П. А. ШАНКИН

Ш 216

РАСЧЕТ ПОКРЫТИЙ ОТКОСОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

001204 34

БИБЛИОТЕКА
Новосибирского института
инженеров водного транспорта

ИЗДАТЕЛЬСТВО «РЕЧНОЙ ТРАНСПОРТ»
Москва — 1961

В книге излагаются результаты исследований плитчатых покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений. На основе этих исследований, с учетом отечественного и зарубежного опыта строительства и эксплуатации, даются рекомендации по расчету плитчатых креплений откосов на волновые нагрузки и воздействие ледяного припая.

Книга предназначается для инженеров, занимающихся проектированием, исследованиями, строительством и эксплуатацией гидротехнических сооружений.

Редактор *Гуревич В. Б.*
Рецензент *Михайлов А. В.*

Переплет художника *Павлинова К. А.*

ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи со строительством гидротехнических сооружений, созданием мощных водохранилищ и судоходных каналов широкий размах получили берегоукрепительные работы. Достаточно сказать, что при строительстве судоходных каналов имени Москвы и имени В. И. Ленина берегоукрепительные работы были выполнены на площади более 6 млн. $м^2$, стоимость укреплений земляных откосов по одному лишь Сталинградскому гидроузлу составляет около 350 млн. руб.

Практика проектирования и строительства покрытий откосов, основанная главным образом на учете работы аналогичных, ранее выполненных креплений, не всегда давала положительные результаты. Об этом свидетельствуют многочисленные повреждения покрытий откосов, для ликвидации которых затрачивались и затрачиваются большие средства.

Покрытия откосов земляных гидротехнических сооружений на водохранилищах и судоходных каналах в основном подвержены волновым и ледовым воздействиям; в связи с этим размер и конструкция покрытия в первую очередь должны определяться величинами силовых воздействий от указанных основных факторов.

Из всех ныне известных типов покрытий при защите откосов земляных сооружений наибольшее распространение получили каменные и бетонные крепления. Переход от каменных покрытий к бетонным, который в настоящее время имеет место в проектных организациях, в основном обусловлен наличием значительных размеров волн. Расчетная высота волны в условиях наших водохранилищ достигает 3—3,5 *м*. Вместе с тем следует признать, что при рациональном проектировании каменного покрытия откоса оно также может работать с большим успехом.

Вопрос о необходимости разработки методических указаний по расчету и проектированию бетонных покрытий земляных откосов особое значение приобрел в последнее время. Советскими инженерами и учеными в этом направлении была проделана большая работа. В результате совместной работы научных и проектных организаций разработан ряд новых экономичных типов бетонных покрытий, позволяющих возводить сооружения индустриальными методами.

В заграничной практике широко применяются различные рациональные типы покрытий откосов. Однако при проектировании бетонных покрытий применительно к высотам волн, наблюдаемым на водохранилищах, заграничная практика в основном идет лишь по пути изыскания новых типов покрытий, вопросы же методики расчетов разработаны недостаточно.

Настоящая работа посвящена вопросам расчета и проектирования бетонных покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений на водохранилищах и судоходных каналах с учетом воздействия волн и ледяного припая.

В работе рассматривается взаимодействие волн и откосных сооружений; определяются элементы судовых волн в судоходных каналах, волновые нагрузки на сооружения откосного типа; исследуется устойчивость бетонного покрытия откоса; рассчитывается обратный фильтр в условиях волнового воздействия; назначаются границы крепления откосов. Для полноты освещения поставленного вопроса было признано целесообразным в отдельных случаях привести предварительные рекомендации.

Следует указать, что автор данной работы не ставит задачу полностью и всесторонне осветить все перечисленные вопросы, так как для окончательного решения даже одного вопроса необходима постановка еще более широких опытных и теоретических исследований, особенно в части проведения натурных наблюдений на действующих и вновь строящихся водохранилищах.

Однако описанные в работе экспериментальные и теоретические исследования позволили получить обоснованные рекомендации по расчету и конструированию бетонных покрытий земляных откосов. По сравнению с прежними рекомендациями предлагаемая методика расчета позволяет выбрать наиболее рациональный и экономичный тип бетонного покрытия.

Отметим, что предложенные автором методические положения по расчету бетонного покрытия в настоящее время нашли распространение в проектных и производственных организациях. Результаты исследований были использованы при составлении технических указаний различными организациями и ведомствами. В проектных организациях, в частности в Гипроречтрансе, Лентрансмостпроекте, Гидроэнергопроекте и других, с учетом разработанных автором рекомендаций составлены и утверждены типовые проекты бетонных покрытий откосов земляных сооружений. По сообщению этих организаций, разработанные типовые проекты позволили удешевить стоимость бетонных покрытий.

В предлагаемой работе изложены результаты многолетних исследований в лабораторных и натурных условиях, связанных в основном с разработкой методических положений по расчету бетонных и железобетонных покрытий на волновые и ледовые воздействия. Лабораторные исследования проводились в ЦНИИЭВТе, натурные — на специальных опытовых участках канала имени Москвы.

Считаю приятным долгом выразить благодарность докт. техн. наук А. В. Михайлову за ценные указания, данные им при рецензировании настоящего труда, проф., докт. техн. наук С. В. Нерпину, докт. техн. наук А. С. Офицерову, инж. Е. В. Зимареву за ценные замечания при просмотре рукописи, канд. техн. наук В. Б. Гуревичу, взявшему на себя труд редактирования книги.

Автор выражает благодарность главному инженеру Управления канала имени Москвы А. М. Румянцеву и инж. А. Г. Чернокову за большую помощь в организации и проведении натурных исследований, а также сотрудникам ЦНИИЭВТа Н. И. Данилову, Э. Я. Филиппову, А. А. Теплякову, А. Х. Григорьевой — за плодотворное участие в проведении лабораторных и натурных исследований.

ГЛАВА I

ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ КРЕПЛЕНИЙ ОТКОСОВ

§ 1. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОКРЫТИЙ ОТКОСОВ

На первых судоходных каналах, например на каналах, входящих в Мариинскую систему (рис. 1), применяли облегченные фашинно-каменные покрытия откосов. Опыт строительства и эксплуа-

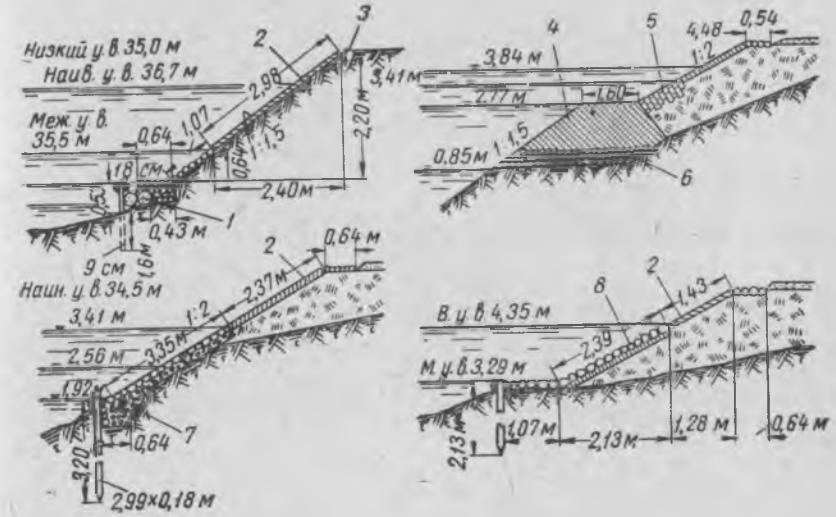


Рис. 1. Типы креплений откосов каналов Мариинской системы:

1—фашина; *2*—одерновка; *3*—барьерный брус; *4*—фашинная кладка; *5*—волховские плитки; *6*—легкие фашины; *7*—фризовый лом; *8*—мостовая на мху

тации таких покрытий показал, что они сравнительно быстро выходят из строя в первую очередь из-за недостаточной прочности конструкции и завышения отметки низа крепления [6]. Особенно интенсивным разрушениям эти покрытия подвергаются при значительных скоростях движения судов и больших их габаритах.

Откосы канала имени Москвы были в основном покрыты каменной облицовкой (рис. 2, *а*) толщиной 0,25 *м*, уложенной на слое разнозернистого гравия толщиной 0,15 *м*. Размер камней на большей части канала 0,15÷0,18 *м* и лишь на отдельных участках 0,3÷0,4 *м*.

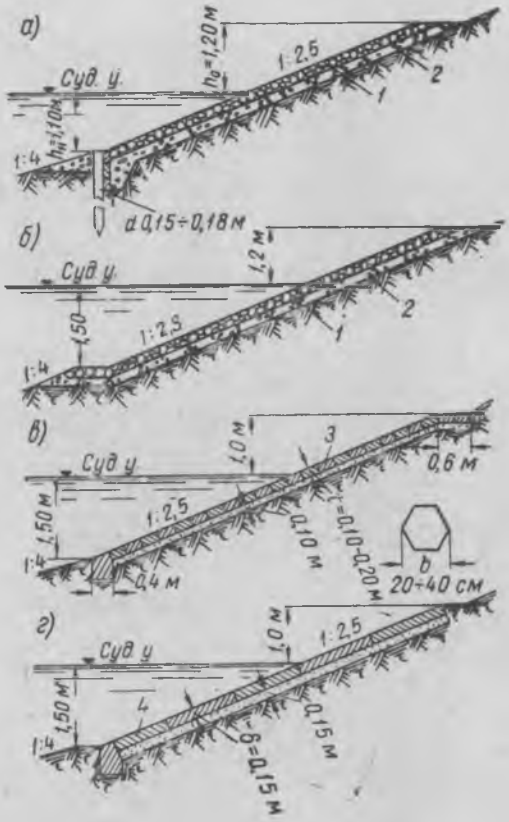


Рис. 2. Типы покрытий откосов канала имени Москвы:
1—каменная облицовка 0,25 *м*; *2*—слой р/з гравия 0,15 *м*; *3*—бетонные шашки, *4*—бетонные плиты

При проектировании обратного фильтра под покрытия данного канала было принято, что коэффициент неоднородности частиц данного слоя должен быть не менее пяти, т. е.

$$\frac{d_{60}}{d_{10}} \leqslant 5,$$

где d_{10}— эффективный диаметр частиц, т. е. диаметр таких частиц, меньше которых в грунте имеется 10% по весу;

d_{60}— контролирующий диаметр частиц, т. е. диаметр таких частиц, меньше которых в грунте содержится 60% по весу.

Однако в производственных условиях это правило в большинстве случаев не соблюдалось, вследствие чего гранулометрический состав обратного фильтра весьма разнообразен.

Эта облицовка оказалась не вполне удачной. В первые же годы эксплуатации канала произошли значительные повреждения и разрушения, имевшие самый разнообразный характер (рис. 3). В последующее время объем разрушений был настолько велик, что работники канала не успевали своевременно проводить текущие и капитальные ремонты.

Рис. 3. Разрушение каменного покрытия откоса (канала имени Москвы)

На основании опыта эксплуатации данного канала, а также по материалам натурных наблюдений [65] было установлено, что основная причина разрушений каменных покрытий откосов заключается в несоответствии самой конструкции условиям ее работы. При образовании судовой волны в канале высотой до 1,2 *м* наблюдались интенсивные разрушения не только верхнего облицовочного слоя, но и обратного фильтра и грунта основания. На ряде участков повреждение креплений откосов начиналось с размыва незащищенного откоса, т. е. происходило из-за недостаточной зоны покрытия откоса.

Наиболее интенсивные разрушения были зафиксированы на тех участках канала, откосы которых были покрыты небольшими бетонными шашками (рис. 2, *в*). После первого разрушения была сделана попытка восстановить это крепление по прежнему проекту, заменив песчаное основание гравийным слоем толщиной 0,15 *м*. Однако и это покрытие быстро вышло из строя (рис. 4). В дальнейшем от покрытий такого рода отказались.

На отдельных участках канала, на подходах к шлюзам и насосным станциям откосы были защищены бетонными плитами размером 2×2×0,15 *м* на слое гравия толщиной 0,15 *м* (рис. 2, *г*); на откосах земляных плотин были применены плиты такого же размера, но толщиной 0,25 *м*. Опыт эксплуатации этих покрытий свидетельствует об удовлетворительной их работе при волнении с высотой волны до 1,5 *м*.

Рис. 4. Разрушение креплений откосов из бетонных шашек

Следует отметить, что во время строительства канала имени Москвы не было еще достаточного опыта эксплуатации каменных покрытий откосов судоходных каналов.

Каменное покрытие откосов канала имени В. И. Ленина представляет собой более совершенную и прочную конструкцию (рис. 5); каменная облицовка толщиной 0,3—0,4 *м* тщательно уложена, филь-

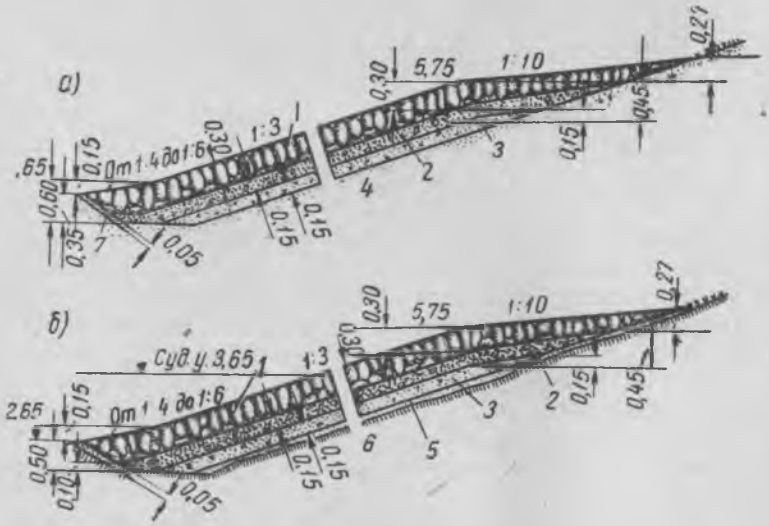


Рис. 5. Типы покрытий откосов на канале имени В. И. Ленина при использовании для подготовки отсортированного крупнозернистого песка:

а — крепление откосов в песчаных грунтах; *б* — крепление откосов в глинистых грунтах; *1*—камни размером 125—250 *мм* (в наименьшем измерении), выравниваемые до проектной толщины около 40—80 *мм* (в наименьшем измерении); *2*—щебень крупностью 10—40 *мм*; *3*—сортированный крупнозернистый песок; *4*—песчаный грунт основания (0,10—0,25 *мм*); *5*—мелкозернистый песок (постель), служащий для выравнивания основания; *6*—глинистый грунт основания; *7*—слой щебня, втрамбованного в грунт

трующая подготовка сделана многослойной. Принятая конструкция оказалась вполне удачной и работает удовлетворительно. Наблюдаемые небольшие разрушения каменной облицовки (рис. 6) были вызваны в основном недостаточно надежным упором и несколько завышенной границей крепления откоса. В подводной части подмывалось основание и оползало крепление. Разрушение верхней облицовки и фильтрующей подготовки наблюдалось на тех участ-

Рис. 6. Разрушение каменного крепления откоса канала имени В. И. Ленина

ках, где во время работ не соблюдались технические условия и применялся материал, не соответствующий этим условиям. Эти разрушения в большинстве случаев были вызваны действием волн, образуемых при повышенной скорости движения судов по каналам, и лишь частично происходили вследствие ледового припая.

Поучительными примерами повреждений и разрушений каменных откосов земляных плотин служат повреждения и разрушения на плотинах водохранилищ данного канала. На Варваровской, Береславской и Карповской плотинах верхняя облицовка была выполнена из камней размером 20÷35 *см*, расположенных на многослойном обратном фильтре (рис. 7).

Во время шторма (ноябрь 1952 г.) на этих плотинах было разрушено более 4 тыс. $м^2$ покрытия, причем разрушались сама облицовка и фильтрующий слой, размывалось основание и крепление сползало вниз по откосу. Аварии на этих плотинах связаны с тем, что действительная высота волны, наблюдаемая во время шторма ($2h \approx 1{,}6 \div 2{,}5$ *м* при скорости ветра 30÷35 *м/сек*), оказалась больше расчетной ($2h = 0{,}8 \div 1{,}2$ *м* при расчетной скорости ветра 20÷25 *м/сек*).

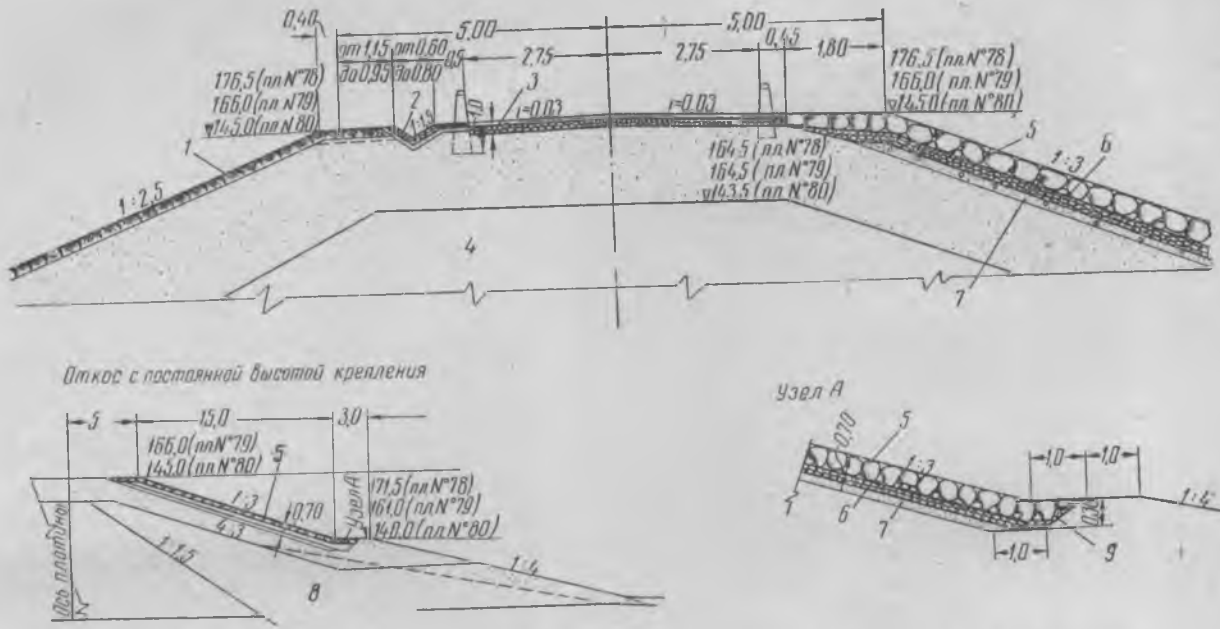


Рис. 7. Крепление откосов на Карповской, Варваровской и Береславской плотинах:

1—растительный слой 0,15 *м* с посевом трав; 2—кюветы $h=0,2-0,3$ *м* с выводом через 400 *м*; 3—щебеночное покрытие $h=0,2$ *м* с поверхностной обработкой гудроном; 4—ядро из супеси и легких суглинков; 5—камни 200—350 *мм* (в наименьшем измерении), выравниваемые до проектной толщины 0,40 *м* околом 40—80 *мм*; 6—щебень крупностью 10—40 *мм* слоем 0,15 *м*; 7—каменная кропка 1—5 *мм* (толщина слоя 0,15 *м*); 8—суглинистый экран; 9—втрамбованный слой щебня 0,06 *м*

При восстановительных работах на этих плотинах устроили прежнее каменное покрытие и залили его цементным раствором (рис. 8). Опыт эксплуатации показывает, что восстановленные крепления вновь подвергаются разрушениям и повреждениям. Особенно это было заметно в 1956 г.

Рис. 8. Общий вид напорного откоса плотины после его усиления

На отдельных участках канала имени В. И. Ленина в виде опыта откос покрыли асфальтобетоном толщиной 10 *см*, положив его на однослойный фильтр из каменной крошки; на канале № 111 это покрытие было распространено по всей зоне крепления откоса, на канале № 104 — лишь в надводной части. Это покрытие было разработано работниками проектных организаций [57], по мнению которых, оно должно быть на 40% дешевле каменного покрытия (стоимость 1 $м^2$ покрытия из асфальтобетона приблизительно 50 руб.; каменного — 83 руб.). Состав асфальтобетона следующий: щебень 10÷40 *мм* — 94%; минеральный порошок — 6%; битум марки БН-2—2%. Температура выпуска смеси 130—140°С. Смесь приготовляли в смесителях со свободным перемешиванием, доставляли к месту кладки автосвалами, выгружали на бойки и раскладывали по откосу вручную в один слой, после чего выравнивали. Уплотняли смесь электровибраторами.

В первые же годы эксплуатации были замечены значительные повреждения асфальтобетонного покрытия почти на всем протяжении канала. Попытка восстановить разрушенные участки с помощью каменной наброски, с проливкой цементным раствором, не дала положительных результатов. Основные причины повреждения асфальтобетона — недостаточная его прочность и образование значительного припая льда.

Весной 1952 г. на канале № 111 был понижен уровень воды (при максимальной скорости снижения 0,5 *см/час*), в результате этого снижения льдом была вырвана значительная полоса асфаль-

Рис. 9а. Разрушение льдом асфальтобетонного покрытия откоса (канал имени В. И. Ленина)

Рис. 9б. Состояние асфальтобетонного покрытия в момент воздействия судовой волны

тобетона (рис. 9а); впоследствии интенсивное разрушение откоса происходило под воздействием судовой волны (рис. 9 б). Напротив, на канале № 104 покрытие хорошо сохранилось, так как здесь оно оказалось вне зоны ледового припая. Разрушению асфальтобетона

способствовали и дефекты производства работ, в частности, некачественное выполнение строительного шва, который проходил по линии уреза воды. Наблюдается оплывание битума, что связано с несоблюдением принятого состава.

Представляет интерес анализ работы бетонного покрытия откоса, которое было выполнено на отдельных участках каналов № 111 и 112. В одних случаях бетонные плиты размером 1,5×1,5×0,1 *м* бетонировали на месте на сплошном трехслойном обратном фильтре; арматуру ⌀ 6 *мм* располагали в середине сечения плиты и пропускали насквозь по всему откосу; швы между плитами заполняли деревянными рейками толщиной 1,6×2,0 *см*; в других случаях плиты принимали размером 1,5×2,2×0,15 *м*; на одном из участков канала № 112 были уложены сборные плиты размером 0,9×0,6×0,10 *м*.

Выполненное бетонное покрытие откосов рассматриваемого канала в общем работает хорошо; вместе с тем в отдельных местах есть серьезные повреждения (рис. 10 а и 10 б). Эти повреждения были вызваны тем, что в средней части откоса укладывали сборные плиты небольшого размера, не связываемые с остальными плитами. Как показал выполненный впоследствии анализ, эти плиты при высоте волны в канале $2h \approx 1$ *м* оказались неустойчивы и были выброшены из своих гнезд под действием значительного волнового взвешивающего давления, образовавшегося в момент отката волны с откоса.

На Шекснинской плотине, построенной в 1941 г., откосы с заложением 1 : 3 защищали плитами различных размеров [75]; размер основных плит 20×20×0,5 *м*. Эти плиты уложены на песчаной подготовке; бетон укладывали на месте по арматурной сетке. Ленточный фильтр в швах покрытия уложен в три слоя, толщина каждого слоя 0,15 *м*; коэффициент неоднородности материала отдельных слоев фильтра 2,1÷5,3; коэффициент междуслойности между верхним и средним слоями 1,5÷3,0; между средним и нижним — 2,7÷6,1.

Данное сооружение испытывает значительную волновую нагрузку; замеренная высота волны в водохранилище вблизи плотины 2 *м* (расчетная высота волны 2,5 *м*). Опыт эксплуатации сооружения показал, что общее состояние бетонного покрытия удовлетворительно; несмотря на тяжелые ледовые условия, бетонное покрытие не подвергалось деформациям и разрушениям. Однако на отдельных плитах все же имеются трещины размером до 1 *см*, образованные в первые годы эксплуатации сооружения.

По характеру расположения этих трещин можно предположить, что их образование связано с неравномерной осадкой тела земляной плотины. По сообщениям работников эксплуатации, вымыва частиц грунта основания через трещины не наблюдается.

На Вышне-Волоцком гидроузле напорные откосы земляных дамб в большей части защищены бетонными плитами размером 3,0×3,0×0,18 и 3,5×3,5×0,12 *м*, уложенными на сплошном двух-

слойном обратном фильтре; шов между плитами защищен деревянной доской толщиной 2 *см*. С начала эксплуатации этих сооружений (1947 г.) не было обнаружено каких-либо серьезных повреж-

Рис. 10а. Вырывание бетонной плиты (начало разрушения).

Рис. 10б. Разрушение бетонного покрытия откоса (канал имени В. И. Ленина)

дений. Однако в отдельных местах в бетонных плитах (вдоль уреза воды) появились трещины, происхождение которых также связано с образованием неравномерной осадки тела дамбы и вызывается тем, что плиты бетонировали непосредственно после устройства насыпи.

На Цимлянском гидроузле откосы земляных дамб защищены бетонной облицовкой, на что было израсходовано более 300 тыс. $м^3$ бетона. Размер плит колеблется от $10 \times 10 \times 0{,}5$ *м* до $20 \times 20 \times 0{,}5$ *м* (рис. 11); после бетонирования плит опалубка оставлена на месте; обратный фильтр уложен только под швами, на остальной части откоса поверхность покрыта слоем втрамбованного гравия 10 *см*; армирование плит выполнено двумя сетками; основной, расположен-

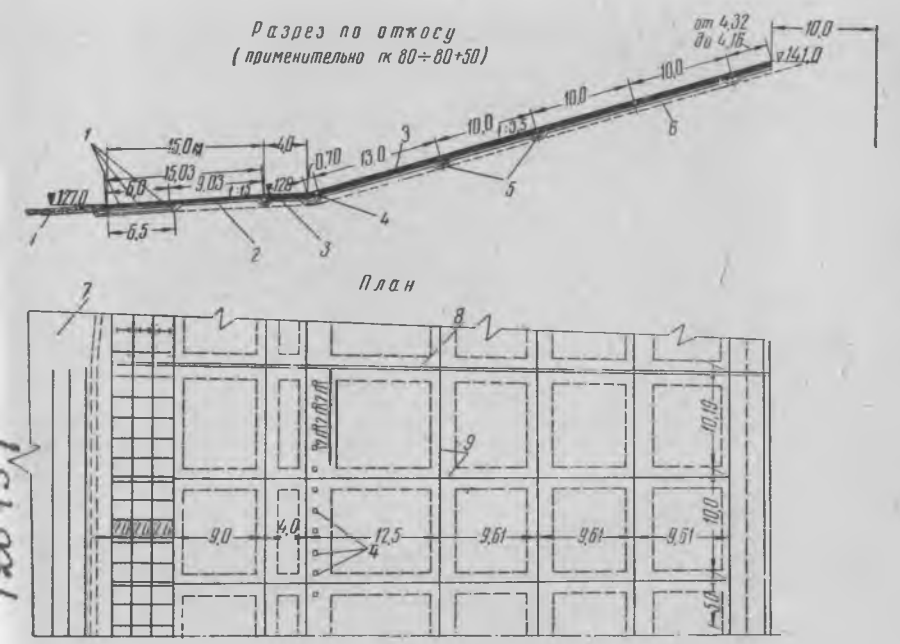


Рис. 11. Бетонное крепление откоса Цимлянской плотины:

1—гибкая часть крепления на трехслойном фильтре; *2*—армированные бетонные плиты $\delta=0{,}2$ *м*; *3*—то же, $\delta=0{,}4$ *м*; *6*—то же, $\delta=0{,}5$ *м*; *4*—дренажные отверстия $0{,}2 \times 0{,}2$ *м*; *5*—трехслойные ленточные фильтры $t=0{,}45$ *м*; *6*—втрамбованный гравий $t=0{,}1$ *м*; *7*—гравийное покрытие $t=0{,}3$ *м*; *8*—температурно-осадочный шов; *9*—конструктивные швы

ной внизу, и верхней, идущей по контуру плит. Трехслойный обратный фильтр состоит из верхнего слоя толщиной 0,20 *м* из гравия с $d=30 \div 50$ *мм*; средний — 0,15 *м* — из каменной крошки $d=4 \div 8$ *мм* и нижний — 0,10 *м* — из гравийно-песчаной смеси $d=0{,}8 \div 1{,}5$ *мм*. Зафиксированная высота волны в водохранилище 3 *м*, расчетная высота волны 3,5 *м*.

При осмотре дамб после трех лет с начала их эксплуатации было установлено, что бетонное покрытие на большом протяжении имеет удовлетворительный вид (рис. 12). Вместе с тем были обнаружены местные просадки плит и раскрытия швов (рис. 13), скалывания бетона по краям плит и образования значительного количества трещин в бетонном покрытии (рис. 14) размером 15 *мм* и более,

БИБЛИОТЕКА

причем часть трещин — сквозные; преобладающее направление трещин совпадает с урезом воды, однако некоторые трещины расположены и по направлению самого откоса.

Рис. 12. Общий вид бетонного покрытия откоса Цимлянской плотины

По характеру расположения трещин, а также по осадке тела земляных дамб можно предположить, что эти трещины образовались

Рис. 13. Раскрытие швов в бетонном покрытии откоса плотины

в результате неравномерной осадки всего сооружения в целом. Бетонирование плит на значительном протяжении производилось одновременно с намывом дамбы, т. е. в условиях еще сильной во-

доотдачи намывного грунта и потому образование вертикальных трещин, по-видимому, связано с неодинаковой плотностью грунта по длине плотины. Значительная часть трещин носит чисто усадочный характер и связана с температурными деформациями.

Сопоставляя общее состояние бетонного покрытия Цимлянских и Шекснинских дамб, можно заметить, что незначительное количество трещин в бетонном покрытии Шекснинских дамб объяс-

Рис. 14. Трещина в бетонном покрытии откоса плотины

няется тем, что откос здесь бетонирован через год после начала эксплуатации сооружения, т. е. после того, как произошла основная осадка тела дамбы.

В октябре 1956 г. во время шторма на Каховском водохранилище было разрушено каменное покрытие откоса на протяжении около 2 *км*. Откос на этом водохранилище укрепляли внаброску несортированным камнем весом от 30 до 150 *кг*; высота волны во время шторма доходила до 2 *м*.

Характерным примером разрушения покрытия из бетонных шашек является авария на дамбах мостового перехода через р. Дон. Шестигранные шашки с размером граней 0,7 *м* и толщиной 0,2 *м* были уложены на слой гравия толщиной 15 *см*; для закрепления шашек были установлены металлические анкера, которые завинчивали в тело дамбы. При первом же шторме это крепление, в основном из-за неудачной конструкции фильтра, было разрушено полностью. Для ликвидации перечисленных аварий были затрачены десятки миллионов рублей.

На волнозащитных дамбах в районе Никополя крепление откоса выполнено из сборных железобетонных плит, связанных между собой шарнирными соединениями; плиты, имеющие размер 2,0×2,0×0,25 *м* (с расчетом на высоту волны $2h=2{,}2$ *м* и заложение откоса 1 : 3,5), укладывали на сплошной трехслойный обратный

фильтр толщиной 0,5 *м*. Шарнирные закрепления сделаны по одному на каждой боковой стороне плиты; верхние ребра плиты скошены. Данный тип покрытия представляет интерес потому, что здесь при неравномерной осадке тела земляного полотна можно избежать образования трещин в бетоне. Кроме того, шарнирные связи увеличивают общую устойчивость всего покрытия в целом. Однако в таких покрытиях не исключена коррозия металла в шарнирных соединениях.

За последнее время проектными организациями (Гипроречтранс, Гидропроект, Гидроэнергопроект, Лентрансмостпроект и др.) разработано несколько типов оригинальных конструкций железобетонных покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений, строящихся в настоящее время на Волге, Днепре и других реках. Применение в них сборных железобетонных плит значительно сокращает трудоемкость работ и позволяет производить их более высокими темпами. Некоторые из этих конструкций уже применены на ряде объектов.

При покрытии земляных откосов аванпорта Куйбышевской ГЭС было применено экономичное и надежное покрытие откосов железобетонными плитами (рис. 15), изготовленными из бетона марки 200, В-4, Мрз 100 с арматурой марок Ст. 3 и Ст. 5.

Армирование плит производилось сетками. Нижняя сетка сплошная, верхняя — по контуру плиты. Рабочую арматуру в нижней сетке укладывали перпендикулярно урезу воды. Плиты между собой соединяли стержнями арматуры, образующими конструктивные швы. Крепление откоса разделено температурно-осадочными швами на секции длиной 30÷40 *мм*. Температурно-осадочные швы отличаются от конструктивных отсутствием соединительной арматуры. Применение этого крепления упразднило одну из самых трудоемких операций — устройство сплошных или ленточных многослойных обратных фильтров.

Для грунтонепроницаемости швов между плитами под швами по всему контуру плиты уложены железобетонные доски толщиной 7 *см*, покрытые битумными матами толщиной 1 *см*, а в шов вставлена доска толщиной 2 *см*, пропитанная креозотом. Эта доска одновременно является и опалубкой. В целях предотвращения суфозий частиц грунта под плитами их укладывали на 15-сантиметровый слой щебня или гравия. Трехлетняя эксплуатация этого покрытия показала его надежность.

Возведение такого покрытия оказалось значительно менее трудоемким, чем обычных покрытий из монолитного железобетона с ленточными фильтрами. Введение в монолитную конструкцию элементов сборного железобетона в вышеуказанном покрытии все же не разрешает задач, поставленных индустриализацией строительства. В связи с этим рядом проектных институтов разработаны типы креплений откосов, в которых широко применяется сборный железобетон.

Замена монолитного железобетона в конструкциях сборным без

изменения принципов расчета и конструирования их не дала эффекта, а наоборот, удорожила покрытие и не сократила трудоемкости работ.

