его корыта. Однако данный метод не предотвращает последующих переформирований русла, приводящих в дальнейшем к ухудшению судоходных условий.

Рис. 65. Выправительные сооружения на нижнем побочне

Анализируя результаты закрепления нижнего побочня, Н. И. Маккавеев говорит:

«Поскольку при этом сооружениями закрепляется только один из элементов переката, все остальные элементы продолжают смещаться вниз по течению. Корыто переката постепенно надвигается на сооружения, нередко искривляясь в большей степени, чем было предусмотрено при проектировании. Сооружения приходится постепенно разбирать или постоянно ремонтировать» [51].

Как пример можно привести деформации Шеланговских перекатов р. Волги, на которых были возведены выправительные сооружения на нижнем побочне. В процессе переформирования нижний побочень на Шеланговском перекате сполз ниже, судовой ход и верхний побочень надвинулись на сооружения, которые стали препятствовать судоходству. Чтобы обеспечить проход судовых составов через перекат, сооружения пришлось разобрать.

Крутое сопряжение судового хода с нижней плесовой лощиной вызывает напор потока на берег, способствующий усиленному размыву последнего. Поскольку породы, слагающие берег, обычно являются легкоразмываемыми, приходится производить крупные берегоукрепительные работы на большом протяжении, иначе нижняя плесовая лощина сильно искривится. Перечисленные недостатки метода Лелявского мешают его широкому распространению, однако в отдельных случаях этот метод можно использовать на реках с относительно малым содержанием наносов и крупнозернистыми грунтами (рр. Томь, Белая и др.), где перекаты и их побочни относительно стабильно находятся на одном месте и не спускаются вниз. В первую очередь эта рекомендация относится к перекатам меандрирующих рек, расположенным в излучине.

**Закрепление верхнего побочня**. Закрепление выправительными сооружениями верхнего побочня воздействует на режим переката следующим образом.

При закреплении верхних песков уменьшается интенсивность поступления перемещающихся вдоль верхнего побочня наносов на корыто переката и на нижний побочень. Последний, будучи не закреплен, спускается вниз по течению относительно быстрее, и корыто переката уширяется и выпрямляется.

Одним из методов улучшения перекатов путем закрепления верхнего побочня является способ, предложенный А. И. Лосиевским. Этот метод основан на создании на перекате таких внутренних течений, при которых поступающие на седловину переката наносы продолжали бы свое движение в нижнюю плесовую лощину.

Для этого у верхнего побочня переката устраивается затопленное донное сооружение, образующее с направлением потока угол 20—25°.

Гребень сооружения понижается от корня к голове. Переливающиеся через гребень струи потока вызывают за сооружением (с его низовой стороны) образование винтообразного потока, двигающегося вниз по течению, увлекающего наносы в подвалье и размывающего дно переката.

Рис. 66. Сооружения Лосиевского на Костенском перекате

На рис. 66 приведена схема улучшения Костенского переката р. Волги с помощью наносоуправляющего сооружения А. И. Лосиевского. На схеме показаны изменения проектной изобаты за пятилетний период после возведения сооружения (с 1938 по 1943 г.).

Под влиянием сооружения судовой ход занял более пологое направление и расширился. До постройки сооружения средний годовой объем землечерпания на перекате составлял 53,7 тыс. $м^3$, а в последующие пять лет после постройки снизился до 23,8 тыс. $м^3$.

После 1943 г. влияния сооружений на объем землечерпания уже не ощущалось. Это объясняется тем, что ухвостье верхнего побочня сместилось вниз по течению и закрыло сооружение. Сооружение активно работало 5 лет.

Таким образом, недостатком этого способа выправления перекатов, не получившего широкого распространения, является довольно быстрое прекращение активного воздействия на поток сооружений, которые заносятся наносами и остаются в стороне

от судового хода. Через несколько лет приходится строить новые сооружения.

Этот способ может быть рекомендован для рек со сравнительно устойчивым руслом. Срок действия подобных сооружений можно значительно удлинить, если закрепить весь массив верхнего побочня кустарниковыми посадками или ленточными тюфяками.

Эти мероприятия способствуют отложению наносов на побочне в паводок, повышению его отметок и уменьшению заносимости корыта переката. Однако в этом случае возможно следующее явление.

Вследствие закрепления верхнего побочня уменьшается приток наносов на нижний побочень, и он начинает интенсивно смещаться вниз по течению, а высота его уменьшается. Из-за быстрого смещения нижнего побочня корыто переката сильно расширяется и мелеет, а в его средней части образуется осередок. В книге автора «Капитальные дноуглубительные работы на перекатах» был приведен пример Верхне-Рязанского переката р. Волги, где с течением времени при закрепленном верхнем побочне нижний побочень сместился вниз настолько, что на перекате образовалось два корыта, причем оба мелководные и неудобные для судоходства.

**Закрытие затонской части.** Выше уже было показано отрицательное влияние затонской части на состояние перекатов рассматриваемого типа и устранение этого влияния. Ниже более подробно рассматриваются рекомендуемые способы закрытия затонской части.

В тех случаях, когда затонская часть переката узка, а верхний побочень развит в длину, следует строить перекрывающее затонскую часть сооружение в ее нижней части. Создавая выше себя подпор, это сооружение способствует ликвидации перетока воды через верхнюю косу и сосредоточению там отлагающихся наносов. Когда затонская часть очень широкая и глубокая или когда она является проточной, для повышения отметок верхнего побочня и ликвидации переливов через него более эффективным средством является рефулирование продольной дамбы (см. рис. 59, *г*).

Такая дамба является продолжением верхнего побочня и в своей концевой части должна иметь отметки побочня. Направление дамбы должно совпадать с трассой движения поплавков в этом месте при таких уровнях, когда вода заливает дамбу.

Весеннее течение обычно не размывает дамбу, так как струи потока приблизительно параллельны ее оси. Наибольшая опасность размыва возникает при средненизких уровнях воды, когда образуется поперечный уклон в сторону затонской части и возможен перелив через дамбу. Основываясь на опыте постройки таких дамб в ряде бассейнов, можно рекомендовать возводить

их до такой отметки, чтобы гребень дамбы выходил из-под воды до начала образования слива в затонскую часть переката. Для проектирования дамб необходимо тщательно изучить режим течений на перекате при различных положениях уровня воды. Неудачный выбор направления и отметки дамбы неизбежно приведет к большим ее разрушениям или к необходимости крупных затрат на крепление, правильно запроектированные и построенные продольные дамбы на верхнем побочне хорошо сохраняются и без крепления.

Выправительное сооружение, перекрывающее затонскую часть переката, требует применения более тяжелых конструкций из хвороста и камня или из рефулированного грунта, но с обязательным укреплением поверхности дамбы. Перекрытие затонских частей широко применялось при выправлении р. Белой. На основе анализа результатов выправления этой реки К. И. Россинский предложил на реках масштаба Белой затонские части длиной до 800 *м* перекрывать одним сооружением. При большей длине следует строить дополнительные сооружения. Голова нижней полузапруды должна быть доведена до гребня верхнего побочня и иметь отметку не меньше, чем у последнего. Ближе к берегу отметка сооружений должна возрастать.

Для уменьшения вредного влияния затонской части в ней иногда создаются поля усиленной шероховатости, особенно на реках в лесной зоне. Затонская часть перекрывается ветвистыми сооружениями, расположенными поперек ее в несколько рядов. Иногда ряды ветвистых сооружений располагаются двумя системами пересекающихся линий. Однако поля шероховатости из ветвистых сооружений через 2—3 года обычно полностью выходят из строя и требуют замены.

Положительно сказывается на состояние переката в период его формирования проводимое одновременно с локализацией затонской части постепенное наращивание побочней путем укладки грунта в их корневые части или устройство поперек побочней нескольких рядов плетней в канавках, укладка расстилочных тюфяков или рассадка кустарника. Повышение побочней приводит к тому, что они начинают обнажаться при более высоких уровнях воды, что способствует лучшему промыву переката к наступлению межени.

Многолетний опыт работ во многих бассейнах показал, что перекрытие затонской части и повышение отметок побочней, положительно сказываются на состоянии переката. Глубины на нем увеличиваются, а объем эксплуатационного землечерпания на продолжительное время резко сокращается. В отдельные годы перекат совершенно не требует землечерпания.

**Переуглубление нижней части прорези.** Концентрацию удельных расходов по корыту переката и, следовательно, ограниче-

ние «веера» струй можно получить при значительном переуглублении нижней части прорези.

Опыты по такому переуглублению были произведены и описаны Г. А. Бородзичем, по наблюдениям которого это мероприятие не только увеличивает устойчивость прорези, но и значительно улучшает условия захода судовых составов на перекат снизу. Для радикального изменения режима переката необходимо, чтобы глубины на нижней части прорези были не меньше, чем в затонской части переката.

При переуглублении нижней части прорези перекат выправляется, но только на одну навигацию. Поэтому переуглубление нижней части прорези целесообразнее проводить одновременно с постройкой струенаправляющей дамбы или других сооружений из грунта, используя для их возведения грунт, полученный при переуглублении.

**Отторжение нижнего побочня.** При рассмотрении руслового режима перекатов I типа было указано на характерный процесс систематического отторжения нижнего побочня и развития нового хода через побочневую протоку. В случае проведения на перекате работ по закрытию затонской части, этот процесс задерживается, но не прекращается и по истечении некоторого периода новый ход через нижний побочень опять начинает развиваться, а судовой ход искривляется и требует все большего объема дноуглубления.

Раньше среди путейских работников было распространено мнение, что надо поддерживать существующий судовой ход, несмотря на ухудшение его судоходных качеств и увеличение объема и повторности землечерпательных работ, до тех пор, пока новый ход через нижний побочень сам, без помощи землечерпания, разовьется до такой степени, что туда можно будет перенести судовой ход без капитальных работ [12].

Практика последних 15 лет показала, что ориентировка исключительно на саморазвитие нового судового хода не всегда правильна. В тех случаях когда существующий судовой ход через перекат круто направлен и представляет большие неудобства для судоходства весьма эффективными являются работы по искусственному отторжению нижнего побочня. В этом случае сразу достигается значительное улучшение судоходных условий на перекате и при определенных условиях сокращение объемов эксплуатационного землечерпания.

Нами проанализировано изменение формы кривых $T=f(H)$ в многолетнем разрезе в зависимости от стадии русловых переформирований перекатов этого типа. На рис. 67 приведены в качестве примера кривые $T=f(H)$ за много лет для одного переката.

Чем круче становится существующий ход, тем больше влево отодвигается вся кривая и при более высоких уровнях воды она пересекает кривую дифференцированных гарантий плеса (на

рис. 67 — кривая за 1939, 1940 и 1941 гг.). Такой характер кривых вполне увязывается с происходящими на перекате переформированиями. Действительно, чем круче направлено корыто переката, тем больше угол расхождения динамической оси потока с осью судового хода, меньше скорости течения в судовом ходу в паводок, больше отложения на корыте переката и меньше его глубина. В 1945 г. была произведена работа по отторжению нижнего побочня, и судовой ход был перенесен. В даль-

Рис. 67. Кривые $T=f(H)$ для разных состояний переката

нейшем по мере отмирания старого судового хода режим глубин на перекате заметно улучшился. Кривые $T=f(H)$ за 1945, 1948 и 1950 гг. проходят заметно правее кривых 1939—1941 гг. Кроме того, сама форма кривых постепенно изменяется. Намыв переката на спаде паводка и соответственно выпуклость кривых влево между уровнями воды 2,8—1,8 *м* уменьшаются. В 1950 г. кривая $T=f(H)$ проходит на всем протяжении приблизительно под углом 45° без резких переломов. Этому моменту соответствует и наилучшее состояние переката: судовой ход на нем широкий и глубокий, очерченный по пологой кривой, старый ход в значительной степени отмер и даже не имеет совсем проектной изобаты. Таким образом, по характеру кривой зависимости $T=f(H)$ можно судить о состоянии переката, его морфологии, судоходных качествах и необходимых объемах путевых работ.

Работы по отторжению нижнего побочня в ряде случаев следует производить в комплексе с выправительными работами, имеющими целью закрытие старого судового хода.

Показателен пример одного из перекатов р. Волги (рис. 68). В результате проведенного на нем отторжения нижнего побочня судоходные условия значительно улучшились. Однако объ-

Рис. 68. Отторжение нижнего побочня:
*а* — план до закрытия старого хода; *б* — план после закрытия старого хода; *1* — капитальная прорезь; *2* — место отвала грунта; *3* — ось намытой дамбы

ем эксплуатационных землечерпательных работ не только не сократился, но даже увеличился, и только после того, как в 1953 г. старый ход был закрыт дамбой из нарефулированного земснарядами грунта, объем эксплуатационных землечерпательных работ резко уменьшился.

Основной причиной увеличения объемов землечерпательных работ при отторжении нижних побочней является увеличение вредного влияния нижней плесовой лощины в связи с ее удлинением после отторжения нижнего побочня. Веерообразные пе-

ретоки поверхностных осветленных вод из верхней плесовой лощины через верхние пески и направление глубинных, насыщенных наносами слоев потока на судовой ход в значительной степени ухудшают состояние корыта переката.

Отрицательное влияние остающейся после отторжения нижнего побочня затонской части особенно заметно в тех случаях, когда нижняя плесовая лощина имеет значительную ширину и большую емкость, и когда верхний побочень имеет низкие отметки и через него происходит перелив воды при средних и низких уровнях воды, а также когда старый ход имеет достаточно пологое направление и не представляет больших сопротивлений для движения потока, а новый ход длиннее старого.

Рис. 69. Планы Ляховского переката: *а* — съемка 1942 г.; *б* — съемка 1950 г.

Наоборот, на многих перекатах, где было произведено отторжение нижнего побочня, наряду с улучшением судоходных условий было достигнуто также и значительное снижение объемов эксплуатационных землечерпательных работ, хотя затонская часть не была перекрыта. Например, на Ляховском перекате р. Волги (рис. 69) до 1942 г. производилось ежегодное эксплуатационное землечерпание в объеме 40—70 тыс. $м^3$, а в 1941 г. — 149 тыс. $м^3$ и все же судовой ход имел исключительно малые радиусы кривизны. В 1942 г. на перекате была выполнена капитальная прорезь, по которой судовой ход получил пологие очертания с большим радиусом закругления и устойчивыми глубинами. После этого и до настоящего времени эксплуатационное ремонтное землечерпание проводится на перекате в незначительном объеме и не ежегодно (в среднем по 6 тыс. $м^3$ в год).

Коренное улучшение судоходных условий с созданием устойчивых глубин и резким снижением объема эксплуатационных землечерпательных работ достигнуто в результате отторжения нижнего побочня и без закрытия затонской части на Нижне-Шашкарском, Бахиловском перекатах р. Волги, Пуховском, Ошитковском, Ирпеньском, Налеснянском перекатах р. Днепра, Разбойном перекате р. Белой, Георгиевском перекате р. Вишеры и целом ряде других.

Сокращение объема эксплуатационного землечерпания без перекрытия затонской части достигается в следующих случаях:

а) если новый судовой ход заметно короче старого, а старый ход сильно искривлен; затонская часть переката узкая и вог-

нутая и на нее надвигается мощный и относительно высокий побочень;

б) когда новый судовой ход совпадает с направлением паводкового потока или мало отклоняется от него, т. е. когда не имеется переливов в затонскую часть или они незначительны;

в) когда на перекат сверху поступает много наносов.