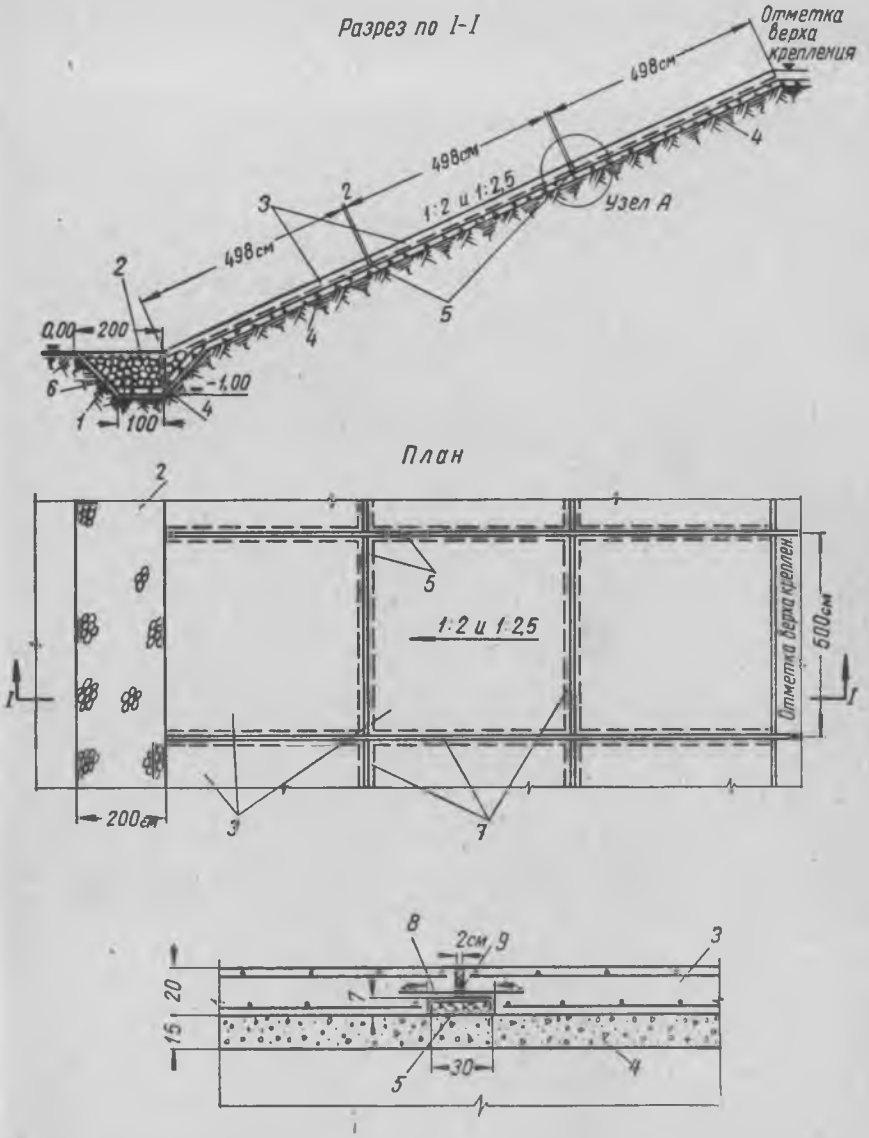


Рис. 15. Покрытие земляных откосов аванпорта Куйбышевской ГЭС:

1—втрамбованный щебень или гравий *t*=5 *см*; *2*—упорная призма из камня; *3*—монолитные железобетонные плиты δ=20 *см*; *4*—щебень или гравий *t*=15 *см*; *5*—сборные железобетонные доски сечением 30×7 *см*, длиной 235 *см*; *6*—крупнозернистый песок *t*=10 *см*; *7* — конструктивные швы; *8* — битумный мат *t*=1 *см*; *9* — доска *t*=2 *см*, пропитанная креозотом.

Действительно, из-за недостаточной грузоподъемности монтажных кранов при переходе на сборный железобетон пришлось значительно уменьшить размеры плит в плане (принимая площадь плиты не более 6—8 $м^2$), чтобы сократить их вес. Даже при таких размерах плит потребовались краны грузоподъемностью 15—20 *т*, так как необходимы большие вылеты стрелы.

Сокращение плановых размеров плит в свою очередь требует как увеличения их толщины для обеспечения устойчивости, так и устройства сплошного многослойного фильтра под ними.

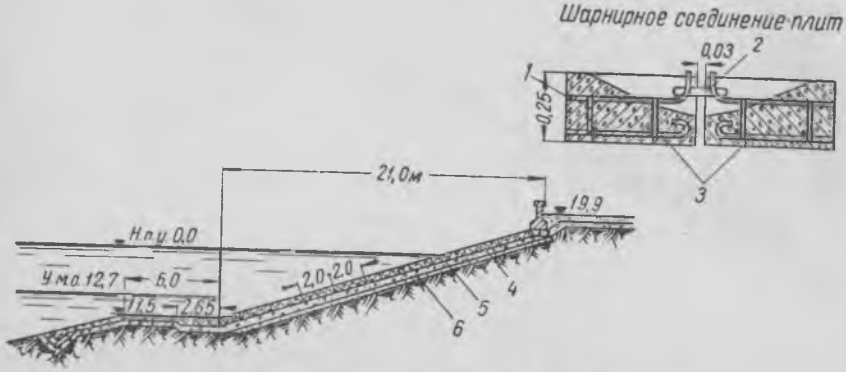


Рис. 16. Крепление дамбы № 4 в г. Марганец:

1—стержень ⌀ 6 *мм*; *2*—шарнирные трубы ⌀ 18 *мм*; *3*—арматурная сетка из стали ⌀ 12 *мм*; *4*—сборные железобетонные плиты 2×2×0,25 *м*; *5*—щебень 40—100 *мм*, толщина слоя 20 *см*; *6*—щебень до 40 *мм*, толщина слоя 20 *см*

С учетом указанных соображений такой вид крепления сборными плитами удается выполнить при высоте волны примерно до 1,5 *м*, при этом применяют плиты толщиной 20 *см* и весом более 5 *т*.

Эффективнее использован сборный железобетон согласно предложению Укргидепа при покрытии откосов защитных дамб, преграждающих доступ воды Каховского водохранилища на территорию марганцевых месторождений. Площадь откосов, покрытых сборными железобетонными плитами, на этих дамбах более 100 тыс. $м^2$.

Покрытие откосов образовано из сборных плит размером 2,0×2,0×0,25 *м*, уложенных на двухслойном обратном фильтре (рис. 16). Для увеличения устойчивости плит на откосе при действии волны высотой, превышающей 2 *м*, их шарнирно связывали друг с другом с помощью хомутов. Плиты изготавливались на заводе железобетонных изделий с применением пропаривания из бетона БГТ-150, Мрз-5, В-4.

В нижней части плиты имели рабочую сетку из стержней ⌀12 *мм*; в верхней части укладывалась сетка из стержней ⌀6 *мм* и два перпендикулярно расположенных друг к другу стержня 18 *мм*, заканчивающихся загнутыми под прямым углом стержнями ⌀18 *мм*. На

эти крюки по окончании укладки отдельных участков плит надевали шарнирные хомуты, затем крюки загибались наглухо. Плиты на откос дамбы укладывали кранами Э-505А и Э-1003. Зазор между плитами составлял от 2 до 4 *см*. Чтобы усилить отдачу фильтрующейся воды при откате волны, в средней части плит при их изготовлении делали четыре симметрично расположенных отверстия ∅4—5*см* каждое. Работы по креплению откосов велись и в зимнее время.

Несмотря на то, что защитные дамбы имели значительные неравномерные осадки, а также подвергались действию сильных штормов при высоте волны до 2,3 *м*, покрытие их из сборных железобетонных плит существенно не разрушалось. В месте просадок откоса плиты оставались плотно прилегающими к обратному фильтру, лишь неровности поверхности ухудшали внешний вид сооружения. Основной недостаток подобного типа крепления — необходимость в тщательном устройстве сплошного обратного фильтра.

Другой способ эффективного применения сборного железобетона в покрытиях откосов для всего диапазона высот волн, встречающихся на водохранилищах (до 3 *м*), был предложен Гипроречтрансом. Покрытие в этом случае состояло из сборных железобетонных плит, омоноличенных по контуру в карты большого размера (рис. 17).

В предлагаемом типе крепления поверхность откоса делится на карты: вдоль линии уреза воды размером до 40 *м*, в направлении, перпендикулярном линии уреза, до 20 *м*. В продольном направлении карты разделены температурно-осадочными швами.

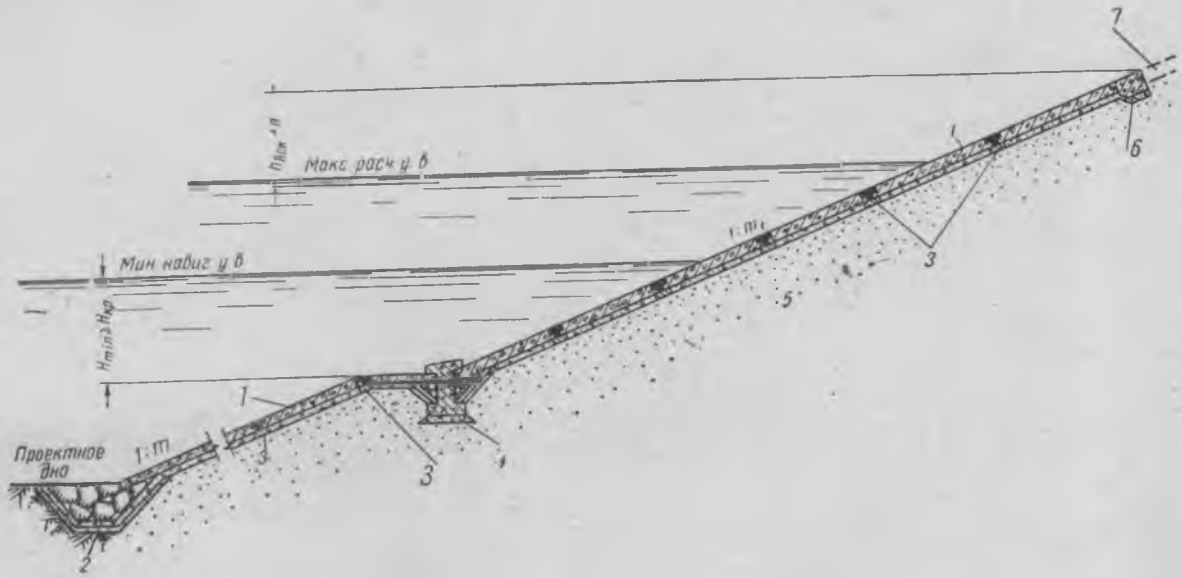
В направлении уклона откоса как на прямых, так и на криволинейных его участках на стыках карт устраивают или осадочные швы (при малых высотах волн), или шарнирные соединения с анкерными упорами.

Карты крепления откосов составляют из отдельных сборных железобетонных плит, размеры которых в плане выбраны с учетом условий транспортирования и монтажа (от 1,5×2,5 *м* до 3,5×2,5 *м*).

После укладки на откосы отдельные сборные плиты в пределах одной карты омоноличивают по контуру равнопрочными стыками в сплошную плиту (рис. 17 а).

Железобетонные плиты укладывают на подготовку из разнозернистого щебня или гравия. Толщина подготовки принята равной 10 *см*. Армирование плит предусмотрено сварными сетками. В плитах толщиной 10 *см* укладывают одну сетку в середине плиты, в плитах толщиной 15 и 20 *см* — две (верхнюю и нижнюю). Рабочую арматуру располагают по уклону откоса.

Под швами между отдельными плитами укладывают железобетонные подкладки сечением 30×10 *см*, имеющие закладные планки в местах омоноличивания плит. В месте омоноличивания в плитах при их изготовлении устраивают четверти и штрабы, обрамляемые швеллерами или уголками, к которым приваривается арматура плит. При омоноличивании обрамляющие швеллеры сваривают понизу с закладной планкой подкладки, а поверху — друг с другом


Макс расч у в
Мин навиг у в
Проектное дно
1:m
1:m
1:m
1
2
3
4
5
6
7

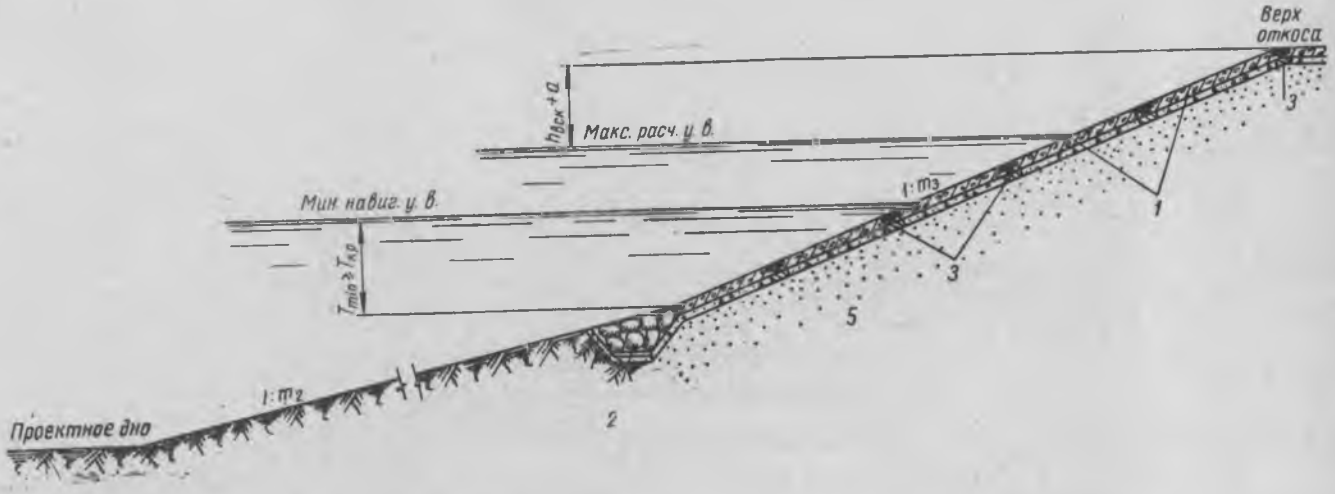


Рис. 17. Конструкция сборного железобетонного покрытия откоса (Гипроречтранс):

1—сборные железобетонные плиты на подготовке из разнозернистого гравия или щебня толщиной 10 *см*; *2*—каменная упорная призма; *3*—подкладки для омоноличивания плит; *4*—анкерный упор; *5*—песчаные грунты; *6*—бордюрный брус из монолитного железобетона; *7*—крепление облегченного типа

с помощью обрезков арматуры. Затем в четверти укладывают арматурную сетку и заливают стык цементным раствором 1:3.

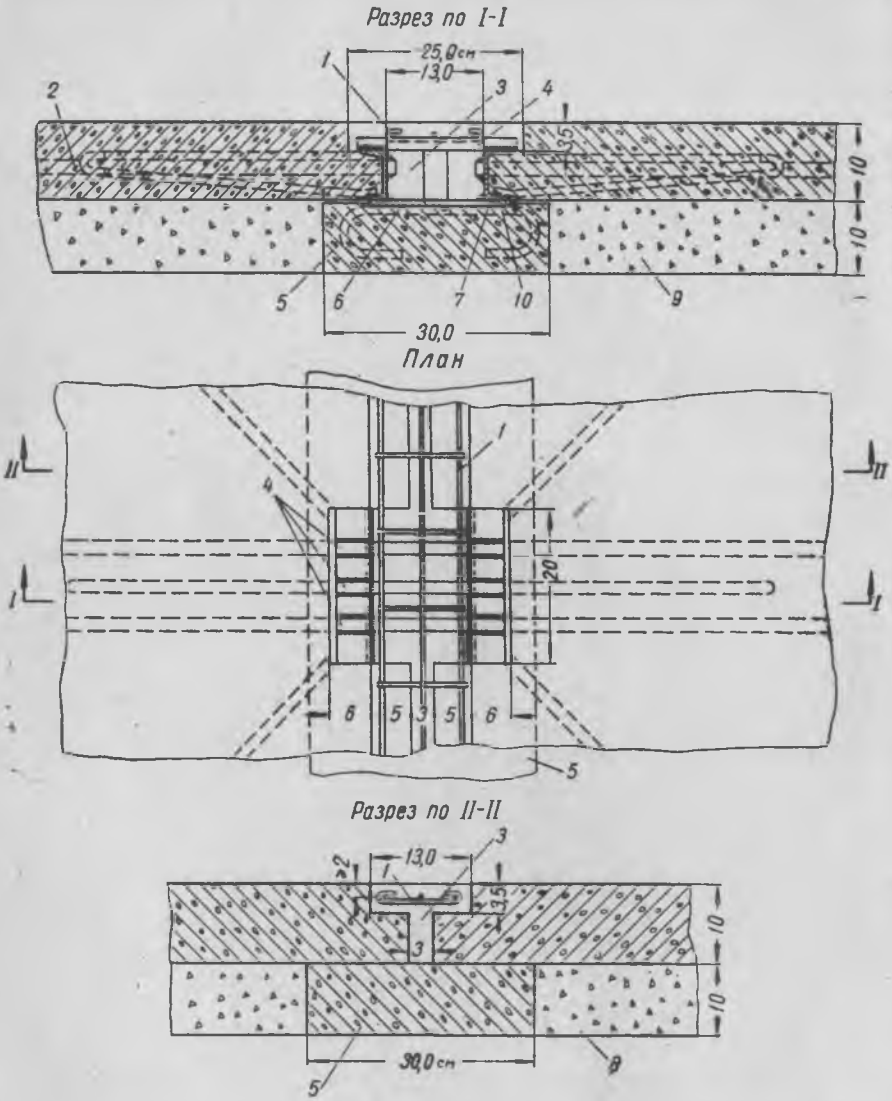


Рис. 17а. Конструкция омоноличивания швов между плитами (Гипроречтранс):

1—арматурная сетка; *2*—стержни-плиты; *3*—штреба, заливаемая цементным раствором состава 1:3; *4*—соединительные стержни *3*⌀16*мм*; *l*=230 *мм*; *5*—подкладка для омоноличивания плит; *6*—закладная планка; *7*—швеллеры; *8*—подготовка из гравия и щебня

В результате получается надежный стык, прочность которого не уступает прочности плиты. Толщину плит принимают в зависимости от высоты волн и крутизны откосов равной 10, 15 и 20 *см*.

В зависимости от марки бетона в проекте предусматривают плиты из обычного (ненапряженного) железобетона марок 200 и 300 и из предварительно напряженного железобетона марки 300.

Под температурно-осадочными швами через 40 *м* предусмотрено устройство ленточного трехслойного обратного фильтра. В нижней части крепление откоса (или дна перед сооружением) заканчивается каменной упорной призмой, уложенной на обратном фильтре.

Благодаря тому, что избыточному взвешивающему давлению при откате волны противодействует большая карта покрытия, а не отдельная плита, устойчивость покрытия значительно возрастает.

Уменьшение количества швов в таком покрытии снижает величину взвешивающего давления, что дает возможность значительно сократить толщину покрытия. Так, при высоте волны 1,5 *м* потребовалась бы сборная плита размером в плане 2,5×2,5 *м*, толщиной 20 *см*, при применении же омоноличения по контуру толщина плит может быть уменьшена до 10 *см*.

Кроме того, отпадает необходимость в устройстве под всем покрытием сплошного обратного фильтра. Указанные обстоятельства делают данный тип покрытия наиболее экономичным по сравнению с рассмотренными ранее.

Недостаток этого рода покрытия — чувствительность к неравномерным осадкам земляного сооружения.

Указанное покрытие применяется на волнозащитной дамбе Саратовского порта протяженностью 1900 *пог. м* при расчетной высоте волны 2,7 *м*. По первоначальному проекту откосы этой дамбы должны были быть закреплены железобетонными монолитными плитами толщиной со стороны водохранилища 30—35 *см*, со стороны акватории — 15 *см*.

По предложению строителей земляная дамба покрывается сборными железобетонными плитами, омоноличенными по контуру. Со стороны водохранилища применяют плиты размером 3,5×3,5×0,2 *м*, со стороны акватории — 2,5×2,5×0,1 *м*. Таким образом, переход на сборные омоноличенные по контуру плиты в 1,5 раза уменьшил потребный объем бетона и ускорил производство работ.

Несмотря на сложные условия строительства в зимнее время, звено из 3 рабочих при работе одним краном Э-1003 укладывало 25—30 плит в смену (более 250 $м^2$).

§ 2. КРАТКИЙ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОКРЫТИЙ ОТКОСОВ В ЗАРУБЕЖНОЙ ПРАКТИКЕ

За рубежом применяют самые разнообразные типы креплений откосов судоходных каналов. Причем с постепенным развитием судоходства переходили ко все более совершенным видам креплений.

На первых каналах для крепления откосов применяли поросли камыша и осоковых растений. Позднее было установлено, что такое крепление не защищает откос от разрушающего действия судовых

волн. Затем стали применять плетневое крепление с загрузкой фашин камнем. Но и такое крепление быстро разрушалось. Позднее перешли к укреплению подводных откосов шпунтовыми, свайными сплошными или заборчатыми рядами, надводных — фашинами, кирпичом и дерном.

С течением времени хворостяные и фашинные типы надводных креплений уступили место каменным креплениям преимущественно в виде мостовых, шпунтовые крепления подводных откосов постепенно заменяли каменными креплениями. Причины замены шпунтовых стенок каменными креплениями — высокая стоимость сооружения этих стенок и сравнительно быстрый их износ.

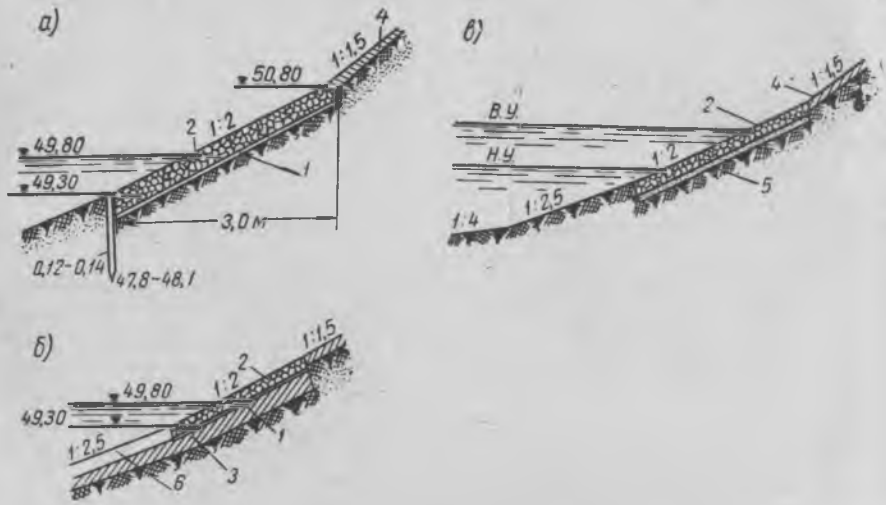


Рис. 18. Крепление откосов каналов:

а и *б* — Среднегерманский канал; *в* — Даттельн-Хамм; *1*—гравий 0,1 *м*; *2*—камень 0,3 *м*; *3*—глина; *4*—дерн; *5*—щебень 0,1 *м*; *6*—защитный слой

Особенно широкое распространение каменные крепления откосов получили в Германии. На Среднегерманском канале были применены в основном каменные крепления двух типов (рис. 18, *а*, *б*). На участках с грунтами средней плотности крепление было выполнено из наброски мелкого камня толщиной 0,4 *м* на слое гравия 0,1 *м*. Нижняя граница крепления, расположенная на 0,5 *м* ниже нормального судоходного уровня, заканчивалась заборчатым или шпунтовым досчатым рядом. Верхняя граница поднималась на 1 *м* выше нормального судоходного уровня. На другом участке данного канала толщина каменной наброски была принята равной 0,3 *м*, укладывали каменную наброску на слой гравия 0,10 *м* и применяли противофильтрационные устройства в виде глиняного экрана. В отличие от предыдущего типа здесь не была предусмотрена деревянная упорная стенка. На некоторых участках крепление

состоит из одиночной мостовой толщиной 0,20 *м*, уложенной на слое щебенки 0,2 *м*.

На канале Дательн-Хамм (рис. 18, *в*) в устойчивых грунтах была применена также каменная наброска толщиной 0,30 *м*, уложенная на слое щебня 0,10 *м*, деревянную заборку в этом случае не устраивали. Такой же тип крепления был принят на канале Одер-Шпрее. Каменную наброску толщиной 0,30 *м* укладывали на слое щебня на откос с уклоном 1:3 и заканчивали небольшой бермой на 0,5 *м* выше высокого судоходного уровня.

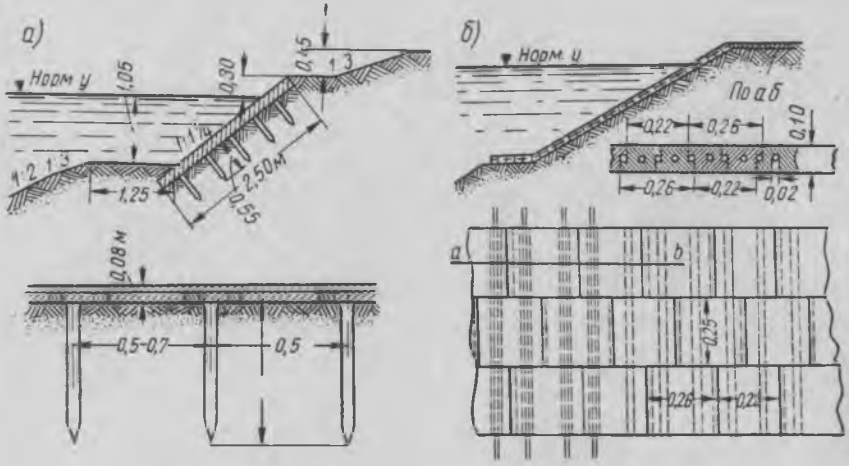


Рис. 19. Крепление откосов каналов:
а — по системе Меллера; *б* — по системе Вилля

На канале Вентов откосы крепили слоем армированного бетона толщиной 0,2 *м* с металлическими якорями, входящими в откос и поставленными через 1,75 *м* один от другого; эти якоря соединяли с каркасом из полосового железа.

На Дортмунд-Энском канале откосы заложением 1 : 1,5 были покрыты бетонными плитами толщиной 8 *см*, внизу они упирались в берму. На канале Одер-Шпрее надводный откос был укреплен бетонными плитами, которые упирались в свайную заборку, идущую по урезу судоходного уровня канала. На некоторых каналах было испытано крепление откоса, выполненное по системе Меллера (рис. 19) и состоящее из сплошного слоя бетона толщиной 8 *см*, армированного железной проволокой. Бетонное покрытие через 50—75 *см* закреплялось трубчатыми якорями. Это крепление в первый же год дало поперечные и продольные трещины, из-за чего пришлось устраивать поперечные швы.

На другом германском канале были применены крепления (рис. 20) нескольких типов. На участках с песчаным грунтом верхней части откоса камень был заменен кирпичом, установленным на ребро. Ниже низкого уровня воды откос был укреплен слоем пес-

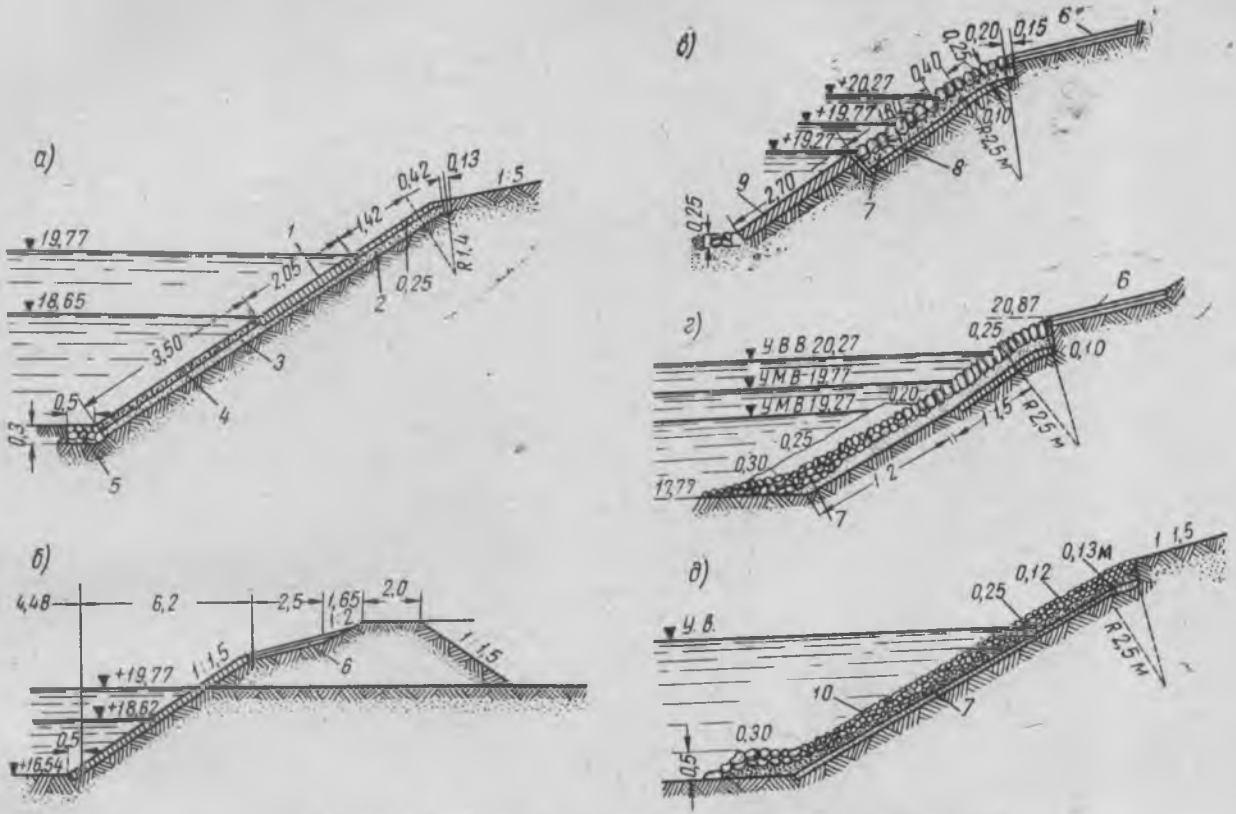


Рис. 20. Крепление откосов судоходных каналов (Германия):

1—кирпичная кладка; *2*—крупный глинистый песок с щебеночным слоем толщиной 5 *см*; *3*—песок; *4*—бетон песчаный; *5*—камень; *6*—дерн; *7*—крупный щебень; *8*—глина; *9*—бетон; *10*—колотый камень

чаного бетона, опирающегося на каменную призму, а выше высокого уровня — покрыт слоем глинистого песка, защищенного поверху слоем щебня толщиной 0,5 *м*. На участках с рыхлыми грунтами кирпичная кладка покрывает откос от подошвы до нижней бровки дамбы. После наполнения канала водой в последующее время были применены другие типы креплений (рис. 20, *в*, *г*, *д*).

В ряде стран в начале этого столетия сравнительно широкое распространение получило крепление откосов каналов бетонными плитками малого размера (25×25×10 *см*) или кирпичом по системе Вилля (см. рис. 19 б). Как бетонные плитки, так и обожженный кирпич нанизывали на проволоку и скрепляли в поперечном направлении. Во избежание всплывания плиток к нижним концам лент из плит подвязывали тяжелые камни.

По некоторым сведениям, эти покрытия имели серьезные повреждения, что особенно было заметно при увеличении скоростей движения судов по каналам, т. е. при увеличении размера судовых волн. В связи с этим проводились большие работы по замене старых типов покрытий более совершенными или по усилению покрытий путем проливки цементным раствором и битумной мастикой.

В ряде работ, опубликованных за границей, в дискуссионном порядке освещается вопрос об эффективности усиления каменной облицовки заливкой поверхности откоса цементом или битумным раствором. Некоторые специалисты считают, что такой метод усиления может дать положительные результаты при сравнительно небольших высотах волн. Большинство же специалистов приходят к выводу, что заливка цементным раствором каменного покрытия откосов, подвергающихся волновому воздействию, мало эффективна. Как показала практика, в таких случаях на поверхности крепления появляются трещины, что затем приводит к более серьезным повреждениям. Отмечается, что подобное усиление в ряде случаев может рассматриваться как временное (аварийное) мероприятие [78].

В качестве неудачного опыта заливки раствором покрытия из бетонных блоков приводится пример ремонтных работ на плотине Кингслей (США). Анализируя аварию на данной плотине, авторы [78] отмечают, что заливка цементным раствором поверхности каменного крепления или покрытие его небольшими бетонными блоками ухудшает работу этого крепления, так какс оздается повышенное волновое взвешивающее давление.

В отдельных работах отмечается удачное применение каменного покрытия в виде плотной укладки. При строительстве земляной дамбы длиной 30 *км*, отделяющей залив Зейдер-Зе (Голландия), откос в верхней части был укреплен бетонными камнями размером 25×45 *см*, уложенными на слое гравийной отсыпки толщиной 15 *см* большей стороной перпендикулярно плоскости откоса; ниже этого покрытия откос был защищен каменной наброской. Как показал опыт эксплуатации, несмотря на относительно значительные волновые усилия, данное покрытие работает вполне удовлетворительно.

В ряде зарубежных стран при креплении откосов применяли наброску из керамиковых блоков (США). Отмечается, что это покрытие может оказаться рациональным, если естественный камень отсутствует или имеет высокую стоимость.

При решении вопроса о креплениях откоса плотины Кингслей были изготовлены пробные блоки, представляющие собой обычный строительный кирпич, сплавленный в монолитные блоки весом до 3 *т*, которые разбивались затем на отдельные куски неправильной формы и необходимого веса.

В некоторых опубликованных работах освещается вопрос о применении пористого бетона в качестве материала для покрытия откосов.

В одних случаях авторы отмечают, что при правильном выполнении пористый бетон сравнительно прочен и почти так же проницаем, как обычный гравий или щебень; в силу этого обстоятельства при откате волны вода без особых препятствий выходит через поры, не создавая большого взвешивающего давления на нижнюю грань плиты.

Однако в большинстве случаев авторы приходят к выводу о непригодности пористого бетона для покрытия откосов вследствие его слабой морозостойкости.

В качестве примера неудачного использования пористого бетона приводится строительство земляной плотины Санто-Купер [82]. При изготовлении пористого бетона на 1 $м^3$ расходовалось 170 *кг* портландцемента без применения песка: крупность инертных изменялась в пределах 6—18 *мм*, причем частиц крупностью более 9 *мм* было около 50%. Плиты из пористого бетона, выполненные толщиной 25 *см*, укладывали на слой гравия толщиной 10 *см*.

Обследование состояния этого покрытия после двухлетней его эксплуатации показало, что плиты, расположенные в подводной части откоса, оказались поврежденными на глубину более 5 *см*. В последующее время разрушение пористого бетона быстро прогрессировало, что затем привело к необходимости замены его армированными бетонными плитами толщиной 15 *см*, а на ряде участков — каменной наброской толщиной 0,60÷1,05 *м*, уложенной на щебеночном фильтре толщиной 0,15÷0,30 *м*.

Джуэл [82], оценивая применение пористого бетона в качестве материала для покрытия напорных откосов земляных водохранилищных плотин, подверженных волновым воздействиям, приходит к выводу, что данный бетон в большей мере воспринимает химические и температурные воздействия, в то же время здесь исключается применение арматуры, без чего крепление не может считаться достаточно прочным и долговечным.

Относительно бетонных покрытий откосов в опубликованной литературе также высказываются различные точки зрения. При оценке работы сплошного монолитного покрытия откосов в США некоторые авторы высказывают опасение, что в таких покрытиях из-за осадки тела земляного полотна плита может получить тре-

щины, через которые будут выноситься частицы грунта основания. По этой причине, по их мнению, к монолитным бетонным покрытиям следует прибегать лишь в тех случаях, когда стоимость каменной наброски становится чрезмерно высокой. Отмечается, что покрытие из отдельных плит не всегда надежно [77].

Вместе с тем в литературе приводятся удачные опыты применения монолитных бетонных покрытий. Такое покрытие на берегах водохранилища у плотины Маккей и озера Бабкок, где наблюдаются волны значительной высоты, работает вполне удовлетворительно, хотя часто подвергается температурным воздействиям.

Рис. 21. Общий вид покрытия откоса канала Отмарсгейм (момент до заливки швов)

Зафиксированные разрушения бетонных покрытий откосов в большинстве случаев связаны с неудачной конструкцией самого покрытия и с несоответствием размера покрытия волновым нагрузкам. Например, на плотине Кингслей вначале крепление было выполнено из бетонных блоков размером до 135×45×15 *см*, уложенных на песчаную подушку с таким расчетом, что между блоками оставался зазор шириной до 2,5 *см*. После ряда штормов, при которых высота волны доходила до 2,4 *м*, через зазоры между блоками начали выноситься частицы грунта основания.

Из описанной аварии следует, что при укладке на откос небольших бетонных плит необходимо обязательное устройство надежного сплошного обратного фильтра. Для ликвидации последствий аварии было решено защитить откос каменной наброской толщиной 90 *см*, уложенной на слое гравия в 38 *см*; причем для наброски употребляли камень весом 230 *кг* (не менее 5% объема наброски) и 45 *кг* (50%).

Интересные данные по изготовлению и укладке вакуум-бетонных плит размером 1,5×3,0×0,09 *м* приведены в статье Бордо по

облицовке откосов канала Отмарсгейм [85]. Общий вид покрытия откосов канала показан на рис. 21. Плиты на откос укладывали двумя кранами с вылетом стрелы 21,3 *м* (рис. 22).

В отдельных работах рассматривается удачный опыт применения бетонного покрытия откосов из отдельных плит, шарнирно закрепленных между собой.

Широкое применение железобетонные тюфяки из плит получили при защите берегов р. Миссисипи, где они подвергаются не только

Рис. 22. Укладка плит на откосы канала Отмарсгейм

воздействию русловых скоростей, но и волновым потокам. Наибольшее распространение получили тюфяки, состоящие из секций длиной 7,5 *м*, шириной 1,2 *м* и толщиной 7,5 *см*. Каждая секция состоит из 20 блоков шириной по 35 *см*, с промежутками между ними 2,5 *см*; между собой блоки связаны нержавеющей проволокой. Тюфяки изготовляли на берегу и укладывали на откос с помощью специальных барж [78; 86]. На рис. 23 а, б показана сборка тюфяка и на рис. 23 б — общий вид откоса после строительства. Как показал тридцатилетний опыт эксплуатации, данные покрытия хорошо сохранились.

Приводятся и другие примеры удачно работающих бетонных плит, хорошо связанных между собой и уложенных на надежный обратный фильтр.

О необходимости устройства обратного фильтра под бетонным тюфяком можно судить по примеру крепления откосов канала Донзер-Мондрагон [87]. На этом канале железобетонные секции (жалюзи) покрытия состоят из слегка армированных бетонных плит со скошенными вертикальными гранями, соединенных между собой проволокой. Вначале такое покрытие укладывали непосредственно на песчаный грунт откоса, что привело к большим про-

Рис.23а. Сборка железобетонных матрацев на откосе (р. Миссисипи)

Рис. 23б. Общий вид откоса после укладки матрацев

садкам (в результате выноса песка основания) и расстройству всего покрытия. Впоследующем под покрытие был уложен гравийный фильтр с диаметром $d=2$ *см*, при открытых швах между плитами 1 *см*.

Для увеличения устойчивости бетонных плит на откосе отдельные авторы рекомендуют устраивать в плитах фильтрующие отверстия, составляющие не менее 15% общей площади плиты. К сожалению, эти авторы не указывают, в каких случаях рационально переходить на дырчатые плиты.

Заслуживает внимания рекомендация устраивать монолитное бетонное покрытие в виде непрерывной железобетонной плиты по всей площади откоса; в местах строительных швов арматуру пропускать без разрыва.

В литературе приводятся также примеры крепления откосов покрытиями из бетонных блоков. Такие покрытия делают из изготовленных блоков, укладываемых без раствора. Блоки размером $0{,}3\times0{,}3\times0{,}1$ *м* с выступами и углублениями 1,27 *см* укладывают в шахматном порядке так, что выступы входят в углубления смежных блоков.

За последнее время в зарубежной практике при креплении откосов гидротехнических сооружений широкое распространение получили различные типы битуминозных покрытий, которые иногда называют асфальтобетонными покрытиями. По этому вопросу опубликовано весьма большое количество работ.

В США битуминозные материалы для защиты откосов были использованы в больших размерах на р. Миссисипи при защите ряда оградительных дамб и откосов каналов. На основании результатов экспериментальных исследований в США было разработано несколько технических условий по применению битуминозных покрытий [77].

Для защиты подводных берегов р. Миссисипи применялся песчаный асфальт в виде горячей смеси, которая опускалась на глубину до 27 *м* при скоростях течения до 5 *м/сек*. Описываются и другие примеры по укладке горячих асфальтовых смесей как под воду, так и на воздухе. На этой же реке применялось и пористое асфальтовое покрытие толщиной до 15 *см*, которое, по мнению ряда авторов, обладает некоторой дренирующей способностью [78].

При применении асфальтового покрытия асфальт толщиной 6 *см* укладывали в виде отдельных разрезных карт. Результаты эксплуатации данного покрытия показали, что оно легко разрушается от навала плотов и судов, а также оттого, что через него пробивается растительность, что вызывает большие эксплуатационные расходы [88]. В других работах отмечается, что стоимость битуминозных материалов, применяемых в качестве покрытия откосов ирригационных каналов, оказалась все же равной стоимости бетонной облицовки [89].

В силу этого некоторые авторы приходят к выводу, что бетонные покрытия наиболее рациональны и долговечны. Отдельные специа-

листы считают, что битуминозные покрытия не способны сопротивляться воздействию волн.

Битуминозное покрытие широко используется в Голландии при креплении откосов морских оградительных сооружений. В порту Харлинген откосы песчаного волнолома были защищены битуминозной одеждой из смеси 5—8% битума и 10% заполнителя,

Рис. 24. Укладка битумных плит на откос волнолома (порт Харлингер)

толщина покрытия 0,25÷0,40 *м*. Асфальтовые тюфяки размером в плане 4,57×13,72 *м* имеют продольную арматуру в виде четырех стальных тросов, по длине которых через 0,9 *м* закреплены нормально к тросам стальные пластинки 5×5 *см*. Укладывали тюфяки с помощью крана (рис. 24). Оценивая данное покрытие, автор статьи [90] отмечает, что его стоимость по сравнению с каменной облицовкой оказалась несколько меньшей; однако окончательная оценка этого покрытия может быть дана после 10—15 лет его эксплуатации.

При креплении откосов и дна канала на Марне (Франция) применялась асфальтовая одежда толщиной 8 *см*; причем на определенных участках использовались сборные битумные плиты, а также заливка битумной мастикой слоя щебня из расчета 34 *л* на 1 $м^2$ покрытия. В опубликованной статье дается подробный состав минеральной части асфальтобетона и состав битумной мастики [91]. Нагревание вяжущего доводилось до 190°. заполнитель нагревался до 150°, при этой же температуре производилась и укладка.

В дальнейшем (1952 г.) битумные плиты такого же размера были

уложены на канале Самбры и Уазы; состав битумного бетона: битума 12,5 части и заполнителя 100 частей; характеристика бетона: плотность 2,12 *г/см*^{3}, процент пустот по объему 4,6. В статье указывается, что на данных каналах после года их эксплуатации состояние покрытия было удовлетворительным.

Битумные плиты размером 8×1,5×0,1 *м* применяли также при защите берегов р. Сены. В результате проведенных экспериментальных исследований была разработана рецептура состава, которая исключала возможность оплывания мастики при обычных температурах, в то же время этот состав оказался достаточно прочным. В качестве заполнителя применяли гальку крупностью 4÷10 *см*; состав битумной мастики: песчаного заполнителя 83%, битума 17% [92]. Плиты укладывали с понтона с помощью соединенных пяти вантусов (отсасывателей воздуха), поддерживающихся краном.

В другой статье [93] описан способ изготовления и укладки на откосы канала битумных полос размером 9×2×0,06 *м*, армированных в средней части металлической сеткой и тремя продольными тросами. Полосы были настолько гибки, что их наматывали на большие барабаны. На откос полосы укладывали с помощью крана, передвигающегося по кромке откоса. Швы между полосами заливали также битуминозной мастикой. Стоимость изготовления и укладки таких полос оказалась примерно в 3 раза больше стоимости их материала.

В статье «Укрепление асфальтом откосов судоходных каналов» [94] описана технология работ по закреплению каменной облицовки откосов канала Рейн-Херне посредством заливки пустот асфальтовой мастикой. В статье отмечается значительное разрушение каменной облицовки откоса данного канала, которое заметно прогрессировало по мере увеличения скоростей движения судов на канале, т. е. с увеличением высоты судовой волны.

Асфальтовая масса для заливки имела следующий состав: 18% битума, 10% заполнителя (известковый порошок) и 72% песка крупностью 0,09÷2 *мм*. Массу изготовляли в специальном котле, установленном на баржах; на откос ее подавали по шлангу в горячем виде. Пустоты каменной облицовки заполняли на откосе лишь в надводной части; опыты по заливке откоса в подводной части откоса не привели к положительным результатам. Перед заливкой мастикой каменную облицовку откоса перекладывали. Автор статьи отмечает, что разработанные мероприятия по усилению каменной облицовки асфальтовой мастикой позволили получить некоторый экономический эффект, хотя никаких конкретных данных он не приводит.

О берегоукрепительных работах, проведенных на Суэцком канале, опубликовано несколько статей [95, 96], в которых подробно описано применение битумных материалов для покрытия откосов и дна канала. Учитывая интересный опыт работы рассматриваемого канала, остановимся несколько подробнее на результатах исследований этого крепления.

Особенность поперечного сечения Суэцкого канала состоит в том, что на значительном его протяжении на откосах устроены бермы шириной от 5 до 12 *м*, предназначенные для предохранения верхней части откоса от размыва (благодаря гашению энергии волны в пределах бермы). На ряде участков берег защищен вертикальной стенкой или стенкой из металлического шпунта. Как показал опыт эксплуатации, бермы подвергаются значительным волновым воздействиям, в силу чего происходят существенные размывы, разрушается и подводная часть откоса ниже бермы.

Для защиты рисберм (берм) и откосов канала были испытаны в натурных условиях два типа крепления.

Первое представляло собой литой асфальт, уложенный под воду. Несмотря на сравнительно большие опытные исследования, продолжавшиеся в течение двух лет, этот тип покрытия оказался не совсем надежным.

Наиболее успешной явилась защита откосов и берм с помощью гибкого покрытия (тюфяков). Было испытано несколько типов тюфяков, изготовленных на берегу и на плавучей платформе. Вначале тюфяки при укладке на место вследствие влияния течений и волнового потока в канале ломались и разрушались.

В дальнейшем был разработан и успешно освоен новый метод укладки тюфяков, который состоял в следующем: тюфяки последовательно соединяли в полосу до их погружения и опускали в воду в виде непрерывной ленты, которая тянулась вдоль крепления на нужном расстоянии. Размер отдельных тюфяков принимали равным 3×8 *м* при толщине 6 *см*; битумный тюфяк армировали проволокой (рис. 25).

В середине тюфяка располагали сетку, предназначенную для сопротивления растяжению; назначение двух продольных тросов — монтаж, необходимый при опускании тюфяка; поперек тюфяка размещалось шесть арматурных тросов, которые, как и продольные тросы, связывались с сеткой. Во время укладки их соединяли с арматурным тросом соседних тюфяков. Анкерные тросы укладывали по два-три на каждый тюфяк и прикрепляли их к сваям, забитым на откосе.

Битумные тюфяки изготовляли на специальном заводе, который состоял из плавучей баржи и полигонов для заливки тюфяков. Для переноски отдельных тюфяков, вес которых доходил до 3,6 *т*, применяли особую раму с присосками («октопус»), которыми удерживался тюфяк при образовании вакуума. Вакуум создавался с помощью воздушного насоса и трубок, вмонтированных в раму.

Схема укладки тюфяков представлена на рис. 26. Операции выполняли в следующей последовательности: соединение тюфяков друг с другом; погружение ленточного покрытия, укладываемого вдоль берега; укрепление ленточного покрытия свайками, вбитыми под водой в откос. Укладку производили со специально оборудованной баржи.

Примененный метод защиты берега Суэцкого канала с помощью

гибких тюфяков дал в общем положительные результаты. Однако из-за непродолжительного времени их эксплуатации (тюфяки были уложены в 1954 г.) дать им окончательную оценку пока невозможно.

Рис. 25. Укладка сетки и тросов тюфяка (Суэцкий канал)

Рис. 26. Баржа для укладки тюфяков во время работы (Суэцкий канал)

В материалах Международного судоходного конгресса (1949 г.) приведено сравнительно большое количество примеров креплений откосов судоходных каналов Франции. На основании опыта эксплуатации судоходных каналов и учета увеличения скоростей движения судов рекомендуется переходить к более мощным покрытиям откосов — к устройству бетонного покрытия откоса с упором в нижней части в виде металлического или железобетонного шпунта; устройству вертикальных или немного наклонных стенок также с применением металлического или железобетонного шпунта.

Выводы

На основании приведенного краткого обзора отечественного и зарубежного опыта строительства и эксплуатации покрытий откосов можно сделать следующие выводы.

1. Из всех видов креплений откосов земляных гидротехнических сооружений за последнее время наибольшее распространение получили крепления с помощью железобетонных плит и каменных мостовых. Эти крепления по сравнению с другими типами являются наиболее прочными и долговечными, способными противостоять значительным волновым и ледовым воздействиям.

Недостатком каменного крепления по сравнению с бетонным являются трудоемкость производства работ и невозможность индустриализации строительства.

2. Значительные повреждения и разрушения каменных покрытий откосов были вызваны несоответствием их размеров размерам волн. Такое положение сложилось в результате отсутствия в прошлом удовлетворительных указаний по расчету и проектированию этих покрытий; занижения расчетных элементов волн; неудовлетворительного качества работ; завышения отметки низа крепления и отсутствия надлежащего упора и т. п.

Основываясь на опыте строительства и эксплуатации каменных покрытий откосов, следует признать, что этот тип может быть рекомендован при высоте волны в водоеме $2h \leqslant 1{,}2 \div 1{,}5$ *м*; при этом конструкция и размер каменного покрытия должны быть выбраны в соответствии с имеющимися рекомендациями по проектированию и расчету [76].

3. Усиление каменного покрытия откоса путем заливки поверхности цементным раствором не оправдало своего назначения, так как эта заливка быстро выходила из строя. Усиление каменного покрытия заливкой цементным раствором может дать лишь некоторый эффект при сравнительно большой толщине заливаемого слоя и при относительно небольших волнах. Однако стоимость такого усиления может оказаться равной стоимости укладки сплошного бетонного покрытия.

4. Из сопоставления опыта эксплуатации каменных и бетонных покрытий следует, что при значительных высотах волн и воздей-

ствии на откосы ледяного припая рациональнее применять бетонные и железобетонные покрытия. Наблюдаемые повреждения этих покрытий были в основном связаны с недостаточными их толщинами и размерами в плане по сравнению с требуемыми при действующих волнах, а также были следствием неравномерной осадки основания.

5. Особого внимания заслуживает устройство сочлененного покрытия, т. е. тюфяков с шарнирным закреплением отдельных плит. Применение железобетонных тюфяков позволяет механизировать процесс производства работ. При этом, однако, следует иметь в виду, что подобные покрытия, а также в равной мере и дырчатые плиты требуют устройства надежного подстилающего слоя в виде многослойного обратного фильтра. В силу этого обстоятельства при решении вопроса о применении железобетонных тюфяков и дырчатых плит особое внимание следует обратить на экономическую сторону вопроса и установить, в каких случаях эти покрытия могут оказаться более экономичными, чем монолитные бетонные покрытия, где можно ограничиться устройством лишь ленточного фильтра.

6. Покрытие откосов гидротехнических сооружений из пористого бетона, подверженных воздействиям волн и ледовых нагрузок, сравнительно быстро выходило из строя.

Следует отметить, что идея использования пористого бетона возникла в результате желания уменьшить волновое взвешивающее давление под этим покрытием.

7. Несмотря на довольно широкое применение за рубежом битуминозных покрытий в качестве крепления откосов гидротехнических сооружений, этот тип покрытия еще не вышел из стадии экспериментирования. Подобные покрытия в основном применялись на откосах берегов рек и каналов, т. е. в условиях текущей воды. Небольшой опыт эксплуатации асфальтобетонных покрытий в условиях волнения пока что не дает достаточного основания для их распространения.

Отечественный опыт применения асфальтобетона (Волго-Донской судоходный канал) показал, что такое покрытие откосов подвергается серьезным повреждениям от ледовых воздействий (колебаний уровней воды при припаях льда) и от навала судов. Целесообразно продолжать экспериментальные и опытные исследования по применению битуминозных покрытий в качестве креплений откосов гидротехнических сооружений. При этом особое внимание следует обратить на армированный асфальтобетон в виде гибких тюфяков.

8. Применение ленточного фильтра при относительно большом размере отдельных плит бетонного покрытия в общем оправдало свое назначение. Однако, учитывая возможность образования пустот под плитами и увеличения в связи с этим скоростей фильтрационного потока, при укладке обратного фильтра только под швами на остальной части откоса следует предусмотреть обязательное устройство втрамбованного в откос гравийно-щебенистого слоя толщиной 5÷10 *см*.

3. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КРЕПЛЕНИЕ ОТКОСОВ

Прочность, устойчивость и долговечность креплений откосов земляных гидротехнических сооружений зависят от ряда естественных и производственных факторов. К естественным факторам относятся: а) воздействие ветровых волн; б) воздействие ледяного покрова; в) действие грунтовых вод; г) температурные воздействия; д) агрессивное действие воды — среды, е) сейсмические и другие физико-химические и биологические факторы и т. п.

К производственным факторам следует отнести дополнительные нагрузки, возникающие в процессе строительства и эксплуатации сооружения, и в первую очередь значительные колебания уровней воды и возникающие в связи с этим фильтрационные нагрузки; удары и навалы судов на откосы; неравномерные осадки оснований под креплениями и т. п.

Из всех перечисленных факторов наибольшие значения имеют волновые и ледовые воздействия, учет которых является решающим при проектировании креплений откосов. Это подтверждают примеры повреждений креплений откосов, приведенные в предшествующих параграфах.

В результате воздействия волн на откосные сооружения создаются сложные гидравлические процессы, приводящие к образованию на поверхности крепления, в самом креплении и в порах подстилающего слоя избыточных давлений и скоростей волнового потока.

Вследствие воздействия волн на откос может быть нарушена устойчивость и прочность самого покрытия, произойти размыв грунта откоса как под креплением, так и выше и ниже границ крепления.

Предлагаемая работа в основном посвящена изучению вопросов, связанных с воздействием ветровых и судовых волн на бетонные покрытия откосов.

Вторым основным фактором, определяющим устойчивость и долговечность любого покрытия откоса, в том числе и бетонного, являются ледовые воздействия.

В общем случае воздействие ледяного покрова на крепления откосов может проявляться в следующих видах: 1) динамическое давление при ударе свободно плавающих льдин; 2) статическое давление при навале ледяного поля на откосы и при изменении температуры сплошного ледяного поля; 3) истирающее действие при движении отдельных льдин; 4) выворачивающее действие примерзшего к креплению льда (припая) при колебаниях уровней воды в период ледостава.

В отношении учета первого и второго вида воздействия ледяного покрова на откосные сооружения в настоящее время имеется ряд рекомендаций. Хуже обстоит дело с учетом выворачивающего действия ледяного покрова, в то же время этот вид воздействия в ряде

случаев может оказаться решающим при проектировании крепления откоса.

В литературе приводится много примеров разрушений и повреждений покрытий откосов ледовым покровом в связи с колебаниями уровней воды. В большинстве случаев эти повреждения относятся к фашинным и каменным покрытиям, когда лед отдирает и ломает хворост, разрывает канаты и поднимает каменную облицовку. Имеются примеры образования трещин в бетонной облицовке откоса в результате колебания уровней воды в период ледостава.

Рис. 27. Разрушение льдом каменного крепления откоса (канал имени Москвы)

Как отмечалось выше, за время эксплуатации канала имени Москвы было зафиксировано несколько случаев повреждений каменных покрытий с вырыванием отдельных камней [65]. В качестве примера на рис. 27 показано образование продольной полосы с вырванной льдом каменной облицовкой при снижении уровня воды в канале. Характерный пример разрушения асфальтобетонного покрытия — разрушения на канале имени В. И. Ленина (см. рис. 9).

Влияние других естественных факторов следует учитывать в процессе проектирования и выбора типа покрытия.

В частности, агрессивное действие воды, истирание поверхности бетона наносами необходимо учитывать в процессе назначения состава бетона.

При учете навала судов на откос надо иметь в виду, что навал, являющийся следствием непогашенной скорости при подходе судна к откосу, представляет собой аварию, в силу чего делать для него расчет не следует. Усилие, передаваемое судном при навале на бетонное покрытие откоса, может быть определено по обычным существующим методам расчета [36].

При значительном выходе грунтовых вод на откосах сооружений или берегов канала, а также при быстром снижении уровня воды в водоеме (при сработке водохранилища) следует предусмотреть в бетонном покрытии соответствующие дренажные отверстия. Влияние гидродинамического противодавления грунтовых вод при расчете бетонного покрытия на устойчивость в этих условиях учитывать не следует.

Наконец, следует обратить внимание на то обстоятельство, что значительный объем разрушений каменных креплений откосов судоходных каналов и, в частности, канала имени Москвы был связан с нарушением Правил плавания судов по каналу, т. е. с увеличением скоростей движения судов по сравнению с установленными, В результате этого на каналах возникали судовые волны значительной высоты, противостоять которым не смогли существующие каменные покрытия откоса.

ГЛАВА II

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕТРОВЫХ ВОЛН НА ОТКОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

§ 4. ОБЗОР РАБОТ, РАССМАТРИВАЮЩИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН С НАКЛОННОЙ СТЕНКОЙ

В настоящее время имеется значительное количество работ, посвященных исследованию волнового воздействия на сооружения откосного типа. В этих работах рассматриваются также такие вопросы, как: характер волнения перед стенкой, критическая глубина, давление волн на откосы, скорости на поверхности откоса, высота наката и т. п. В большинстве случаев эти работы общеизвестны, в силу чего здесь мы остановимся лишь на конечных их выводах и принципиальных замечаниях.

Первые экспериментальные исследования действия волн на гидротехнические сооружения с наклонной стенкой были проведены в лабораторных условиях проф. Н. Н. Джунковским [10]. Эти исследования по существу послужили началом более широких исследований. На основе их было установлено, что все сооружения можно разделить на сооружения вертикального и крутонаклонного типа с $m=\mathrm{ctg}\alpha\leqslant 1$ и сооружения наклонного типа с $m>1$. Это разграничение основывали на предположении, что при $m<1$ волна отражается от стенки, а при $m>1$ — всегда полностью разбивается на откосе.

Для определения максимальной крутизны волны в открытом море, которая теоретически могла бы полностью отражаться от стенки, образующей с горизонтом угол α, Миш получил такую зависимость [105]:

$$\left(\frac{2h}{2L}\right)_{макс}=\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\cdot\frac{\sin^2\alpha}{\pi}. \qquad (1)$$

В работах Кондратьева, Ирибарена и др. отмечается, что волны могут отражаться от весьма пологих откосов и что критерий $m\gtrless 1$ не совсем правильно отражает существо явления.

На основании лабораторных исследований А. Г. Сидорова [51]

предложила следующий критерий для определения характера волнения перед наклонной стенкой:

$$A = \frac{\ln \frac{2\pi H}{L}}{\sqrt{2\pi \frac{H}{L}}} \cdot \frac{2L}{2h} \left(\operatorname{tg}\alpha\right)^{\frac{2}{3}}. \qquad (2)$$

При $A \leqslant 5$ отражения не наблюдается; при $A \geqslant 5{,}6$ — полное отражение с образованием стоячей волны; при $5 < A < 5{,}6$ — частичное отражение.

Проведенные таким образом исследования показали, что при определенных параметрах волны и крутизны откоса происходит разрушение волны.

Вопрос о причинах разрушения волны рассматривался рядом авторов, которые высказывали самые различные предположения.

Одни авторы, к числу которых следует отнести Н. Н. Джунковского, В. А. Березкина и пр., связывают обрушение волны с разностью скоростей перемещения гребня и впадины волны и влиянием сопротивления дна. Другие [18] считают, что непосредственной причиной опрокидывания гребня и разрушения волны является замедление поступательного перемещения волны, в то время как орбитальные скорости остаются неизменными. Н. Е. Кондратьев [23] связывает разрушение волны с изменением плотности потока энергии; по его мнению, в момент разрушения волны проекция орбитальной скорости равна скорости распространения волны, а передний склон волны становится вертикальным.

По мнению Боголепова и Миша, правильное волновое движение трохоидальных волн нарушается в момент, когда волна достигает своей предельной формы, а волновая поверхность из эллиптической трохоиды обращается в эллиптическую циклоиду.

Многие авторы связывают разрушение волны с потерями механической энергии и сравнивают это явление с гидравлическим прыжком, при котором теряется больше половины энергии потока. Наконец, в последней работе Г. Д. Хасхачих [61] отмечается, что окончательное разбивание волны происходит вследствие тормозящего действия дна и потока, скатывающегося с откоса, на подошву волны.

Приведенные соображения различных исследователей показывают на отсутствие единого мнения в вопросе о причинах разрушения волны.

При решении практических задач возникает необходимость в определении критической глубины на откосе, т. е. глубины, на которой волна теряет устойчивую форму периодического движения и разрушается. По этому вопросу также имеется несколько рекомендаций, причем часть из них уже устарела и не соответствует действительности [5].

Для определения критической глубины Миш [104] на основании теоретического решения (с использованием энергетического метода) предложил формулу

$$H_{кр} = 1{,}17\, h^{\frac{4}{5}} L^{\frac{1}{5}}. \tag{3}$$

Эта формула может быть представлена и в таком виде:

$$H_{кр} = 0{,}585\,(2h)\left(\frac{h}{L}\right)^{-\frac{1}{5}}. \tag{3'}$$

Из предложенных зависимостей следует, что пологие волны разбиваются на большей глубине, чем крутые, а значение средней глубины равно примерно $2h$ (при $\frac{2L}{2h} \approx 10 \div 15$). Такое же среднее значение критической глубины рекомендует принимать и Н. Н. Джунковский.

А. Г. Сидорова на основе экспериментальных исследований для определения критической глубины вывела такую зависимость:

$$H_{кр} = \left[0{,}5 - 0{,}67\,\frac{(\operatorname{ctg}\alpha)^n}{e^{m_0}}\right] 2L \operatorname{tg}\alpha, \tag{4}$$

где

$$n = 2{,}95 + 0{,}065\,\frac{2L}{2h};$$

$$m_0 = 0{,}078\,\frac{2L}{2h} + 1{,}3\,\operatorname{ctg}\alpha.$$

А. В. Кульчицкий [32] получил иную эмпирическую зависимость:

$$H_{кр} = (0{,}2 + 2{,}1 \operatorname{tg}\alpha)\,(2L)^{0{,}05}\,(2h). \tag{5}$$

Г. Д. Хасхачих на основании лабораторных опытов рекомендует такое выражение:

$$H_{кр} = \left(0{,}47 + 0{,}023\,\frac{L}{h}\right)\frac{2h}{\cos^2\alpha}. \tag{6}$$

Рассматривая эти зависимости, можно установить некоторые расхождения. Больше всего отличается результат, полученный по формуле (4). Это положение следует объяснить различными условиями экспериментальных исследований. Вместе с тем, при обычных заложениях откоса ($m = 2 \div 4$) и расчетной крутизне волны ($\frac{L}{h} \approx 15$) в среднем по всем формулам можно получить

$$H_{кр} \simeq 0{,}8 \div 1{,}2\,(2h).$$

Наблюдения над разрушениями волн в естественных условиях показывают значительное колебание $H_{кр} \approx 0{,}7 \div 2{,}5$ $(2h)$ и больше; это колебание зависит от многих естественных условий, которые не поддаются аналитическому учету.

В прошлых исследованиях большое значение уделялось вопросу определения высоты наката волны на откос $h_в$.

Этот вопрос впервые исследовался проф. Н. Н. Джунковским, которым еще в 1939 г. была предложена такая формула:

$$h_в = 3{,}2\, K\, (2\,h)\, \mathrm{tg}\, \alpha, \tag{7}$$

где значение коэффициента шероховатости откоса K принимается для бетонных плит и мощения равным 1, для каменной наброски 0,77. Эта формула получила широкое распространение в практике проектирования.

Профессор П. К. Божич на основе весьма ограниченных опытов, которые им были проведены в 1946 г., считает возможным коэффициент K в формуле (7) соответственно уменьшить до $0{,}8 \div 0{,}7$.

В 1947 г. проф. Б. А. Пышкин исследовал сложные профили в виде ломаного откоса с бермой и без нее. В результате им была предложена следующая эмпирическая зависимость:

$$h_в = 0{,}565\, \frac{2\,h}{m_0 \sqrt{n}}, \tag{8}$$

где n — коэффициент шероховатости по Гангилье-Куттеру;

m_0 — виртуальный коэффициент откоса, равный

$$\frac{1}{m_0} = \frac{1}{m}\left[1 - 0{,}2 \sqrt{\frac{б}{2\,h}}\left(1 - \frac{t_0}{L}\right)\right].$$

Здесь $б$ — ширина бермы;

t_0 — глубина над бермой.

Следует заметить, что Б. А. Пышкин неправильно учитывает влияние длины волны на высоту наката, его предложение не соответствует действительности даже в качественном отношении; по его рекомендации $h_в$ уменьшается по мере увеличения $2L$, что противоречит опытам других исследователей.

В 1957 г. Б. А. Пышкин, основываясь на результатах последних экспериментальных исследований [43], предложил иную зависимость следующего вида:

$$h_в = \frac{0{,}23}{m\sqrt{n}} \sqrt[3]{\frac{2\,L}{2\,h}}\,(2\,h). \tag{9}$$

А. Г. Сидорова в 1952 г. предложила такую эмпирическую зависимость для гладкой стенки:

$$h_в = \left(1{,}52 + 0{,}24\,\frac{2\,L}{2\,h}\right) \mathrm{tg}\, \alpha\, (2\,h). \tag{10}$$

Большой интерес представляет теоретическая формула А. В. Кульчицкого, предложенная им в 1953 г.:

$$h_в = \frac{v^2_н}{2g}\left(1 + 3\sin\alpha\right) n K, \tag{11}$$

где $v_п$ — скорость наката в начальный момент времени;

K — коэффициент шероховатости, равный 0,83 для гладкого откоса;

$$n = \left(0{,}55 + \operatorname{tg}\alpha - \frac{h}{L}\right)^2.$$

А. М. Жуковец в 1954 г. предложил эмпирическую зависимость для гладкого откоса

$$h_в = 1{,}8\,(2h)\sqrt[3]{\frac{2L}{2h}}\left(\operatorname{tg}\alpha\right)^{0,8}. \tag{12}$$

Кроме приведенных формул, определяющих высоту наката волны на откос, имеются предложения ряда других авторов: М. И. Лупинского, Е. В. Курлович, Л. Н. Борисовой и др.

При проектировании креплений откосов земляных сооружений возникает необходимость в определении максимальной скорости на поверхности откоса и перед сооружением.

Анализируя данный вопрос, Н. Н. Джунковский еще в 1940 г. пришел к выводу о возможности использования для этой цели формулы Буссинеска, которая была получена для прогрессивных волн, распространяющихся при постоянной глубине:

$$v_{макс} = \frac{\pi h}{\sqrt{\frac{\pi L}{2g}\operatorname{sh}\frac{2\pi z}{L}}}. \tag{13}$$

Для откосных сооружений эта формула может быть применена при глубине на откосе $z \geqslant 3h$ с введением коэффициента $n = 0{,}6 \div 0{,}9$ (в зависимости от длины волны).

Максимальную скорость на уровне покоя воды Н. Н. Джунковский рекомендует определять из такого выражения:

$$v_{макс} = \sqrt{3{,}2\operatorname{tg}\alpha\,(2h)\,2g}. \tag{14}$$

Миш на основе теоретического решения для стенки с углом наклона $\alpha < 20°$ ($m \geqslant 2{,}75$) для прогрессивных волн получил такую формулу (при $z > H_{кр}$):

$$v_{макс} = \frac{h\sqrt{\frac{gk}{L}\operatorname{th}\frac{\pi H}{L}}}{\sqrt[4]{4\left(\frac{\pi z}{L}\right)^3}}\cos\alpha. \tag{15}$$

Б. А. Пышкин предложил следующую формулу для определения скорости наката волны на откос и ската с него:

$$v_{макс} = \eta \sqrt{\frac{h}{L} \cdot \frac{2h}{n}}, \tag{16}$$

где n — коэффициент шероховатости по Гангилье-Куттеру;

$$\eta = 0{,}2\left(1 + \frac{0{,}4L}{h}\right) \text{ — для скорости на урезе воды;}$$

$$\eta = 0{,}3\left(1 + \frac{0{,}4L}{h}\right) \text{ — на глубине } z = h.$$

А. М. Жуковец рекомендует такие формулы:

для определения максимальной скорости на уровне покоя

$$v_o = K_c \sqrt{g} \sqrt[6]{(2h)^2 L}; \tag{17}$$

для определения скорости в любой точке откоса, находящейся на глубине $z > 3h$,

$$v_н = K_u 2h \sqrt{\frac{\pi g}{2L \operatorname{sh} \frac{2\pi z}{L}}}, \tag{18}$$

где K_u — коэффициент интерференции, определяется по графику в зависимости от соотношения $2L : 2h$.

Следует заметить, что формула (18) представляет собой выражение Буссинеска [13] в ином виде.

К сожалению, из-за отсутствия данных натурных измерений не представляется возможным оценить достоверность той или иной формулы. Из сравнительного сопоставления, для случая $H = z$ (где H — глубина воды) и $m = 3$, можно установить, что эти формулы дают значения максимальной скорости, различающиеся между собой до 50%.