Для решения вопроса о том, надо ли закрывать затонскую часть переката или ее можно оставить открытой, следует использовать материалы поплавковых наблюдений и определения поперечных уклонов на перекате. Ярко выраженный веер расходящихся струй на перекате говорит о том, что затонская часть вредно влияет на состояние судового хода и требует закрытия ее. Перепад уклонов в сторону затонской части также говорит об оттоке туда осветленных поверхностных вод.

Отсутствие ярко выраженного растекания струй и небольшие перепады уклона в затонскую часть указывают, наоборот, на возможность оставления затонской части открытой.

**Отторжение верхнего побочня.** Отторжение верхнего побочня и перенесение судового хода в верхнее положение, где раньше был судовой ход, отмерший с течением времени, не может улучшить перекат на длительный период.

Практика дноуглубительных работ в ряде бассейнов подтверждает это. По статистическим данным, за последние 15 лет только 30% работ по отторжению верхнего побочня привели к созданию относительно устойчивых глубин на новом судовом ходу и снижению последующего эксплутационного землечерпания.

Поэтому рекомендовать для улучшения состояния переката отторжение верхнего побочня, как правило, нельзя, но в отдельных случаях оно может оказаться полезным.

Первым исключением являются перекаты, расположенные на повороте русла, причем верхний побочень находится у вогнутого берега. Образование переката на этом месте можно объяснить только спуском его с лежащего выше прямого участка реки или выносами грунта из впадающих в этом месте в реку ручьев или оврагов.

В весенний период, когда поток двигается в коренных берегах, поворот русла создает усиленные поперечные циркуляции, под влиянием которых корневая часть верхнего побочня постепенно размывается, и с течением времени побочень может быть отторгнут даже естественным путем.

Разработкой капитальной прорези через верхний побочень на таком перекате (рис. 70) ускоряется естественный процесс его развития. Циркуляционное течение, вызванное изгибом русла, используется в таком случае для защиты прорези от наносов.

Вторым исключением являются перекаты с мощной затонской частью (широкой и глубокой), имеющие слаборазвитый

верхний побочень, приток наносов на который сверху незначителен. В этом случае прорезь через верхний побочень хорошо сохраняется и развивается до тех пор, пока верхний побочень не станет интенсивно пополняться наносами.

Рис. 70. Капитальная прорезь через верхний побочень

Хорошие результаты при отторжении верхнего побочня получаются при определенных условиях на сложных перекатах, расположенных у приверха и ухвостья мощного побочня. В этом случае оттортаемый побочень является нижним для верхнего переката и верхним для нижнего переката.

Рис. 71. План Нижне-Безводнинского переката:
*1* — эксплуатационная прорезь; *2* — капитальная прорезь

Примером может служить отторжение общего побочня на Нижне-Безводнинском перекате р. Волги (рис. 71). В этом районе у правого слабо вогнутого коренного берега был расположен мощный побочень, который с двумя левобережными побочнями образовал два Нижне-Безводнинских переката — первый на перевале от правого берега к левому и второй — от левого

к правому. Оба переката из-за крутизны судового хода затрудняли судоходство и требовали ежегодного землечерпания в значительных объемах.

При отторжении правобережного побочня в 1955 г. судовой ход перенесли к коренному вогнутому берегу и полностью ликвидировали Нижне-Безводнинские перекаты.

## § 22. ПРОРЕЗИ НА ПЕСЧАНО-ГАЛЕЧНЫХ И СУГЛИНИСТЫХ ПЕРЕКАТАХ (ТИП I, ГРУППА II)

Опыт капитального дноуглубления и выправления на перекатах с тяжелыми грунтами показал более высокую эффективность этого метода улучшения судоходных условий на них, чем на песчаных перекатах. После разработки на этих перекатах новых судовых ходов эксплуатационное землечерпание резко снижается и часты случаи полного его прекращения и превращения переката в глубоководный перевал.

Рис. 72. Планы Георгиевского переката:
*а* — по съемке 1939 г.; *б* — по съемке 1942 г.

Приведем несколько примеров капитального улучшения такого типа перекатов на рр. Вишере, Белой и Нижней Каме.

Георгиевский перекат (рис. 72) на р. Вишере расположен на почти прямолинейном участке реки с ведущим коренным правым берегом. В месте расположения переката со стороны правого берега в русло выходят трудноразмываемые суглинистые образования. Огибая их со стороны левого берега, меженное русло образовало два последовательных перевала, разделенные короткой плесовой лощиной. Вдоль правого берега располагалась протока, имевшая в межень глубины 40 *см*. Поддержание гарантийных глубин по судоходному левому рукаву требовало значительных землечерпательных работ. Расположен-

ный под углом к весеннему потоку на верхнем перевале в 40° и на нижнем в 30°, левый рукав ежегодно являлся зоной аккумуляции наносов.

Распыление потока по двум рукавам в межень обусловливало неустойчивость разрабатываемых прорезей даже в течение одной навигации. Криволинейность левого рукава не удовлетворяла требованиям буксировки плотов.

В 1940 г. была разработана капитальная прорезь *1* по правобережной протоке, имевшая несколько увеличенные габариты, рассчитанные на пропуск по правому рукаву всего меженного расхода воды. Левый рукав был перекрыт запрудой *2*, для возведения которой был использован суглинистый грунт, извлеченный из капитальной прорези.

После этого Георгиевский перекат по существу перестал существовать, так как глубины по новому прямолинейному судовому ходу, проложенному вдоль правого коренного берега, стали устойчивыми и не падали ниже плановых; землечерпательные работы на перекате больше не проводились.

Рис. 73. Перекат с длинной затонской частью:

*а* — до выправления; *б* — после выправления

Как уже было сказано выше, на реках с песчано-гравелистым ложем побочни имеют вытянутую вдоль реки форму. Здесь часто встречаются перекаты с длинным корытом и подвальем, образующие далеко заходящие друг за друга плесовые лощины.

Наиболее эффективным мероприятием по улучшению судоходных условий такого переката является закрытие затонской части. Однако вследствие большой длины корыта переката подпор от одного сооружения будет недостаточным для ликвидации поперечного уклона в затонскую часть переката. Поэтому перекрывать затонскую часть следует не одним сооружением, а двумя, в отдельных случаях еще большим числом.

Необходимость постановки в данных условиях дополнительного сооружения доказана практикой выправительных работ на ряде рек. На одном из перекатов р. Белой (рис. 73) проектом предусматривалось ликвидировать вредное влияние затонской

части путем установки одной полузапруды в ее нижней части.

После постройки полузапруды № 1 в нижней части переката были получены вполне удовлетворительные результаты. Гребень переката был размыт, и на перевале образовался хороший судовой ход с гарантийными глубинами. Однако поставленное

Рис. 74. Планы Усть-Реченского переката по съемке:
*а* — 1941 г.; *б* — 1946 г.; *в* — 1949 г.

одиночное сооружение ввиду значительной длины корыта переката не оказывало воздействие на увеличение глубин в верхней части переката.

В данном случае необходимо было поставить дополнительное сооружение № 2 в верхней части переката.

В качестве еще одного примера можно привести Усть-Реченский перекат нижней Камы (рис. 74). Он расположен на слегка криволинейном участке реки. Вдоль правого вогнутого берега располагается вытянутый вдоль русла низкий осередок, отделенный побочневой протокой, работающей весной, но не раз-

мывающейся из-за плотного гравелисто-галечного грунта дна. Левый судоходный рукав в обход побочня имел достаточно развитое русло с изобатами от 2 до 3 *м*, но так как паводковый поток пересекал его под углом, близким к 45°, выход из левого рукава постоянно являлся местом аккумуляции наносов.

Резкое ухудшение судового хода по левому рукаву началось с 1937 г. вследствие того, что медленно происходивший процесс размыва верхней плесовой лощины выше Усть-Реченского осередка достиг такой стадии, когда начался непосредственно размыв входа в правый рукав. Крупные землечерпательные работы по старому ходу должного эффекта не давали. В 1942 г. было решено отторгнуть побочень от вогнутого берега и перенести судовой ход в правый рукав. В весенний период 1943 г. по правому рукаву была разработана капитальная прорезь *1*, вынутый из нее грунт был уложен в старом судовом ходу в виде двух запруд *2* и *3*. Новый судовой ход с течением времени развился и при наличии устойчивых глубин был весьма удобен для судоходства.

В результате Усть-Реченский перекат был превращен в устойчивый перевал, почти не требующий землечерпания.

Рис. 75. Мушкаринский перекат

При проектировании путевых работ на перекатах с трудноразмываемым ложем мы не можем точно проследить тенденции развития русловых процессов в многолетнем разрезе, так как этот процесс происходит очень медленно и незаметно, однако, руководствуясь общими закономерностями развития речного русла, всегда можно правильно запроектировать мероприятия по коренному улучшению перекатов данного типа.

Хороший эффект на песчано-галечных и суглинистых перекатах дают выправительные сооружения по закреплению и наращиванию побочней в комплексе с землечерпанием с целью повышения их отметок и лучшего промыва с корыта переката наносов, отложившихся на нем в паводок. Особо хорошие результаты сооружения такого типа дали на рр. Белой и нижней Каме, где деформации побочней весьма незначительны.

На рис. 75 помещен план Мушкаринского переката р. нижней Камы. Расположенный в широком русле с низкими отметками пологих и очень вытянутых побочней, перекат имел длин-

ное и извилистое корыто, представляющее большие неудобства для судоходства и требовал для поддержания габаритов пути большого объема дноуглубительных работ. После постройки полузапруд из хворостяных тюфяков основной поток сосредоточился на фарватере, побочни повысили свои отметки. Судовой ход получил плавные очертания в плане. Объем эксплуатационного землечерпания сократился на 24%, глубины увеличились на 20 *см*.

## § 23. ПРОРЕЗИ НА СЛОЖНЫХ ПЕРЕКАТАХ I ТИПА

При трассировании эксплуатационных прорезей на перекатах такого вида нужно постоянно учитывать, что значительное изменение конфигурации русла у одного из перекатов может повлиять на состояние соседних перекатов. Нельзя сначала разрабатывать нижние перекаты группы, так как это может привести к быстрому обмелению верхних перекатов, вследствие ликвидации подпора и, как говорят, «спуска воды».

К тем же последствиям может привести излишнее переуглубление перекатов в межень, особенно на средних и малых реках.

Рис. 76. Трассирование прорезей на группе сложных перекатов

Для лучшей устойчивости трассы Н. И. Маккавеев рекомендует проектировать прорези на верхних перекатах несколько более пологими, а судовые хода с большим радиусом закругления, постепенно увеличивая кривизну и крутизну хода по мере перехода к нижним перекатам (рис. 76). Так как верхний перекат обычно самоуглубляется в межень, то прорезь на нем можно не дорабатывать до проектного дна и не создавать запаса глубины на заносимость. На остальных перекатах глубина прорезей устанавливается с запасом на заносимость и на понижение уровня воды при разработке нижележащих перекатов.

Имея в виду, что сложные перекаты являются обычно наиболее затруднительными и первыми начинают лимитировать глубины на плесе, а кроме того, требуют большего объема дноуглубления, разрабатывать их следует в первую очередь при подготовке плеса к межени.

В связи с трудностью прохода судов через такие перекаты при разработке их часто приходится делать уширения (раструбы) для лучшего захода в прорезь, хотя эти уширения быстро заносятся.

Несмотря на большой объем ежегодных дноуглубительных работ, повторные подрезки, подчистки и раструбы, проход крупных судовых составов и плотов через перекаты такого типа из-за свальных течений остается очень затруднительным. Здесь часты случаи посадки судов на мель. Поэтому в современных условиях, когда габариты судов и составов и скорости их движения непрерывно растут, в целях создания нормальных судоходных условий на перекатах такого типа необходимо рекомендовать производство капитальных дноуглубительных работ.

Натурными и лабораторными исследованиями перекатов этого типа установлено, что при определенных условиях на них происходит отторжение общего побочня и перемещение судового хода к ведущему берегу. При этом создается устойчивый глубокий и удобный для судоходства ход.

Одним из эффективных способов улучшения таких перекатов является искусственное создание условий для развития и ускорения указанного процесса. За последние 10—15 лет во многих бассейновых управлениях пути производились капитальные дноуглубительные работы по отторжению общих побочней. Результаты в большинстве случаев хорошие, выражающиеся в значительном улучшении судоходных условий за счет спрямления судового хода, устранения свальных течений и в одновременном снижении объемов эксплуатационного землечерпания. Примерами могут служить Горно-Сарептский, Нижне-Подновский, Духовницкий перекаты р. Волги, Нижне-Кырский, Нижне-Жежартский перекаты р. Вычегды, Заразильский — р. Камы и целый ряд других перекатов. Однако на отдельных перекатах при общем улучшении судоходных условий объем эксплуатационных землечерпательных работ либо снизился незначительно, либо остался прежним или даже вырос (Мостовский, Капитанский, Курочкинский перекаты р. Волги, Питерский — р. Камы и др.).

В книге автора «Капитальные дноуглубительные работы на перекатах» отмечено, что наиболее устойчивые судовые хода при отторжении побочня на сложных перекатах получены в тех случаях, когда новый судовой ход расположен выше выпуклости коренного неразмываемого и незатопляемого берега, имеющего небольшую вогнутость. В тех же случаях, когда ведущий берег затопляется высокими водами и в весенний период происходит резкое ослабление циркуляции, в потоке получается относительно больший занос переката.

Искусственное поднятие ведущего берега, проведенное на некоторых перекатах рр. Припяти и Вычегды, резко сократило

заносимость их в период паводка. На ряде перекатов Волги (Курочкинский и Ширяевский) нижняя часть прорези оказалась в зоне растекания струй вследствие поворота в этом месте ведущего берега, в результате чего наблюдался занос нижней части прорези косой, спускающейся с ухвостья осередка.

На Ташевском перекате р. Волги выше захода в новую прорезь имелся печинистый выступ берега, отклонявший поверхностные струи в сторону от судового хода и затягивавший в него донные струи, насыщенные наносами, вследствие чего происходил занос нового судового хода. После срезки мыса многочерпаковым земснарядом занос судового хода прекратился.

При разработке нового судового хода на Курочкинском перекате отвал грунта был сделан на небольшом расстоянии от прорези (в пределах ширины судоходной трассы), этим было стеснено живое сечение нового хода. Оно стало недостаточным для пропуска расхода воды не только при паводке, но и при меженных уровнях воды. Старый ход вследствие этого не отмирал и вредно влиял на состояние нового судового хода, тем более, что он имел излишнюю ширину, вдвое большую, чем плесовые лощины других перекатов. После специальной перекидки отвала грунта за пределы судоходной трассы и уширения нового судового хода старый ход стал быстро отмирать, а состояние нового улучшилось.

Рис. 77. Планы Подновских перекатов:
*а* — по съемке 1939 г.; *б* — по съемке 1949 г.

В практике проведения за последние годы работ по капитальному улучшению сложных перекатов имеется ряд случаев весьма удачного отторжения двух следующих один за другим побочней от правого берега и достигнутого в результате этого улучшения четырех затруднительных перекатов.

Такие работы были выполнены на Средне- и Нижне-Подновских перекатах р. Волги (рис. 77), на Верхне- и Средне-Ласинских перекатах р. Оки.

На Средне-Подновском перекате в течение первых пяти лет после выполнения капитальной прорези объем эксплуатационного землечерпания не только не уменьшился, но значительно возрос. Это послужило поводом для критики принципиальной схемы улучшения переката. Высказывалось мнение, что нельзя спрямлять русло реки, потому что в спрямленном русле

Рис. 78. Планы Ласинских перекатов:
*а* — по съемке 1947 г.; *б* — по съемке 1951 г.