В настоящее время также имеется большое количество предложений по определению величины максимального местного волнового давления на откосе, причем в большинстве случаев эти предложения основываются лишь на результатах лабораторных исследований.

Н. Н. Джунковский [10], на основе сравнительно небольших лабораторных опытов, предложил гидравлический метод определения максимального волнового давления на откосе ($p_{макс}$). Его предложение исходит из таких условий: а) разрушение волны происходит на откосе на глубине $H_{кр} = 2h$; б) частицы воды, находящиеся на гребне в момент обрушения, обладают орбитальной и поступательной скоростями; в) максимальный подъем гребня в момент обрушения остается постоянным и равным $2h + h_0 = y_0$.

В результате проведенных исследований для определения максимального местного давления волны на откос Н. Н. Джунковский предложил такую зависимость:

$$p_{макс} = K\gamma \frac{u^2 + (gx_в)^2}{2g} \cdot \sin^2(\alpha + \beta) = K\gamma \frac{v_в^2}{2g} \cos^2 \varphi, \qquad (19)$$

где K — коэффициент, равный 1,7;

u — скорость частицы на гребне волны в момент ее обрушения;

$x_в$ — абсцисса точки встречи струи с откосом при разрушении волны (рис. 28):

$$x_в = \frac{-u^2 \operatorname{tg} \alpha \pm u \sqrt{u^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 2gy_0}}{g}.$$

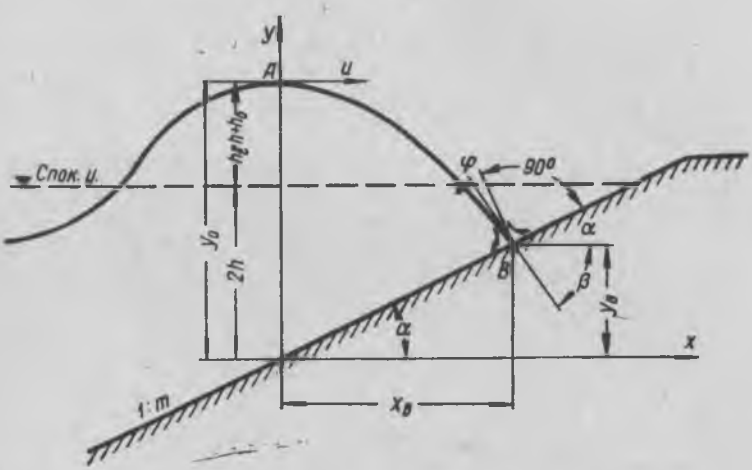


Рис. 28. Расчетная схема по Н. Н. Джунковскому

Здесь y_0— ордината высшей точки гребня волны в момент обрушения:

$$y_0 = 3h + \frac{\pi h^2}{2L} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L},$$

β — угол между касательной к направлению струи в точке B встречи ее с откосом и горизонталью, вычисляемый по формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \alpha \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{2gy_0}{u^2}},$$

$v_в$— скорость струи при ударе ее об откос в точке с координатами $x_в$ и $y_в$.

Скорость частицы на гребне волны в момент ее обрушения

$$u = n\sqrt{\frac{gL}{\pi}\,\mathrm{th}\,\frac{\pi H}{L}} + h\sqrt{\frac{g\pi}{L}\,\mathrm{cth}\,\frac{\pi H}{L}}\,, \tag{20}$$

где n — коэффициент; $n=0$ для откосов с уклонами от 1 : 1 до 1 : 2,5 и $n=0{,}75$ для откосов с уклонами от 1 : 2,5 до 1 : 4.

Скорость струи при ударе ее об откос в точке с координатами $x_в$ и $y_в$

$$v_в = \sqrt{u^2 + \left(\frac{gx_в}{u}\right)^2}\,. \tag{21}$$

Лупинский и Курлович считают необходимым к формуле Джунковского (19) дать поправочные коэффициенты в зависимости от $m = \mathrm{ctg}\,\alpha$ и соотношения $\frac{2L}{2h}$.

И. Я. Андрейчук (1) по данным лабораторных опытов, проведенных в ВНИИГИ имени Веденеева, предложил следующую зависимость:

$$p_{макс} = \gamma K (2h), \tag{22}$$

где значение K принимается в зависимости от m и $\frac{2h}{2L}$.

А. М. Жуковцем [13] для определения максимального местного давления предложена такая формула:

$$p_{макс} = \frac{\gamma (2h)}{2K\cos^2\alpha}\sqrt{\frac{2h}{2L}}\,, \tag{23}$$

где K — опытный коэффициент, учитывающий продолжительность удара и характер изменения нагрузки, а также влияние «водной подушки». В первом приближении рекомендуется принимать следующие значения K: для $\frac{2L}{2h}=8$ $K=0{,}08$; для $\frac{2L}{2h}=15$ $K=0{,}055$; для $\frac{2L}{2h}=27$ $K=0{,}0337$ и для $\frac{2L}{2h}=39$ $K=0{,}030$.

Формула (23) получена теоретическим путем и проверена затем в лабораторных условиях, что заслуживает большого внимания. Вместе с тем нельзя согласиться с утверждением, что продолжительность удара равна половине периода волны. Это утверждение противоречит всем результатам предшествующих исследований, так как фактически продолжительность импульсного удара исчисляется несколькими долями сотых и даже тысячных секунд.

Лабораторные исследования были проведены также Л. Н. Борисовой [4]. При проведении этих исследований для измерения волновых давлений были использованы высокочастотные тензометрические датчики.

В результате анализа материалов опытных исследований Борисовой была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$p_{макс} = \gamma \varepsilon \frac{(2h)(2T)}{3,86}, \tag{24}$$

где ε — коэффициент, определяемый по графику в зависимости от высоты волны и заложения откоса.

Из последних работ, посвященных определению волнового давления на откосе, следует отметить исследования Г. Д. Хасхачиха [60÷61]. В работе данного автора освещены интересные положения в части исследования характера разбивания волн на непроницаемом откосе.

На основании этих исследований автор пришел к выводу о возможности использования метода расчета Н. Н. Джунковского с уточнением и введением в предложенные им формулы некоторых поправок.

Максимальную высоту гребня волны над спокойным уровнем (см. рис. 28) автор рекомендует определять по формуле

$$h_г = \left[0,95 - (0,84\,m - 0,25)\,\frac{h}{L}\right] 2h, \tag{25}$$

а значение коэффициента n к формуле (20) принимать равным

$$n = 4,7\,\frac{h}{L} + 3,4\left(\frac{m}{\sqrt{1+m^2}} - 0,85\right). \tag{26}$$

Кроме того, данным автором предложены следующие эмпирические формулы:

для определения $p_{макс}$

$$p_{макс} = \gamma\left[\left(0,01\,m + 0,02\right)\frac{L}{h} + \left(2,56 - 0,27\,m\right)\right] 2h \tag{27}$$

и для определения глубины над точкой приложения $p_{макс}$

$$e_0 \approx 0,023\,(2\,L). \tag{28}$$

Сопоставляя формулу Н. Н. Джунковского с формулой (27), можно установить, что последняя несколько занижает величину $p_{макс}$— примерно до 10%.

Несмотря на положительную оценку работы Хасхачиха, следует, однако, заметить, что для случая $\frac{2L}{2h} > 15$ и $m = \mathrm{ctg}\,\alpha < 3,5$ величина $p_{макс}$, полученная по рекомендуемой им формуле, сильно занижена и не согласуется с опытами других авторов (Борисовой, Андрейчука, Петрашеня и др.). Поэтому его предложение может дать правильные результаты при определении $p_{макс}$ по так называемому «навалу» осциллографической записи.

Из сравнительного обзора приведенных формул для определения максимального местного давления на откос можно установить, что все последние исследования учитывают не только влияние высоты волны и заложения откоса, но и длину исходной волны. Такое положение следует признать правильным. Однако, в силу различных условий проведения экспериментальных исследований, результаты, получаемые по рекомендуемым формулам, расходятся и не всегда правильны.

§ 5. СОСТАВ ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная задача настоящих исследований заключается в разработке некоторых вопросов методики инженерного расчета бетонных покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений, находящихся под воздействием ветровых и судовых волн.

Следует напомнить, что расчет бетонного покрытия откоса связан с разрешением большого комплекса вопросов: с установлением расчетных нагрузок; расчетами на прочность и устойчивость покрытия; определением границ крепления откоса; расчетом и проектированием обратного фильтра и т. п.

Как отмечалось выше, в предлагаемой работе в основном рассматриваются лишь вопросы, связанные с установлением волновых нагрузок на бетонное покрытие откоса и определением элементов судовых волн в каналах. Вместе с тем, учитывая запросы проектных организаций, автор счел необходимым привести предварительные рекомендации в части расчета границ крепления откоса, состава и размера обратного фильтра, некоторых практических указаний по выбору типа и конструкции бетонного покрытия и т. п. Само собой разумеется, для надлежащего решения этих вопросов необходима постановка более полных исследований.

Вследствие сложности характера взаимодействия волн с откосом ряд вопросов, касающихся методики расчета волновых нагрузок, еще не достаточно изучен и требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Весьма ограниченное количество работ посвящено вопросу воздействия ветровых волн на бетонные покрытия. Проведенные в прошлом в этом направлении исследования касались изучения частных вопросов и весьма ограничены по составу самих опытов.

Таким образом, в состав предлагаемых исследований входят решения следующих основных вопросов:

1) установление характера волнения перед наклонной стенкой и определение глубины разрушения волны;

2) установление волнового давления на непроницаемые откосы (бетонное покрытие);

3) установление характера и величины волнового взвешивающего давления;

4) определение высоты наката волны на откос;

5) исследование устойчивости бетонного покрытия в условиях волнового потока.

При решении поставленных задач автор стремился идти тремя путями: лабораторно-экспериментальным, теоретическим и путем натурных исследований. Кроме того, при оценке рекомендуемых зависимостей были широко использованы данные опыта эксплуатации построенных сооружений.

Волновые движения в водохранилищах и в судоходных каналах достаточно сложны, причем эти движения еще более осложняются в результате взаимодействия волн с откосами. В силу этого точные теоретические решения до настоящего времени найдены для очень немногих случаев волнового движения перед наклонным дном и справедливы только для потенциального движения.

В большинстве же случаев при решении дифференциальных уравнений движения приходится схематизировать отдельные положения, отступать от физики рассматриваемого явления и ограничивать число факторов, определяющих это движение. Все это приводит к тому, что теоретические решения часто оказываются очень сложными или менее точными, чем упрощенные зависимости, полученные экспериментальным путем и дающие для практики вполне надежные результаты.

Как известно, разрушение волны на откосе сопровождается усиленными вихревыми явлениями, нарушающими колебательный характер движения, в этом случае движение уже не подчиняется потенциалу скорости. Здесь может быть использован способ конечных величин, когда не требуется знать точную картину движения каждой частицы жидкости, а достаточно установить средние величины. Этот теоретический метод решения часто называют гидравлическим способом, который в прошлом нашел широкое применение в работах Н. Н. Джунковского и других.

В предлагаемой работе был широко использован лабораторный метод решения тех или иных задач, имеющий по сравнению с натурными исследованиями свои преимущества и недостатки. Преимущество лабораторного метода состоит в возможности упрощения изучаемого явления и расчленения действия основных факторов. Кроме того, постановка лабораторных опытов требует меньших затрат времени и средств. Недостаток лабораторных исследований — неизбежность искажений отдельных явлений при переходе от уменьшенной модели к натуре.

Нахождение способов моделирования изучаемых явлений, основывающихся на законах динамических и кинематических подобий, является одним из самых сложных вопросов. Автор специально не занимался исследованием законов моделирования волновых процессов и основывался главным образом на выводах, сделанных отдельными авторами, изучающими этот вопрос.

Проведенные до сего времени многочисленные исследования волновых процессов в лабораторных условиях как у нас, так и за границей базировались на возможности применения правила гравита-

ционного подобия, т. е. моделирование производилось только по силе тяжести.

Такое положение прежде всего следует объяснить невозможностью соблюдения полного динамического подобия, при котором имеет место одновременное действие нескольких сил, имеющих различную физическую основу.

Однако при выяснении в лабораторных условиях того или иного волнового процесса следует установить главную превалирующую силу, которая в основном обусловливает изменение рассматриваемого процесса, и выяснить влияние второстепенных сил хотя бы с качественной стороны, чтобы отдать себе отчет в знаке корректива, т. е. выяснить, будут при этом занижены или завышены искомые величины.

С достаточным основанием можно считать, что при изучении отдельных явлений прогрессивных, разного рода интерферированных и судовых волн моделирование по гравитационному подобию не может дать существенных искажений.

Несколько сложнее обстоит тело с моделированием разбитых волн, где при определенных условиях могут сыграть существенную роль, помимо сил тяжести, силы вязкости и упругости. Однако при рассмотрении этого вопроса следует иметь в виду, что проведенные автором опыты были выполнены при достаточно крупном масштабе; основные опыты проводились в масштабе $1:10 \div 1:20$. С другой стороны, ряд проведенных ранее исследований, в том числе и исследования Камишелья, показали, что при весьма значительной турбулентности движения жидкости, которая имеет место при полном разбивании волны, влияние собственной вязкости жидкости уменьшается [10, 34, 39].

Вопрос об учете сил упругости возник за последнее время в связи с исследованиями воздействия разбитых волн на сооружения вертикального типа, проведенными Багнольдом, Г. Н. Смирновым и другими. Эти исследования показали, что возникновение отдельных пиков волнового давления до некоторой степени зависит от образования воздушных прослоек между обрушивающимся гребнем волны и стенкой.

Как будет отмечено ниже, при изучении волнового воздействия на откосные сооружения эти воздушные прослойки характер воздействия разбитых волн на откосные сооружения существенным образом не изменяют. Поэтому принятая гидравлическая схема удара обрушивающегося гребня с достаточной степенью точности отвечает действительной картине.

Не могут оказать существенного влияния на изучение волновых процессов и силы поверхностного натяжения при принятом масштабе моделирования. Эти силы начинают играть свою роль при весьма малых размерах волн, которых не было в наших опытах. Влияние поверхностного натяжения может сильно сказаться при лабораторных исследованиях волнового режима в акваториях портов. Вместе с тем, даже и в этом случае, согласно данным, полу-

ченным д. т. н. А. С. Офицеровым, моделирование по гравитационному подобию не может дать существенной погрешности при масштабах $\lambda < 50 \div 100$.

На основании изложенного, а также на основании результатов специально проведенных нами опытов в разномасштабной серии считаем возможным применить к изучаемым нами волновым процессам правило гравитационного нодобия, т. е. учесть только силы тяжести.

Наконец, следует иметь в виду, что при проведении лабораторных опытов в ряде случаев мы исходили из результатов натурных исследований и тем самым уточняли рекомендуемые окончательные зависимости, полученные в лабораторных условиях.

Натурные исследования, связанные с изучением судовых волн в каналах и их действием на откосы и крепления, проводились на специальных опытных участках.

Лабораторные исследования проводились в двух опытовых бассейнах, имеющих размеры в плане $13 \times 0{,}5$ *м* и $13 \times 2{,}5$ *м*. Высота обоих бассейнов 1 *м*. Бассейны оборудованы устройствами для киносъемки и фотографирования.

Волны создавались в бассейнах с помощью волнопродуктора с нырялом. Необходимые размеры и элементы экспериментальной волны подбирали при помощи соответствующей настройки волнопродуктора с изменением частоты колебаний ныряла, центра и амплитуды колебаний.

Элементы исходной, прогрессивной, волны назначали в бассейне, имеющем в конце гасители, состоящие из каменной наброски. Перед моделью откоса в узком лотке был устроен передвижной гаситель из наклонного щита, снабженный хворостяным пакетом.

В этих бассейнах определяли волновое движение перед стенкой, волновые воздействия на откос, устойчивость бетонных покрытий откоса, работу обратного фильтра и решали другие задачи, связанные с моделированием ветровых волн.

Для изучения характера и величины противодавления под бетонным покрытием в момент отката судовой волны с откоса использовали специальный лоток длиной 2,5, высотой 0,6 и шириной 0,25 *м*. Торцовая стенка лотка сделана откидной, что позволяло сбрасывать воду с заданной скоростью. Для регулирования времени сброса применяли щиты с отверстиями; продолжительность сброса можно было регулировать в пределах от 1 до 9 *сек*. Моделирование процесса откатывания волны производилось в масштабах $1 : 2 \div 1 : 5$, с учетом времени ската волны с откоса, установленного в натурных условиях по данным киносъемки.

При проведении лабораторных и натурных исследований была использована различная электронная аппаратура с применением киносъемки. Для определения высоты волны в лабораторных условиях применяли волнограф, состоящий из приемника, источника тока и регистрирующего прибора. Приемник (датчик) представляет собой два медных стержня, электрически изолированных друг

от друга и подключаемых последовательно к источнику переменного тока с несущей частотой 1000 *гц* и регистрирующему прибору. Волнограф работает по принципу изменения тока в цепи при погружении датчика в воду. Скорость распространения волны определяли по записям двух волнографов, установленных друг от друга на расстоянии, несколько меньшем длины волны. Волновые скорости в лабораторных условиях определяли при помощи киносъемки индикаторов, а также с применением тензометрических датчиков типа ВДК. Общий вид датчика показан на рис. 29.

Рабочая часть датчика представляет собой консольную балочку, на которую наклеены тензометры; в конце консоли прикреплен шарик диаметром 5 *мм*, являющийся приемной частью. Давление от датчика передается на консоль, прогиб которой вызывает дополнительное сопротивление в тензометрах. Тарировали датчики в русловом лотке.

Рис. 29. Датчик для измерения скоростей волнового потока

При определении волновых давлений как в лабораториях, так и в натурных условиях были широко использованы тензометрические датчики. Как показал опыт применения этих датчиков, они отвечают всем основным требованиям, а именно, требованию прямолинейности тарировочных характеристик, безынерционности и стабильности работы в процессе исследований.

Рабочим элементом датчика служит гибкая полузащемленная балочка, собранная по схеме моста Уитстона, с наклеенными на нее электротензометрами из константановой проволоки диаметром 0,03 *мм* и сопротивлением 200 *ом*. Принцип действия тензометров основан на изменении электрического сопротивления проволоки при деформации сжатия или растяжения (рис. 30).

Для балочки применяли различные материалы — сталь, текстолит и гетинакс; толщина балочки от 0,5 до 1,5 *мм*, что обеспечивало различную частоту колебаний. На каждую балочку наклеивались четыре плеча моста (два измерительных и два компенсационных), чем достигались большая чувствительность, надежность и стабильность работы.

В лабораторных условиях балочку с наклеенными тензометрами и грибком монтировали в корпус с размером 25×60 *мм* (рис. 31). Приемное отверстие датчика, изолированное от воды резиной, имеет диаметр 6 *мм*; в датчиках с двойной мембраной штуцер расположен сбоку.

В начале лабораторных опытов (1951—1953 гг.) собственная частота колебаний датчиков принималась в пределах 200—300 *гц*, что вполне удовлетворяло условию изучения волнового взвешиваю-

щего давления, однако, несколько искажало результаты при определении удара разбитых волн. Впоследствии были освоены датчики с частотой 1200÷1500 *гц* (высокочастотные).

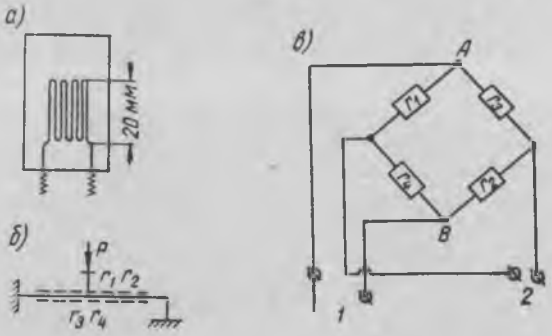


Рис. 30. Схема включения тензометрического датчика давления:
а — схема тензометра; *б* — наклейка тензометра; *в* — схема включения; *1* — усилитель; 2—питание

Тарировали датчики загружением статической нагрузкой. Согласно исследованиям Г. Н. Смирнова [53], при статической тари-

Рис. 31. Общий вид лабораторного датчика

ровке датчиков с такой частотой ошибка в измерении давления не превосходит ± 7%.

Для записи волнового давления использовались усилители артели имени 800-летия Москвы и осциллограф конструкции Ленинградского технологического института, а также осциллограф СИ. Для регистрации давления от разбитой волны применялись шлейфы с рабочей частотой до 2000 *гц*.

Учитывая ограниченные количества каналов усилителей, а также шлейфов осциллографа при определении давлений в отдельных точках модели, применяли метод связующего датчика, который либо перемещался вместе со всеми приборами, оставаясь в одной точке в течение двух записей, либо всегда был в одном месте. За-

метим, что во всех случаях применяемые датчики фиксировали избыточное давление, т. е. сверхгидростатическое давление в данной точке. Это достигалось путем балансировки показаний усилителей.

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОТКОС

1. Общий характер волнового движения перед наклонной стенкой

Эта серия опытов проводилась при следующих условиях: заложение откоса принималось в пределах от 1 : 1,5 до 1 : 5; глубина воды в лотке — от 30 до 70 *см*; исходные элементы (прогрессивной) волны: $2h=6\div12$ *см*; $2L=90\div300$ *см*, при соотношениях:

$$\frac{h}{L}=0{,}03\div0{,}11 \text{ и } \frac{H}{L}=0{,}2\div1{,}0.$$

Анализируя полученные материалы исследований изменения профиля волны перед наклонной стенкой, движение индикаторов скоростей в отдельные промежутки времени периода волны (по киносъемке), можно установить, что общий характер волнового движения перед наклонной стенкой претерпевает существенные изменения в зависимости от заложения стенки, исходных элементов волн и глубины воды. Частицы жидкости совершают сложные движения. На рис. 32 представлены одна из схем последовательного перемещения частицы (по движению индикатора) и состояние поверхности волны за полный период.

При одних и тех же исходных данных, например, при постоянной глубине и постоянном заложении откоса, характер волнового движения будет изменяться с изменением исходных элементов волн. При пологой волне вначале может наблюдаться полное или частичное отражение волны от стенки, с переходом к более крутой волне степень отражения уменьшается, и с последующим увеличением крутизны волны может произойти либо полное, либо частичное разрушение волны. Полное отражение волны может перейти в пучность интерферированной волны, без заметного перемещения гребня.

То же самое можно наблюдать и при постоянных исходных элементов волны, но с изменением других параметров, т. е. или крутизны откоса, или глубины воды. Характерно, что частичное отражение волны всегда сопровождается поднятием гребня.

Такой характер изменения волнового движения перед стенкой, по-видимому, связан с изменением структуры самого потока. Дело в том, что при распространении волны по откосу может произойти сдвиг фаз колебания частиц по глубине движения; движение частиц воды, находящихся вблизи поверхности откоса, в сильной мере зависит от влияния самого откоса. По этой причине наблюдается образование асимметрии траекторий движения частиц, и как след-

ствие, изменение профиля самой волны. Форма движения частиц при относительно крутых откосах и особенно при наличии пологих волн может приближаться к параболическим траекториям. С увеличением пологости откоса можно наблюдать образование поступатель-

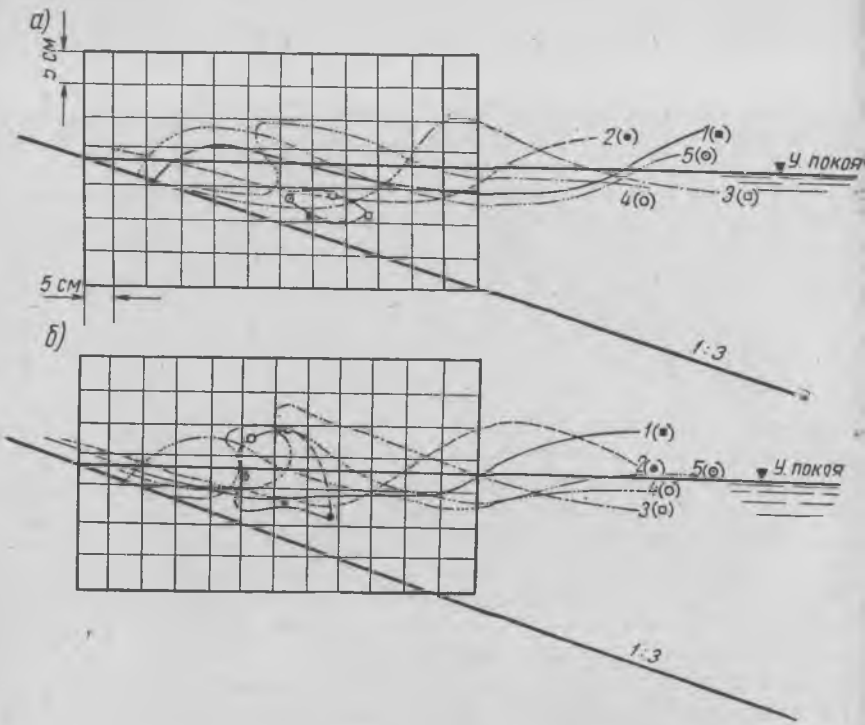


Рис. 32. Траектория движения частиц на откосе за полный период волны:
1÷5 — положение гребня волны через 0,2 от ее периода; условные обозначения, показанные на траектории движения частиц жидкости, соответствуют положению профиля волны в отдельные моменты времени

ного перемещения всех частиц жидкости. Характерно, что в момент разбивания волны передний склон ее становится почти вертикальным.

Проведенные исследования также показали, что перед разбиванием волны на откосе наблюдается увеличение высоты гребня и на глубине $H_{кр}$, после достижения волной предельной крутизны, происходит полное ее разрушение, сопровождающееся сбрасыванием с гребня массы воды. Эти исследования, как и исследования других авторов, свидетельствуют о том, что окончательное разбивание происходит вследствие увеличения орбитальной скорости частиц на гребне, влияния тормозящего действия дна и скатывающегося с откоса потока.

При рассмотрении вопроса об ударе волны об откос большое значение приобретает изучение кинематики сбрасываемой с греб-

ня массы воды и взаимодействия этой массы с откосом. Сопряжение двух потоков, т. е. скатывающегося с откоса после наката предыдущей волны и встречного потока, образованного после удара струи об откос, сопровождается также бурными завихрениями и аэрацией, вследствие чего гасится значительная энергия. С увеличением высоты наката волны на откос скорость потока постепенно уменьшается до нуля, а затем начинается скат воды под действием силы тяжести. В результате взаимодействия этих двух потоков наблюдается уменьшение высоты наката волны на откос, что особенно заметно на пологих откосах. С другой стороны, скатывающийся с откоса поток способствует подъему гребня набегающей волны и образованию сбойного потока в вершине ее гребня.

Описанный характер волнового движения перед наклонной стенкой и процесс разбивания волны на откосе в качественном отношении совпадают с выявленными при исследованиях, выполненных другими авторами. Однако, как будет показано ниже, количественная оценка этих явлений при определении волнового давления, высоты наката волны и т. п. в ряде случаев приводит к существенным расхождениям.

Из рассмотрения ряда работ по определению величины удара разбитой волны на откос, высоты наката и т. п., проведенных другими лабораториями, можно установить, что удар струи об откос почти во всех случаях передается через толщу скатывающейся предшествующей волны.

В проведенных нами исследованиях были обнаружены две схемы взаимодействия волны с откосом после ее разрушения (рис. 33), которые в принципе отличаются одна от другой наличием на пологих откосах водяной подушки толщиной t и отсутствием таковой на крутых откосах. Вследствие того что на крутых откосах скатывающийся с них поток полностью освобождает участок откоса, в опытах были замерены большие величины волновых давлений.

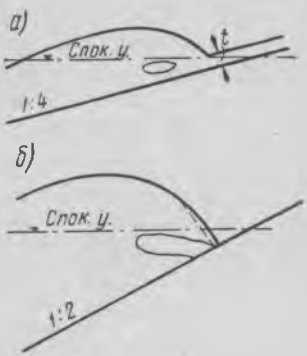


Рис. 33. Схема взаимодействия разбитой волны с откосом

Такое положение следует, по-видимому, объяснить влиянием конструкции волнопроизводящих машин (качающий щиток или ныряло). Автор считает, что моделирование волн в бассейне волнопродукторами с нырялом по сравнению с моделированием волнопродукторами со щитком более правильно отвечает естественным условиям образования ветровой волны, так как почти исключается образование компенсационных течений в лотке, которые всегда имеют место в установках со щитовыми волнообразователями, и меньше сказывается отражение.

2. Параметры, определяющие характер волнения перед наклонной стенкой

В результате проведенных экспериментальных исследований, таким образом, было установлено, что перед наклонными стенками характер волнового движения, в том числе и отражение волн от пологих откосов, может носить различный характер.

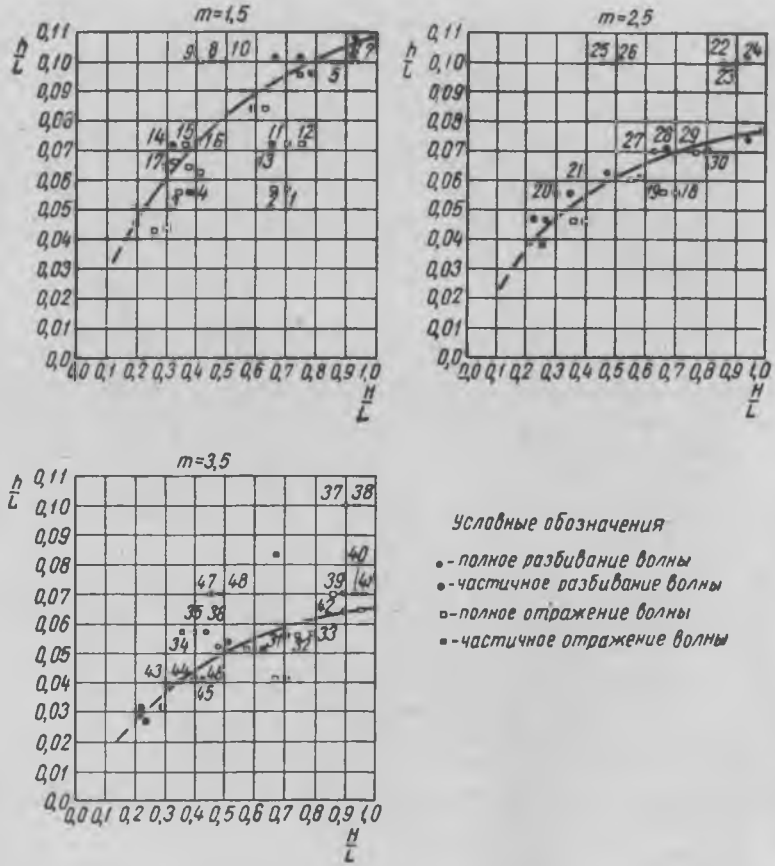


Рис. 34. Взаимодействие волны с наклонной стенкой (лабораторные данные); под условными обозначениями поставлены № опытов по данным 1952 г. опытные точки без номеров соответствуют основным данным 1951 г.:
$2h$—высота волны; $2L$—длина волны; H—глубина воды в бассейне; m-ctgα—коэффициент заложения откоса

Результаты полученных экспериментальных исследований в окончательном виде представлены на рис. 34 в виде графиков зависимости основных параметров, обусловливающих характер движения воды перед наклонной стенкой: $2h$ — высота волны; $2L$ —

длина волны; H — глубина воды в бассейне и коэффициент заложения откоса $m = \mathrm{ctg}\alpha$.

На основании экспериментальных данных были получены следующие критерии, позволяющие определить режим волнения перед наклонной стенкой (без учета шероховатости).

Прогрессивная волна перед наклонной стенкой (полное разбивание волны) будет иметь место при следующих условиях:

$$\frac{m}{\psi_0} > 0{,}11. \tag{29}$$

Образование стоячей волны (полное отражение волны) перед наклонной стенкой возможно при условии

$$\frac{m}{\psi_0} < 0{,}09, \tag{30}$$

а образование переходного режима (частичное отражение или неполное разбивание волны) — при

$$0{,}09 < \frac{m}{\psi_0} < 0{,}11, \tag{31}$$

где $m = \mathrm{ctg}\alpha$ (α — угол наклона стенки к горизонту).

$$\psi_0 = \left(\frac{1 - e^{-\pi \frac{H}{L}}}{1 - e^{-\pi \frac{Hh}{L}}} \right)^2. \tag{32}$$

Резюмируя полученные результаты экспериментальных исследований, устанавливаем, что характер волнового движения перед наклонной стенкой зависит не только от заложения откоса самой стенки, но и от соотношений между высотой и длиной волны $\frac{2h}{2L}$ и от относительной глубины воды перед стенкой $\frac{H}{L}$. Причем, чем круче откос, положе волна и больше относительная глубина воды, тем значительнее степень отражения.

Следует заметить, что проведенные вначале исследования по установлению характера волнового движения перед наклонной стенкой в последующем позволили наиболее правильно решить ряд вопросов, связанных с определением волновых нагрузок на откосы и высоты наката волны на откос.

Для сравнительной оценки на рис. 35 представлено графическое изображение зависимостей: Миша (*1*), Сидоровой (*2*) и автора (*3*), откуда следует, что предложение Сидоровой близко к нашей рекомендации. Наблюдаемые расхождения между теоретическими и эмпирическими формулами (при $\frac{H}{L} \approx 1$), по-видимому, обусловлены влиянием скатывающегося с откоса потока, что не учитывается в теоретическом решении Миша.

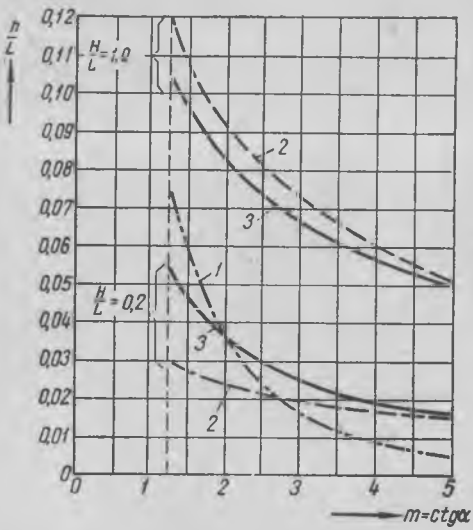


Рис. 35. График для определения зоны разбивания волны на откосе:
1—формула Миша; *2*—формула Сидоровой; *3*—формула Шанкина

3. Критическая глубина на откосе

Во время проведения опытов по установлению характера волнового движения перед наклонной стенкой был рассмотрен также вопрос о критической глубине $H_{кр}$, при которой происходит окончательное разбивание волны на откосе.