трудно поддерживать глубину, и что спрямленное русло в течение короткого времени опять приобретает извилистость. Однако после проведения выправительных работ по ограничению пропускной способности старого русла объем эксплуатационных землечерпательных работ на Подновских перекатах резко сократился и затраты на капитальные работы окупились.

На Ласинских перекатах Оки (рис. 78) снижение объемов эксплуатационного землечерпания было достигнуто сразу же после проведения всего комплекса работ. Однако, с нашей точки зрения, объем эксплуатационного землечерпания на Ласинских перекатах можно было бы еще значительно уменьшить, если бы при проектировании прорези было обращено внимание на плавность и обтекаемость ее входной части, для чего необходимо было подрезать выступающий в русло приверх островка.

Большая эффективность проведенных работ по отторжению двух побочней на Ласинском перекате с затратой значительно меньших средств, чем на Подновских перекатах, объясняется, в первую очередь, масштабом реки Оки, на которой степень воздействия прорезей на структуру речного потока значительно больше, чем на Волге.

Сечение прорези на Волге составляет всего 5% живого сечения русла реки, в то время как на Оке оно равно 20%.

Интересным примером улучшения еще более сложной группы перекатов с отторжением трех расположенных друг за другом побочней являются капитальные работы на Зименско-Безводнинской группе перекатов р. Волги (рис. 79).

Река Волга на этом участке протекает по двусторонней пойме и лишь в конце участка у Нижне-Безводнинских перекатов она подходит к коренному берегу. В верхней части участка левый берег представляет собой пойменный вогнутый яр, высотою 5—7 *м*. К этому яру до проведения капитальных работ примыкал мощный песчаный побочень, который с двумя лежащими выше и ниже правобережными побочнями образовал Верхне- и Нижне-Зименские перекаты, сильно лимитировавшие плёс. Побочни обоих перекатов сильно росли, при этом судовой ход через перекаты становился все круче и круче. В корневой части побочня начиналось образование побочневой протоки, из года в год постепенно увеличивающейся. Побочни, а вместе с ними и сами перекаты начали спускаться вниз по течению.

Ниже Зименских перекатов, на перевале от левого к правому коренному берегу, расположился Верхне-Безводнинский перекат, имевший очень крутой и неудобный судовой ход из-за чрезмерного роста своего нижнего побочня. Затем ниже, у правого берега, разросся очень мощный побочень, у приверха и ухвостья которого сформировались два Нижне-Безводнинских переката. Судоходные условия на всем этом участке были исключительно плохие, несмотря на ежегодное землечерпание в объеме 400—450 тыс. $м^3$ грунта.

После натурных и лабораторных исследований были намечены и выполнены следующие мероприятия по капитальному улучшению рассматриваемой группы перекатов.

На Зименских перекатах был отторгнут верхний мощный левобережный побочень и судовой ход в верхней части участка направлен вдоль вогнутого пойменного яра (прорезь № 1).

Затем на Верхне-Безводнинском перекате была отторгнута часть побочня от левого берега (прорезь № 2), и туда перенесен судовой ход. Отвал грунта был уложен к левому берегу на оставшуюся часть побочня в виде сплошной дамбы, т. е. на нижнюю косу.

Далее было произведено отторжение побочня на Нижне-Безводнинских перекатах от правого коренного берега (прорезь № 3), и грунт был сложен за пределы судоходной трассы с частичным закрытием старого хода. В период паводка отвал грунта на Верхне-Безводнинском перекате частично был смыт, что способствовало отмиранию старого хода на Нижне-Безводнинских перекатах.

В результате проведения полного комплекса работ на всем участке резко улучшились судоходные условия, увеличились радиусы закруглений, были ликвидированы свальные течения. Если раньше с трудом поддерживались гарантийные глубины,

Рис. 79. Участок Зименско-Безводнинской группы перекатов:
*а* — до капитального улучшения; *б* — после капитального улучшения

то после проведенных капитальных работ удалось их увеличить на 50 *см* при некотором снижении объема эксплуатационного землечерпания.

Незначительное снижение эксплуатационного землечерпания после капитальных работ на Зименском и Верхне-Безводнинском перекатах обусловливается влиянием правобережной емкости русла на движение вод по судовому ходу, деконцентрацией потока землечерпательными свалками, отделяющими продольными разорванными валами сравнительно узкий судовой ход от широкой правобережной части русла. Для уменьшения эксплуатационного землечерпания необходимо локализировать правобережную емкость поперечными намывными сооружениями и произвести перевалку продольных отвалов грунта за пределы судоходной трассы, увеличив живое сечение главного русла.

В заключение данного параграфа можно дать следующие рекомендации по проектированию капитальных работ с целью улучшения сложных перекатов.

1. Если выше захода в новую прорезь есть выступающие мысы или подводные выступы, то их нужно удалить, чтобы использовать направляющее влияние ведущего берега.

2. На случай отхода ведущего берега в середине или конце прорези от проектируемого направления судового хода необходимо предусмотреть возведение направляющего сооружения с тем, чтобы избежать заноса нижней части прорези.

3. Отвал грунта рекомендуется располагать за пределами судоходной трассы.

4. Прорезь постепенно надо уширять, чтобы помочь потоку разработать новое русло и ускорить отмирание старого судового хода.

5. При отторжении общего побочня у двух смежных перекатов старый судовой ход в первые 2—3 года не рекомендуется перекрывать глухими сооружениями, так как это приведет к интенсивным русловым переформированиям в новом ходу, предварительно учесть которые весьма трудно. Можно рекомендовать перекрытие старого хода сквозными сооружениями.

6. В случае образования косы, идущей от ухвостья отторгнутого осередка, полностью или частично перекрывающей новый судовой ход, в нижней части старого хода следует возвести полузапруду с перекрытием его в ухвостье косы в сторону старого хода берега на треть ширины для отсасывания наносов с судового хода, как это выполнено инж. И. А. Шадриным на Воютинском перекате р. Оки[1] (см. рис. 58).

---

[1] С. Н. Григорьев и И. А. Шадрин. Выправительные работы на реках, Речиздат, 1954, стр. 67.

При разработке проекта капитального улучшения сложного переката полезно провести подробные гидробатиметрические наблюдения в натуре, а также проверить проектную схему мероприятий в лабораторных условиях на модели перекатов.

## § 24. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТАХ УЧАСТКОВ РЕК С ОДНОСТОРОННЕЙ ПОЙМОЙ (ТИП IБ)

**Перекаты ниже выпуклости коренного берега.** Для улучшения перекатов этого типа обычно проводят те же мероприятия, что и на песчаных перекатах в двусторонней пойме в отдельные периоды их развития.

Однако в отличие от перекатов в двусторонней пойме перекаты на участках односторонней поймы можно с большим эффектом выправлять путем разработки судового хода вдоль коренного берега, т. е. путем отторжения общего побочня или пойменного массива между двумя перекатами. При этом нужно учитывать, что поворот коренного берега, как уже отмечалось, ухудшает условия обтекания его потоком, отклоняет поток и способствует постепенному отложению наносов за мысом. Поэтому для предотвращения образования за мысом побочня и в целях приближения динамической оси потока к коренному берегу необходимо старое русло реки перекрыть запрудой, создав тем самым подпор и ликвидировав поперечный уклон в сторону старого русла (см. рис. 52). Без постройки запруды поддержание судового хода вдоль коренного берега потребует больших ежегодных землечерпательных работ.

**Перекаты с вогнутым коренным берегом.** За последние 15 лет в ряде бассейнов и в особенности в Московско-Окском и Днепровском были проведены большие работы по капитальному улучшению перекатов рассматриваемого типа. Эти работы заключались в отторжении среднего побочня и переносе судового хода к вогнутому коренному берегу. Для примера может быть рассмотрен перекат, план которого помещен выше (см. рис. 35).

Прорезь на верхнем перекате следует направлять под верхним побочнем, устраивая в верхней ее части раструб, обеспечивающий плавность захода воды в прорезь. Отвал грунта укладывается на верхний побочень в виде сплошного вала. Прорезь на этом перекате обычно начинает заноситься в верхней своей части грядами вторичного рельефа, спускающимися вдоль подводной части верхнего побочня. Поэтому при назначении раструба прорези необходимо убрать все возможные причины будущего ее засорения.

На нижнем перекате прорезь следует располагать ближе к нижнему побочню, чтобы сделать судовой ход по возможности более пологим и соответствующим гарантийным радиусам закругления. Извлекаемый грунт следует обязательно укладывать на верхний побочень переката в виде сплошной дамбы, устра-

няющей перетоки поверхностных вод в затонскую часть переката. Отвал грунта на нижний побочень на этом перекате особенно вреден, так как, спускаясь вниз, он сильно искривляет судовой ход и усиливает подпор на перекате, способствуя его занесению и развитию нежелательной протоки через корневую часть нижнего побочня.

Рис. 80. Кривые $T=f(H)$ для Усть-Реченского переката

Благодаря разрабатываемой прорези вдоль вогнутого берега создается плавный и удобный судовой ход, совпадающий с направлением паводковых вод и поддерживаемый этими водами. Последующим эксплуатационным землечерпанием приходится только удалять наносы, спускающиеся с вышележащего перекатного участка или выносимые из притоков и то только в том случае, если количество их превышает то, с которым в состоянии справиться действующие в судовом ходу циркуляционные течения.

Анализ кривых зависимости $T=f(H)$ для судового хода, направленного в обход побочня, примкнутого к вогнутому берегу и для судового хода, направленного вдоль вогнутого берега,

показал, что с отторжением побочня коренным образом меняется сама форма этих кривых. На рис. 80 показаны кривые $T=f(H)$ для Усть-Реченского переката р. Камы, соответствующие его состоянию до и после отторжения побочня, выполненного в 1943 г.

Кривые $T=f(H)$ за 1941 г. показывают, что старый судовой ход с наступлением межени заносился (кривая идет под углом, меньшим 45°). Причиной этого являлось широкое и плоское меженное русло потока на перекате. Излишняя ширина гасит скорости течения на перекате и, как следствие, влечет отложение наносов.

После отторжения побочня и отсыпки грунтовой дамбы в уровень с отметкой нижнего побочня характер зависимости $T=f(H)$ резко изменился. На спаде уровней воды при наступлении горизонта 0,9—0,7 *м* над проектным кривая становится круче (более 45°), т. е. на перекате начинается размыв. Это объясняется тем, что в процессе спада паводка при обсыхании левого побочня и дамбы резко сокращается живое сечение потока и увеличиваются скорости, приводящие к размыву корыта переката.

Если созданный в результате отторжения побочня новый судовой ход значительно короче старого (на половину длины и более) и заход в него сверху плавный, старый судовой ход закрывать не нужно. В этом случае он не сможет оказать вредного влияния на состояние нового судового хода и в то же время будет служить отстойником для складирования наносов, особенно в верхней части. Таких примеров можно много найти на Припяти, Оке, Вычегде и других реках. Если же новый ход незначительно короче старого, то рекомендуется закрыть последний запрудами. Закрытие следует производить в течение 2—3 лет, постепенно повышая гребень запруды до проектной отметки.

Если оставить старый судовой ход незакрытым, то в первое время он служит отстойником наносов, но после того как верхняя часть его обмелеет, полезная роль старого хода прекратится. В то же время нижняя часть старого хода, являющаяся по отношению к новому ходу затонской частью, вредно влияет на устойчивость его. В конце нового хода образуется одиночный перекат обычного типа.

При трассировании прорезей по новому судовому ходу вдоль вогнутого берега необходимо обеспечить плавность прохода потока, создать обтекаемые формы берегов и дна реки. Нельзя оставлять выступов, шалыг, мысов, особенно на входе на перекат сверху, так как они являются причиной образования всевозможных отмелей и обмелений на перекате. Отвал грунта при выполнении прорези вдоль незатопляемого вогнутого берега желательно укладывать с помощью рефулера или шаланд между сооружениями в старый судовой ход, а если это невоз-

можно, то — на побочень вдоль прорези, но не ближе, чем на ширину выправительной трассы от вогнутого берега, так как при разработке нового судового хода в паводок плотный грунт отвала будет причиной засорения нижней части переката.

Встречаются перекаты, где вогнутый берег затопляется паводковыми водами. При этом вследствие отгона струй устойчивые поперечные циркуляции расстраиваются, и при высоких паводках происходит некоторый занос переката. Однако, как показала практика, и в этом случае более эффективно все же устраивать ход вдоль вогнутого берега, чем разрабатывать два затруднительных переката. Можно рекомендовать укладывать отвал грунта в виде дамбы на вогнутый берег, повышая его отметки. Нарефулированный берег необходимо укрепить.

Рис. 81. Кривые $T=f(H)$ для Усть-Гаревского переката

**Перекаты на крутом повороте русла.** При крутом повороте русла, когда угол поворота менее 90° и отношение $\frac{R}{B}$ менее 3, картина движения вод и деформации русла получается совсем иной, чем на участках со слабой кривизной.

Как впервые обосновал Н. С. Лелявский и как показали впоследствии опыты Энгельса, Мёллера, Матлина, Лосиевского

и др., в начале изгиба наблюдается размыв у выпуклого берега и отложение наносов у вогнутого берега, а в нижней половине изгиба — обратная картина.

При просмотре по лоцманским картам крутых поворотов русел рек можно заметить, что в верхней половине поворота стрежень обычно проходит вдоль выпуклого берега. Это объясняется тем, что поток не обтекает вогнутый берег, а отрывается от него.

Рис. 82. План Усть-Гаревских перекатов до капитального улучшения

Анализ кривых зависимости глубин от уровней воды на Усть-Гаревском перекате р. Камы, относящемся к перекатам рассматриваемого типа (рис. 81), показывает следующее.

При поддержании в 1945 г. судового хода в рукаве вдоль вогнутого берега (рис. 82) после падения уровней воды ниже двух метров над проектным уровнем характер кривой $T=f(H)$ резко меняется. Она делается положе, что указывает на начало заноса корыта переката. Этот процесс продолжается до самого низкого уровня воды, несмотря на производство землечерпательных работ. Таким образом, морфологические элементы переката таковы, что они приводят к отложению наносов при меженных уровнях воды. Причины заноса уже были освещены ранее.

После переноса в 1948—1949 гг. судового хода к выпуклому берегу (рис. 83) характер зависимости $T=f(H)$ резко изменился. Кривые за 1949 и 1950 гг. на всем их протяжении в пределах от 3 *м* до проектного уровня воды направлены примерно под углом 45°, что говорит об отсутствии заноса судового хода.

Однако в отдельные годы, в частности в 1950 г., кривая проходит заметно левее, чем кривая 1949 г. Весеннее половодье в 1950 г. было очень большое, и межень стояла высокая. Это и повлияло на общее поднятие отметок дна переката.

Положительный опыт улучшения многих перекатов этого типа на ряде рек позволяет рекомендовать проведение капи-

Рис. 83. План Усть-Гаревских перекатов после капитального улучшения

тальной разработки судового хода выше поворота, вдоль выпуклого берега. Отвал грунта необходимо укладывать на осередок за пределами выправительной трассы.

## § 25. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТАХ УЧАСТКОВ СО СЛАБОРАЗВИТОЙ ПОЙМОЙ

Для создания удобных для судоходства и устойчивых судовых ходов на перекатах этого типа (см. рис. 36) необходимо трассировать их по возможности параллельно коренным берегам, так как формирующим расходом на таких участках русла является расход воды в половодье.

Прямые судовые хода на таких перекатах бывают обычно значительно устойчивее, чем крутые и извилистые. При трассировании прорези нужно стремиться удалить нарастающие заструги, выдающиеся на судовой ход и способствующие срыву и завихрениям течения на корыте переката и, как следствие, его обмелению.

Отвал грунта при разработке переката такого типа необходимо использовать для повышения отметок побочней, укладывая его на корневую часть, как это показано на рис. 36.

Укладывать грунт вблизи прорези, на побочень, оставляя между ним и коренным берегом пониженную лощину, нельзя. Такой отвал грунта в паводок будет способствовать развитию побочневой протоки и ухудшению переката. Постепенным наращиванием побочней перекат можно привести в состояние перевала, к чему и надо стремиться. Как исключение, если нет шаландового земснаряда, а рефулер короткий, можно допускать свалку на верхний побочень переката, но обязательно валом к самому берегу, чтобы не вызвать искривления корыта переката. Разрабатывать такие перекаты можно сразу с начала подготовительного периода на проектную глубину, но больших запасов в глубине делать не следует.

## § 26. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТЕ, ОБРАЗОВАННОМ КОСОЙ ОТ ПОЙМЕННОГО БЕРЕГА К КОРЕННОМУ (II ТИП)

В технической литературе для такого типа перекатов дается обычно три варианта расположения прорези (рис. 84): № 1 — вдоль коренного берега; № 2 — через косу, круто к пойменному берегу и № 3 — в среднем положении между первым и вторым направлениями.

Рис. 84. Варианты прорези на перекате II типа

До 30-х годов на таких перекатах обычно поддерживались крутые судовые хода через косу к пойменному берегу. Однако с ростом габаритов пути и размеров судовых составов крутые прорези требовали все больших и больших объемов землечерпания для обеспечения устойчивых габаритов в межень.

Обычно такие перекаты, несмотря на значительные объемы землечерпательных работ, представляли серьезные затруднения для прохода через них большегрузных караванов из-за малых радиусов и навальных течений. На рис. 85, *а* приведен план одного из перекатов р. Волги, на котором на спаде паводка была разработана прорезь в верхней части косы, круто направленная в затонскую часть.

В дальнейшем у тыловой части косы, непосредственно ниже выхода прорези в затонскую часть переката, начались

Рис. 85. Планы переката II типа

интенсивные отложения наносов. Эти отложения, сужая затонскую часть и вытесняя воду, привели к размыву противоположного берега. Продукты размыва берега отлагались непосредственно ниже конца прорези. Соединение этих наносных отложений с отложениями их по тыловому скату косы привело к образованию нового переката.

Для поддержания судоходства по этому ходу приходилось проводить землечерпательные работы почти на всей его длине, пока в ту же навигацию не был разработан новый ход вдоль правого коренного берега (рис. 85, *б*). Искривление судового хода, его сужение, возникновение нового переката увеличивают суммарные сопротивления движению вод по рассматриваемому направлению, что, в конечном итоге, ведет к активизации стока вдоль горного берега и к промыву здесь корыта переката, где и был разработан землечерпанием новый судовой ход.

На рис. 85, *в* помещен план того же переката через 4 года, на котором виден глубокий прямолинейный судовой ход вдоль правого берега, а бывший ход через верхние пески обмелел.

Начиная с 30-х годов судовые хода на перекатах рассматриваемого типа, в первую очередь на р. Волге, стали поддерживать преимущественно прямые, вдоль правого горного берега. Опыт показал, что землечерпательные прорези вдоль горного берега хорошо сохраняются, когда коса в процессе передвижения вниз по течению спускается к нижней половине дуги вогнутости коренного берега.

В этом случае циркуляционные течения, возникающие здесь под действием центробежных сил у правого берега, несколько усиливающиеся под действием Кориолисова ускорения, отметают наносы в сторону пойменного берега, не давая им оседать на судовом ходу. Если помочь работе циркуляционных течений землечерпанием, то перекат может быстро перейти в перевал с устойчивыми и большими глубинами.

Следует сказать об ошибках, допускаемых иногда при трассировании на рассматриваемом типе переката прорезей вдоль горного берега. В нескольких случаях отвал грунта укладывался в нижней части прорези к горному берегу, а в средней и верхней части — к луговому берегу, непосредственно вблизи прорези.

По своим габаритам прорези не могут вместить в себя всего, даже меженного расхода воды, не говоря уже о расходах при среднемеженных уровнях. Поэтому значительная часть расхода воды на перекате проходит через прилегающие к прорези участки русла, и уложенный вблизи прорези отвал грунта, уменьшая пропускную способность русла, создает подпор на перекате. В результате подпора усиливаются перетоки осветленных поверхностных вод в затонскую часть через верхнюю косу. Это приводит к разработке прорана через верхнюю косу и к занесению судового хода вдоль горного берега.

Грунт, извлекаемый при разработке прямой прорези вдоль горного берега, следует укладывать к луговому берегу и не рядом с прорезью, а за пределами судоходной трассы, чтобы он не мешал саморазработке русла на перекате в пределах прорези. Кроме того, укладка грунта в некотором отдалении от прорези способствует более эффективному наращиванию косы и ликвидации перетоков в затонскую часть при низких и среднемеженных уровнях воды.

Рис. 86. Планы переката:
*а* — при наличии галечной отсыпки; *б* — после срезки отсыпки

В тех случаях, когда при разработке прорези вдоль горного берега отвалом грунта не удается перекрыть проран через верхнюю косу, нужно намыть дамбу земснарядом. Работу следует провести в полноводные периоды (весна, осень), когда земснаряды менее загружены работами на транзите. В крайнем случае, можно укладывать грунт к горному берегу ниже вершины его выпуклости, как бы продолжая направление ведущего берега.

Второй серьезной ошибкой при трассировании прорезей вдоль коренного берега является оставление выше прорези выступов от этого берега в виде выносов из оврагов, кос и др., которые, нарушая плавность захода воды в прорезь, создают завихрения и срывы течения и в результате вызывают занесение прорези.

На рис. 86, *а* показан перекат, в верхней части которого не была убрана галечная отсыпь из оврагов. На плане хорошо видны шалыги, образовавшиеся ниже высыпки и лимитировавшие перекат по глубине. На рис. 86, *б* показано значительно улучшившееся состояние этого же переката на следующий год, когда высыпка была удалена черпаковым земснарядом.

В тех случаях, когда образующая перекат коса опускается ниже вершины выпуклости горного берега (рис. 87), прорезь следует трассировать как продолжение вогнутости лежащего выше участка горного берега.

Отвал грунта в этом случае следует располагать или в затонской части, формируя из него дамбу № 1 (рис. 87), или укладывать к горному берегу ниже вершины выпуклости, также в виде дамбы (№ 2), продолжающей направление ведущего берега.

Рис. 87. Перекат у выпуклости ведущего правого берега

Если грунта, извлекаемого при разработке прорези не хватает для перекрытия затонской части, следует специально выделить земснаряд для насыпки дамбы, перекрывающей затонскую часть.

Рис. 88. Перекат у выпуклости ведущего левого берега

На перекатах, где коренным ведущим является левый берег и коса спустилась ниже вершины выпуклости этого берега (рис. 88), прорезь лучше располагать в верхней части косы с укладкой грунта в затонскую часть переката.

Среднее положение прорези (прорезь № 3 на рис. 84) никогда нельзя рекомендовать, так как такая прорезь проходит по осередку между горным и луговым ходами, и первоначальный объем выемки в этом случае будет очень большим, а естествен-

ный размыв этого хода, как промежуточного, происходит в течение очень короткого периода времени при средних уровнях воды, т. е. при наиболее интенсивном спаде. В остальной период года этот ход подвержен аккумуляции наносов, так как по нему проходит минумум скоростей и энергии потока.

Рис. 89. Планы Яблонского переката:
*а* — до начала работ; *б* — после проведения работ

На устойчивость среднего судового хода будут также неблагоприятно влиять боковые емкости русла, расположенные вдоль горного и лугового берегов.

Практика работ показала, что прорези среднего положения быстро заносятся и для восстановления требуют очень большого объема выемки грунта.

Удачное решение улучшения переката II типа было достигнуто на Яблонском перекате р. Волги (рис. 89), на котором была возведена рефулированием сплошная высокая дамба *ab* вдоль косы. Перекат был выведен из числа лимитирующих и требовавших больших объемов ежегодных землечерпательных работ. На нем лишь в отдельные годы формируется теперь небольшая перемычка у ухвостья косы.

Результат работы может быть успешным только в том случае, если:

а) живое сечение нового хода уже в достаточной степени подготовлено к пропуску всего меженного расхода;

б) осередок достаточно далеко отстоит от берега;

в) верх рефулируемой дамбы прочно примыкает к ухвостью верхнего острова. Ведущий берег в нижней части участка сохраняет еще кривизну и в значительной мере управляет потоком.

## § 27. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТЕ, РАСПОЛОЖЕННОМ В РАЙОНЕ РАСШИРЕНИЯ ПОЙМЫ (III ТИП)

При трассировании эксплуатационных прорезей на перекатах рассматриваемого типа следует поддерживать судовой ход по пологому направлению, грунт укладывать валом на верхний побочень с перекрытием затонской части.

Такая прорезь, выполненная на спаде паводка, держится хорошо в течение навигации и не требует ремонта.

В числе перекатов рассматриваемого типа встречаются такие, на которых затруднения создает излишняя кривизна судового хода, например, Нижне-Бахиловский перекат р. Волги (рис. 90), расположенный в месте расширения поймы. Правый горный берег выше переката отходит вправо, образуя выпуклость, за которой сформировался мощный побочень, отклоняющий главное русло реки к левому пойменному яру. В корневой части побочня имеется побочневая протока, в паводок имеющая значительные расходы и развивающаяся из года в год.

Перекат расположен в левом рукаве и образован мощным верхним левобережным побочнем и нижним правобережным. Лежащий выше участок представляет собой плёс, идущий вдоль правого горного берега. Узкая левобережная пойма выше переката изрезана озерами и низинами, общее направление которых не совпадает с направлением течения в меженном русле. По этим озерам можно судить о направлении весенних вод, растекающихся по левобережной пойме.

До последнего времени перекат представлял затруднения для судоходства не из-за малых глубин, а потому что он лимитировал всю Волгу своим радиусом закругления (800 *м*). Опасна для судоходства была неразмываемая левобережная печина, расположенная в нижней плесовой лощине переката Судоводители настойчиво требовали разработки нового судового хода по протоке вдоль правого берега.

Разработка этой прорези, выполненная в 1958 г., значительно улучшила судоходные условия на перекате, но потребовала значительных объемов землечерпания как при капитальном, так и при ремонтном черпании. Уменьшению ремонтного землечерпания в правом ходу могла бы способствовать подрезка выступающего выше переката мыса правого берега.

Рис. 90. Нижне-Бахиловский перекат

## § 28. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТАХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В РАЙОНЕ ВПАДЕНИЯ ПРИТОКОВ (IV ТИП)

Наиболее радикальным мероприятием при улучшении условий судоходства на участках слияния двух рек является создание стрелки, обеспечивающей плавное слияние притока с основной рекой под острым углом (рис. 91).

Такая форма впадения притока способствует отложению наносов в стороне от фарватера и удобный заход судов. Начало стрелки надо располагать в уровень с расчетным горизонтом выправления (1—0,5 *м* над проектным), а корневую часть — в уровень со среднемеженным горизонтом воды. В отношении разрабатываемых в местах слияния рек прорезей следует дать ряд рекомендаций.

Рис. 91. Стрелка в устье притока

Необходимо тщательно изучить гидрологический режим устьевого участка и установить зависимость подпоров, уклонов и скоростей от соотношения расходов воды в обеих реках.

Планировать дноуглубительные работы на предстоящую навигацию следует в зависимости от прогноза и фактического хода паводков на притоке и главной реке. Если паводок на притоке прошел при отсутствии подпора со стороны главной реки или при подпоре ее притоком, необходимо ожидать значительного заноса лежащих ниже перекатов главной реки и хорошего состояния русла в устьевой части притока. В соответствии с этим нужно планировать разработку перекатов ниже устья притока, чтобы заблаговременно подготовить их к межени. Необходимо выполнить в больших объемах работы по расчистке рейдов и подходов к пристаням, если они имеются в этом месте.

На предустьевом перекате в случае большого паводка на притоке и подпора им главной реки обычно формируется пологий судовой ход вдоль выпуклого берега.

Если же паводок на основной реке больше, чем на притоке, и подпирает приток, на том же перекате формируется более крутой судовой ход и поддержание его в течение навигации значительно облегчается.

На рис. 92 изображен участок р. Камы в месте впадения в нее притока — р. Обвы.

Паводок на р. Обве проходит раньше, чем на р. Каме, в результате чего из-за создания больших перепадов уровней воды из притока происходит вынос большого количества наносов, откладывающихся ниже места впадения. На рисунке видно,

как сформировавшийся из выносов притока побочень отжал основное русло р. Камы. На перегибе русла образовался серьезный перекат, для поддержания глубин на котором требуется большой объем землечерпания.

Отторжение побочня, образованного выносами р. Обвы, коренным образом улучшило судоходные условия на этом участке, и перекат перестал быть лимитирующим.

Рис. 92. Устье р. Обвы:
*а* — план до отторжения побочня; *б* — план после отторжения побочня

В целях создания благоприятных судоходных условий, недопущения роста побочня ниже притока и тем самым предотвращения порчи всего участка реки необходимо отторгать такие побочни по мере их образования. Эти работы себя окупят, так как разрастание побочня может повлечь за собой образование тяжелых затруднительных перекатов.

## § 29. ПРОРЕЗИ И ВЫПРАВИТЕЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ НА ПЕРЕКАТАХ ТИПА РОССЫПИ (V ТИП)

Обычно на россыпях разрабатывались прямые длинные прорези по середине русла. Однако, несмотря на значительное переуглубление, такие прорези быстро заносятся и требуют пов-

торных подчисток. Опыт проведенных за последние 10—15 лет капитальных работ показал возможность коренного переформирования россыпи и превращения ее в перекат перевального типа. Для этого разрабатываемую прорезь направляют сверху вдоль одного из берегов, а затем поворачивают ее с перевалом к противоположному берегу, вдоль которого прорезь выходит в нижнюю плесовую лощину (рис. 93). Выполняя такую прорезь с переуглублением, складывая грунт на верхнюю косу и повышая ее, можно в течение 2—3 лет вместо россыпи сформировать обычный перекат с побочнями.

Рис. 93. Преобразование россыпи в перевал

Инж. Г. В. Инфилицин улучшил одну россыпь на р. Урале путем искусственного деления выправительным сооружением русла на два рукава, из которых один был углублен и стал судоходным, а второй использовался для отвлечения наносов (рис. 94).

Несмотря на указанные удачные примеры, до сих пор коренное улучшение перекатов типа россыпи путем дноуглубления представляет большие трудности. ЦНИИЭВТом (А. И. Лосиевским) проведены большие лабораторные исследования руслового режима перекатов типа россыпи и влияния различных типов выправительных сооружений на их переформирование. Эти исследования показали, что наибольший эффект по увеличению глубин на россыпи достигается при постройке у одного из берегов полузапруд, направленных под углом 40—45° вверх по течению (рис. 95).

Рис. 94. Улучшение россыпи продольной дамбой

Эти сооружения при паводке отметают наносы в межбунное пространство, а в меженный период создают условия для транспортирования наносов без осаждения их в пределах переката.

Несколько худшие, но тоже удовлетворительные результаты получаются при возведении выправительных сооружений по предложению Лосиевского. Сооружение Лосиевского представляет собой одно затопленное и направленное косо вверх сооружение, имитирующее гребень и подвалье переката. Валец циркуляционного течения с горизонтальной осью, возникающей за сооружением, способствует промыву корыта переката.