При исследовании данного вопроса прежде всего было установлено, что процесс разбивания волны на откосе имеет также различный характер в зависимости от параметров исходной волны и крутизны откоса. На крутых откосах ($m \leqslant 2$) в момент разрушения волны гребень становится вертикальным; на пологих откосах, после того как гребень волны достиг своего предельного состояния, волна продолжает перемещаться в сторону уреза воды и окончательное разбивание происходит на меньшей глубине; на пологих откосах было также замечено, что перед окончательным разбиванием может происходить неоднократное частичное обрушение гребня волны.

При анализе полученных опытных данных автор исходил из условия определения критической глубины на откосе там, где гребень волны становится вертикальным, считая, что именно в этот момент времени происходит коренное изменение структуры волнового потока на откосе. Знание этой глубины позволит правильно решить вопрос о скоростях волнового потока вдоль откоса, что необходимо при установлении границ крепления.

Величину $H_{кр}$ автор определял как по кинограммам, так и визуально, причем в последнем случае точность измерения была в пределах ± 1 *см*; каждое измерение соответствовало трем-четырем

волнам рассматриваемого режима, при окончательной обработке данных эти измерения осреднялись. Результаты основных опытов представлены на рис. 36 и в ранее опубликованной работе [69].

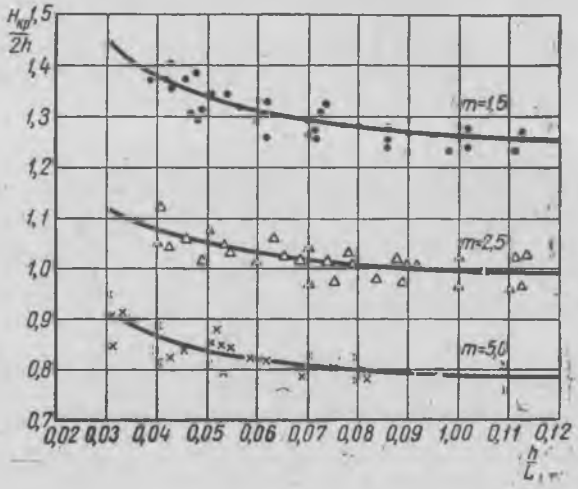


Рис. 36. График зависимости $\frac{H_{кр}}{2h} = f\left(\frac{h}{L};\ m\right)$ по данным лабораторных исследований

На основании анализа полученных материалов для определения критической глубины на откосе была получена такая зависимость:

$$H_{кр} = \beta_к \left(0{,}58 + \frac{1}{m}\right) 2h, \tag{33}$$

где

$$\beta_к = \left[1 - e^{\left(0{,}55 + \pi \frac{h}{L}\right)}\right] \sqrt[4]{\frac{2L}{2h}}.$$

Из рассмотрения полученных результатов можно установить, что в общем случае $H_{кр}$ зависит от крутизны откоса, высоты и крутизны исходной волны, причем относительная глубина $\frac{H_{кр}}{2h}$ увеличивается по мере увеличения крутизны откоса и уменьшения крутизны волны.

По ряду причин в наших опытах не удалось получить количественную зависимость $H_{кр}$ от глубины воды перед стенкой. Вместе с тем было установлено, что увеличение относительной глубины $\frac{H}{L}$ перед откосом приводит к некоторому увеличению высоты $H_{кр}$. Такая закономерность в качественном отношении согласуется с выводами акад. В. В. Шулейкина [64].

Заметим, что увеличение относительной критической глубины $\frac{H_{кр}}{2h}$ в связи с увеличением пологости откоса m связано с большим влиянием скатывающегося с откоса потока от предшествующей волны.

Для сравнения оценки зависимостей по определению $H_{кр}$ приводим график (рис. 37), из которого видно, что результаты, полученные различными авторами, дают отклонение от предложенного выражения (33) в ту и другую сторону. Наибольшие расхождения получаются по формуле Сидоровой. Эти расхождения, по-видимому, связаны с наличием различных условий эксперимента. Недостатком теоретического решения Миша является то, что он не учитывает влияния заложения откоса; вместе с тем при $\alpha < 20°$ (что было принято Мишем) его рекомендация хорошо согласуется с нашими экспериментальными исследованиями.

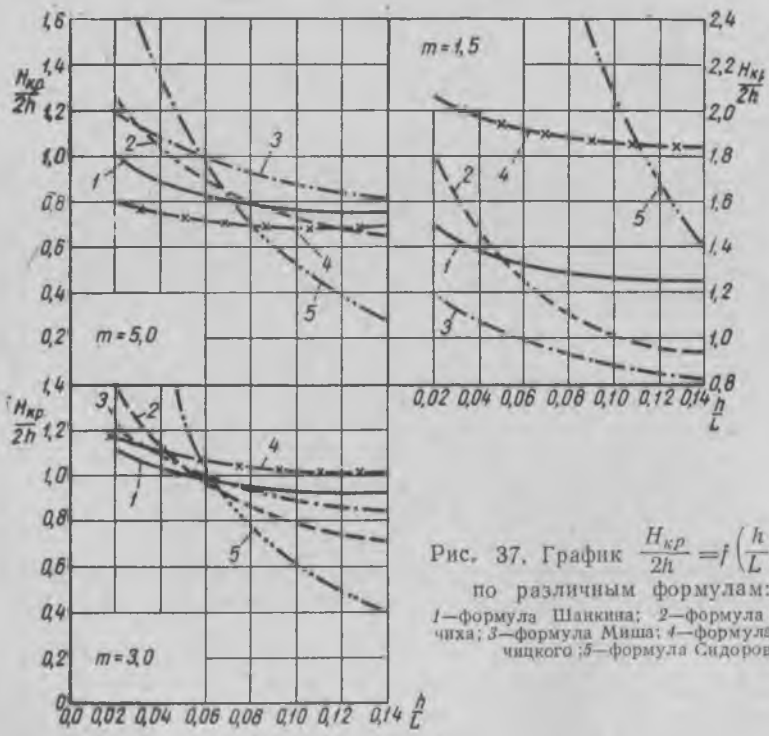


Рис. 37. График $\frac{H_{кр}}{2h} = f\left(\frac{h}{L};\ m\right)$ по различным формулам:

1—формула Шанкина; 2—формула Хасхачиха; 3—формула Миша; 4—формула Кульчицкого; 5—формула Сидоровой

При оценке различных предложений по определению критической глубины следует напомнить, что при обычных заложениях откосов земляных сооружений ($m = 2{,}5 \div 3{,}5$), а также расчетных соотношениях $\frac{2L}{2h} = 10 \div 15$ все они в среднем дают $H_{кр} \approx 2h$.

Как отмечалось, проведенные опыты также показали, что перед обрушением высота гребня волны не остается постоянной, а изменяется в зависимости от параметров исходной волны и крутизны откоса. Причем в опытах было установлено, что величина $h_г$ увеличивается с уменьшением m и $\frac{h}{L}$.

Для практических расчетов в среднем можно принять (при $m=2\div4$)

$$h_г \approx 0{,}7 \div 0{,}9\,(2h). \tag{34}$$

где 0,7 соответствует соотношению $\frac{2L}{2h}<15$ и 0,9 при $\frac{2L}{2h}\geqslant15$.

4. Максимальные скорости на поверхности откоса

Изучение максимальных скоростей волнового потока на поверхности откоса было выполнено в связи с постановкой вопроса о нижней границе облегченного крепления. Учитывая, что эта зона крепления по отношению к расчетному уровню покоя находится на относительно большой глубине, все исследования охватывали зону откоса с глубинами $z>H_{кр}$.

Лабораторные исследования проводились при следующих условиях: глубина воды в лотке $H=35\div45$ *см*; заложение откоса $m=2;3;4$; элементы исходной волны $2h=9{,}0\div15$ *см*; $2L=130\div240$ *см*, т. е. при крутизне волны в пределах $\frac{h}{L}=0{,}042\div0{,}10$ и относительной глубине $\frac{H}{L}=0{,}34\div0{,}70$* .

Заметим, что при определении скоростей с помощью киносъемки индикаторов последние находились от стекла лотка на расстоянии 1 — 2 *см*. Для определения времени наступления максимума скорости по датчикам в створе их расположения устанавливали волнографы, которые записывали на осциллограмме изменения уровня воды одновременно с записью скорости. Датчик скоростей устанавливали с таким расчетом, что приемный шарик всегда находился на расстоянии $1\div2$ *мм* (рис. 38) от поверхности откоса.

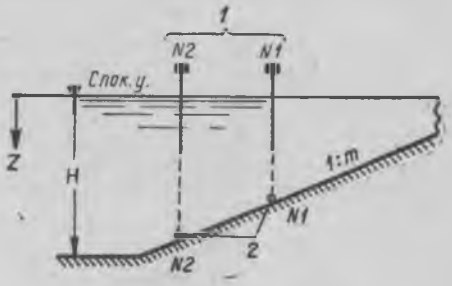


Рис. 38. Схема модели для определения донных волновых скоростей:
1—волнографы; 2—приемные шарики датчиков скоростей

Из рассмотрения полученных материалов можно установить, что донная скорость за период волны имеет два противоположных направления, достигая максимальной величины в момент прохож-

* Лабораторные исследования по волновым скоростям были проведены в 1957 г. под руководством автора, мл. научн. сотр. В. И. Авдеевой.

дения впадины и гребня волны. На больших глубинах, т. е. при $z > 7 \div 8\ h$, максимальная скорость соответствует моменту прохождения гребня волны.

В качестве примера на рис. 39 представлена одна из эпюр скоростей волнового потока на откосе. Несмотря на относительно большой разброс опытных точек, общий характер изменения скоростей вдоль откоса весьма закономерен и в качественном отношении сов-

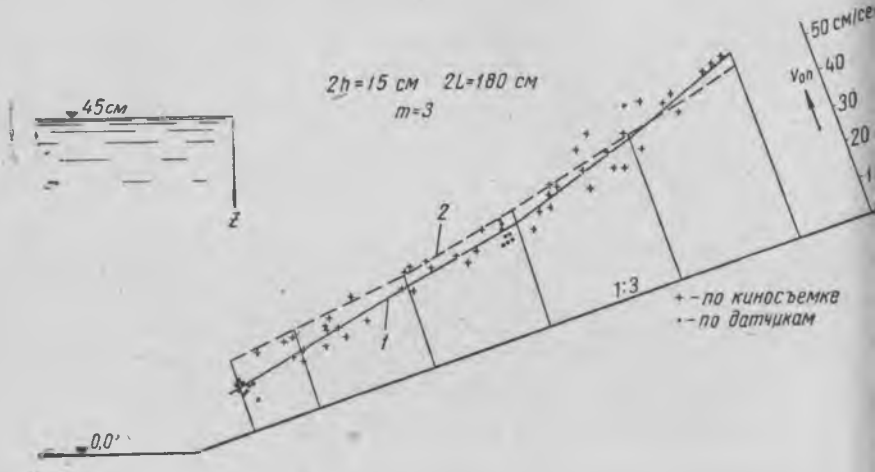


Рис. 39. Эпюра скоростей волнового потока на откосе по данным лабораторных опытов:
1—по осредненным опытным данным; 2—по формуле Буссинеска

падает с теоретическими решениями для прогрессивной волны, распространяющейся на ограниченной глубине при горизонтальном дне.

Однако сравнивая абсолютные значения скоростей по осредненным опытным данным и по формуле для прогрессивной волны (13), устанавливаем, что при больших относительных глубинах формула Буссинеска дает завышение скорости против опыта, при меньших глубинах зафиксирована обратная картина.

В проведенных опытах не удалось установить существенного влияния заложения откоса на характер и величины донных скоростей, в силу чего автор считает возможным полученные ниже рекомендации принимать для заложений откосов от 1 : 2 до 1 : 4. Вместе с тем было замечено, что волновая скорость, при всех равных исходных условиях, увеличивается по мере увеличения высоты и длины волны.

Из всего вышеизложенного можно прийти к выводу о возможности использования формулы (13) для расчета орбитальных скоростей волнового потока вдоль откоса, принимая z как переменную

глубину для рассматриваемой точки, при условии $z > H_{кр}$, и вводя соответствующие поправочные коэффициенты.

Для получения поправочных коэффициентов n все опытные данные рассматривались в зависимости от изменения следующих параметров:

$$n = f\left(\frac{2L}{2h}\right); \quad f\left(\frac{z}{2h}\right); \quad f\left(\frac{z}{L}\right).$$

В результате выполненных расчетов и сравнительной оценки опытных значений было установлено, что значение поправочного коэффициента к теоретической формуле находится в большей зависимости от относительной глубины воды над рассматриваемой точкой, т. е.

$$n = f\left(\frac{z}{L}\right).$$

К такому выводу можно прийти, если рассмотреть график (рис. 40). Относительно большой разброс опытных точек на гра-

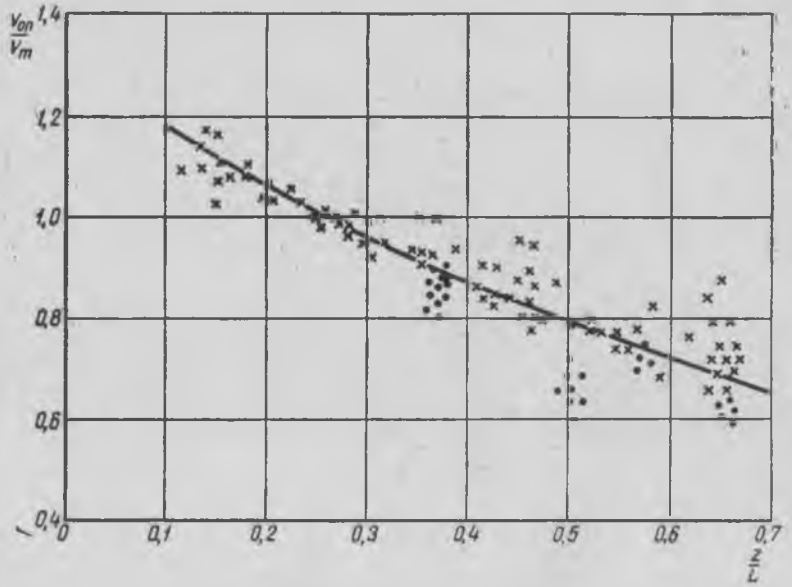


Рис. 40. График зависимости $\frac{v_{on}}{v_m} = f\left(\frac{z}{L}\right)$ по данным лабораторных опытов:

v_{on} — скорость, замеренная при опытах, v_m — соответствующая теоретическая скорость, полученная по формуле (13), z — ордината (глубина) рассматриваемой точки, L — половина длины исходной волны

фике объясняется как влиянием различных заложений откосов (m), так и относительными глубинами $\frac{H}{L}$.

Из графика по осредненным данным можно получить следующие выражения:

$$\frac{v_{оп}}{v_m} \approx 1{,}3\, e^{-\frac{z}{L}}.$$

Таким образом, для определения максимальных скоростей волнового потока на поверхности откоса можно рекомендовать следующую формулу:

$$v_{макс} = 1{,}3\, e^{-\frac{z}{L}} \frac{\pi h}{\sqrt{\frac{\pi L}{2g} \operatorname{sh} 2\pi \frac{z}{L}}}, \tag{35}$$

которая действительна при таком условии:

$$\frac{z}{L} \geqslant \frac{H_{кр}}{L} \geqslant 2\,\frac{h}{L}.$$

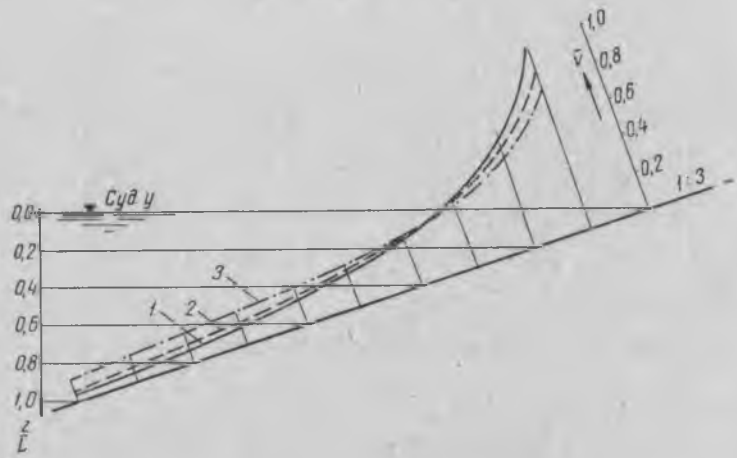


Рис. 41. Эпюры максимальных волновых скоростей на откосе по различным формулам:

1—по формуле (35); *2*—по формуле Буссинеска; *3*—по формуле Миша

Для сравнительной оценки различных формул на рис. 41 представлен безразмерный график

$$\bar{v} = \frac{v}{\pi (2h)} \sqrt{\frac{\pi L}{g}} = f\left(\frac{z}{L}\right).$$

Расчет по Мишу выполнен при $m=3{,}0$ и $\frac{H}{L}=0{,}50$.

Из рассмотрения приведенного графика устанавливаем, что безразмерная величина $\bar{v}$ во всех случаях зависит лишь от относительной глубины $\frac{z}{L}$. Теоретическая формула Миша по сравнению с результатами опыта дает занижение скорости при $\frac{z}{L} \leqslant 0{,}4$ и значительное завышение этой скорости при $\frac{z}{L} > 0{,}4$. В силу этого дан-

ная формула не может быть рекомендована для практических расчетов.

Анализируя формулы (13) и (35), можно установить, что в случае $\frac{z}{L}>0{,}26$ значение коэффициента n будет соответствовать следующему условию:

$$n=1{,}3e^{-\frac{z}{L}}<1.$$

В практических расчетах при определении нижней границы облегченного покрытия откоса всегда имеет место $\frac{z}{L}>0{,}26$. Учитывая это соотношение, можно установить, что значение $n<1{,}0$ имеет место при $\frac{2L}{2h}>8$.

Оценивая рекомендацию Жуковца, можно прийти к выводу, что его предложение для значения $n=1{,}0\div1{,}2$ к формуле Буссинеска, не подтверждается данными наших исследований.

§ 7. ДАВЛЕНИЕ РАЗБИТОЙ ВОЛНЫ НА НАКЛОННУЮ СТЕНКУ

1. Общие замечания

Вопрос определения давления разбитой волны на наклонную стенку имеет большое практическое значение при решении ряда инженерных задач, в том числе и при расчете на прочность бетонных покрытий откосов.

Лабораторные опыты по определению волновых давлений на наклонную стенку проводились для одиннадцати исходных режимов при высоте волны от $0{,}11\div0{,}16$ *м* и длине волны $1{,}60\div2{,}40$ *м* при следующих условиях: заложение откоса стенки $m=\mathrm{ctg}\,\alpha=2;3;4$ и 5; глубина воды в лотке $40\div70$ *см*. При каждом волновом режиме на осциллограмме фиксировалось изменение по времени давления не менее чем шести разбивающихся волн. Для определения максимального, местного давления датчики перемещали вдоль откоса. На основании полученных осциллограмм определяли одновременно давления в пяти-шести точках в момент удара волны и строили эпюры мгновенного давления вдоль откоса; для промежуточных точек использовали показания связующих датчиков.

Из рассмотрения полученных осциллографических записей можно установить, что за полный период разбивания волны давление в одной и той же точке крайне неравномерно; это давление, достигнув максимального значения в момент удара, уменьшается затем во время наката волны на откос и при откате волны с откоса; в отдельные моменты периода волны давление меньше гидростатического.

В зависимости от величины волновых давлений весь откос можно разделить на три зоны: 1) зона переформирования волны — от подошвы откоса до нижней границы обрушения, где наблюдается плавное изменение давлений в отдельных точках; 2) зона обрушения

с присущим ей резко пульсационным характером давления; 3) зона наката волны от верхней границы зоны обрушения до максимального наката волны на откос, где, как и в первой зоне, наблюдается плавное изменение волновых давлений в отдельных точках.

Траектории струй волны в пределах откоса изменяются при смене режима волнения перед наклонной стенкой; при переходе от прогрессивной волны к интерферированной траектории струи из выпуклых по отношению к откосу превращаются в вогнутые. Причем характерно, что в переходный период сила удара уменьшается по сравнению с моментом полного разбивания волны на откосе. При более крутых откосах моменту обрушения волны предшествует образование на откосе достаточно развитого вальца; с уменьшением крутизны откоса завихрение создается, как правило, после полного обрушения гребня волны.

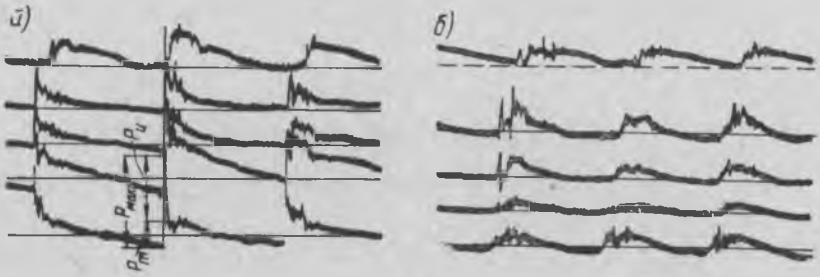


Рис. 42. Осциллографическая запись волновых давлений на откос модели *а*—откос 1 : 2, режим II, опыт №125; *б*—откос 1 : 5, режим II, опыт №144

Особенность воздействия разбитой волны на откос состоит в том, что в первое мгновение наблюдается резкое нарастание давления, а затем столь же резкое уменьшение; «навал», последовавший после пика, характерен большой продолжительностью и сравнительно малым давлением. Причем сам характер изменения пика давления изменяется по довольно сложному закону (рис. 42).

Характер и величина волнового удара, при тех же исходных данных, зависят от крутизны откоса. При крутых откосах максимум давления наступает почти одновременно на значительной части откоса. На пологих откосах зона одновременного наступления максимума в момент удара волны уменьшается. Причем характерно, что во всех случаях максимальное давление всегда приложено ниже спокойного горизонта.

Из рассмотрения осциллографических записей волновых давлений (см. рис. 42) можно установить, что продолжительность «пика» максимального давления, т. е. длительность удара, по сравнению с продолжительностью ударов в соседних точках, весьма мала и что наибольшая величина максимального давления зафиксирована на крутых откосах. Последнее положение в действительности и должно было иметь место; как отмечалось выше, при крутых откосах обрушение волны почти всегда происходило при от-

сутствии на откосе «водяной подушки», на пологих же откосах скатывающаяся вниз вода не успевает освободить откос к моменту предшествующего разбивания волны.

Отмеченная особенность имеет важное значение при оценке величин максимальных волновых давлений; нам представляется, что имеющиеся расхождения в определении величины максимальных давлений по формулам различных авторов связаны именно с недоучетом отмеченной особенности.

После этих замечаний перейдем к количественному анализу полученных величин волновых давлений на откос.

2. Максимальное местное давление

В результате анализа полученных осциллографических записей можно установить, что величина максимального волнового давления, или, вернее сказать, избыточного давления (сверх гидростатического) зависит в основном от трех параметров: высоты и длины исходной волны и заложения откоса. Эта величина $p_{макс}$ увеличивается по мере увеличения $2h$ и $2L$ и уменьшения заложения откоса m.

Результаты обработки основных серий лабораторных опытов сведены в табл. 1. Заметим, что каждая серия состояла из 6—8 опытов, проведенных при одних и тех же исходных данных, т. е. $2h$, $2L$ и $m=\mathrm{ctg}\alpha$, где α — угол наклона откоса к горизонту; в данной таблице даны осредненные показания величины $p_{макс}$ для каждой серии опытов. Величина $p_{макс}$ во всех случаях определялась по «пику» осциллографической записи (см. рис. 42).

Таблица 1

Сводные данные величин максимальных волновых давлений на откос, полученные по лабораторным исследованиям

№ серии опытов	Исходные элементы волн в м		$\frac{2L}{2h}$	$m=2$		$m=3$		$m=4$		$m=5$	
	$2h$	$2L$		$p_{макс}$ т/м²	$\frac{p_{макс}}{2h}$	$p_{макс}$ т/м²	$\frac{p_{макс}}{2h}$	$p_{макс}$ т/м²	$\frac{p_{макс}}{2h}$	$p_{макс}$ т/м²	$\frac{p_{макс}}{2h}$
1	0,15	1,50	10,0	0,54	3,60	0,48	3,20	0,36	2,46	0,28	1,86
2	0,16	2,40	15,0	—	—	—	—	0,43	2,70	0,35	2,19
3	0,12	2,40	20,0	—	—	0,43	3,58	0,40	3,33	0,28	2,34
4	0,14	1,60	11,4	0,57	4,05	0,43	3,15	0,31	2,23	—	—
5	0,16	1,70	10,6	—	—	0,52	3,25	0,41	2,56	0,25	1,57
6	0,15	2,20	14,7	0,60	4,00	0,55	3,66	0,41	2,74	0,28	1,87
7	0.11	2,20	20,0	—	—	—	—	0,36	3,26	0,26	2,36
8	0,13	2,40	18,0	0,59	4,45	0,50	3,85	0,38	2,92	0,21	2,38
9	0,15	1,20	8,0	0,47	3,12	0,38	2,52	0,32	2,14	0,22	1,47
10	0,12	1,65	13,7	0,46	3,82	0,36	3,00	0,30	2,50	0,17	1,42
11	0,08	1,35	17,0	0,35	4,42	0,28	3,54	0,23	2,92	0,18	2,28

На основании данных, приведенных в табл. 1, на рис. 43 представлена графическая зависимость относительной величины максимального волнового давления $\frac{p_{макс}}{2h}$ в функции от соотношения длины волны к ее высоте $\frac{2L}{2h}$ и коэффициента заложения откоса m.

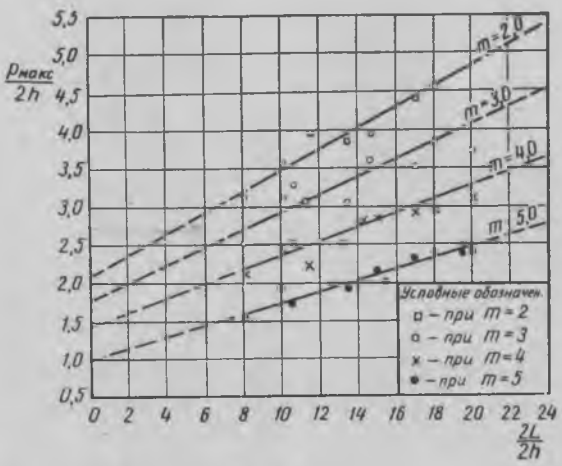


Рис. 43. Зависимости $\frac{p_{макс}}{2h} = f\left(\frac{2L}{2h}; m\right)$ по данным лабораторных опытов

На основании анализа этого графика можно получить следующую зависимость.

$$\frac{p_{макс}}{\gamma\, 2h} = \left(0{,}35 + 0{,}023\,\frac{2\,L}{2\,h}\right)(8 - m),$$

откуда

$$p_{макс} = \gamma\left(0{,}35 + 0{,}023\,\frac{2L}{2h}\right)(8 - m)\,2h\,. \qquad (36)$$

Заметим, что полученное выражение действительно при тех значениях исходных параметров, которые были приняты во время опытов, т. е. при $m = 2 \div 5$; $\frac{2L}{2h} = 8 \div 20$.

Для определения этой же величины ранее нами была рекомендована зависимость иного вида [70]:

$$p_{макс} = \gamma\, 0{,}183\,\sqrt{\frac{2L}{2h}}\,(8 - m)\,2h. \qquad (36')$$

Сопоставляя эти две формулы, можно установить, что они дают идентичные результаты, хотя по конструкции несколько отличаются одна от другой.

В действительности из соотношения этих формул следует

$$\frac{[36]}{[36']} = \frac{0{,}35 + 0{,}023\frac{2L}{2h}}{0{,}183\sqrt{\frac{2L}{2h}}}.$$

Сравнительные расчеты этого соотношения даны в табл. 2.

Таблица 2

Данные по сопоставлению расчетных формул

$\frac{2L}{2h}$	$0{,}023\frac{2L}{2h}$	[36]	$\sqrt{\frac{2L}{2h}}$	[36′]	$\frac{[36]}{[36']}$
8,0	0,18	0,53	2,83	0,52	1,02
12,0	0,28	0,63	3,47	0,63	1,00
15,0	0,35	0,70	3,87	0,71	0,99
20,0	0,47	0,82	4,47	0,82	1,00

Данные таблицы свидетельствуют о равноценности этих формул в пределах тех соотношений $\frac{2L}{2h}$, при которых они были получены.

Как отмечалось выше, проведенные исследования показали, что точка приложения $p_{макс}$ во всех случаях находится ниже горизон-

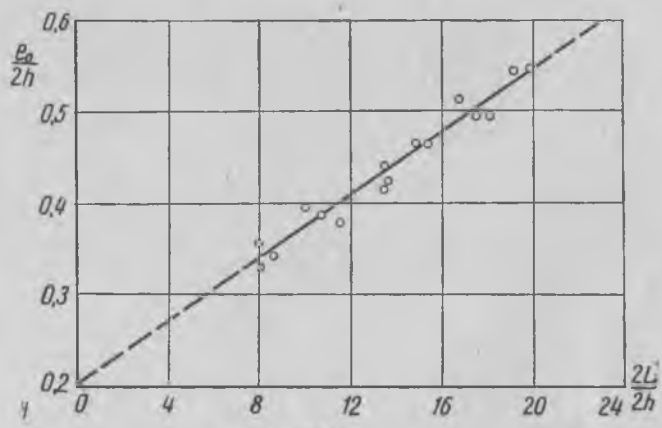


Рис. 44. Зависимость $\frac{e_0}{2h} = f\left(\frac{2L}{2h}\right)$ по лабораторным данным при $m=3$

та покоя. Глубина e_0 над точкой приложения $p_{макс}$ в общем случае зависит от тех же пераметров, что и само давление, т. е. от $2h$,

$2L$ и m. В наших опытах было установлено, что величина e_0 увеличивается по мере увеличения $2h$ и соотношения $\frac{2L}{2h}$.

К сожалению, в этих опытах по ряду причин не удалось установить влияние заложения откоса на величину e_0. Результаты опытов для случая $m=3$ представлены на рис. 44, откуда получена следующая зависимость:

$$e_0 \approx \left(0{,}2 + 0{,}018\frac{2L}{2h}\right)2h, \tag{37}$$

которая справедлива также в пределах изменения $\frac{2L}{2h}=8\div20$.

Полученная формула (36) соответствует максимальному волновому давлению, с учетом осциллографической записи так называемого «пика». В действительности, как отмечалось выше, диаграмма волнового давления (см. рис. 42) характеризуется наличием очень короткого пика продолжительностью нескольких сотых и тысячных секунд и «навала» со значительной продолжительностью и меньшей интенсивностью.

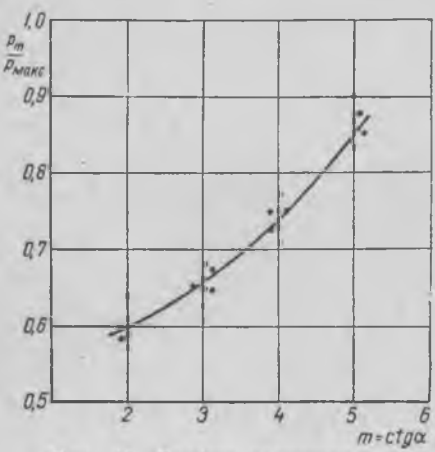


Рис. 45. График зависимости $\frac{p_m}{p_{макс}}=f(m)$

Для сравнительной оценки максимального волнового давления, соответствующего пику $p_{макс}$ и навалу p_m, были обработаны имеющиеся осциллографические записи. Результаты этой обработки показали возможность получения формулы для p_m в зависимости от $p_{макс}$ и заложения откоса (табл. 3). Рассматривая эти материалы, устанавливаем, что наибольшая разница в соотношениях $\frac{p_m}{p_{макс}}$ соответствует крутым откосам. Такое положение хорошо согласуется и с физикой рассматриваемого явления, так как на крутых откосах в момент удара волны на откосе отсутствует водяная подушка.

На основании данных табл. 3 построен график (рис. 45) связи p_m с давлением $p_{макс}$ и заложением откоса, из которого можно получить такую зависимость:

$$p_m \approx \frac{1{,}47}{\sqrt{8-m}}p_{макс}. \tag{38}$$

Тогда с учетом данной зависимости и формулы (36) для опреде-

Таблица 3

Сравнение величин $p_{макс}$ и p_m по осредненным данным лабораторных опытов

№ волнового режима	Элементы волн в *см*		$m=2$			$m=3$			$m=4$			$m=5$		
	$2h$	$2L$	$p_{макс}$ г/см²	p_m г/см²	$\frac{p_m}{p_{макс}}$	$p_{макс}$ г/см²	p_m г/см²	$\frac{p_m}{p_{макс}}$	$p_{макс}$ г/см²	p_m г/см²	$\frac{p_m}{p_{макс}}$	$p_{макс}$ г/см²	p_m г/см²	$\frac{p_m}{p_{макс}}$
1	15	150	54	32	0,59	48	31	0,65	36	27	0,75	24	20	0,83
2	16	240	75	—	—	66	43	0,66	43	32	0,74	35	30	0,85
3	12	240	51	31	0,61	43	29	0,68	40	30	0,75	28	25	0,90
4	14	160	57	34	0,60	43	28	0,65	31	22	0,71	21	18	0,86
5	16	170	67	43	0,64	52	32	0,62	41	30	0,73	25	21	0,85
6	15	220	60	36	0,60	55	33	0,60	41	32	0,78	28	—	—
7	11	220	44	25	0,57	37	25	0,68	36	27	0,75	26	—	—
8	13	240	59	34	0,58	50	32	0,64	38	28	0,73	31	27	0,88

ления местного волнового давления, соответствующего «навалу», можно получить следующую формулу:

$$p_m \approx \gamma \left(0{,}51 + 0{,}034 \frac{2L}{2h}\right) \sqrt{8 - m}\ 2h \tag{39}$$

при условии $m = 2 \div 5$ и $\frac{2L}{2h} = 8 \div 20$.

Вопрос о практическом использовании полученных формул освещен ниже.

Представляют интерес результаты сопоставлений величин $p_{макс}$ по формулам различных авторов (рис. 46).

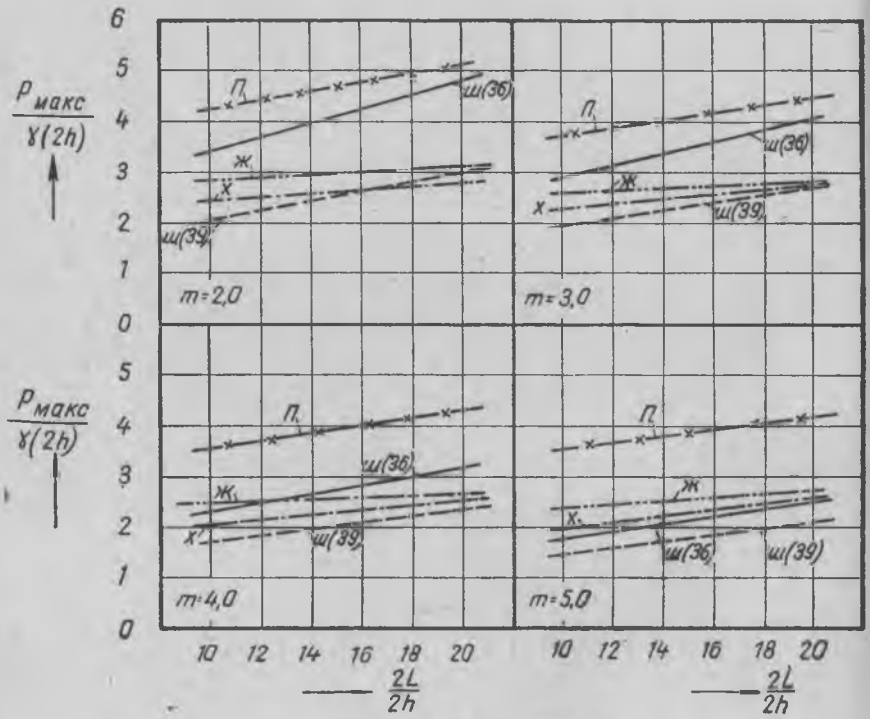


Рис. 46. Сравнение величин $\frac{p_{макс}}{2h} = f\left(\frac{2L}{2h}, m\right)$ по формулам:

Х — Хасхачиху; *Ж* — Жуковца; *П* — Петрашеня; *Ш* (36) — Шанкина [формула (36), *Ш* (39) — Шанкина [формула (39)]

Из рассмотрения полученных результатов следует, что предложенные к настоящему времени формулы в качественном отношении дают правильную зависимость $p_{макс}$ от $2h$, $2L$ и m; однако в количественном отношении имеются расхождения. Эти расхождения, как неоднократно отмечалось выше, объясняются различными условиями экспериментирования.

Теоретическое предложение Н. Н. Джунковского (19) дает примерно одни и те же результаты, что и эмпирическая зависимость Г. Д. Хасхачиха (27), с отклонением в пределах $\pm 7\%$.

Степень расхождения между результатами, полученными по различным формулам зависит от изменения величин параметров, определяющих $p_{макс}$, однако во всех случаях расчет по формуле Петрашеня сильно завышает искомую величину. Наша формула (36), по сравнению с Хасхачихом, дает несколько бо́льшие величины, что особо заметно при крутых откосах, и наоборот, предложение Хасхачиха при его сравнении с другой нашей формулой (39) несколько завышает величину максимального давления, хотя это завышение не имеет особого практического значения.

Окончательная оценка достоверности того или иного предложения, вполне естественно, может быть дана после получения данных натурных исследований.

3. Построение эпюры волнового давления

Для установления характера и величин волновых давлений в плоскости откоса в момент удара волны была проведена специаль-

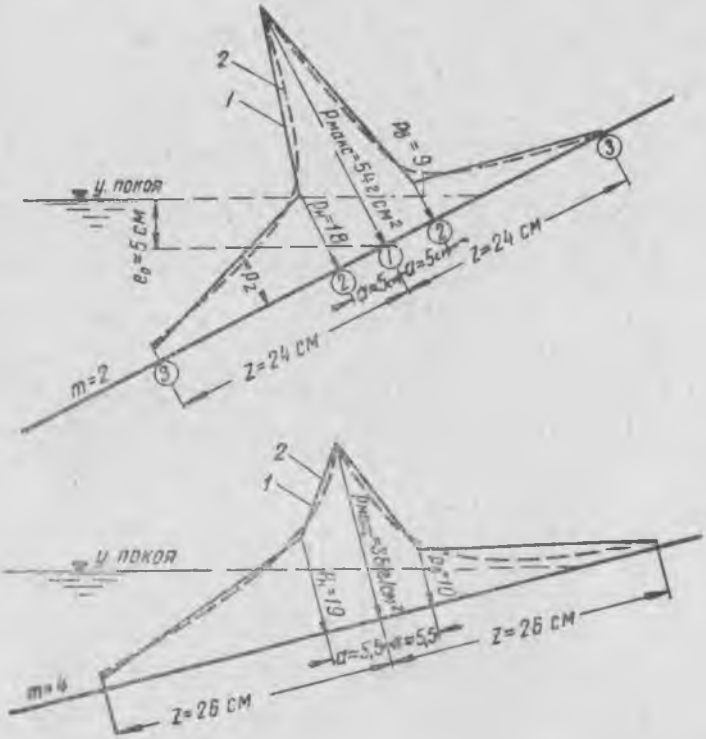


Рис. 47. Эпюры волнового давления на откос в момент удара волны (для случая $2h=15$ *см* и $2L=150$ *см*):

1—по формулам; *2*—по опытным данным

ная серия опытов для тех же заложений откосов, что и при определении $p_{макс}$, но для трех волновых режимов с соотношениями $\frac{2L}{2h}=10$; 15 и 20. В результате этих опытов были построены эпюры мгновенных давлений; в качестве примера на рис. 47 представлены две эпюры для одного и того же исходного режима, но при разных заложениях откосов.

Особенность характера распределения волнового давления вдоль откоса состоит в том, что от точки «пика» давление по обе стороны интенсивно падает, при этом во всех случаях верхняя ветвь по сравнению с нижней имеет бо́льшую вогнутость, которая увеличивается с увеличением крутизны откоса. Судя по данным осциллографических записей, время нарастания давления до максимальной величины находится в пределах от 0,005 ($2T$) до 0,02 ($2T$).

Анализируя вопрос о характере эпюры волнового давления, можно установить, что давление в любой точке p_z, находящейся на расстоянии z от точки приложения максимального давления, в основном зависит от $p_{макс}$, m и $2L$. Обработанные материалы показали, что в общем случае можно получить аналитические зависимости для построения кривых давлений для каждой ветви в отдельности, что и было предложено нами впервые применительно к судовым волнам [69].

Однако для практических расчетов представляется возможным несколько упростить построение данной эпюры волнового давления (путем замены действительных кривых отрезками прямых линий). Как показали сравнительные подсчеты, такая замена не вносит существенных погрешностей и вместе с тем значительно упрощает весь расчет.

В результате детального анализа многочисленных эпюр давлений было установлено, что для их построения при данном положении $p_{макс}$ (см. точку *1* на рис. 47) достаточно на каждой ветви эпюры определить положение наиболее характерных точек *2* и *3*. Особенность такой схемы состоит в том, что в крайних точках *3* давление составляет примерно 0,05÷0,10 $p_{макс}$; в точке *2* нижней ветви $p_н \approx 0{,}5 \div 0{,}6\ p_{макс}$; в точке *2* верхней ветви $p_в \approx 0{,}20 \div 0{,}30\ p_{макс}$.

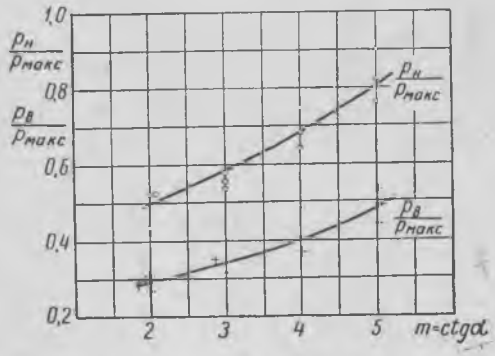


Рис. 48. График $\frac{p_н}{p_{макс}}$ и $\frac{p_в}{p_{макс}} = f(m)$ по данным лабораторных опытов

Из рассмотрения основных данных лабораторных исследований (табл. 4) следует, что положение точек *2* может быть определено так: $a_{ср} \approx 0{,}064\ L$, а точек *3* $z_{ср} \approx 0{,}32\ L$.

Таблица 4

Сводные данные по волновым давлениям в отдельных точках поверхности непроницаемого откоса

Элементы волн в м		m	$p_{макс}$ т/м²	$p_н$ т/м²	$p_в$ т/м²	a см	$\frac{a}{L}$	$\frac{p_н}{p_{макс}}$	$\frac{p_в}{p_{макс}}$	z см	$\frac{z}{L}$	e_0 см
$2h$	$2L$											
0,15	1,50	2	0,54	0,18	0,09	5,0	0,067	0,334	0,167	24	0,320	5,0
		3	0,48	0,20	0,10	6,0	0,080	0,428	0,214	25	0,334	5,0
		4	0,36	0,19	0,10	5,5	0,073	0,530	0,278	26	0,346	5,0
		5	0,24	0,18	0,08	5,0	0,067	0,750	0,334	24	0,320	4,5
0,6	2,40	2	0,75	0,31	0,16	8,0	0,067	0,412	0,214	36	0,308	9,0
		3	0,66	0,29	0,14	7,0	0,058	0,440	0,213	38	0,318	7,0
		4	0,43	0,28	0,13	7,5	0,062	0,650	0,300	36	0,300	6,5
		5	0,35	0,29	0,15	8,5	0,071	0,880	0,430	38	0,318	6,0
0,12	2,40	2	0,51	0,22	0,11	7,5	0,062	0,430	0,216	38	0,318	7,5
		3	0,43	0,20	0,10	8,0	0,066	0,465	0,230	40	0,333	6,0
		4	0,40	0,22	0,10	8,0	0,066	0,550	0,400	38	0,318	5,5
		5	0,28	0,20	0,11	8,0	0,066	0,720	0,398	39	0,325	5,5

$$\left(\frac{a}{L}\right)_{ср} \approx 0,064 \qquad \left(\frac{z}{L}\right)_{ср} \approx 0,32$$

С другой стороны, рассматривая соответствующие величины давлений в точках $2\ p_н$ и $p_в$, можно заметить, что они в основном зависят от $p_{макс}$ и m. В этом можно убедиться из представленного графика (рис. 48), построенного по данным табл. 4.

Таким образом, для построения эпюр волнового давления вдоль откоса можно рекомендовать такие приближенные зависимости:

$$\left.\begin{aligned} a &= 0{,}032\,(2\,L) \\ z &= 0{,}16\,(2L) \\ p_н &= \frac{2{,}36}{8-m}\,p_{макс} \\ p_в &= \frac{1{,}18}{8-m}\,p_{макс} \end{aligned}\right\}. \qquad (40)$$

§ 8. ВЫСОТА НАКАТА ВОЛНЫ НА ОТКОС

Основные лабораторные исследования по определению высоты наката волны на откос проводились для следующих четырех типов покрытий откосов: 1) сплошное — непроницаемое покрытие; 2) мостовая; 3) наброска из разных камней; 4) покрытие из отдельных плит.

Условия опытов: заложение откоса от 1 : 1,5 до 1 : 5; соотношение между длиной и высотой исходной волны $2L : 2h$ от 7 до 20; высота волны в экспериментах изменялась в пределах $2h = 5 \div 15$ *см*. Измерение высоты вскатывания волны на откос производилось в основном с помощью киносъемки сверху и контрольными визуальными отсчетами по нескольким наклонным рейкам, уложенным на откосе. При обработке кинограмм принимали средние из максимальных показаний.

В результате предварительного анализа полученных экспериментальных данных было установлено, что высота вскатывания волны на откос увеличивается по мере увеличения высоты и длины исходной волны и уменьшения заложения откоса; кроме того, была установлена зависимость высоты вскатывания волны от размера и места расположения бермы на откосе.

В силу этого в основу обработки экспериментальных данных была принята следующая эмпирическая зависимость:

$$h_в = K'_0\,K_в\,K_б\,(2h), \qquad (41)$$

где K'_0 — обобщенный коэффициент шероховатости и проницаемости крепления откоса (в лабораторных условиях);

$K_в$ — коэффициент, учитывающий влияние заложения откоса и крутизну волны;

$K_б$ — коэффициент, учитывающий влияние бермы откоса; при отсутствии бермы на откосе $K_б = 1$.

Первый этап лабораторных исследований был проведен для прямолинейного откоса, т. е. при отсутствии бермы на откосе.

В результате обработки опытных данных для каждого типа покрытия откоса и его заложения были построены графически зависимости вида $\overline{h_в}=h_в : 2h=f(2L : 2h)$. Один из таких графиков для сплошного непроницаемого покрытия представлен на рис. 49. Как следует из рассмотрения данного графика, при определенных значениях m и $i=2L : 2h$ отклонение между максимальными и минимальными показаниями не превышает $\pm 10\%$ (от средних данных). Напомним, что каждая опытная точка, нанесенная на графике, соответствует одному опыту и получена в результате осредненных данных максимальных показаний 5—6 кинограмм. Во избежание ошибок высоту вскатывания волны на откос фиксировали при прохождении первых 3—6 волн.

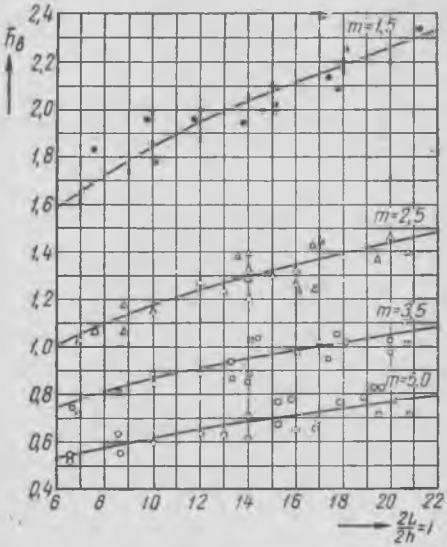


Рис. 49. Данные экспериментальных исследований по установлению связи $\overline{h_в}=f(m; 2L$ и $2h)$ для сплошного непроницаемого покрытия

Аналогичные графики были получены и для других типов покрытий, т. е. для каменной мостовой, каменной наброски и бетонного покрытия из отдельных плит. Полученные материалы для этих покрытий показали идентичную зависимость между $\overline{h_в}=f(m;\ i)$.

В результате обработки материалов опытных исследований для значения коэффициента $K_в$ была получена такая зависимость:

$$K_в = \frac{1}{m+0{,}25}\left(1{,}35+0{,}585\sqrt{\frac{2L}{2h}}\right), \qquad (42)$$

где $m=\mathrm{ctg}\alpha$.

В результате сравнения лабораторных данных значение коэффициента K_0 было получено в таких пределах: 1) для сплошного непроницаемого покрытия $K'_0=1{,}55$; для покрытия из отдельных бетонных плит $K'_0=1{,}40$; 3) для мостовой или укладки камней $K'_0=1{,}1$; 4) для наброски из разных камней $K'_0\approx 0{,}85$.

Полученные экспериментальные значения коэффициента шероховатости и проницаемости покрытия откоса соответствуют лабораторным данным K'_0.

Из-за отсутствия данных натурных наблюдений по высоте вскатывания ветровой волны на действующих водохранилищах автор считает возможным при оценке действительного значения K_0 воспользоваться данными натурных наблюдений, проведенных на канале имени Москвы. Ранее в работе автора [67] такое сравнение было сделано на основе графика $h_в=f(2h)$, полученного по натурным данным для каменной мостовой; на основании этого анализа для перехода от лабораторных данных к натурным был установлен переходный коэффициент, равный $\lambda_n=0{,}9$. Покажем, что это же значение λ_n может быть получено применительно и к бетонному покрытию откоса.

Принимая в приведенных выше выражениях (41, 42) $K_б=1$ и $m=2{,}5$, что соответствует натурным условиям наблюдений, можно написать

$$\overline{h}_{в\,(л)}=\frac{h_в}{2h}=0{,}508\left(1{,}35+0{,}585\sqrt{\frac{2L}{2h}}\right).$$

С другой стороны, в соответствии с формулой (94), приведенной ниже, для натурных условий при $m=2{,}5$ и $K_0=1{,}2$ имеем

$$h_{в\,(н)}=\frac{h_в}{2h}=1{,}2\left(0{,}9+0{,}03\,\frac{2L}{2h}\right).$$

При расчете задаемся различными значениями относительной длины волны. Результаты расчетов сводим в табл. 5.

Таблица 5

Определение переходного коэффициента по данным натурных измерений

$\frac{2L}{2h}$	$0{,}585\sqrt{\frac{2L}{2h}}$	$1{,}35+$ $+0{,}585\sqrt{\frac{2L}{2h}}$	$\overline{h}_{в(л)}$	$0{,}03\frac{2L}{2h}$	$0{,}9+$ $+0{,}03\sqrt{\frac{2L}{2h}}$	$\overline{h}_{в(н)}$	$\lambda_n=\frac{h_{в(н)}}{h_{в(л)}}$
8	1,65	3,00	1,53	0,24	1,14	1,37	0,90
10	1,85	3,20	1,62	0,30	1,20	1,44	0,89
12	2,02	3,37	1,71	0,36	1,26	1,51	0,89
14	2,18	2,52	1,78	0,42	1,32	1,59	0,89
16	2,34	3,69	1,87	0,48	1,38	1,66	0,89
18	2,48	3,83	1,94	0,54	1,44	1,74	0,90

Из данных, приведенных в табл. 5, следует, что и в рассматриваемом случае $\lambda_n\approx0{,}9$.

Следует заметить, что из сравнения данных натурных измерений, полученных применительно к судовым волнам, с результатами лабораторных исследований, полученных применительно к ветровым волнам, могут возникнуть возражения о справедливости подобных

сравнений. В действительности такое сопоставление в отношении высоты наката волны на откос может быть вполне допустимо, если учесть идентичность характера волнового движения перед наклонной стенкой для косых ветровых волн и судовых волн в каналах (см. § 9).

На основании изложенного с учетом приведенных выше значений коэффициентов шероховатости и проницаемости K'_0, полученных лабораторным путем, в табл. 6 даны действительные значения для K_0, которые необходимо принимать в расчете.

Таблица 6

Значение коэффициента шероховатости и проницаемости крепления откоса

Тип покрытия откоса	Значение K_0
Наброска из околотых камней	~0,72
Наброска из округленных камней	~0,82
Наброска из разных камней	0,77
Мостовая или плотная укладка	1,00
Бетонное покрытие из отдельных плит	1,25
Сплошное непроницаемое покрытие	1,40

Заметим, что для наброски из околотых и округленных камней лабораторные исследования проводились в ограниченном объеме, поэтому на приведенные для них значения коэффициента K_0 следует смотреть лишь как на первое приближение. Кроме того, следует также оговорить, что значение $K_0=0{,}77$ для наброски из разных камней было получено применительно к покрытию с небольшой толщиной (при $t_{натура} \approx 0{,}3 \div 0{,}6$ *м*); при $t_к > 0{,}6$ *м* значение коэффициента K_0 может быть принято несколько меньше.

Учитывая, что толщина каменной наброски существенным образом влияет на значение K_0, полагаем, что в последующих исследованиях весьма желательно уточнить значение этого коэффициента и получить его в зависимости от толщины наброски.

Второй этап лабораторных исследований касался выяснения влияния берм на откосе на высоту вскатывания волны, т. е. установления значения коэффициента $K_б$ в формуле (41).

Опыты были проведены для жесткой непроницаемой модели откоса при следующих условиях: глубина воды в лотке $H=20$; 35 и 50 *см* (рис. 50); ширина бермы $б=0$; 10; 20; 30; 40 и 50 *см*; глубина воды над бермой по отношению к уровню покоя t_0 принималась в пределах от 0 до H с интервалами 5 *см*. Исследования проводились при четырех основных режимах, характеризующихся изменением элементов моделируемой волны при $2h=5 \div 10$ *см* и $2L=75 \div 155$ *см*.

Всего было выполнено более 300 опытов и смонтирован специальный кинофильм. Киносъемка проводилась при фиксации первых 10—12 волн (гребней), причем для съемки одного цикла взаимодействия волны со стенкой потребовалось в среднем 36÷42 кинокадра.

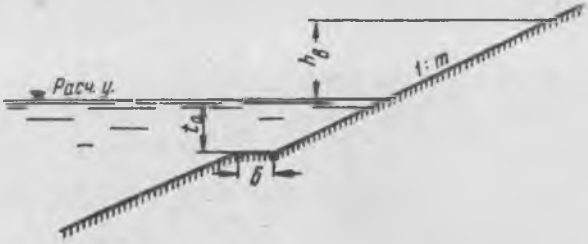


Рис. 50. Расчетная схема для определения высоты наката волны на откос

Первая серия данного этапа лабораторных исследований была проведена с целью установления качественной оценки влияния длины волны на высоту вскатывания при откосе с бермой. Результаты этих опытов показали, что влияние длины волны (при обычных соотношениях $i=\frac{2L}{2h}=10\div15$) на высоту вскатывания для откосов с бермами с достаточной степенью точности учитывается коэффициентом в формуле (42), полученным для прямолинейного откоса. Вместе с тем в этих опытах было установлено влияние глубины воды перед стенкой.

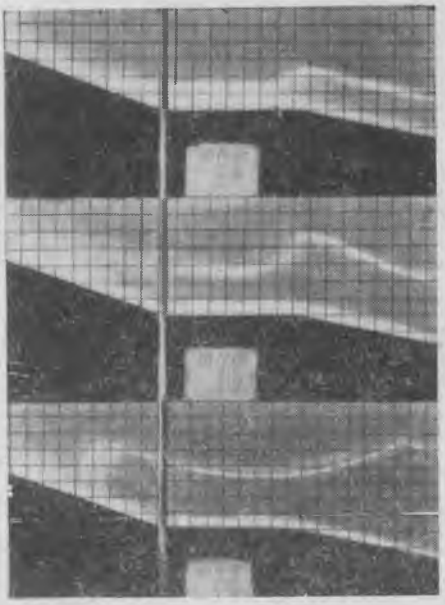


Рис. 51. Взаимодействие волны с откосом при наличии на нем бермы

Обработка материалов последующих опытов показала, что при прочих равных условиях высота вскатывания волны на откос уменьшается по мере увеличения ширины бермы $б$ и уменьшения глубины воды над бермой t_0. При небольшой ширине бермы и достаточно большой глубине воды над ней форма волны перед самой стенкой сохраняет прогрессивный характер (рис. 51); волна в таких случаях разбивается непосредственно на верховом откосе, сохраняя при этом все характерные особенности процесса разбивания волны на откосе.

С увеличением $б$ и уменьшением t_0 зафиксировано заметное влияние бермы на характер взаимодействия волны со стенкой; в этом случае на подходе волна принимает асимметричный характер и ее разрушение происходит или в начале бермы (см. рис. 51) или в пределах самой бермы. С увеличением глубины воды волна при прохождении бермы сохраняет правильную форму.

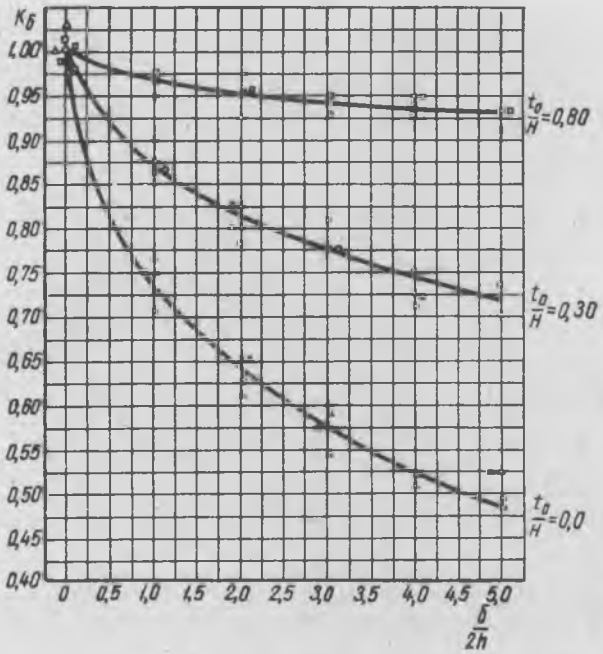


Рис. 52. Графическая зависимость коэффициента $K_б$ по данным лабораторных исследований

Для получения коэффициента $K_б$ обработка материалов лабораторных исследований была проведена с учетом принятой зависимости (41), т. е. при

$$K_б = \frac{1}{K'_0 K_в} \cdot \frac{h_в}{2h}.$$

Принимая $K'_0 = 1,55$ (как для непроницаемого покрытия — см. выше) и $m=3$ (см. рис. 50), получим

$$K_б = \frac{2,1}{1,35 + 0,585\sqrt{i}} \cdot \frac{h_в}{2h}, \qquad (43)$$

где $i = 2L : 2h$;

$2h$ — высота исходной волны;

$h_в$ — высота вскатывания волны на откос при данных значениях $б$; t_0; H.

В качестве примера на рис. 52 представлена графическая зависимость коэффициента $K_б$ от соответствующих соотношений $t_0 : H$ и $б : 2h$. Заметим, что, кроме приведенного графика, были построены и другие, при иных значениях $t_0 : H$ и $б : 2h$ [69].

В результате такой обработки окончательное выражение для коэффициента $K_б$ было найдено в следующем виде:

$$K_б \approx e^{-0,32\sqrt{\frac{б}{2h}}\left(1-\sqrt{\frac{t_0}{H}}\right)}, \tag{44}$$

откуда следует, что при отсутствии бермы $б=0$ или при $t_0=H$ значение $K_б=1$, т. е. соответствует случаю прямолинейного откоса без бермы.

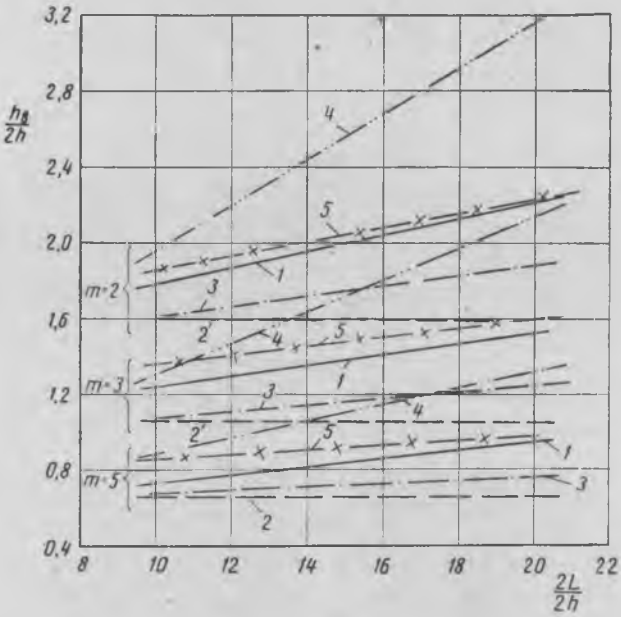


Рис. 53. График величин $\frac{h_в}{2h}$ по формулам:

1—Шанкина; 2—Джунковского; 3—Пышкина; 4—Сидоровой; 5—Жуковца

Таким образом, для определения высоты вскатывания разбитой волны на откос любого очертания предлагается следующая обобщенная формула:

$$h_в = K_o K_в K_б (2h), \tag{45}$$

где K_0— коэффициент шероховатости и проницаемости крепления откоса по табл. 6;

$K_в$ и $K_б$— по формулам (42), (44) или по графикам [69].

Для сравнительной оценки на рис. 53 представлен график зависимости $\frac{h_в}{2h}=f(\frac{2L}{2h};\ m;)$ по формулам различных авторов для гладкого непроницаемого откоса (бетонного покрытия).

Из рассмотрения приведенных выше формул (см. § 4), а также полученных результатов следует, что по всем предложениям, за исключением Н. Н. Джунковского (опыты которого были проведены с волнами при $\frac{2L}{2h}<10$), высота наката волны на откос увеличивается по мере увеличения $2h$ и $2L$. Однако степень влияния соотношения $\frac{2L}{2h}$ различна, а в формуле Сидоровой (10) правильность учета этого соотношения вызывает большое сомнение.

Вместе с тем следует заметить, что предложенные затем формулы Пышкина и Жуковца по существу не отличаются от предложения автора, так как отклонение до $\pm 10\%$ находится в пределах точности измерений $h_в$ в лабораторных условиях.

Предложенная автором формула (45) подвергалась неоднократной проверке рядом других исследователей. Так, например, из работы Жуковца [14] можно установить, что предложение автора дает хорошие результаты. Опыты ВНИИГСа также дали хорошее совпадение с нашей формулой. В ЦНИИСе Минтрансстроя были проведены специальные опыты с целью проверки существующих предложений, касающихся высоты вскатывания волны на откос. Результаты этих исследований в виде специальных графиков опубликованы в информационном письме [8].

§ 9. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСЫХ ВОЛН С НАКЛОННОЙ СТЕНКОЙ

Установление характера взаимодействия косых волн с наклонной стенкой по сравнению с рассмотренными выше случаями фронтального подхода волн представляет более сложную задачу. В данной работе освещены некоторые характерные особенности взаимодействия косых волн с наклонной стенкой: характер волнового движения перед стенкой; высота наката волны на откос и величина волнового давления.

Следует отметить, что в настоящее время опубликовано несколько работ о косом подходе волн. Некоторые авторы [52], рассматривая только высоту наката волны на откос, приходят к выводу, что при косом подходе волны высота наката меньше, чем при фронтальной волне. Степень этого уменьшения растет с увеличением угла подхода волны β, т. е. угла между лучом волны и плоскостью, перпендикулярной откосу. Значение угла подхода волны определяют по известной формуле акад. В. В. Шулейкина, полученной на основе теории рефракции волн.

Имея в виду, что рекомендуемые в данной работе расчетные зависимости по волновым воздействиям в основном выведены для

фронтального подхода волны, мы сочли необходимым поставить специальную серию опытов для косого подхода волны к наклонной стенке только лишь с целью качественной оценки влияния угла подхода волны на характер волнового движения перед наклонной стенкой (в отношении высоты наката волны на откос).

Лабораторные исследования проводили при трех значениях угла: $\beta=0$; 15 и 30° (при $\beta=0$ — фронтальная волна). Основные опыты проводили для откоса с заложением 1 : 3 и контрольные — для откосов с заложением 1 : 2 и 1 : 5. Глубину воды в бассейне принимали постоянной, равной $H=35$ *см*. Все исследования были проведены для трех исходных волновых режимов: при $2h=11\div14$ *см*; $2L=130\div200$ *см* и $2T=0{,}9\div1{,}2$ *сек*. Для исключения влияния отраженной волны вдоль бортов бассейна устраивали откос из каменной наброски.

Высоту наката волны и траекторию движения частиц на откосе определяли с помощью киносъемки. Скорости наката и ската волны измеряли как с помощью волновых датчиков, так и с помощью киносъемки (по движению индикаторов). Измерение скоростей наката с помощью двух волновых датчиков сводилось к определению времени между двумя последовательными «пиками» осциллографических записей. При косом подходе волны к откосу датчики (волнографы) устанавливали по направлению движения скатывающейся волны, которое определяли с помощью шариков-индикаторов, перемещающихся вместе с волной. Следует отметить, что описанный метод определения осредненных скоростей давал сравнительно точные данные для надводной зоны и менее точные —для подводной.

На основании рассмотрения полученных материалов лабораторных исследований можно установить, что картина взаимодействия волн с наклонной стенкой при косом подходе сильно отличается от взаимодействия при фронтальном подходе. Это отличие прежде всего состоит в характере траекторий движения частиц воды (рис. 54): при $\beta=0°$ траектории ската и наката почти всегда прямолинейны и параллельны лучу волны; при $\beta>0$ траектории имеют вид параболы и накат волны на откос происходит по линии, параллельной лучу волны, а линия ската всегда составляет некоторый угол с лучом (больший или равный углу подхода фронта волны с откосом).

Было установлено, что в этом случае характер волнового движения перед наклонной стенкой зависит не только от заложения откоса и параметров исходной волны, но и от угла подхода луча волны, причем степень отражения волны увеличивается по мере увеличения этого угла.

Зафиксировано существенное отличие и в картине разбивания волны на откосе. В случае косого подхода (рис. 55) разрушение волны на откосе происходит не одновременно по всему фронту, а последовательно на отдельных участках, продвигаясь по направлению луча волны со скоростью, равной скорости распространения. Вид обрушающейся волны при этом напоминает спираль. Частицы

воды, сброшенные с гребня волны, описывают на откосе параболические траектории (см. рис. 54).

Согласно полученным данным можно заметить, что осциллографическая запись давления при косом подходе волны напоминает

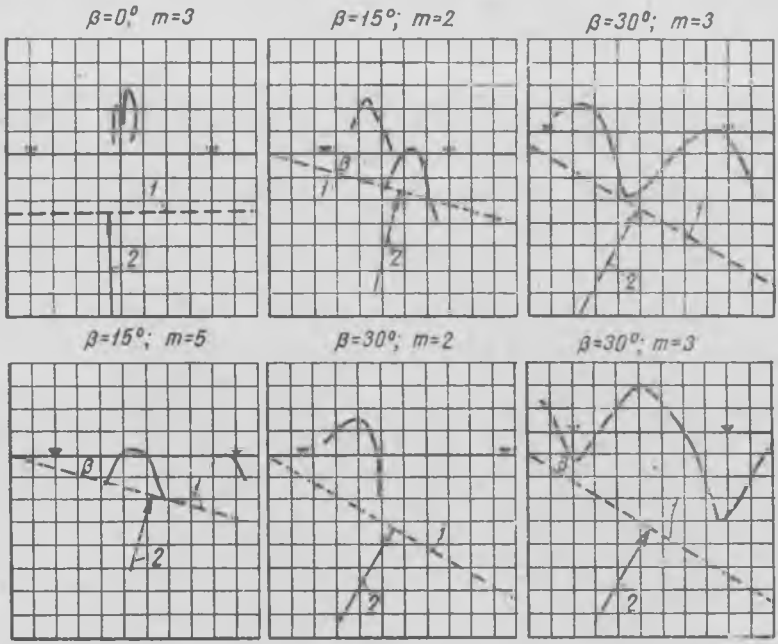


Рис. 54. Траектории движения частиц на откосе при косом подходе волны:
1—фронт волны; 2—луч волны

Рис. 55. Разбивание волны на откосе при косом подходе

промежуточную форму записи стоячей и разбитой волны. Для коротких волн отражение сказывается в меньшей степени, пики выражены более четко, второй максимум давления либо очень незначителен, либо вообще отсутствует.

Характерной особенностью взаимодействия косой волны с откосной стенкой является то, что удар почти всегда передается через водяную подушку. Наличие водяной подушки на откосе можно установить и по характеру траекторий движения частиц (см. рис. 54).

При изучении волнового воздействия на откос наибольший интерес представляют два момента: момент разбивания волны на откосе и момент, предшествующий разбиванию; в первом случае в зоне удара имеется избыточное положительное давление (больше гидростатического), во втором — избыточное отрицательное давление (меньше гидростатического). Для всех рассмотренных случаев были построены эпюры избыточных давлений и определены среднеабсолютные величины; причем при $\beta > 0°$ характер эпюр давлений на откосе существенно не отличается от характера эпюр при $\beta = 0°$.