При применении указанных выше трех типов сооружений можно достигнуть любой степени промыва переката путем уширения перекрываемой зоны или усиления действия вспомогательных гасящих скорости сооружений.

Применение того или иного типа выправительных сооружений должно определяться в зависимости от конфигурации русла

Рис. 95. Лабораторные исследования действия полузапруд на россыпи

## § 30. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТАХ В РАЗВЕТВЛЕННОМ РУСЛЕ (VI ТИП)

Мероприятия для улучшения судоходных условий на участках рек с разветвленным руслом должны иметь целью одну из следующих задач:

1) предотвращение дальнейшего развития вторых рукавов во избежание ухудшения судоходных условий в главном русле;

2) частичное и постепенное увеличение расхода воды в судоходном рукаве для того, чтобы обеспечить поддержание в нем увеличенных габаритов пути;

3) перенесение судового хода во второй рукав с ограничением или без ограничения старого русла;

4) полное закрытие вторых рукавов и сосредоточение всего меженного расхода воды в едином русле.

Принятие мер к предотвращению развития второго рукава необходимо в тех случаях, когда на участках разветвленного

русла несудоходная протока начинает развиваться, вследствие чего ухудшается состояние судоходного рукава. Это явление легко проследить при сопоставлении планов за определенный период времени. Если не прекратить развитие рукава в самом начале, через несколько лет придется затратить на него значительно больше средств.

Рис. 96. Отвал грунта в несудоходный рукав

Простейшей мерой по предотвращению развития рукава и уменьшению в нем расхода воды служит укладка сюда грунта (рис. 96), извлекаемого при разработке прорезей в судоходном рукаве.

Рис. 97. Дамба из рефулированного грунта во входе в несудоходный рукав с неполным перекрытием

В тех случаях, когда второстепенный рукав довольно значительный (25—50% общего расхода реки) и в него идет часть наносов, рекомендуется при разработке прорези производить подрезку приверха острова, а укладку грунта производить в виде дамбы, сужающей заход во второстепенный рукав, но оставляющей проход в него для отложения наносов (рис. 97).

В тех случаях, когда второстепенная протока еще сильно не развилась и наносы в ней не откладываются, целесообразнее полное закрытие ее сверху сооружением в виде струенаправля-

ющей дамбы (рис. 98). Закрытие рукава сверху можно рекомендовать для таких рек с трудноразмываемым ложем и малым твердым расходом, как Томь, Лена, Енисей.

Рис. 98. Дамба, полностью перекрывающая вход в рукав

В отдельных случаях, когда это экономически выгодно, для закрытия рукавов, можно применять укладку фашинных тюфяков или донных сооружений других конструкций. На реках со значительным количеством наносов и легкоразмываемым грунтом перекрытие рукавов лучше производить в средней или нижней части, на реках с малым количеством наносов и с гравелисто-галечным или глинистым грунтом располагать запруду можно и в верхней части.

Рис. 99. Участок Умяковских перекатов:
*а* — до выправления; *б* — после выправления

Пример правильного улучшения судоходных условий на участке разветвленного русла приведен на рис. 99, где изображен участок р. Вятки в районе Умяковской группы перекатов. Русло реки имеет здесь небольшой и плавный изгиб и делится на два рукава. Левый рукав проходит вдоль вогнутого пойменного берега, а правый — вдоль выпуклого. В меженный период левый рукав пропускает примерно 60% общего расхода воды, а в период половодья 40%; и в левом и в правом рукавах имеется

по два затруднительных переката. Из-за узости и крутизны судового хода весь участок был засемафорен.

Улучшение Умяковских перекатов заключалось в постепенном закрытии правой протоки двумя запрудами — № 1 и 2, построенными в ее средней части с одновременным производством землечерпательных работ по увеличению живого сечения левого рукава.

Работы, проводившиеся в течение трех лет, привели к тому, что в межень левый рукав стал пропускать 75% расхода, а в паводок 50%. В результате глубины по левому рукаву настолько увеличились, что потребность в землечерпании отпала полностью.

При выборе одного из рукавов в качестве судоходного следует учитывать при прочих равных условиях вогнутость берега, способствующую развитию циркуляционных течений, развивающих данный рукав.

Рукава, протекающие вдоль коренного трудноразмываемого берега, менее подвержены заносу, в то время как рукава, протекающие между песчаными отложениями, менее устойчивы.

По данным проф. Л. И. Кустова, а также из анализа, проведенного автором применительно к р. Волге, правые рукава оказываются более жизненными, что объясняется в известной степени действием сил Кориолисова ускорения, а также воздействием преобладающих ветров, направленных на р. Волге преимущественно на правый берег.

Наблюдаемое систематическое и неуклонное перемещение русла вправо выражается в первую очередь преимущественным развитием правобережных воложек по сравнению с левобережными.

На Волге на участке от Горького до Астрахани за период с 1935 по 1958 г. развились и были открыты для судоходства правобережные воложки: Новинская, Ширяевская, Винновская, Кольцовский проран, Девушкина, Кулалинская, Татьянка, Саралевская, Грачевская; в то же время не открыто ни одной левобережной воложки.

При переносе судовых ходов из одного рукава в другой на р. Волге лучшие результаты были достигнуты в тех случаях, когда ход был перенесен из более длинной левобережной воложки, протекающей по пойме, в более короткую правую воложку. Как пример могут быть указаны разработки нового судового хода по Девушкиной воложке (рис. 100). На участке Балаковских перекатов до 1940 г. судоходным был левый Балаковский рукав. Расположенные в нем перекаты ежегодно лимитировали плёс и требовали систематических землечерпательных работ в объеме 160—190 тыс. $м^3$ в год. В 1940 г. после траления, уборки отдельных камней и разработки небольшой прорези в заходе было открыто судоходство по правобережной Девушкиной воложке. В ней до настоящего времени поддержи-

ваются нормированные глубины без применения землечерпательных работ.

При переносе судового хода из одного рукава в другой следует придерживаться следующих рекомендаций.

Рис. 100. Участок Балаковских перекатов

1. По возможности не делать заход в судоходный рукав за мысом, в районе пониженного давления и гидравлических завихрений. Лучше располагать заход на продолжении ведущего берега. В тех же случаях, когда это сделать невозможно и приходится «передавать» судовой ход из одной кривой в другую под мысом, необходимо создать плавность захода по выпуклому берегу, убрать выступающие в фарватер заструги, печины и косы. Кроме приведенных примеров по р. Волге, ряд работ такого характера был выполнен М. В. Мясниковым на рр. Припяти, Соже и Иртыше при спрямлении излучин и отторжении побочней. Все эти работы дали положительные результаты.

2. Прорезь на входе в новый судоходный рукав сверху лучше располагать не у приверха острова, а ближе к берегу, чтобы идущие сверху судовые составы и плоты могли входить в нее более спокойно, с меньшим риском затягивания хвостовых барж буксируемого состава в неходовой рукав или навала их на приверх острова. Отвал грунта лучше располагать сплошным валом на верхней косе или в истоке несудоходного рукава, не допуская при этом образования из них порога, отклоняющего донные наносы в судоходный рукав.

Для постепенного ослабления деятельности несудоходного рукава целесообразно, учитывая наблюдающееся здесь расслоение потока, применять выправительные сооружения, которые

направляют свободную от наносов часть потока в судоходный рукав, но не мешают и даже способствуют движению наносов в несудоходный рукав.

К таким сооружениям относятся:

а) короткие струенаправляющие сооружения, установленные выше истока несудоходного рукава и перекрывающие около половины ширины этого рукава (рис. 101, *а*);

Рис. 101. Схема расположения выправительных сооружений на входе в несудоходный рукав

б) спаренные струенаправляющие дамбы (рис. 101, *б*), установленные у истока несудоходного рукава: верхняя, направленная от берега вниз до середины русла этого рукава, и нижняя, направленная от приверха острова навстречу верхней дамбе и расположенная на расстоянии нескольких десятков метров ниже ее. Такое расположение дамб способствует отвлечению придонных наносов в несудоходный рукав;

в) короткая полузапруда (рис. 101, *в*), установленная у берега выше истока несудоходного рукава в виде шпоры и составляющая с направлением течения главного потока на подходе ею к раздвоению русла угол около 70°. Она также может усилить затягивание наносов в несудоходный рукав;

г) аналогичная полузапруда, установленная у приверха острова (рис. 101, *г*).

При возведении указанных выше полузапруд необходимо учитывать опасность подмыва их корней, которые, как и берег выше сооружения, на определенном расстоянии должны быть защищены от подмыва. Недоучет этого требования привел, на-

пример, на Сельдюкском перекате р. Вятки к тому, что сооружение оказалось на фарватере и были часты случаи навала на него судов.

Мысы, расположенные выше входа в рукав, обычно оказывают такое же влияние, как и полузапруды, способствуя привлечению транзитных наносов. Кроме того, мысы затрудняют движение составов. Поэтому совершенно необходимо мысы, выступающие за линию судоходной трассы, подрезать с помощью землечерпания.

Наиболее удобным периодом для производства капитальных землечерпательных работ по разработке нового судового хода, является осень. Весенний паводок в этом случае сможет поддержать результаты землечерпания и расширить новый судовой ход.

## § 31. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТАХ У ПРИВЕРХА И ХВОСТЬЯ ОСТРОВА

В практике землечерпания на перекатах этого типа встречаются два случая расположения прорези:

1) с подрезкой верхнего побочня и отвалом грунта к берегу;

2) с подрезкой приверха острова или осередка и укладкой грунта в виде сплошного вала, частично перекрывающего второстепенный рукав.

При расположении прорези с подрезкой верхнего побочня нельзя оставлять между берегом и отвалом грунта неперекрытую емкость, так как при повышенных уровнях перетоки воды в эту емкость способствуют смыву уложенного грунта и заносу прорези.

В этом случае, если не хватает длины рефулера, необходимо сделать перевалку грунта, но обязательно его положить валом к берегу.

В тех случаях, когда второстепенный ход развивается или отвлекает много воды из судоходного рукава, необходимо проектировать прорезь с подрезкой приверха острова или осередка и с укладкой отвала грунта в сторону второстепенного рукава с частичным его закрытием.

Постепенной последовательной подрезкой приверха острова и отвалом грунта во второстепенный рукав можно добиться увеличения расхода воды в судоходном рукаве и отмирания второстепенного рукава.

Примеры правильного и неправильного отвала грунта при разработке прорези на перекате у приверха острова приведены ниже.

На рис. 102 показана прорезь на Петровском перекате р. Вятки, где отвал грунта в виде дамбы расположен так, что стесняет побочневый рукав и тем самым способствует увеличению расхода по судовому ходу.

При повышенных уровнях воды отвал грунта не ползет на судовой ход. На данном перекате нет нижней затонской части, поэтому здесь не было смысла укладывать извлеченный грунт на верхнюю косу.

Рис. 102. Прорезь на Петровском перекате

На рис. 103 показан перекат р. Волги у приверха Балыклейского острова. Здесь отвал грунта на верхнюю косу был

Рис. 103. Укладка отвала грунта у приверха Балыклейского острова:

*1* — неправильная; *2* — правильная

уложен неправильно. В течение всей навигации он находится под водой и, как показывают траектории поплавков, подвер-

гается размыву и выносу на разработанную прорезь. Следовало бы положить отвал грунта на нижнюю косу, с удалением от прорези на 200—300 *м* во избежание навала на него плотов.

В случае недостаточной длины рефулера разумней было бы сделать перевалку грунта, но не укладывать его на верхнюю косу, а при невозможности этого уложить грунт непосредственно к урезу левого берега.

Сложные перекаты у входа в судоходный рукав встречаются на участках рек с разветвленным руслом. Эти перекаты образуются вследствие наползания на вход в судоходный рукав мощного побочня и располагаются у ухвостья и приверха этого побочня. По мере спуска побочня судовой ход на перекате у его ухвостья становится круче и неудобнее для судоходства. После каждого половодья прорезь на перекате полностью заносится. По мере ухудшения переката от создаваемого побочнем подпора начинает развиваться второстепенный рукав. Зачастую этот рукав не может быть использован для судоходства даже в случае его развития. В таком случае единственным кардинальным решением является только отторжение побочня от берега и перенесение судового хода в новое направление. Отторгнутая часть побочня постепенно присоединяется к массиву левого берега, закрывая вход во второстепенную протоку.

Судовой ход на входе в рукав приобретает плавную форму, перекат улучшается и с течением времени перестает быть лимитирующим.

Примером улучшения такого типа переката можно привести работы П. А. Леонова на Верхне-Чермозском перекате р. Камы.

Верхне-Чермозский перекат (рис. 104) расположен у приверха Чермозского острова во входе в судоходный правый рукав. Левый рукав за островом действовал в течение всей навигации, но не имел достаточных для судоходства глубин на входе и, в особенности, на выходе. Верхне-Чермозский перекат располагался на криволинейном участке русла в месте формирования мощного правобережного побочня, начинающегося на 2 *км* выше переката.

Ширина русла на перекате достигала 500 *м*. Пойма обоих берегов затоплялась высокими водами на значительную ширину. Весенний паводковый поток проходил через правобережный побочень, пересекая меженное русло на Верхне-Чермозском перекате и ударялся в приверх Чермозского острова, подвергая его интенсивному размыву. При этом происходил размыв побочня в его приверхе, благодаря подпору, создаваемому островом; продукты размыва откладывались в нижней части побочня. В результате этого увеличивалась кривизна меженного русла на Верхне-Чермозском перекате; радиус кривизны судового хода уменьшился с 850 *м* в 1930 г. до 330 *м* в 1936 г.

Ухудшение условий входа в правый рукав сопровождалось некоторым развитием входа в левый рукав, однако достаточных

предпосылок для переноса судового хода в последний до 1936 г. не имелось. Состояние Верхне-Чермозского переката было в 1936 г. совершенно неудовлетворительным, вследствие кривизны судового хода, а также сильного свального течения в лощину у левого берега при входе в левый рукав. Для улучшения его была разработана в 1937 г. капитальная прорезь через правобережный побочень на месте намечавшегося размыва его. Прорезь имела ширину 100 *м* и длину 1255 *м*.

Рис. 104. Планы Чермозского переката:
*а* — по съемке 1937 г.; *б* — по съемке 1945 г.

Трасса прорези плавно сопрягалась с верхней и нижней плесовыми лощинами. Извлеченный грунт был уложен в левобережную лощину у входа в левый рукав, где предварительно зимой было установлено 850 звеньев ветвистых заграждений.

Осенью 1937 г. для ускорения процесса обмеления левого рукава в нем была нарефулирована запруда высотой 0,4—1,3 *м*.

В зиму 1937—1938 гг. в левом рукаве было установлено еще 1700 звеньев ветвистых заграждений.

Результаты проведенного комплекса землечерпательных и выправительных работ были вполне удовлетворительные. На Верхне-Чермозском перекате создан устойчивый судовой ход

шириной 150 *м*, с радиусом кривизны 2000 *м* и достаточными глубинами.

Такой тип переката встречается на ряде рек, в частности на Волге, Северной Двине, Оби. На рис. 105 изображен Нижне-Дубровинский перекат р. Оби по съемке 1958 г. Побочень *А* с течением времени спустился вниз и совершенно перекрыл за-

Рис. 105. Сложные перекаты у входа в рукав

ход в правый судоходный рукав. Несмотря на крупные землечерпательные работы, которые приходится сейчас проводить несколько раз в навигацию, судовой ход затруднителен для судоходства. За последние годы заметен сильный размыв левой протоки и борозды по корневой части побочня (линия *аб*). Вследствие того, что левый рукав проходит в пойменных песчаных берегах, а правый, ведущий берег судоходного рукава неразмываемый и незатопляемый и не имеет мысов или плеч, выступающих в реку, единственно правильным решением по улучшению этого переката может быть лишь отторжение правобережного побочня.

Для перекатов, расположенных у ухвостья острова, в технической литературе даются два варианта направления прорези (рис. 106): прямой ход вдоль ведущего берега судоходного рукава (прорезь № 1) и крутой ход под косу (прорезь № 2).

Если сливаются рукава более или менее равноценные, то устойчивым будет прямой ход, так как он совпадает с направлением судоходного рукава, а отсутствие перекоса водной поверхности и поперечных сливов течений предопределяет незаносимость прорези. Наоборот, крутые прорези в этих условиях быстро заносятся.

Когда из-за разности скоростей и расходов воды в рукавах образуется сильный перекос водной поверхности в сторону несудоходного рукава, прямые прорези подвергаются заносу.

В этом случае крутой судовой ход бывает более устойчив, однако надо считаться с неудобствами для судоходства, вызываемыми его крутизной и свальными течениями.

Рис. 106. Прорези у ухвостья острова

Для предотвращения заносимости прямой прорези нужно рекомендовать устройство разделительной стрелки — дамбы, продолжающей ухвостье острова и ликвидирующей перекос водной поверхности в судоходном рукаве.

## § 32. ВЫПРАВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ СЛОЖНЫХ РАЗВЕТВЛЕНИЙ РУСЛА

В качестве примера улучшения судоходных условий на участке сложного разветвления русла с помощью выправительных сооружений долговременного действия приведем Сызранский водный узел р. Волги и Селищанский узел р. Днепра.

Волга в районе Сызранского узла (рис. 107) делится на шесть рукавов: Сызранскую, Раковскую, Лопатинскую и Застенную воложки и Лопатинский и Застенный прованы. За последние 40 лет судовой ход несколько раз переходил из одного рукава в другой. Раковская воложка была открыта для судоходства в 1944 г. Из-за узости и кривизны судового хода, а также из-за наличия четырех затруднительных перекатов движение судов по ней до 1953 г. на протяжении 14 *км* регулировалось семафорами.

Для коренного улучшения судоходных условий по Раковской воложке было запроектировано перекрытие Лопатинского прорана и Лопатинской воложки. Лопатинский проран предусматривалось перекрыть сооружением № 1 из каменной наброски по расстилочному тюфяку с отметкой гребня 2,6 *м* над проектным уровнем воды.

В Лопатинской воложке была запроектирована запруда № 2 с отметкой гребня 2,55 *м* над проектным уровнем воды. Нижняя часть ее состояла из тюфячной кладки, верхняя — из каменной наброски. Возведением этих сооружений имелось в виду

увеличить удельный вес Раковской воложки по расходу воды с 62,7 до 76,2%.

Работы по постройке запруд были выполнены в 1951—1955 гг. Уже в процессе возведения первой запруды (в Лопатинском проране) расход и скорость течения воды по Раковской воложке заметно увеличились. В ней началось переформирование русла, которое привело к размыву перекатов.

Рис. 107. Сызранский водный узел

В комплексе с выправительными работами на перекатах Раковской воложки производились землечерпательные работы. В 1952 г. были выполнены капитальные землечерпательные работы на входе в Раковскую воложку и частично на Средне-Раковском перекате, в 1953 г. — на Верхне- и Средне-Раковском перекатах и в 1954 г. на Нижне-Раковском перекате.

В результате проведения этих работ уже в 1953 г. (при незаконченной постройке первой запруды) стало возможным открыть по Раковской воложке двустороннее движение судов.

Селищанская группа перекатов на Днепре (рис. 108) долгое время являлась затруднительным участком, судоходство по которому регулировалось семафорами. Значительное отвлечение расхода воды из правого основного рукава вследствие развития прорвы Руда привело к резкому ухудшению Бучакского, 1 и 2-го Тальбергских, 1, 2 и 3-го Селищанских и Руднянского перекатов.

Начиная с 1950 г., в соответствии с проектом улучшения Селищанской группы перекатов, были выполнены следующие работы.

В 1950 г. на 2-м Тальбергском перекате было произведено отторжение правобережного побочня, а на 2-м и 3-м Селищан-

Рис. 108. Селищанская группа перекатов:
*а* — до выправления; *б* — после выправления

ских перекатах выполнено крепление отвалов грунта. В 1951 г. на 3-м Селищанском перекате был отторгнут правобережный побочень и были начаты работы по перекрытию запрудой из фашинной кладки с пригрузкой камнем рукава Старый Днепр, а на 2-м Тальбергском, 1-м и 2-м Селищанских перекатах произведено закрепление отвалов грунта. В 1952 г. на Бучакском перекате был перекрыт исток рукава Старый Днепр с помощью нарефулированной дамбы, на 2-м Тальбергском перекате укреплен отвал грунта, на 1-м Селищанском перекате произведено перекрытие истоков левобережных прорв. Прорва Руда была также перекрыта запрудой из фашинной кладки, с пригрузкой камнем, а в рукаве Старый Днепр продолжались работы по строительству запруды.

В результате этих работ заметно увеличился меженный расход воды в правом судоходном рукаве, что дало возможность провести в нем землечерпательные работы с целью создания пологой и широкой трассы судового хода, обеспечивающей двустороннее движение судовых составов.

В 1953 г. на Бучакском перекате были поставлены ветвистые заграждения на левобережной подводной косе, в рукаве Старый Днепр и прорве Руда продолжались работы по строительству запруд, на 2-м Селищанском перекате произведен намыв правого берега до проектной трассы с постройкой пяти полузапруд из фашинной кладки с пригрузкой грунтом и камнем для закрепления намытого правого берега, а на 3-м Селищанском перекате выполнено отторжение левобережного побочня.

В октябре 1954 г. на 1-м Селищанском перекате была выполнена капитальная землечерпательная прорезь по отторжению левобережной подводной косы в нижней части переката, судовой ход был проложен в направлении проектной трассы меженного русла. Продолжались работы по достройке двух запруд в рукаве Старый Днепр и прорве Руда.

На 2-м Селищанском перекате с 1953 по 1955 г. был произведен намыв грунта от естественного правого берега до правой кромки проектной трассы с целью создания более пологих форм меженного судового хода. На 2-м Селищанском перекате была построена одна полузапруда из фашинной кладки с пригрузкой камнем и закреплен отвал грунта. В 1954—1955 гг. был произведен намыв хвостья побочня на 2-м Бучакском перекате.

В результате работ, проведенных в период 1953—1955 гг., создано пологое меженное русло с радиусом кривизны не менее 800 *м*.

В связи с тем, что участок реки от 2-го Селищанского переката на протяжении 5 *км* не имел естественных мест для расхождения судов, проектом улучшения судоходных условий на Селищанской группе перекатов предусматривалось создание увеличенной по сравнению с заданием ширины судового хода

до 150—200 *м*. В результате работ, проведенных на Селищанской группе перекатов, получился хороший прямой судовой ход, допускающий двустороннее движение.

В 1955 г. глубина на этой группе перекатов была выдержана выше гарантийной на 10 *см* при объеме землечерпательных работ по всем семи перекатам около 400 тыс. $м^3$, тогда как раньше на этом участке ежегодно извлекалось от 800 до 1200 тыс. $м^3$ грунта.

## § 33. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТАХ МЕАНДРИРУЮЩИХ УЧАСТКОВ РУСЛА

**Перекат типа VIIIA.** Перекаты на прямой вставке между двумя обратными кривыми образуются вследствие затухания поперечной циркуляции при выходе потока из поворота на прямой участок и перемены направления циркуляции при заходе в обратную кривую.

Рис. 109. Выправление переката по схеме Лелявского

Эти перекаты, как правило, сохраняют свое месторасположение и передвигаются лишь вместе с самой излучиной. Для улучшения перекатов этого типа наиболее эффективно может быть использована методика, разработанная Н. С. Лелявским. Она заключается в удлинении ведущего берега путем возведения струенаправляющей дамбы, для того, чтобы поддержать циркуляцию, действующую на участке излучины и не дать ей рассеяться на прямолинейном участке (рис. 109).

Одновременно со струенаправляющей дамбой Лелявский рекомендует постройку полузапруд на верхнем побочне для задержания спускающихся к низу наносов. На меандрирующих реках с песчано-галечным грунтом (р. Белая), где поступление наносов относительно небольшое, выправление перекатов, расположенных на прямолинейной вставке, успешно достигается постройкой одного направленного косо вверх сооружения, закрывающего затонскую часть переката (рис. 110).

Проектировать прорези на таких перекатах необходимо под нижней косой с частичной ее подрезкой. Прорезь лучше разрабатывать с переуглублением нижней части.

**Перекат типа VIIIБ в вершине излучины.** На участках русла реки, состоящих из последовательного ряда излучин, как показали опыты ЦНИИЭВТа, в верхней части каждой излучины наблюдается размыв выпуклого берега и отложение наносов у вогнутого берега, а в нижней части излучины—обратное явление.

Рис. 110. Ляпустинский перекат:
*а* — до работ; *б* — после работ

В результате размыва и отложения наносов в вершине излучины образуется перекат, а иногда и два переката—один у приверха, а другой у ухвостья побочня, образовавшегося у вогнутого берега.

Эти перекаты представляют большие неудобства для судоходства из-за малых радиусов закругления и свальных течений. По мере роста побочня, как по площади, так и в высоту, состояние перекатов ухудшается. В практике выправительных работ на перекатах такого типа встречаются прямо противоположные решения. На рис. 111,*а* представлен один из перекатов реки Припяти. До 1950 г. работы по его улучшению сводились к возведению полузапруд на примыкающем к выпуклому берегу побочне с целью его наращивания и предотвращения размыва побочневой протоки.

Рис. 111. Перекат типа VIIIБ:
*а* — по съемке 1945 г.; *б* — по съемке 1949 г.; *в* — по съемке 1950 г.; после выправления

Такое же решение встречается и на ряде перекатов других рек. Однако практика показала, что постройка сооружений на побочне, примыкающем к вогнутому берегу, не дает капитального улучшения переката. В каждый паводок перекат продолжает заноситься. При росте и повышении побочня судовой ход становится круче и неудобнее для судоходства (рис. 111,*б*), а объем землечерпания увеличивается.

После разборки сооружений, построенных на побочне, и отторжения его от вогнутого берега в 1950 г. судовой ход значительно улучшился и перекат вышел из числа лимитирующих (рис. 111,*в*). Поэтому строить полузапруду на таком побочне нельзя. Капитальное улучшение перекатов этого типа следует проектировать в зависимости от величины $\frac{R}{B}$ (где $R$ — радиус закругления в данном месте, а $B$ — ширина русла).

Безотрывное обтекание берегов на повороте наблюдается, когда отношение $\frac{R}{B}$ равно 2,75—3 (Милович, Нипперт).

При отношении $\frac{R}{B}$ больше 3 нужно рекомендовать отторжение побочня от вогнутого берега с закрытием или без закрытия старого хода выправительными сооружениями. Работы такого типа за последние 15 лет выполнены больше чем на 50 перекатах рр. Припяти, Днепра, Оки, Вычегды, Вятки, Камы и др., причем на 90% перекатов удалось создать судовой ход с большим радиусом закругления, равномерным течением, устойчивыми глубинами и везде в той или иной мере достигнуть уменьшения эксплуатационного землечерпания.

Отвал грунта при отторжении побочня необходимо располагать обязательно за пределами судоходной трассы, так как в противном случае, как это и имело место на ряде перекатов, при повышенных уровнях воды отвал грунта становился осередком, разделяющим поток на два рукава. В результате увеличивалась заносимость переката в паводок.

Разрабатывая прорезь, отторгающую побочень, желательно делать ее ширину в 1,5—2,0 раза более проектной, чтобы ускорить стабилизацию переката.

В тех случаях, когда вогнутый ведущий берег не затопляется в паводок, заносимость переката резко снижается и эксплуатационного землечерпания почти не требуется. Если же ведущий берег затопляется высокими водами, в зависимости от высоты затопления, происходит занос переката и возникает потребность проведения эксплуатационного землечерпания. Повышение ведущего берега путем рефулирования грунта с последующим его закреплением рассадкой кустарника, выполненное на ряде перекатов рр. Вычегды и Припяти, значительно снизило эксплуатационное землечерпание.

На р. Припяти при отторжении побочня от вогнутого берега старый судовой ход, как правило, перекрывали несколькими выправительными сооружениями, между которыми укладывали грунт от землечерпания.

На р. Оке при улучшении такого типа перекатов (Дракинский, Подмокловский и др.) старый ход оставляли открытым для отложения в нем наносов. Однако практика показала, что в этом случае верхняя часть старого судового хода быстро зано-

прямолинейный участок пути, не требующий землечерпания для поддержания глубин.

Рис. 112. Камышинские перекаты:
*а* — до выправления; *б* — после выправления

Полузапруды № 4, 8, 12 уничтожают вредное влияние затонских частей у нижних концов побочней; полузапруды № 11, 13 и 14 уничтожают свал воды в выбоины и в затонскую часть левого подводного побочня. Остальные сооружения являются как бы направляющими поток по выбранной трассе.

Рис. 113. Выправление переката двусторонними полузапрудами

На рр. Припять, Сож, Березина часто применяют двустороннюю постройку полузапруд для выправления перекатов на слабоизогнутых участках реки, где часто возникают перекаты, по характеру близкие к россыпям. Такие сооружения сосредоточивают поток в определенном направлении, способствуют размыву русла и связанному с этим увеличению габаритов пути.

На рис. 113 изображен план одного из перекатов р. Припяти. Перекат расположен на участке плавной извилины большого радиуса. Верхняя плесовая лощина с таким же радиусом закругления, как и на участке переката, имеет сравнительно устойчивый ведущий левый берег как для меженного, так и для весеннего потока.

У ведущего левого берега имеются местные вымоины, образовавшиеся под действием весенних вод. Правый берег сложен из песчаных отложений. Рельеф обоих берегов сильно изрезан.

Несмотря на высокие отметки весной, с правобережной поймы и ряда озер происходят значительные сливы. Живое сечение на перекате по сравнению с хорошими плесовыми и перевальными участками значительно увеличено. Весной на перекате отлагается большое количество наносов. Русло на перекате и преобладающая часть берегов сложены из мелких песков.

Улучшение переката осуществлено за счет повышения побочней и некоторого уменьшения меженного живого сечения реки и придания потоку определенного направления. Сжатие потока произведено с обоих берегов, так как и правый и левый берега не являются ведущими.

При выборе места расположения полузапруд имелось в виду создать левый ведущий берег с достаточной кривизной для удержания около него потока.

Для повышения отметок верхнего побочня построили пять полузапруд, отстоящих одна от другой на расстоянии, несколько большем ширины трассы. Чтобы скорее получить требуемые габариты судового хода разработали землечерпательную прорезь, грунт из которой уложили к левому берегу между сооружениями.

Плана переката до начала работ не сохранилось, но, по имеющимся сведениям о глубинах, этот перекат в течение ряда лет был одним из самых мелких на плесе. Ежегодно здесь неоднократно производились дноуглубительные работы. После постановки десяти фашинных полузапруд в 1930 г. перекат был выведен из числа лимитирующих и в течение более 25 последующих лет не требовал дноуглубительных работ. Все сооружения хорошо сохранились, занесены песками и сильно поросли ивняком. Ход на перекате плавный, с достаточной шириной, удобный для прохода судов.