Так как величины волнового давления в отдельных точках откоса на момент удара волны в основном зависят от абсолютного значения максимального давления, которое всегда приложено в точке, находящейся несколько ниже уровня покоя воды, то для сравнения величин были приняты $p_{макс}$, значения которых по некоторым опытам представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты сравнений опытных значений $p_{макс}$ для откоса 1 : 3

№ волнового режима	$2h$ см	$2L$ см	$p_{макс}$ г/см² при $\beta°$			$p_\beta / p_{макс}$ при $\beta°$	
			0	15	30	15	30
I	11	130	28,0	25,7	18,5	0,92	0,66
II	14	180	29,0	25,2	19,8	0,87	0,68

Приведенные результаты показывают, что с увеличением угла подхода луча волны волновое давление уменьшается: при $\beta = 15°$ $p_\beta \approx 0{,}9\, p_{макс}$, где $p_{макс}$—давление при $\beta = 0°$; при $\beta = 30°$ $p_\beta \approx 0{,}6 \div 0{,}7\, p_{макс}$. Такое уменьшение давления для случая косого подхода волны следует объяснить наличием влияния степени отражения и передачей упругого удара через слой воды на откосе.

Вместе с тем, как показали результаты опытов, характер и величина избыточного волнового давления для момента, предшествующего разбиванию, практически не зависит от угла подхода волны к откосу. На части откоса, по которой волна скатывается, давление очень мало, но оно резко возрастает и достигает максимума в месте встречи волн.

На части откоса, где происходит удар волны и давление достигает пика, находится зона повышенного давления; вправо и влево от этой зоны, где удар либо уже был и происходит накат волны, либо удара еще не было и волна скатывается с откоса, наблюдается обычное распределение избыточного давления в момент удара.

Результаты этих опытов показали, что при расчете бетонного покрытия откоса на прочность следует исходить из условия фронтального подхода волны; расчет покрытия на устойчивость дает также наихудшие результаты при $\beta=0°$.

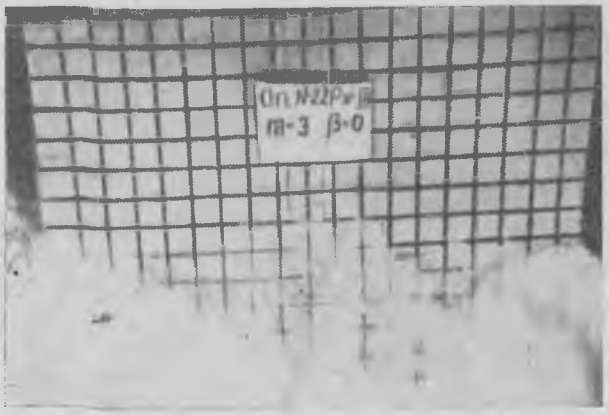


Рис. 56. Набегание волны на откос (вид сверху)

На основании приведенных данных по табл. 7, в порядке первого приближения, представляется возможность учесть влияние угла подхода волны на величину максимального волнового давления. В действительности, если принять известную формулу для учета косого удара

$$p_\beta = p_{макс} \cos^2\beta, \tag{46}$$

то для $\beta=15°$ имеем $\cos^2\beta=0{,}92$; для $\beta=30°$ $\cos^2\beta=0{,}74$.

Сравнивая значения теоретического коэффициента в виде $\cos^2\beta$ с опытными данными, устанавливаем, что совпадение удовлетворительно.

Следующий этап данной серии опытов касался выяснения влияния косого подхода волны на высоту вскатывания; при проведении этих опытов была использована киносъемка сверху, одна из кинограмм для $\beta=0$ приведена на рис. 56.

Из результатов проведенных исследований видно, что средняя линия, проведенная по максимальным точкам вскатывания волны,

при фронтальном подходе ($\beta=0°$) почти совпадает по направлению с линией уреза воды. Характер воздействия косой волны, полученной на модели, имеет полную аналогию с натурой при перемещении волнового вала по откосу судоходного канала (где всегда имеется косой подход волны).

Кинограммы обрабатывали путем построения совмещенных траекторий движения максимальных точек вскатывания для каждого опыта в отдельности по 8÷24 наблюдениям; на рис. 57 показано последовательное положение линий наката волны на откос через $\frac{1}{12}$ *сек*.

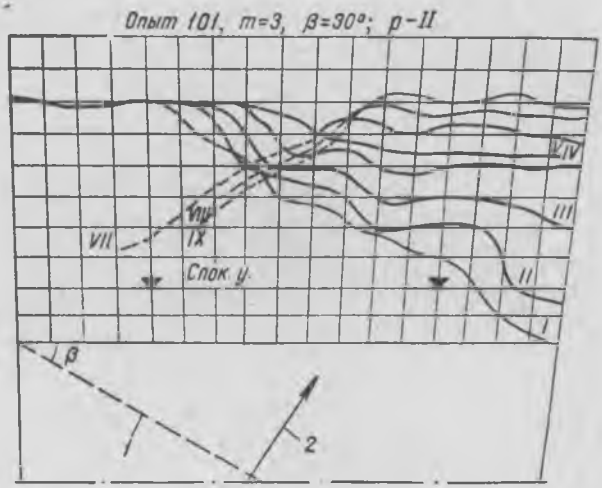


Рис. 57. Последовательные положения линий наката волн (через $\frac{1}{12}$ *сек*):

1—фронт волны; 2—луч волны

Результаты некоторых опытов по определению высоты наката волны на откос для $2h=11$ *см* и $2L=130$ *см* представлены на рис. 58. На этом графике, кроме опытных значений h_0 для $\beta=30°$, нанесены осредненные значения $h_в$ для фронтального подхода, полученные по формуле (45).

Из рассмотрения приведенных данных прежде всего следует, что при угле подхода волн к откосу $\beta=30°$ практически высота наката волны близка к получаемой при фронтальном подходе. Наблюдаемые отклонения опытных и расчетных значений фронтальной волны $\pm 10\%$ находятся в пределах точности измерения максимальных осредненных показаний $h_в$.

Таким образом, эти исследования показали, что в настоящее время для практических расчетов высоту наката волны следует определять, исходя из условия фронтального подхода.

Результаты проведенных исследований по определению скоростей наката и ската волны по откссу показали, что максимальные скорости большей частью наблюдаются в зоне уровня покоя воды; ниже и выше этой зоны скорости уменьшаются. Скорости ниже места удара волны близки к скоростям распространения волны. Характер распределения скоростей в надводной части откоса хорошо согласуется с выводами Н. Н. Джунковского [10].

Максимальная скорость наката волны на откос увеличивается по мере увеличения высоты и длины волны, крутизны откоса и угла β. С уполаживанием откоса накат волны почти всегда происходит при наличии незаконченного скатывания волны с откоса.

Результаты проведенных исследований показали, что при определении максимальной скорости на откосе на уровне покоя можно пользоваться приближенной зависимостью

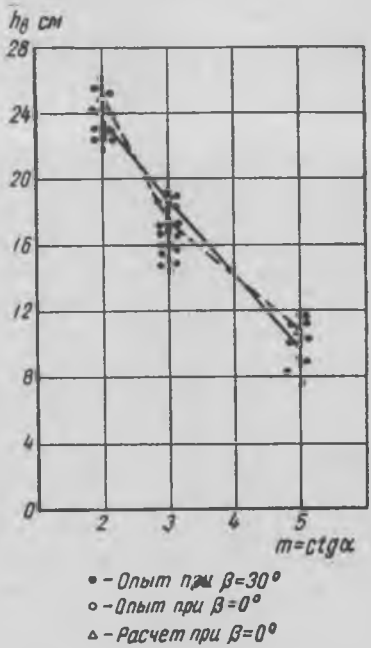


Рис. 58. График зависимости высоты наката волны $h_в$ от заложения откоса α и угла подхода волны β

$$v_{макс} \approx \sqrt{2gh_в},$$

где $h_в$— высота наката волны на откос по формуле (45).

§ 10. ЗАМЕЧАНИЯ К УСТАНОВЛЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАСЧЕТЕ БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

Как известно, при расчете действия разбитых волн на бетонное покрытие откосов гидротехнических сооружений до сего времени считали, что динамический характер воздействия разбитой волны во всех случаях может быть уподоблен статической нагрузке.

В действительности же следовало бы учитывать динамический характер нагрузки в виде весьма короткого импульса. Дело в том, что рассматриваемая упругая система в результате удара начинает совершать свободные колебания, которые могут сильно изменить характер взаимодействия волны и сооружения. В силу этого при оценке эффекта удара согласно теории колебаний необходимо преж-

де всего выяснить отношение продолжительности действия нагрузки к периоду собственных колебаний сооружения.

Сложность решения поставленной задачи состоит в том, что в рассматриваемом случае при оценке коэффициента динамичности применительно к расчету бетонного покрытия надо определить частоту собственных колебаний системы плита — грунт основания и установить характер и продолжительность действия силы.

Однако из предложенного нами приближенного теоретического решения, а также из рассмотрения ряда работ, посвященных этому вопросу [38, 47], можно установить, что применительно к расчету бетонного покрытия, исходя из учета продолжительности действия импульсного давления от разбитой волны и величины собственных колебаний системы плита — грунт основания, в отдельных случаях можно получить коэффициент динамичности меньше единицы. Это объясняется тем, что с увеличением размера плит бетонного покрытия заметно уменьшается частота свободных колебаний рассматриваемой системы, а следовательно, уменьшается и соотношение между этой частотой и частотой возмущающей силы удара волны.

Таким образом, с теоретической точки зрения, можно уменьшить расчетную волновую нагрузку и вместо формулы (36) в расчет вводить величину, определяемую примерно по зависимости (39), т. е. основываться на учете «навала» осциллографической записи (см. рис. 42).

Но мы считаем, что в практических расчетах этого пока делать не надо по следующим соображениям. Как известно, в настоящее время при решении вопроса о прочности бетонного покрытия (определение изгибающего момента в плите от волнового воздействия) по известным методам расчета конструкций на упругом основании исходят из предположения, что плита плотно соприкасается с грунтом основания — откоса. Вместе с тем из приведенных выше данных, вытекающих из опыта эксплуатации построения сооружений, следует, что под плитами наблюдаются значительные просадки грунта и образование отдельных пустот, вследствие чего фактически плита работает не на сплошном основании, а на отдельных упругих опорах, т. е. в менее благоприятных условиях. В силу этого из-за осторожности в расчет надо вводить полное давление, определяемое формулой (36).

При определении изгибающего момента в плите бетонного покрытия необходимо установить максимальное результирующее давление на плиту, т. е. суммарную разницу давлений на плиту сверху и снизу. Исходя из имеющихся опытных данных, можно установить, что результирующее давление на плиту всегда достигает наибольшей величины в момент удара волны.

С учетом конструктивных особенностей бетонного покрытия при определении расчетной схемы были рассмотрены следующие возможные случаи: 1) закрытые швы между плитами в пределах всего откоса; 2) открытые швы между плитами в нижней части и закрытые—

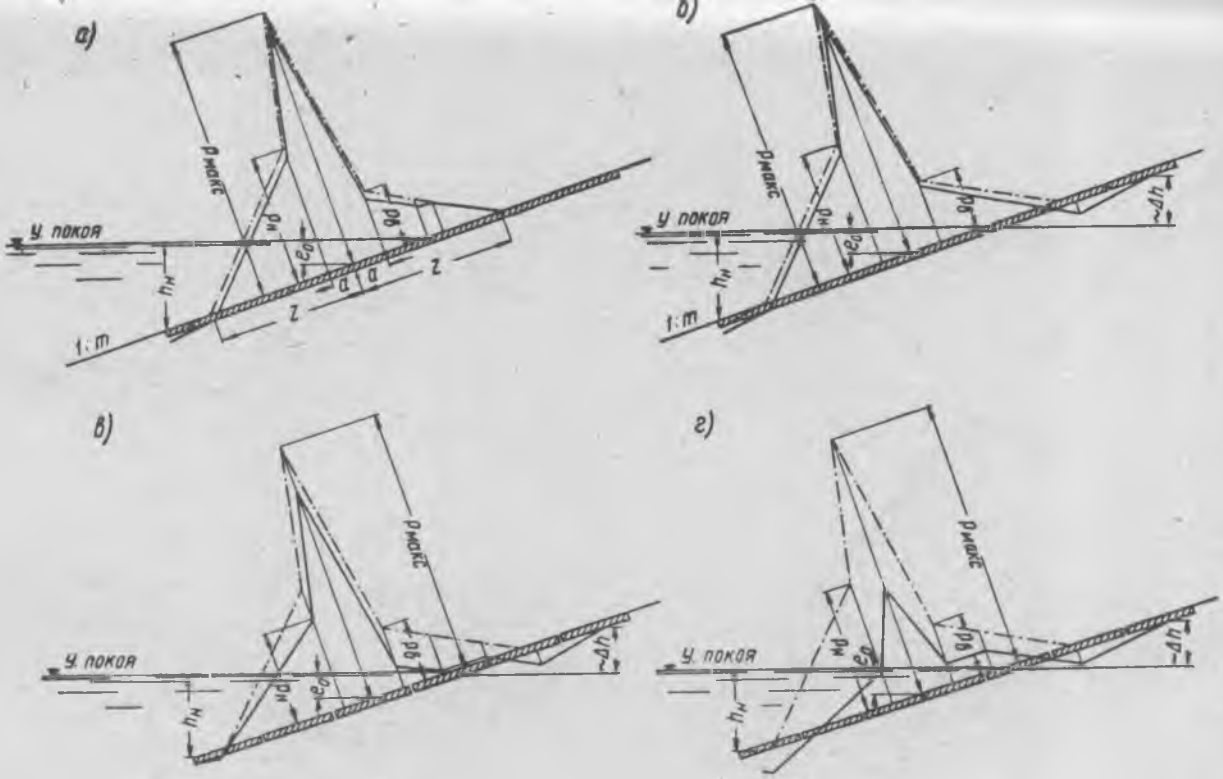


Рис. 59. Результирующие эпюры давлений на плиту в момент удара волны:

а — при закрытых швах между плитами в пределах всего откоса; *б* — при закрытых швах в нижней части и открытых в верхней части откоса; *в* — удар в центр плиты при открытых швах между плитами; *г* — удар в шов между плитами при открытых швах

в верхней; 3) удар волны в центр плиты при открытых швах между плитами в пределах всего откоса; 4) удар волны в шов при открытых швах между плитами в пределах всего откоса.

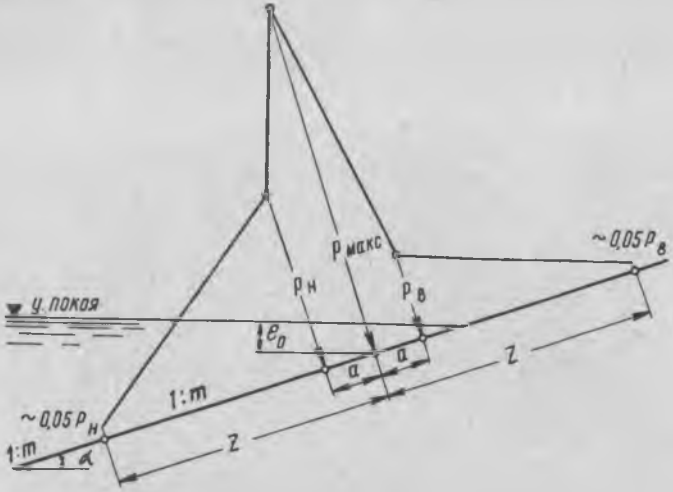


Рис. 60. Схема построения эпюры волнового давления на откос в момент удара волны

Сопоставляя полученные эпюры (рис. 59), можно установить, что наибольшая волновая нагрузка соответствует первому случаю. Так как в начальный период работы бетонного покрытия, т. е. при закрытых швах в пределах всего откоса, такой случай может быть в действительности, считаем правильным расчетную нагрузку определять по первой схеме.

Вместе с тем, учитывая незначительную разницу между избыточным давлением сверху (пунктир с точкой) и общим результирующим давлением (при обычных толщинах бетонного покрытия), для ускорения расчета за суммарную эпюру нагрузок на плиту рекомендуется принимать эпюру избыточного давления волны на откос, т. е. принимать нагрузку согласно схеме, показанной на рис. 60, и расчетным формулам (36), (37), (40).

ГЛАВА III

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ ОТКОСА НА ДЕЙСТВИЕ ВЕТРОВОЙ ВОЛНЫ

§ 11. КРАТКИЙ ОБЗОР ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО РАСЧЕТУ БЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

В прошлом при проектировании бетонных покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений толщину их определяли из условия устойчивости на всплывание. По этому условию устойчивость непроницаемого покрытия, опущенного на глубину $h_н$

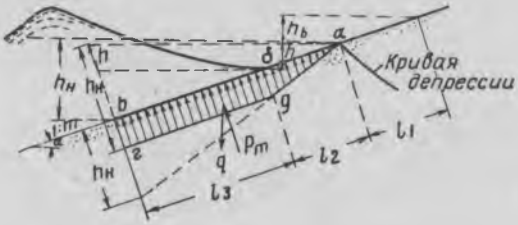


Рис. 61. Расчетная схема для непроницаемого покрытия откоса

(рис. 61), обусловливается разностью гидростатического и взвешивающего давлений, при этом предполагается, что гидростатическое давление сверху на момент скатывания волны с откоса будет сниженным на половину высоты волны. Как показали проверочные расчеты, для соблюдения этого условия требуется бетонное покрытие значительной толщины, вследствие чего сильно удорожается стоимость всего сооружения.

Описанный метод расчета основан на произвольных допущениях и не совсем отвечает физической сущности взаимодействия волны с бетонным покрытием откоса. Результаты расчетов по данному методу не подтверждаются материалами экспериментальных исследований, о чем подробно будет изложено ниже.

Недостатки и условность данного метода привели к необходимости выполнения специальных исследований устойчивости бетонных покрытий при воздействии на них ветровых волн.

К первой работе по данному вопросу относятся исследования проф. Б. А. Пышкина [41], который на основе лабораторных исследований пришел к выводу о том, что плита на откосе имеет наименьшую устойчивость в момент максимального отката волны с откоса. Допуская, что суммарное противодавление по всей зоне бетонного покрытия постоянно и равно $p_m = 0{,}178\ (2h)$, и исходя из условия предельного равновесия плиты на откосе (условие на всплывание), проф. Пышкин получил следующую зависимость для определения толщины бетонного покрытия:

$$\delta = \gamma\eta \frac{0{,}178\,(2h)}{(\gamma_n - \gamma)\cos\alpha}, \qquad (47)$$

где η — коэффициент запаса, равный 1,25÷1,50;

$2h$—высота волны;

γ_n— объемный вес материала плиты;

α — угол наклона откоса к горизонту;

γ — объемный вес воды.

В следующей своей работе [42] Пышкин рекомендует толщину бетонного покрытия определять исходя из условия давления волны на грунт

$$\delta = p : 2\sigma,$$

где p — максимальное давление волны, равное 3 $(2h)$;

σ — допустимое давление на грунт.

Исследования проф. П. К. Божича, проведенные также в лабораторных условиях, показали, что величина суммарного волнового противодавления может достичь $p_m = 0{,}28(2h)$. В силу этого в формулу (47) он предлагает ввести поправочный коэффициент, равный 1,6. Следует заметить, что при лабораторных опытах Божича отсутствовал подстилающий слой, т. е. не было обратного фильтра, в результате чего суммарное противодавление получилось увеличенным.

Недостаток формулы (47) состоит в том, что в ней не учитываются размеры бетонного покрытия в плане и длина исходной волны; кроме того, нельзя признать правильным допущение о постоянстве суммарного волнового противодавления p_m для всех типов бетонного покрытия. Вследствие этого данная формула с некоторым приближением может быть применена лишь для плит сравнительно небольшого размера.

В работе В. А. Денисовой [11] приведены некоторые данные лабораторных исследований воздействия ветровых волн на непроницаемые покрытия откосов земляных напорных плотин. На основании результатов этих исследований В. А. Денисова приходит к выводу о необходимости учитывать экранирующий эффект непроницаемого покрытия, который может достичь 20% полного перепада в створе начала кривой депрессии. Учитывая, что устройство отверстий в бетонном покрытии влечет за собой повышение уровня воды за

креплением, Денисова предлагает отказаться от применения дырчатых плит. Кроме того, она отмечает, что периодическое понижение гидростатического давления на откос при волнении не превышает $\frac{1}{3}$ $(2h)$ и распространяется на глубину до 1,5 $(2h)$.

С выводами Денисовой о том, что дырчатые отверстия во всех случаях приводят к повышению суммарного избыточного давления, согласиться нельзя. Как показали опыты, проведенные Я. Э. Гугняевым [9], плиты с отверстиями, составляющими 14—18% площади плиты, более устойчивы, чем сплошные плиты.

М. И. Лупинский [34] провел специальные лабораторные исследования устойчивости бетонных плит при действии на них волнового потока. Заслуга Лупинского в том, что он впервые указал на необходимость учета размеров плит в плане, причем с качественной стороны его оценка учета размера плит оказалась вполне правильной.

Используя уравнение предельного равновесия плиты на откосе и допуская равномерное распределение избыточного волнового взвешивания под плитой в пределах всего откоса, он получил зависимость, близкую к (47). Разница заключается только в том, что в зависимости Лупинского учтено влияние размера плиты. Поправочный коэффициент определен им на основании лабораторных опытов с учетом предельного равновесия плит на откосах. Зависимость Лупинского имеет следующий вид:

$$\delta = \frac{0{,}11\,(2h)}{(\gamma_n - 1)\sqrt{b}\cos\alpha}, \tag{48}$$

где b — длина ребра плиты (по откосу).

В работе И. Я. Андрейчука [1] приведены результаты лабораторных исследований по расчету бетонных плит на откосах земляных плотин с учетом воздействия ветровых волн (исследование ВНИИГа имени Б. Е. Веденеева).

Оценивая взаимодействие волны и бетонного покрытия откоса, Андрейчук различает два момента: момент обрушения волны на откосе и момент, предшествующий обрушению волны. Для этих моментов он получил соответствующие эпюры избыточных давлений (только для откоса 1 : 3 и крутизны волны $\frac{1}{13}$: $\frac{1}{15}$). Им также было установлено, что затухание пика давления под плитой увеличивается с уменьшением коэффициента фильтрации грунта подготовки. На основании проведенных опытов Андрейчук рекомендует эпюры нагрузок для расчета плиты на прочность и устойчивость.

Недостаток предложения Андрейчука, по нашему мнению, состоит в том, что наихудшим моментом для расчета плиты на устойчивость он считает момент удара волны, а не момент, предшествующий этому удару; кроме того, он не учитывает влияния длины волны и заложения откоса и т. п.

Для расчета бетонных покрытий на волновое воздействие боль-

шой интерес представляют исследования, выполненные Е. В. Курловичем [21]. На основании проведенных лабораторных опытов им предложены эмпирические зависимости для построения эпюр волнового давления и волнового взвешивания. Причем для расчета плиты на прочность максимальное местное давление на откосе он рекомендует принимать по формуле Н. Н. Джунковского с поправочными коэффициентами; для построения кривой давления предлагает сложные эмпирические зависимости, а для расчета плиты на устойчивость в подводной части откоса рекомендует строить профиль волны на момент прохождения впадины и по этому профилю определять гидростатическое давление (т. е. давление сверху).

Основываясь на сравнительных расчетах и учитывая полученные эпюры волнового взвешивания, Курлович для определения толщины бетонного покрытия предложил следующую эмпирическую зависимость:

$$\delta = \frac{0{,}15\,(2h)}{(\gamma_n - 1)\cos\alpha}\sqrt[3]{\frac{L}{1+b}}, \qquad (49)$$

где δ — толщина плиты в *м*;

b — сторона квадратной плиты в *м*;

γ_n — объемный вес материала в $т/м^3$;

$2h$ — высота волны в *м*;

L — полудлина волны в *м*;

α — угол наклона стенки к горизонту.

Кроме того, Курлович дает некоторые практические рекомендации в части конструирования и расчета бетонного покрытия откосов.

Следует подчеркнуть, что несмотря на значительное количество исследований, проведенных по расчету бетонных покрытий на волновую нагрузку, до сего времени ряд вопросов остается невыясненным. Все это еще раз свидетельствует о сложности рассматриваемой проблемы.

§ 12. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыт эксплуатации бетонных покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений показал, что аварии, происходящие с этими покрытиями, связаны с нарушением их устойчивости в результате несоответствия между размером самого покрытия и волновыми нагрузками.

Некоторые авторы [11, 38] считают, что, кроме силовых воздействий волны на бетонное покрытие земляных плотин, во всех случаях следует учитывать так называемый «экранирующий эффект» самого покрытия, т. е. потерю фильтрационного напора в пределах покрытия. По опытным данным, а также по результатам теоретических расчетов [74] можно установить, что при закрытых швах бетонного покрытия и глубине заложения этого покрытия $1 \div 3(2h)$

потеря фильтрационного напора для однородных земляных плотин в пределах покрытия может достичь 15÷20% полного напора.

Однако, учитывая, что современные земляные плотины на водохранилищах почти всегда оборудуют мощными противофильтрационными устройствами (в виде экрана, ядра, зуба и т. п.) и что неизбежны раскрытия швов между плитами в процессе эксплуатации сооружений, мы считаем возможным не вводить в расчет «экранирующий эффект».

Цель лабораторных исследований волнового взвешивающего давления — выяснить следующие вопросы: а) установить характер изменения волнового взвешивания под бетонным покрытием; б) определить величины избыточных и суммарных давлений на бетонные покрытия; в) установить влияние некоторых конструктивных элементов на величину противодавления; г) определить величины результирующих давлений на покрытия; д) установить схемы расчета устойчивости бетонного покрытия.

Лабораторные исследования были проведены при разных размерах моделируемых плит (от 5 до 45 *см*), различных типах подстилающего основания, открытых и закрытых швах между плитами; различных заложениях откосов (от 1 : 2 до 1 : 5), элементах исходной волны (табл. 8) и глубине воды в бассейнах (от 30 до 70 *см*). Методика проведения опытов и применяемая при этом аппаратура описаны в § 5. Здесь же остановимся на некоторых особенностях обработки данных экспериментальных исследований.

Таблица 8

Характеристика моделируемых волновых режимов

№ режима	$2h$ *см*	$2L$ *см*	$\frac{2L}{2h}$	№ режима	$2h$ *см*	$2L$ *см*	$\frac{2L}{2h}$
I	16	280	17,2	V	15	150	10
II	15	150	10	VI	16	240	15
III	9	134	15	VII	12	240	20
IV	5	65	13	—	—	—	—

При проведении лабораторных исследований за исходную моделируемую волну принимали волну в условиях полного гашения ее энергии, которое достигалось при помощи специальных гасителей, устраиваемых в конце бассейна. Отклонения от этих исходных волн, получаемые при воздействии волны на откос, характеризовали влияние самого откоса. В отдельных опытах в случае необходимости устанавливали связь между элементами исходной волны и волны перед разбиванием на откосе.

При обработке осциллографических записей изучаемых процессов в лабораторных условиях за расчетные принимали элементы

тех волн, которые имели максимальную повторяемость на одной записи. Для каждого опыта записывали элементы первых восьмидесяти волн, что исключало ошибки, которые могли возникнуть вследствие отражения волн в бассейне.

На каждой осциллографической записи проводили нулевую линию, соответствующую начальным условиям опыта. При вычислении величин волновых давлений, в зависимости от доли периода волны, определяли положительное и отрицательное избыточное давление в данной точке модели, т. е. устанавливали отклонения величин от гидростатического давления. При проведении большинства опытов применяли синхронную запись изучаемых явлений в нескольких точках, что позволило получить наиболее надежные данные и проследить за характером осциллографических записей за весь период волны.

При оценке полученных материалов экспериментальных исследований выяснилась необходимость в установлении связи между давлением волны на откосе и профилем волны.

Согласно теории Стокса для прогрессивной волны потенциал скорости может быть определен из следующего выражения:

$$\varphi = \frac{hgT}{\pi} \cdot \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L}(z+H)}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} H} \sin \pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right).$$

В гидромеханике для безвихревого движения имеется такая зависимость:

$$\frac{p}{\rho} = -\frac{\partial \varphi}{\partial t} - gz.$$

После подстановки значения потенциала скорости в данное выражение и дифференцирования получаем давление волны в любой точке:

$$p = \gamma h \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L}(z+H)}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} H} \cos \pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) - gz.$$

Давление на поверхности $z=0$

$$p_0 = \gamma h \cos \pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right).$$

Давление на дне ($z=-H$)

$$p_к = \gamma H + \gamma h \frac{\cos \pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)}{\operatorname{ch} \pi \frac{H}{L}}.$$

Из основного приведенного выражения для φ определяем соответствующие скорости

$$v_x = \frac{hgT}{L} \cdot \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L}(z+H)}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} H} \cos \pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right);$$

и

$$v_z = \frac{hgT}{L} \cdot \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi}{L}(z+H)}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} H} \sin \pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right).$$

Для определения траектории частиц можно написать такую зависимость:

$$x = x_0 - h \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L}(z_0 + H)}{\operatorname{sh} \frac{\pi}{L} H} \sin \pi \left(\frac{x_0}{L} - \frac{t}{T}\right)$$

и

$$z = z_0 + h \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi}{L}(z_0 + H)}{\operatorname{sh} \frac{\pi}{L} H} \cos \pi \left(\frac{x_0}{L} - \frac{t}{T}\right),$$

где x_0 и z_0 — координаты первоначального положения частицы, x и z — координаты той же частицы в момент времени t.

Для построения профиля волны, полагая $z_0=0$, будем иметь

$$\left.\begin{aligned} x &= x_0 - h \operatorname{cth} \frac{\pi}{L} H \sin \pi \left(\frac{x_0}{L} - \frac{t}{T}\right) \\ \text{и} \quad z &= h \cos \pi \left(\frac{x_0}{L} - \frac{t}{T}\right) \end{aligned}\right\}.$$

Проанализируем полученные выражения на конкретном примере. Пусть $2h=3$ *м*; $2L=30$ *м*; $H=5$ *м* и $H=10$ *м*. При этих значениях находим: $h_0=0{,}3$ *м* (для $H=5$ *м*) и $h_0=0{,}24$ *м* (для $H=10$ *м*). При расчетах полагаем $t=\frac{T}{2}$ и задаемся $x_0=7{,}5 \div 22{,}5$, т. е. в пределах $L=22{,}5-7{,}5=15$ *м*. По результатам расчетов строим кривые профиля волны и давления на дне водоема (рис. 62). Из рассмотрения полученных результатов устанавливаем, что при относительно малых глубинах ($\frac{H}{L}<0{,}333$) кривая давления на дне практически вписывается в приведенный профиль волны (максимальное расхождение $\pm 5\%$). При больших глубинах наблюдается заметное

расхождение в рассматриваемых кривых, причем при $\frac{H}{L} > 1$ волновое давление на дне водоема практически равно нулю.

Таким образом, теоретические исследования показывают, что при относительно небольших глубинах воды давление на дне можно оценить по профилю рассматриваемой волны, т. е. по закону гидростатики. На откосах мы имеем весьма небольшие относительные глубины, что дает основание оценивать суммарное давление по профилю волны.

Рассмотренный нами случай относится к горизонтальному дну, т. е. к постоянной глубине водоема. В условиях откосных сооружений глубина воды меняется, в силу чего при строгом рассмотрении поставленной задачи, казалось бы, нет основания для распространения полученных выводов на случай с изменяющимися глубинами.

Для ответа на поставленный вопрос была проведена специальная серия опытов при различных элементах исходной волны и откоса с заложением 1÷3,5. На рис. 63 представлены профили волны через $\frac{1}{8}$ периода для двух режимов, построенные по материалам киносъемки.

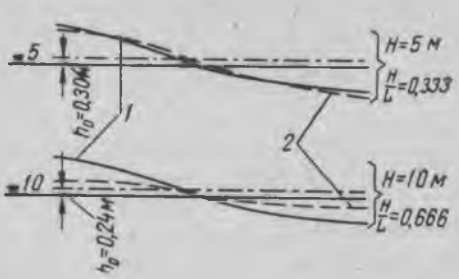


Рис. 62. Сравнение профиля волны с давлением на дне при $2h=3$ *м*, $2L=30$ *м* (по теоретическим подсчетам): *1*—профиль волны; *2*—кривая давления на дне

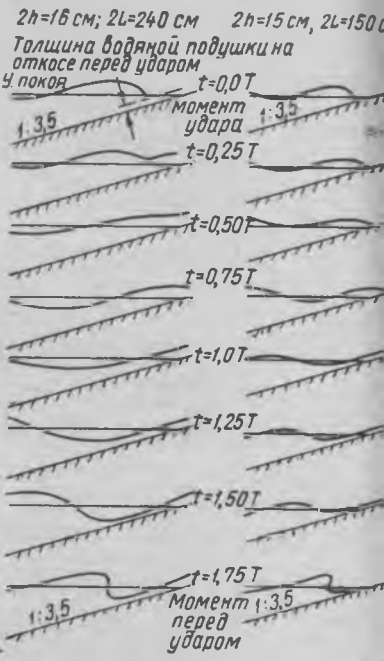


Рис. 63. Профили волны через периода по данным киносъемки

Из рассмотрения полученных данных прежде всего можно установить, что максимальное обнажение откоса во всех случаях наблюдается при прохождении впадины волны над откосом. Перед моментом удара ($t=1{,}75\ T$) профиль волны принимает своеобразный характер: гребень волны несколько повышается над уровнем покоя (по сравнению с гребнем исходной волны), передний склон принимает форму вертикального уступа.

Заметим, что в последующем изложении: а) избыточным волновым давлением мы называем сверхгидростатическое давление в рассматриваемой точке; б) избыточным активным давлением — давление на верхнюю (лицевую) часть бетонного покрытия; в) избыточным взвешивающим давлением — давление на нижнюю (тыловую) часть бетонного покрытия; г) суммарным давлением сверху (на лицевую часть)—алгебраическую сумму гидростатичес-

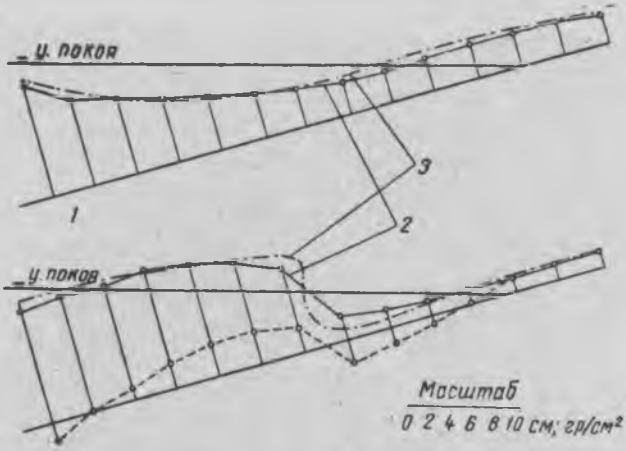


Рис. 64. Совмещение профиля волны с суммарным давлением на откосе:

1—избыточное активное давление; *2*—суммарное давление; *3*—профиль волны

кого и избыточного давлений в рассматриваемой точке; д) суммарным давлением снизу (на тыловую часть) — алгебраическую сумму гидростатического и избыточного взвешивающего давлений.