На рис. 114 приведен еще один из подобных перекатов.

Группа перекатов представляет собой россыпь, образованную мелкими подвижными песками. На обоих перекатах нет ярко выраженных плесовых участков, и глубины прилегающих плесов мало отличаются от глубин перекатов. Правый берег, вдоль которого проходит судоходная трасса, возвышаясь над проектным уровнем на 2—3 *м*, имеет чрезмерно большой радиус закругления, не соответствующий величине меженных расходов воды. Берег — песчаный, подвержен сильному размыву.

На рассматриваемой группе перекатов ежегодно требовалось производство неоднократных землечерпательных и взрывных работ. Русло реки блуждало, было крайне неустойчиво.

Для придания трассе очертаний, обеспечивающих сохранность судового хода, проектом было предусмотрено приблизить

судовой ход на верхнем перекате к правому берегу путем перекрытия низких песков левого берега системой полузапруд, а перевал судового хода от правого берега к левому осуществить посредством четырех коротких полузапруд, поставленных на приверхе нижнего побочня. Правый берег, чтобы исключить его размыв и сократить выносы наносов на нижележащий участок, предусмотрено было закрепить легким подводным тюфяком, а надводную часть — хворостяной выстилкой. Намечалось также укрепить левый берег вдоль нижней плесовой лощины.

Рис. 114. Двусторонние полузапруды на перекате типа россыпи:
*а* — до выправления; *б* — после выправления

В 1952 г. были построены фашинные сооружения и разработана прорезь длиной 800 *м* с укладкой грунта между сооружениями.

В результате перечисленных работ было достигнуто улучшение участка: глубины на нем увеличились, судовой ход принял плавное и устойчивое очертание. В настоящее время перекаты превратились в перевал.

**Спрямление крутых излучин.** В связи с необходимостью увеличения габаритов пути и создания возможностей для плавания больших судов на ряде рек за последние 15 лет проведены работы по спрямлению излучин.

Нами собран материал по 19 спрямленным излучинам — четырем на р. Дону, трем на р. Припяти, двум на р. Соже, двум на р. Десне, одной на р. Вятке, двум на р. Каме, одной на р. Белой, двум на р. Вычегде, одной на р. Ветлуге и одной на р. Суре. Везде был получен хороший результат. После спрямления излучин никаких заметных ухудшений на участках, ле-

жащих выше и ниже, не произошло. Наоборот, после спрямления был обойден ряд очень затруднительных перекатов.

Н. А. Доманевский и М. В. Мясников [14] приводят ряд примеров спрямления излучин на рр. Припяти и Соже и делают вывод, что в условиях этих рек спрямление излучин в большей своей части приводит к коренному улучшению судоходных условий и резкому сокращению объема ежегодных землечерпательных работ.

Однако на отдельных спрямлениях имелись некоторые недостатки, которые необходимо учитывать при дальнейшем проектировании таких работ.

Так, на Щучанском спрямлении р. Дона и Лясковичском спрямлении р. Припяти образовались отмели, которые можно объяснить неудачной формой сопряжения спрямления с верхним и нижним участком русла.

Вход в Щучанское спрямление (рис. 115) направлен под углом 90° к лежащему выше участку русла. Кроме того, непосредственно выше спрямления, у правого берега, был оставлен песчаный побочень, который с течением времени переместился в спрямление, искривив его в верхней части.

Большая работа по спрямлению Измайловской (рис. 116) излучины проведена в 1950 г. на р. Белой. Излучина расположена на участке реки с двусторонней поймой. Длина реки на излучине 17 *км*, а по спрямляющей ее протоке 1,4 *км*. Падение на этом участке равно 1,4 *м*. При проектировании спрямления было опасение, что сосредоточенное падение в месте прокопа повлечет за собой большой перепад и увеличение скоростей течения, что затруднит взводное судоходство. Кроме того, в связи с увеличением живого сечения русла в районе спрямления (расход воды распределялся на два рукава) неизбежно должно было произойти падение уровней воды выше спрямления и обмеление расположенного здесь Золотовского переката. Опасение вызывала также возможность сильных переформирований русла ниже спрямления вследствие выноса грунта из прокопа.

Гидравлические расчеты показали, что ожидается падение уровня воды на Золотовском перекате в пределах 30—40 *см*, что не может сколько-нибудь серьезно сказаться на состоянии глубин.

Расчет оказался весьма близким к действительности. После спрямления падение уровня воды на Золотовском перекате составило 40 *см*, но перекат в то же время подвергся размыву более чем на 1 *м*, и в результате гарантийные глубины на нем были выдержаны.

Средняя скорость течения в спрямлении после выполнения полного комплекса работ не превышала 1,5 *м/сек*. Ниже спрямления никаких крупных русловых деформаций не наблюдалось.

Рис. 115. Щучанская излучина

Рис. 116. Участок р. Белой в районе Измайловской излучины

В спрямляющем проране Измайловской излучины оказались разнородные грунты: песчаные и глинистые. Вследствие этого размыв русла в проране начал проходить неравномерно, и проран стал искривляться (рис. 117). Глинистые выступы пришлось подрезать земснарядом, а песчаные участки правого берега, во избежание их излишнего размыва, были укреплены.

Рис. 117. Новый судовой ход после спрямления Измайловской излучины

Проектируя спрямление излучины, необходимо стремиться достигнуть такого сопряжения его с верхним и нижним участками русла, при котором не будут возникать нежелательные завихрения. Следует также путем расчета проверить величину падения уровней воды на вышележащем участке русла.

## § 34. ПРОРЕЗИ НА ПЕРЕКАТАХ РЕК С БЛУЖДАЮЩИМ РУСЛОМ

Инженеры В. В. Петровский и В. С. Вильперт, анализировавшие опыт работ по капитальному улучшению судоходных условий на участках блуждающего русла р. Большой Северной Двины, считают, что прежде проектирования мероприятий по улучшению отдельных перекатов необходимо решить принципиальный вопрос о выборе судоходного рукава. По их мнению, обязательно необходимо перекрытие всех второстепенных рукавов и сосредоточение реки в одном русле.

Против перекрытия всех рукавов и в особенности отмирающих встречается много возражений, так как обычно эти рукава используются для естественного отложения в них наносов. Однако в условиях реки с блуждающим руслом принцип обязательного перекрытия всех второстепенных рукавов следует признать правильным по следующим соображениям.

1. Отмирание и развитие рукавов на таких реках в значительной степени определяется высотой и продолжительностью весеннего паводка, прохождением весеннего ледохода и в отдельных случаях — высотой меженных уровней воды. Поэтому

процесс отмирания того или иного рукава может легко перейти в процесс его развития, а следовательно, приведет к увеличению свальных течений, уменьшению расхода воды по основному руслу и в целом к ухудшению состояния судоходного рукава и условий судоходства по нему.

В отдельных случаях может оказаться необходимым перенос судового хода во вновь развившийся, а до этого отмиравший рукав. При подобном положении трудно вообще говорить об улучшении состояния пути на таком участке реки. В качестве примера инж. Вильперт приводит Комарицкие и Телеговские перекаты р. Большой Северной Двины, где до тех пор, пока не приступили к перекрытию несудоходных рукавов, судовой ход периодически переходил из рукава в рукав, и состояние судоходного рукава то улучшалось, то ухудшалось, в зависимости от состояния несудоходных рукавов.

2. Величина габаритов пути, в первую очередь, определяется расходом воды, а не транспортирующей способностью рукава, что подтверждается эффективностью применения регулирования стока для увеличения глубин в меженный период на ряде наших рек: Волге, Каме, Нижнем Дону и др.

Практикой работ на реках с подвижным ложем установлено, что перекаты на блуждающих участках, разделенных на рукава, имеют значительно меньшие глубины, чем на участках, где река течет в одном русле.

При выборе судоходного рукава необходимо руководствоваться положениями, изложенными выше, причем главным фактором при выборе рукава должны быть условия захода в рукав и движение побочней на лежащем выше участке.

Ниже приведены подтверждающие эти положения примеры, заимствованные из материалов Северного бассейнового управления пути.

### 1. Телеговские перекаты

Русло реки в районе Телеговских перекатов (рис. 118) разветвляется на ряд рукавов. В период с 1920 по 1950 г. судовой ход периодически переходил из одного рукава в другой, причем тогда функционировали три рукава: правый, средний и левый. Выправительных работ в сколько-нибудь значительном объеме до 1941 г. на этом участке не производилось.

В 1930 г. судоходным был правый рукав. При дальнейших изменениях в 1932—1937 гг. судоходным стал левый рукав, в 1938—1943 гг. — средний, в 1944—1946 гг. — правый и в 1947—1949 гг. — средний. С 1950 г. судоходным является левый рукав.

Лучшие условия для судоходства были в левом рукаве, худшие — в среднем и правом рукавах, что объясняется неудобствами захода в них, а также большой кривизной судового хода. Показателем судоходных качеств рукавов может служить

среднегодовое количество аварий с транспортным флотом: в левом рукаве — 1,5, среднем — 4, правом — 5.

Рис. 118. Телеговские перекаты:
*а* — по съемке 1944 г.; *б* — по съемке 1951 г.

Характеристикой трудности поддержания плановых габаритов пути могут явиться следующие данные о среднегодовой площади разработанных прорезей:

| Рукав | Годы | Площадь, тыс. $м^3$ |
|---|---|---|
| Левый . . . . . | 1932—1937 | 43 |
| Средний . . . . | 1938—1943 | 110 |
| Правый . . . . | 1944—1946 | 172 |
| Средний . . . . | 1947—1949 | 118 |
| Левый . . . . . | 1951—1956 | 89 |

Таким образом, плановые габариты пути легче поддерживать в левом рукаве.

Большие выправительные работы на Телеговском узле были начаты в 1941 г. При этом вначале были допущены серьезные ошибки: в качестве судоходного рукава был выбран средний рукав, по которому в то время проходил судовой ход. Работы, выполненные по перекрытию левого рукава, оказались бесполезными. Не было принято во внимание, что при прочих равных условиях заход в левый рукав значительно лучше (ведущий берег на участке выше разделения русла на рукава переходит в берег левого рукава) и, кроме того, берега левого рукава имеют более плавные очертания.

Далее неправильно были определены перспективы развития рукавов, и один лишь факт наличия песчаного побочня на заходе в левый рукав послужил основанием для проведения капитальных работ по перекрытию этого рукава. Наличие побочня и его рост были вызваны развитием Кузнецовского рукава (вдоль левого коренного берега). После перекрытия последнего рост побочня прекратился и начался его размыв.

В результате недоучета этих факторов построенные в левом рукаве сооружения пришлось вскоре убрать, и судовой ход перенести в этот рукав, который начал интенсивно развиваться.

Лишь после этого было принято правильное решение и начались работы по перекрытию правых рукавов, результат которых сказался довольно быстро: объем землечерпательных работ на узле с 200 тыс. $м^3$ в 1951 г. сократился до 70 тыс. $м^3$ в 1955 г. и 35 тыс. $м^3$ в 1956 г.

## 2. Комарицкие перекаты

В районе этих перекатов (рис. 119) река течет несколькими рукавами, основными из которых являются Канзский (левый) и Комарицкий. Судовой ход на участке периодически переходил из одного рукава в другой, так как до 1951 г. никаких работ по закреплению судоходной трассы не проводилось. До 1931 г. судоходным был Комарицкий рукав, в 1932—1935 гг. — Канзский, в 1936—1941 гг. — снова Комарицкий, а с 1942 г. судоходство осуществляется Канзским рукавом. Причем переход в 1942 г. в Канзский рукав в значительной мере был вызван затором в Комарицком рукаве. Объемы землечерпательных работ до 1951 г. то увеличивались, то уменьшались в зависимости от состояния несудоходного рукава. Благодаря проводимому перекрытию несудоходных рукавов объемы землечерпательных работ, начиная с 1952 г. начали систематически снижаться и составили в 1956 г. 33 тыс. $м^3$ против 182 тыс. $м^3$ в 1953 г. и 231 тыс. $м^3$ в 1952 г.

И в этом случае хороший в отношении условий судоходства и поддержания гарантированных габаритов пути Канзский рукав отличается от Комарицкого прежде всего значительно луч-

шим заходом, более плавными очертаниями берегов, наличием коренного или высокого пойменного берега и совпадением направления рукава и весеннего потока.

Рис. 119. Комарицкие перекаты:
*а* — по съемке 1953 г.; *б* — по съемке 1955 г.

Вопрос улучшения судоходных условий на блуждающих участках рек не ограничивается правильным выбором судоходного рукава и перекрытием второстепенных проток.

В самом судоходном рукаве обычно имеется ряд перекатов, интенсивно переформирующихся и представляющих серьезные затруднения для судоходства. Наиболее часто перекаты развиваются в трех местах: на заходе в рукав, в середине его и на выходе из рукава.

В качестве типичных деформаций переката, расположенного в заходе в судоходный рукав, можно привести деформации Красноборского переката р. Большой Северной Двины (рис. 120), подробно описанные инж. В. В. Петровским в статье «О переформировании Красноборского переката». Красноборский перекат расположен на участке реки с односторонней правобережной поймой шириной до 10 *км*. Левый берег в зоне верхней плесовой лощины представляет собой крутой уступ 20—25-метровой террасы, отделенной от меженного русла ниже с. Крас-

ноборска мощным левобережным песчаным побочнем. Правобережная пойма высотой 4—6 *м* над проектным уровнем изрезана староречьями, покрыта луговой растительностью. Непосредственно в зоне переката со стороны правого берега в основное русло впадает Дябринский рукав. Левый горный берег выше с. Красноборск сложен из относительно прочных пород и почти не подвергается размыву. Уступ террасы непосредственно у села разрушается высокими паводками, но продукты размыва на перекат не поступают, а откладываются в левобережную протоку.

Рис. 120. Красноборский перекат

Рельеф и конфигурация речной долины определяют направление движения весенних вод по пойме. Выше устья Дябринского рукава весенние воды сливаются с правобережной поймы, ниже устья течение в половодье резко меняет направление и движется из русла опять на правобережную пойму. Расстояние между бровками пойменных яров на перекате в 1,5—2 раза больше, чем на участках, расположенных выше и ниже по течению. Таким образом, в зоне переката происходит резкое изменение ширины и направления потока в половодье, вследствие чего создаются условия для отложения наносов при высокой воде. При средних

уровнях воды, когда обнажаются бровки поймы, но левобережный побочень, имеющий в настоящее время отметки 1,5 — 2 *м*, остается затопленным, продолжает действовать эффект местного расширения потока в зоне переката, и поэтому процесс естественного снижения отметок дна при спаде уровней задерживается.

История Красноборского переката прослеживается по плановым материалам с 1916 г. За это время перекат находился в стадии ухудшения — с 1921 по 1932 г., затем с 1936 по 1941 г. и, наконец, с 1953 г. по настоящее время. В каждом случае ухудшение вызывалось повышением интенсивности поступления песков с расположенного выше участка русла и сопровождалось разрастанием правобережных песков переката, что приводило к отжатию судового хода в сторону левого побочня и общему понижению отметок последнего. Одновременно с этим корыто переката покрывалось осередками, между которыми образовывались мелкие извилистые протоки (см. планы 1939 и 1957 гг.).

В периоды улучшения меженный поток собирался в одно русло, и корыто переката смещалось в сторону правого побочня (см. план 1947 г.), располагаясь приблизительно по направлению стрежня весеннего потока. С 1943 по 1953 г. перекат находился в хорошем состоянии не только благодаря естественному процессу очищения от излишних скоплений наносов, но и в результате удачно запроектированного комплекса мероприятий, выполненных в 1940—1943 гг. В 1940 г. была выполнена капитальная прорезь в крайне правом направлении (см. съемку 1940 г.), при этом были проведены значительные работы (447 тыс. $м^3$), затем (в 1941—1943 гг.) на левом побочне был поставлен ряд ветвистых сооружений и посажен ивовый кустарник для повышения отметок. До 1953 г. необходимости в проведении землечерпательных работ не было. Постепенно ухудшаясь, перекат к 1957 г. пришел в состояние, сходное с наблюдавшимся в 1939 г. (см. план 1957 г.).

Как видно из сравнения планов и приведенного описания, деформации русла на Красноборском перекате имеют явно выраженный периодический характер. Главное отличие их от деформаций перекатов на реках с периодическим расширением русла (Волга, Ока, Кама и др.) заключается в том, что при периодическом отторжении нижнего побочня на перекате фарватер переходит в крайнее верхнее положение, а не в крайнее нижнее, как это происходит на Волге, Днепре и других реках.

Искривленный меженный фарватер на перекате по линии *аб* не совпадает в весенний период и при средних уровнях воды с динамической осью потока, которая проходит по более прямому направлению *ав*. Вследствие этого поток размывает борозду по корневой части песков, в данном случае являющихся ниж-

ними для судоходного корыта переката. Во-вторых, по мере формирования кос *А* и *Б* пропускная способность меженного русла также уменьшается и создающийся дополнительный подпор по мере увеличения кривизны корыта создает усиленные перетоки через нижний побочень по прямому направлению.

Таким образом, искривление судового хода на перекате, ухудшение судоходных условий и увеличение объема путевых работ уже свидетельствует о необходимости его капитального улучшения. В этот период разработка прорези в крайнем верхнем положении резко улучшает судоходные условия и уменьшает объем эксплуатационных землечерпательных работ на ряд лет. При выполнении этих работ перекат выходит из числа лимитирующих.

Рис. 121. Перекат в середине судоходного рукава

Перекаты в середине рукава (рис. 121), формирующиеся из наносов, поступающих от размыва берега в месте захода в рукав, образуются обычно в виде интенсивно растущей излучины в обход побочня.

По мере искривления этой излучины происходит отторжение побочня и образование несколько ниже его по течению нового переката. Перекаты в средней части рукава недолговечны и быстро меняют свою форму и местоположение.

До тех пор пока побочень на перекате в середине рукава еще не сильно разросся и прорези у его приверха и ухвостья возможно выполнять с относительно небольшим объемом работ, для поддержания глубин можно ограничиться эксплуатационными подчистками.

Однако с развитием побочня и двойным искривлением судового хода через перекат начинается развиваться выбоина верхней плесовой лощины в корневой части нижнего побочня. В тех случаях, когда длина судового хода по излучине в 1,5 раза больше прямого направления через побочень и когда выбоина плесовой лощины доходит до середины длины побочня, можно безошибочно отторгать побочень и переносить судовой ход в спрямленное направление.

Извлеченный грунт в этом случае необходимо укладывать в старый ход, за пределы судоходной трассы.

Перекаты на выходе судоходного рукава обычно формируются в виде косы, спускающейся от ухвостья острова к противоположному берегу судоходного рукава (рис. 122).

В зависимости от соотношения расходов воды в рукавах судовой ход может изменить свое направление от крутого, которое наблюдается под ухвостьем острова, к пологому — вдоль ведущего берега судоходного рукава. Кроме того, на устойчи-

вость судовых ходов влияет угол встречи двух потоков и ширина устьевых частей рукавов.

Близкие по величине расходы воды в протоках, как правило, способствуют устойчивости судового хода вдоль ведущего берега судоходного рукава.

Инж. Вильперт приводит примеры Вандышевского, Усть-Важского и других перекатов, где на слиянии двух проток примерно с одинаковым расходом воды судовой ход, расположенный вдоль правого ведущего берега судоходного рукава, находится в хорошем состоянии, имеет большие габариты и почти не требует дноуглубительных работ. Наоборот, при слиянии рукавов, резко отличающихся расходами воды, при спаде паводка в несудоходном рукаве горизонт воды становится меньше, чем в главном рукаве. Второстепенный рукав как бы становится затонской частью переката и переформирование происходит примерно так, как на типовом перекате участка реки с периодическим расширением.

Рис. 122. Перекат в устье рукава

По мере спада воды коса в устье протоки все более и более создает подпор на перекате.

Динамическая ось потока постепенно искривляется в сторону второстепенного рукава и поднимается по косе вверх. В меженный период через косу разрабатывается борозда, через которую и проходит судовой ход. Чем больше разница в расходах между главным руслом и протокой, тем устойчивее крутой судовой ход и тем хуже держится прямой ход вдоль ведущего берега судоходного рукава.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акулов К. А., О землечерпательных прорезях на реках, Киев, 1905.
2. Акулов К. А., Образование речных русел. М, Транспечать, 1930.
3. Беляев В. Д., Увеличение габаритов водного пути, Речиздат, 1948.
4. Великанов М. А., Гидрология суши, изд. 4-ое, Л., Гидрометеоиздат, 1948.
5. Великанов М. А., Русловой процесс, М., Гос. изд-во физико-математической литературы, 1958.
6. Водарский Е. А., Выправление (регулирование) рек, М., изд-во «Водный транспорт», 1939.
7. Волжское землечерпание и его достижения (Сборник статей), НКПС, Центральное управление внутренних водных путей, 1925.
8. Григорьев С. Н. и Шадрин И. А., Выправительные работы на реках, Водтрансиздат, 1954.
9. Гончаров В. Н., Основы динамики русловых потоков, Гидрометеоиздат, 1954.
10. Громов М. И., Капитальное улучшение перекатов реки Волги, М., изд-во «Речной транспорт», 1955.
11. Гусев В. Н., Прорезь и свалка грунта при землечерпании, М., Гострансиздат, 1933.
12. Дедученко М. П., Методы капитальных путевых работ на Волге, «Речной транспорт», 1952, № 3.
13. Денисович П. А. и др., Практическое пособие начальнику плеса, Речиздат, 1951.
14. Доманевский Н. А. и Мясников М. В., Обобщение опыта выправительных работ на реках Верхне-Днепровского бассейна, изд-во «Речной транспорт», 1956.
15. Жуковский Н. Н., О руководящем принципе улучшения естественно судоходного состояния русских рек, Нижний Новгород, 1917.
16. Жуковский Н. Н., Об организации и системе землечерпания на транзите рек с подвижным ложем, М., 1925.
17. Жуковский Н. Н., Гидрологическая система регулирования рек и перспективы ее применения, Нижний Новгород, 1928.
18. Клейбер В. Г., Землечерпание и выправление как меры улучшения Волжского транзитного пути, Спб., 1900.
19. Коновалов И. М. и Баланин В. В., О формировании речных русел. Труды ЛИИВТа, вып. XXVI, изд-во «Речной транспорт», 1959.
20. Кустов Л. И., Введение в механику речного русла и методика планирования транзитного землечерпания. Труды ЦНИИРФа, вып I, Л., Речиздат, 1940.
21. Кустов Л. И., Влияние затонской части переката на устойчивости судового хода, «Речной транспорт», 1941, № 5.
22. Кустов Л. И., Развитие путевых работ на Волге, Речиздат, 1947.
23. Лавринович Л. П., Развитие выправительных работ. Речиздат, 1946.
24. Лавринович Л. П. и Варламов Н. Н., Практическое руководство для производителя выправительных работ, Речиздат, 1946.

25. Легун А. Н., Коренные вопросы в деле улучшения рек России, М., 1917.
26. Лелявский Н. С., О речных течениях и формировании речного русла, Сб. «Вопросы гидротехники свободных рек», Речиздат, 1948.
27. Лелявский Н. С., Об исследовании передвижения песчаных кос у г. Александрова. Сб. «Вопросы гидротехники свободных рек», Речиздат, 1948.
28. Лелявский Н. С., Об углублении наших больших рек, Киев, 1904 (доклад на X съезде русских деятелей по водным путям).
29. Лосиевский А. И., Лабораторные исследования процессов образования перекатов. Труды ЦНИИВТа, вып. 86, Л., Гострансиздат, 1934.
30. Лосиевский А. И., Борьба с перекатами путем применения наносоуправляющих сооружений, Речиздат, 1940.
31. Лосиевский А. И., Работа выправительных сооружений на перекатах типа россыпи, Речиздат, 1950.
32. Лосиевский А. И. и Попков И. Ф., Борьба с перекатами II типа, Гострансиздат, 1937.
33. Лохтин В. М., О механизме речного русла. Сб. «Вопросы гидротехники свободных рек», Речиздат, 1948.
34. Маккавеев В. М. и Коновалов И. М., Гидравлика, Л.—М., Речиздат, 1940.
35. Маккавеев В. М., Поперечные течения в призматическом русле и их возбуждение. Труды ГГИ, вып. 2 (56), Гидрометиздат, 1947.
36. Маккавеев Н. И., Русловой режим рек и трассирование прорезей, Речиздат, 1949.
37. Маккавеев Н. И., Русло реки и эрозия в ее бассейне, изд-во АН СССР, 1955.
38. Петровский В. В. и Сахарова Е. И., О переформированиях Красноборского переката. Сб. «Русловые исследования для улучшения судоходных условий, изд-во «Речной транспорт», 1958.
39. Попков И. Ф., Классификация перекатов. Труды ЦНИИВТа, вып. 179, Л., 1937 (стеклограф).
40. Попков И. Ф., Дноуглубление на раздвоенных участках рек (Сб. «Дноуглубительные работы на свободных реках и водохранилищах»), изд-во, «Речной транспорт», 1958.
41. Попов Н. А. и Шелгунов Н. К., Опыт проведения выправительных работ на реках Камского бассейна, изд-во «Речной транспорт», 1958.
42. Попов Н. А. и Шелгунов Н. К., Опыт применения гидравлических расчетов при проектировании судовых ходов, изд-во «Речной транспорт», 1958.
43. Потапов М. В. и Пышкин Б. А., Метод поперечной циркуляции и его применение в гидротехнике, изд-во АН СССР, 1947.
44. Проблемы русловых процессов, Гидрометеоиздат, 1958. (Материалы всесоюзного совещания).
45. Пузыревский Н. П., Об особых условиях течения р. Дон в связи с вопросом о его регулировании. Сб. «Вопросы гидротехники свободных рек», Речиздат, 1948.
46. Романов А. Ф., Трассирование прорезей на перекатах. Труды ЛИИВТа, вып. 7. Гострансиздат, 1936.
47. Пышкин Б. А. и др., Вопросы проектирования дноуглубительных прорезей, изд-во АН УССР, 1959.
48. Россинский К. И. и Кузьмин И. А., Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел. Сб. «Проблемы регулирования стока». Вып. I, изд-во АН СССР, 1947.
49. Россинский К. И. и Кузьмин И. А., Гидрологические основы речной гидротехники, изд-во АН СССР, 1950.
50. Русловой процесс. Сб. статей, изд-во АН СССР, 1958.
51. Русловые процессы и путевые работы на свободных реках. Труды ЦНИИЭВТа, вып. VIII, Речиздат, 1956.
52. Русаков А. Н., К вопросу устойчивости прорезей на перекатах второго типа, «Водный транспорт», 1937, № 10.

53. Садовский Г. Л., Капитальные дноуглубительные работы на перекатах, изд-во «Речной транспорт», 1956.
54. Садовский Г. Л., 50 лет транзитного землечерпания на реках СССР и пути его дальнейшего развития и усовершенствования. Речиздат, 1949 (Материалы технических совещаний по путевым работам).
55. Садовский Г. Л., К вопросу изучения речных переформирований, «Речной транспорт», 1949, № 14.
56. Чекренев А. И. и др., Дноуглубление и руслоочищение, Речиздат, 1949.
57. Чекренев А. И., Водные пути, ч. I, Водтрансиздат, 1953.
58. Шадрин И. А., Наблюдение за режимом речного потока, Речиздат, 1950.
59. Щукин И. С., Общая морфология суши, т. I, гос. научно-техн. горно-геологонефт. изд-во, 1933.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . . 3

Глава I. **Русловой процесс**

§ 1. Сущность руслового процесса . . . . . 5

§ 2. Особенности движения руслового потока . . . 6

§ 3. Русловые формы . . . . . 11

§ 4. Подвижность и устойчивость русла . . . . . 19

§ 5. Закономерности формирования речных русел . . .

§ 6. Речная пойма . . . . . 30

Глава II. **Анализ режима и деформаций перекатов**

§ 7. Классификация перекатов . . . . . 36

§ 8. Перекаты на пойменных участках равнинных рек (тип IA) 41

§ 9. Сложные перекаты . . . . . 51

§ 10. Перекаты на участках рек с односторонней поймой (тип IБ) 54

§ 11. Перекаты на участках реки со слаборазвитой поймой (тип IВ) . . . . . 57

§ 12. Перекаты в районе впадения весенней протоки (II тип) 58

§ 13. Перекаты, расположенные в местах расширения поймы (III тип) . . . . . 62

§ 14. Перекаты в районе впадения притоков (IV тип) . . 63

§ 15. Перекаты-россыпи (V тип) . . . . . 68

§ 16. Перекаты в разветвленном русле (VI тип) . . . 70

§ 17. Перекаты ниже высыпки из балки или мыса (VII тип) . 74

§ 18. Перекаты на участках рек с меандрирующим руслом (VIII тип) . . . . . 75

§ 19. Перекаты на участках рек с блуждающим руслом (IX тип) 82

Глава III. **Проектирование прорезей и выправительных сооружений**

§ 20. Общие указания . . . . . 85

§ 21. Улучшение перекатов типа IA . . . . . 99

§ 22. Прорези на песчано-галечных и суглинистых перекатах (тип I, группа II) . . . . . 116

§ 23. Прорези на сложных перекатах I типа . . . . 120

§ 24. Прорези на перекатах участков рек с односторонней поймой (тип IБ) . . . . . 127

§ 25. Прорези на перекатах участков со слаборазвитой поймой 132
§ 26. Прорези на перекате, образованном косой от пойменного берега к коренному (II тип) . . . . . 133
§ 27. Прорези на перекате, расположенном в районе расширения поймы (III тип) . . . . . 138
§ 28. Прорези на перекатах, расположенных в районе впадения притоков (IV тип) . . . . . 140
§ 29. Прорези и выправительные сооружения на перекатах типа россыпи (V тип) . . . . . 141
§ 30. Прорези на перекатах в разветвленном русле (VI тип) 143
§ 31. Прорези на перекатах у приверха и ухвостья острова . 149
§ 32. Выправление участков сложных разветвлений русла . 154
§ 33. Прорези на перекатах меандрирующих участков русла . 158
§ 34. Прорези на перекатах рек с блуждающим руслом . . 169
Литература . . . . . 178

САДОВСКИЙ ГЕОРГИЙ ЛЬВОВИЧ

**Пособие по трассированию землечерпательных прорезей**

Редактор изд-ва *Алексеев В. И.*
Техн. редактор *Похлебкина М. И.*
Корректоры: *Воробьева В. А.* и *Чуракова Ю. Л.*

---

**Сдано в производство** 29/III-1960 г. **Подп. к печ.** 6/VII 1960 г.
Т-08231 **Бумага** $60 \times 92^1/_{16}$—5,75 б. л.,11,5 п. л.,11,36 **уч.-изд. л.**
Изд. № С—1832-Р Тираж 2000 Цена 6. р. 70 к. Заказ 762

---

1-я типография изд-ва «Речной транспорт»
Москва, Кожевническая ул., д. 1-б.