На рис. 64 представлены совмещенные эпюры давлений на откос: суммарного давления, полученного экспериментальным путем, и давления, определенного по профилю волны. Опытные данные относятся к случаю $2h=16$ *см*, $2L=240$ *см*, $m=3{,}5$ для $t=1T$ в момент прохождения впадины волны над откосом и для $t=1{,}75\ T$ в момент перед ударом волны, т. е. для основных расчетных случаев, необходимых при изучении работы бетонного покрытия на устойчивость.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что при оценке суммарного давления на поверхности откоса с достаточной степенью точности можно исходить из соответствующего профиля волны. Зафиксированное расхождение между суммарным давлением и приведенным профилем волны находится в пределах точности аппаратуры, применяемой в лабораторных условиях.

На основании изложенного при оценке суммарного давления волн на откос в ряде случаев при отсутствии достаточных опытных данных в расчет принимался соответствующий приведенный профиль волны.

§13. ИЗБЫТОЧНЫЕ И СУММАРНЫЕ ДАВЛЕНИЯ НА БЕТОННОЕ ПОКРЫТИЕ

Так как вопрос о расчете плит на устойчивость является одним из основных, считаем необходимым более подробно остановиться на результатах экспериментальных исследований и прежде всего установим общий характер изменения волнового взвешивающего давления под бетонным покрытием.

Полученные осциллографические записи показывают, что величина и характер волнового взвешивания в отдельных точках зависят от времени и места удара волны на откос. В момент удара волны в открытый шов между плитами взвешивающее давление под плитой распределяется в виде упругого удара, передаваемого покрытию жидкой средой, заполняющей поры обратного фильтра. При этом осциллографическая запись величины волнового взвешивания напоминает характер записи активного давления, т. е. характер импульсного давления.

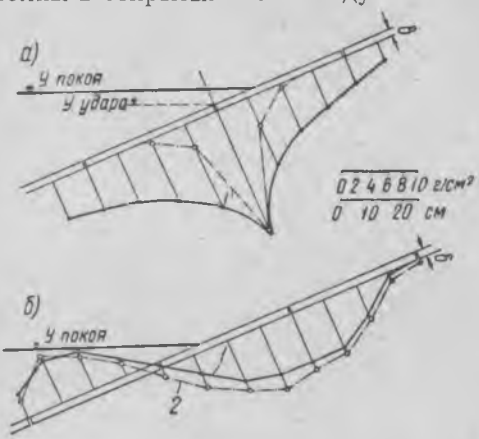


Рис. 65. Кривые избыточных давлений под плитой в зависимости от времени удара и состава подстилающего слоя (лабораторные данные):

а — $t=0{,}0T$ — момент удара волны; *б* — $t=1{,}0T$ момент максимального отката волны с откоса; *1*—при сплошном фильтре, *2*—при ленточном фильтре

Затем в толще подстилающего слоя наблюдается образование более сложного неустановившегося фильтрационного потока, характер которого также зависит от размера и состава подстилающего слоя. В этом случае общая картина изменения величины взвешивающего давления в отдельных точках не имеет сколько-нибудь заметных пиков давлений и по существу приближается к картине изменения самой волны, записанной осциллографом.

Первая серия опытов касалась выяснения характера и величины волнового взвешивающего давления под плитой в зависимости от состава подстилающего слоя. Опыты были проведены для двух случаев: при сплошном обратном фильтре под плитами с размерами частиц $d_{cp}=2\div4$ *мм* и при ленточном фильтре с размерами частиц грунта под остальной частью плиты $d_{cp}=0{,}25$ *мм*. В результате опытов были получены соответствующие эпюры волнового взвешивающего давления под плитой. Часть этих эпюр показана на рис. 65.

Из рассмотрения полученных материалов можно установить, что в момент удара волны в открытый шов между плитами волновое взвешивающее давление увеличивается по мере увеличения размера частиц подстилающего слоя, затем наблюдается обратная картина. Характерно, что в период удара волны зона повышенного давления весьма ограничена — на некотором расстоянии от места удара под плитой уже не наблюдается влияния этого удара.

Таким образом, первый цикл экспериментальных исследований показал, что для правильной оценки работы бетонного покрытия в условиях волнового воздействия необходимо различать два момента: а) момент удара волны в шов между плитами (стадия упругого удара) и б) момент после удара волны (стадия фильтрационного потока). Иными словами, для правильного решения вопроса об устойчивости бетонного покрытия необходимо проследить и изучить характер изменения волнового взвешивания за полный период волны.

Вторая серия лабораторных исследований касалась выяснения влияния открытых и закрытых швов между плитами на характер и величину волнового давления в пределах всей зоны крепления.

На основании обработки осциллографических записей были построены кривые изменения избыточных взвешивающих давлений под плитой через $\frac{1}{8}$ периода волны для различных исходных условий (для трех размеров плит в плане), для различных волновых режимов и при разных заложениях откосов.

В качестве примера на рис. 66 представлен один из таких графиков, на котором для сравнения показаны также кривые изменения соответствующего активного давления на плиту (давления сверху). Из данного графика следует, что величина и характер волнового взвешивания под плитами, находящимися выше уровня покоя воды, не претерпевают существенного изменения в пределах всего периода волны, исключая момент удара волны в шов ($t=0$, T); тем не менее абсолютная величина этих давлений достигает минимального значения для момента перед ударом волны ($t=1{,}75\ T$).

Основной особенностью рассматриваемого случая является то, что при открытых швах между плитами в процессе воздействия волны на откос с тыловой стороны под плитами устанавливается динамический уровень (см. рис. 66). Характерно, что величина динамического напора Δh за весь период волны существенно не изменяется.

Несколько иная картина наблюдается в зоне откоса ниже уровня покоя. В этой зоне за полный период волны изменяется как величина волнового взвешивания, так и его знак. Такое различие обусловливается тем, что в верхней зоне величины волнового взвешивания зависят от характера фильтрационного потока и положения динамического уровня под плитами; во второй зоне взвешивающее волновое давление в большей мере зависит от профиля волны, воздействующей на откос.

На характере и форме эпюр избыточных давлений в некоторой мере сказывается размер плит, т. е. количество конструктивных швов между плитами, причем величина противодавления несколько увеличивается с увеличением размера плиты, а следовательно, и с уменьшением количества швов. Однако практически разница в

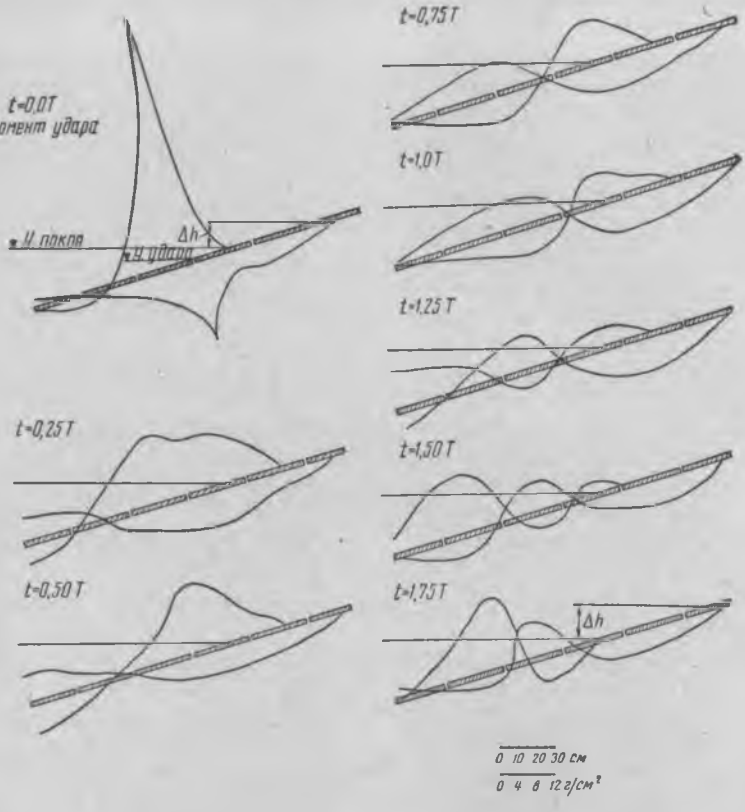


Рис. 66. Кривые избыточных активного и взвешивающего давлений при ударе волны в шов между плитами через $^1/_8$ периода волны при открытых швах между плитами (при $2h=16$ *см*, $2h=240$ *см* и $m=3,5$):

1 — избыточное активное давление; *2* — избыточное взвешивающее давление.

этих величинах не имеет особенного значения, а разное количество швов влияет лишь на время достижения максимального динамического уровня под плитой.

Для расчета бетонного покрытия на устойчивость в конечном итоге необходимо иметь суммарную эпюру давлений на плиту, т. е. разность давлений сверху и снизу. Для получения таких эпюр было рассмотрено значительное количество опытных данных. В качестве примера на рис. 67 представлены результирующие эпюры

давлений на бетонное покрытие откоса при ударе волны в шов между плитами, построенные через $\frac{1}{8}$ периода волны.

Величина результирующего давления, т. е. разность соответствующих давлений сверху и снизу, за период времени после удара ($t=0{,}25\ T$) и до удара ($t=1{,}75\ T$) в основном определяется величиной

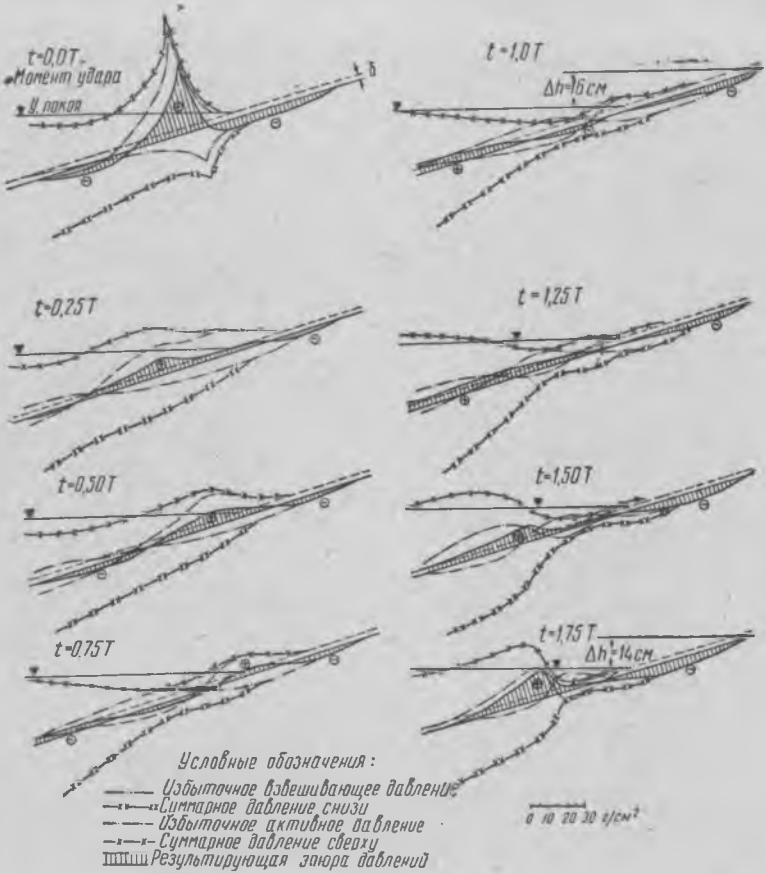


Рис. 67. Результирующие эпюры давлений на бетонное покрытие откоса через $^1/_8$ периода волны при ударе волны в шов между плитами

волнового взвешивания (для верхней зоны) и профилем волны (для нижней зоны) при прохождении впадины волны над откосом. Величина результирующего давления для верхней зоны увеличивается по мере ската волны с откоса и, как правило, достигает максимума перед ударом волны. Причем местные давления увеличиваются по мере увеличения размера исходной волны, т. е. с увеличением высоты наката волны на откос.

Сопоставляя величины результирующих давлений для момента перед ударом и в момент удара, можно установить, что в последнем случае, в зоне непосредственного удара, это давление направле-

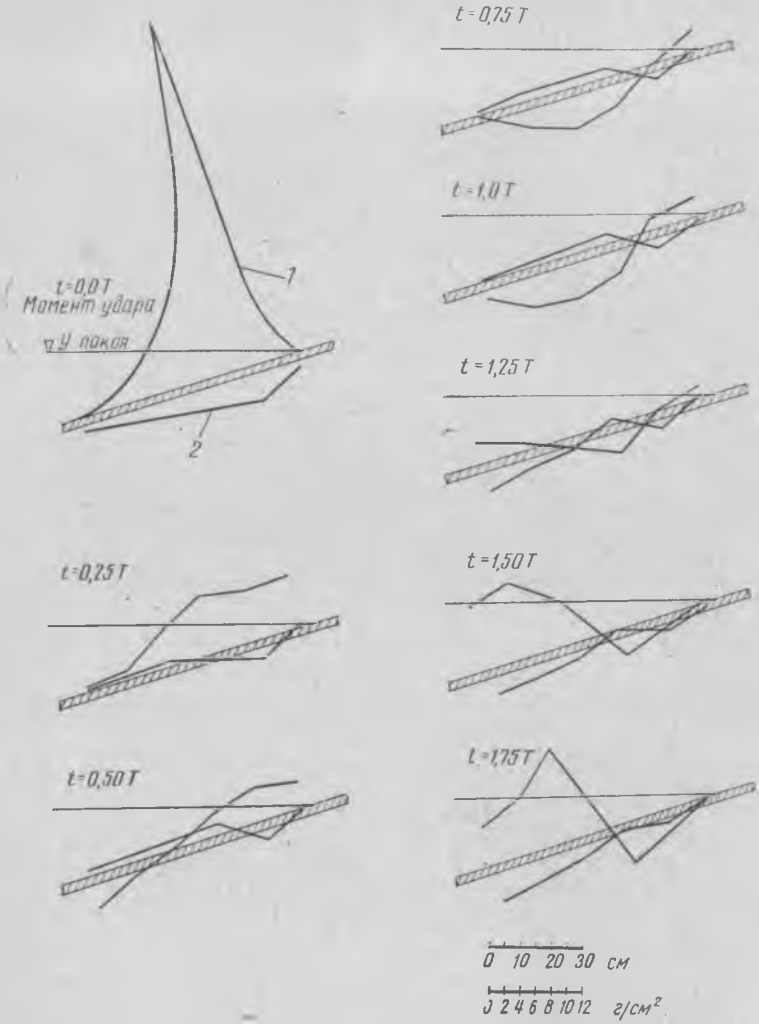


Рис. 68. Кривые избыточных активного и взвешивающего давлений на бетонное покрытие откоса через $^1/_8$ периода волны при закрытых швах между плитами (лабораторные данные):
1 — избыточное активное давление; *2* — избыточное взвешивающее давление

но вниз, а следовательно, способствует устойчивости расположенных здесь плит. Выше и ниже этой зоны результирующее давление направлено вверх, что ухудшает условия устойчивости плит.

Общую результирующую нагрузку для расчета плит на устойчивость следует принимать не в момент удара волны, а в момент перед ударом. На необходимость расчета плит на устойчивость на момент перед ударом указывают и специально проведенные опыты по устойчивости плит на откосе по предельному равновесию, о чем будет сказано ниже.

Полученные выводы соответствуют случаю открытых швов и наличию сплошного фильтра под плитами. Для закрытых швов в

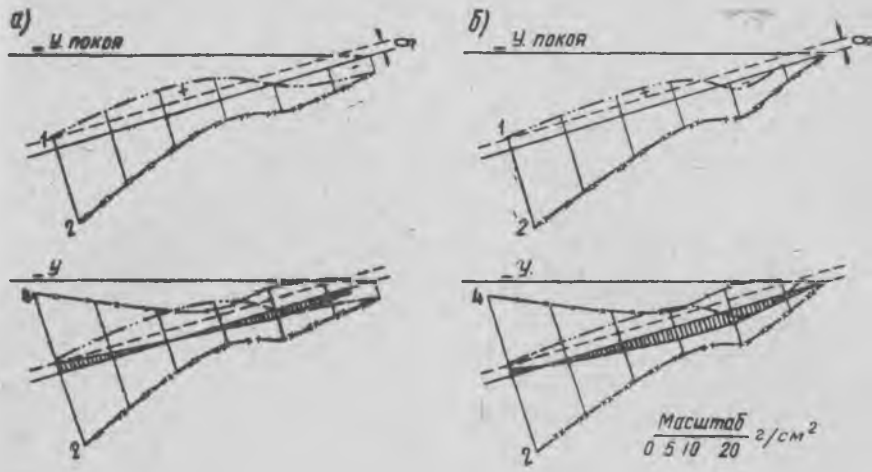


Рис. 69. Сопоставление результирующих эпюр давлений на бетонное покрытие для случаев открытых и закрытых швов между плитами (для момента $t=1\ T$)

а — при открытых швах; *б* — при закрытых швах; *1* — избыточное взвешивающее давление; *2* — суммарное давление снизу; *4* — суммарное давление сверху

качестве примера на рис. 68 представлены кривые изменения величин избыточных давлений (по опытам № 101—105). Как видно, для этого случая, из-за отсутствия динамического уровня за плитой, наблюдается несколько иная картина (см. рис. 66).

Результирующие давления как при открытых, так и при закрытых швах приведены на рис. 69.

Таким образом, результаты второго цикла исследований позволили установить, что при расчете на устойчивость бетонного покрытия за расчетные эпюры результирующих давлений следует принимать эпюры, соответствующие моменту времени $t=1{,}0\div1{,}75\ T$, и, в частности, эпюры, относящиеся к моменту прохождения впадины волны над откосом.

Проведенные опыты показали, что при непроницаемом покрытии (т. е. при закрытых швах) не всегда взвешивающее давление под плитами следует принимать равным гидростатическому давлению на нижнюю грань плиты при спокойном уровне воды.

Такая рекомендация справедлива лишь при значительном заглублении низа крепления в подводной части и при абсолютной водонепроницаемости самого крепления.

Для оценки влияния отметки низа бетонного крепления на величину взвешивающего давления были построены соответствующие эпюры при сплошном фильтре, заложении откоса 1 : 3,5, закрытых швах между плитами и $h_н$=22; 13 и 5 *см*.

Из результатов исследований вытекает, что в пределах времени $t=0,T \div 1,T$ отрицательное взвешивающее давление (меньше гидростатического) увеличивается по мере уменьшения зоны крепления откоса, т. е. с уменьшением значения $h_н$. В пределах времени $t=1,T \div 1,75\ T$ наблюдается увеличение положительного взвешивающего давления по мере уменьшения $h_н$. Исследования также показали, что с повышением отметки низа крепления откоса, т. е. с уменьшением $h_н$, работа плиты на устойчивость улучшается.

§ 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ИЗБЫТОЧНЫХ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩИХ ДАВЛЕНИЙ НА БЕТОННОЕ ПОКРЫТИЕ

Волновое взвешивающее давление на бетонные плиты зависит от ряда факторов, в том числе от: 1) размеров волн ($2h$; $2L$); 2) расположения швов между плитами; 3) заложения откоса; 4) размеров плит в плане; 5) конструкции подстилающего слоя; 6) отметки заложения низа бетонного покрытия и т. п.

Качественная оценка последних трех факторов была дана выше, поэтому здесь остановимся лишь на дополнительных значениях.

Рассматривая полученные эпюры взвешивающего давления, можно установить, что при открытых горизонтальных швах в зоне, расположенной выше уровня покоя, взвешивающее давление в центре плиты (для относительно большого размера плит) по сравнению с соответствующим давлением у шва будет несколько больше. При плитах относительно малого размера существенной разницы давлений не зафиксировано. Если горизонтальные швы не заливаются, давление в центре плиты по сравнению с давлением у шва будет несколько меньше.

Как было показано выше, при оценке влияния конструкции подстилающего слоя на величину волнового взвешивающего давления следует различать в основном два случая: 1) плиты расположены непосредственно на песчаном основании, 2) плиты расположены на сплошном обратном фильтре. В опытах тело модели выполняли из мелкозернистого песка с содержанием до 60% частиц крупностью 0,10÷0,25 *мм* и до 30% крупностью 0,25÷0,50 *мм*.

Обратный фильтр выполняли толщиной 20 *мм* из частиц двух размеров: 2÷4 и 4÷6 *мм*.

С учетом отмеченных в предыдущем параграфе соображений по оценке работы ленточных фильтров все последующие исследования были поставлены при сплошном обратном фильтре под плитами. Опыты показали, что принятые в них две градации частиц

фильтра не дали разницы в величине давления, поэтому в дальнейших опытах обратный фильтр выполнялся из частиц одной градации $d=2\div4$ *мм*.

Глубина заложения низа бетонного покрытия, как было отмечено выше, также оказывает влияние на величину волнового взвешивающего давления под плитами, расположенными в подводной части откоса. Однако учитывая, что в практических случаях низ основного бетонного покрытия, как правило, определяется глубиной, равной $h_н \approx 1\div1{,}5$ $(2h)$, для сокращения количества лабораторных опытов мы приняли в опытах данную глубину.

Средняя моделируемая толщина плит была принята $\delta_{ср}=25$ *мм*.

Заметим, что приведенные здесь эпюры избыточных и суммарных давлений построены относительно нижней плоскости, т. е. относительно линии соприкасания плит с подстилающим слоем.

Перейдем к количественной оценке величин избыточных и результирующих давлений в зависимости от конструкции бетонного покрытия.

1. Швы между плитами открыты в пределах всей зоны крепления.

Для данной схемы покрытия были рассмотрены три типа квадратных плит с размерами в плане 15×15; 30×30 и 45×45 *см*; швы имели ширину $1\div2$ *мм*.

В соответствии с характером образования избыточного и суммарного давлений на бетонное покрытие волновую нагрузку можно разделить на две зоны (см. рис. 67): первая (верхняя зона) начинается несколько ниже уровня покоя, вторая включает оставшуюся подводную часть откоса. Различаются эти зоны тем, что в первой максимальное результирующее давление (разность суммарных давлений на плиту снизу и сверху) всегда соответствует моменту перед ударом волны ($t\approx1{,}75\ T$), а второй совпадает с моментом прохождения над откосом впадины волны ($t\approx1\ T$).

Очертание эпюр волнового взвешивающего давления в верхней зоне зависит в основном от количества швов между плитами и положения динамического уровня под плитой (рис. 70). Вместе с тем, как видно из опытных данных, величина волнового взвешивания здесь за весь период волны не претерпевает существенного изменения, хотя несколько и отклоняется от среднего значения.

Образование динамического уровня под плитой связано с периодическим воздействием волнового потока на откос и с попаданием массы воды через открытые швы, т. е. вызывается разностью скоростей свободно скатывающегося потока на поверхности плит в момент отката волны и скоростей фильтрационного потока в порах подстилающего слоя. Волновое взвешивающее давление достигает максимальной избыточной величины в момент наибольшего наката волны на откос, а результирующее давление снизу вверх — в момент отката волны с откоса.

Полученный вывод в отношении изменения величин суммарных и избыточных давлений на бетонные покрытия в качественном от-

ношении согласуется с выводами других авторов, полученными ранее.

Учитывая, что все последующие расчеты бетонного покрытия на устойчивость связаны с динамическим напором под плитой Δh, прежде всего остановимся на получении для этой величины количественной зависимости.

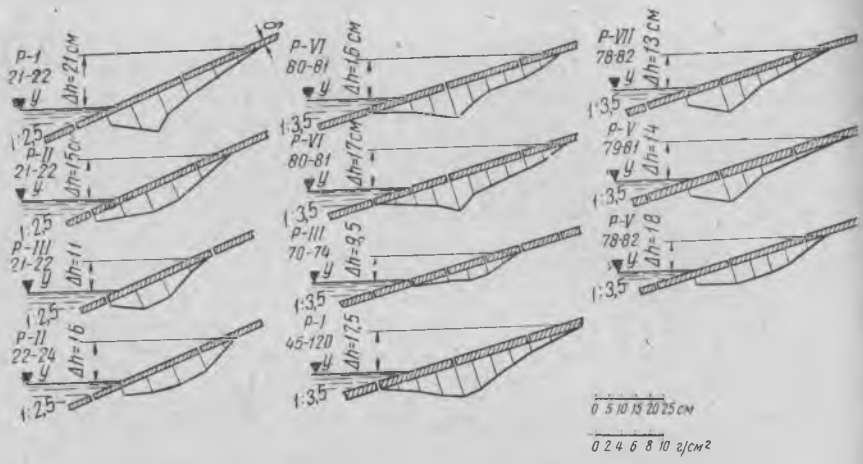


Рис. 70. Эпюры избыточного взвешивающего давления на бетонное покрытие при ударе в шов между плитами в момент $t=1\ T \div 1{,}75\ T$:

P—I — волновой режим I, *P*—V — волновой режим V; *21—22, 80—81, 78—82* — номера опытов

Заметим, что величины Δh в основном определяли с помощью датчиков давлений, расположенных под плитой вдоль откоса на расстоянии друг от друга $5 \div 6$ *см*. В табл. 9 приведены результаты замера возвышения динамического уровня над спокойным для откоса 1 : 3,5; аналогичные данные были получены и для других откосов ($m=2{,}5$ и $m=5$). Высоту наката волны в принятой расчетной схеме определяли по формуле (45) при $K_0=1{,}25$ и $K_б=1$. Исходные волновые режимы приведены в табл. 8.

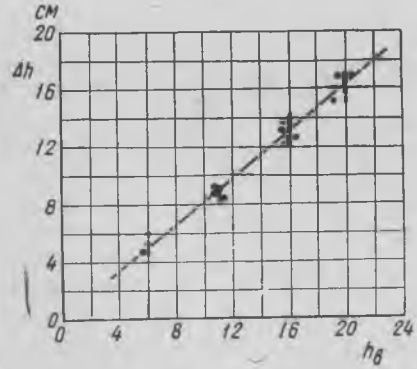


Рис. 71. График зависимости $\Delta h = f(h_в)$ для случая $m=3{,}5$

Рассматривая полученные данные, а также график (рис. 71), можно установить прямую связь между величинами Δh и $h_в$. Эта связь в общем виде может быть представлена как

$$\Delta h = K h_в. \qquad (50)$$

Таблица 9

Возвышение динамического уровня за плитой для откоса 1 : 3,5

№ волнового режима	h, см	Δh, см	$\frac{\Delta h}{2h}$	$\frac{\Delta h}{h_в}$	№ волнового режима	h, см	Δh, см	$\frac{\Delta h}{2h}$	$\frac{\Delta h}{h_в}$
I	20,0	17,0	1,06	0,85	III	11,0	8,0	0,89	0,73
		17,5	1,09	0,87			8,5	0,95	0,77
		17,0	1,06	0,85			9,0	1,00	0,82
		15,5	0,97	0,78			8,5	0,94	0,77
		15,0	0,94	0,75			9,0	1,00	0,82
II	16,0	12,0	0,80	0,75	IV	6,0	4,7	0,94	0,79
		13,5	0,90	0,84			4,5	0,90	0,75
		13,0	0,87	0,81			5,0	1,00	0,83
		12,0	0,80	0,75			6,0	1,20	1,00
		12,0	0,80	0,75					
		14,0	0,94	0,88	V	16,0	14,0	0,94	0,87
VII	10,0	13,0	1,07	0,81	VI	19,5	17,0	1,07	0,87
		12,0	1,00	0,75			15,0	0,94	0,77

Для рассматриваемого заложения откоса $m=3{,}5$, $K=0{,}82$ (см. рис. 71).

Примерно аналогичные зависимости были получены и для других заложений откосов, причем при $m=2{,}5$ $K\approx0{,}67$; при $m=5$ $K=0{,}9$. При этих данных для определения значения K была установлена зависимость

$$K \approx 1-\frac{2{,}2}{m^2},$$

подставив которую в выражение (50), окончательно получаем

$$\Delta h=\left(1-\frac{2{,}2}{m^2}\right)h_в. \qquad (51)$$

Таким образом, проведенные исследования показали, что динамический напор под плитами зависит как от параметров волны, так и от заложения откоса, причем он увеличивается по мере увеличения $2h$, $2L$ и уменьшения $m=\operatorname{ctg}\alpha$.

Более сложным оказалось построение расчетных эпюр избыточных давлений на бетонное покрытие откосов. В работах других авторов при расчете бетонных покрытий на устойчивость даны

рекомендации по построению избыточных давлений на плиту; необходимое суммарное давление в этих работах определяется с учетом соответствующего гидростатического давления.

Анализируя этот вопрос, мы пришли к выводу, что при построении расчетных эпюр следует исходить непосредственно из суммарной нагрузки, так как при этом значительно упрощается сам расчет и не надо определять избыточное давление на верхнюю поверхность плиты.

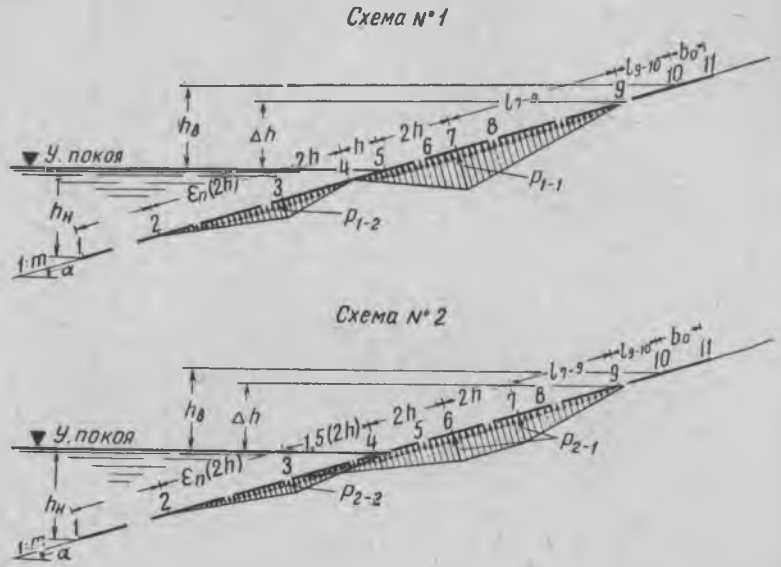


Рис. 72. Расчетные схемы определения суммарного давления на плиту по условию устойчивости (при открытых швах между плитами по всему откосу)

На основании рассмотрения эпюр суммарных давлений для построения расчетных эпюр можно предложить схемы, изображенные на рис. 72. По этим двум схемам, которые близки к действительным, в верхней зоне суммарная эпюра может быть представлена или в виде треугольника, или в виде трапеции.

Остановимся сначала на построении эпюр в верхней зоне. Для того чтобы построить данные эпюры, необходимо определить величины суммарных давлений p_{1-1} (в точке *7* на схеме № 1) и p_{2-1} (в точках *6* и *7* на схеме № 2), причем положение необходимых точек вдоль откоса при данном значении m по существу определяется высотой волны и величиной Δh (см. рис. 72).

При предварительном рассмотрении было установлено, что суммарные единичные давления p_{1-1} и p_{2-1} в основном зависят от динамического напора под плитой Δh. В силу этого при последующей обработке определяли зависимость $p=f(\Delta h)$. В качестве примера в табл. 10 приведены опытные данные значений p для откоса с заложением 1 : 3,5 (характеристика волновых режимов дана в табл. 8).

Из приведенных материалов следует, что максимальный и минимальный разброс опытных точек при оценке относительного суммарного давления $\frac{p}{\Delta h}$ в среднем находится в пределах $\pm 15\%$; такой разброс при принятых условных схемах вполне допустим.

Таблица 10

Опытные данные величин волнового взвешивающего давления для откоса 1:3,5

№ волнового режима	Δh *см*	p_{1-1} *г/см²*	$\frac{p_{1-1}}{\Delta h}$	№ волнового режима	Δh *см*	p_{2-1} *г/см²*	$\frac{p_{2-1}}{\Delta h}$
I	17,0	5,0	0,294	II	16,0	3,2	0,200
	17,5	4,7	0,269		13,5	2,5	0,185
	17,0	4,8	0,282		13,0	2,7	0,207
	17,0	5,2	0,306		12,0	2,5	0,208
	15,5	4,5	0,290		12,0	2,5	0,208
					14,0	2,8	0,200
II	12,0	3,6	0,298	III	8,5	1,8	0,212
III	8,0	2,0	0,250		9,0	1,9	0,212
	8,5	2,6	0,306		8,5	1,5	0,177
	9,0	2,6	0,290		8,0	2,1	0,232
	9,0	2,7	0,300				
IV	5,0	1,3	0,260	IV	5,0	1,2	0,240
	4,5	1,2	0,267		5,0	0,95	0,190
	5,0	1,2	0,240		5,0	0,85	0,190
					5,0	1,0	0,200
VI	16,0	4,3	0,268	VI	9,0	1,4	0,155
	17,0	4,8	0,282		6,1	1,2	0,196
	15,0	4,5	0,300				
VII	16,0	4,0	0,250	VII	14,0	3,0	0,214
	15,0	3,5	0 254		13,5	2,5	0,184

$$\Sigma \frac{p_{1-1}}{\Delta h} = 5 \qquad \Sigma \frac{p_{2-1}}{\Delta h} = 3{,}58$$

На основании данных, приведенных в табл. 10, можно получить

$$[p_{1-1}]_{cp} = \frac{\Sigma p_{1-1}}{\Delta h n} = \frac{5}{18} = 0{,}277$$

и

$$[p_{2-1}]_{cp} = \frac{\Sigma p_{2-1}}{\Delta h n} = \frac{3{,}58}{18} = 0{,}198,$$

где n — количество опытов, равное 18.

Таким образом, для рассматриваемого случая для определения суммарных единичных давлений можно рекомендовать такие зависимости:

$$\left.\begin{aligned} p_{1-1} &= 0{,}28\,\gamma\,(\Delta h) \\ \text{и} \quad p_{2-1} &= 0{,}2\,\gamma\,(\Delta h) \end{aligned}\right\}, \tag{52}$$

где Δh — определяется по формуле (51).

Аналогичная обработка была выполнена и для других заложений откоса, причем установлено, что формулы (52) могут быть применены при заложении откоса в пределах $m=2\div5$.

Наблюдаемое при этом отклонение соответствующих величин p_{1-1} и p_{2-1} (т. е. при $m=2$ и $m=5$) по сравнению с их значением при $m=3{,}5$, не имеет практического значения.

В результате рассмотрения эпюр суммарного давления для нижней расчетной зоны (см. рис. 72) была принята треугольная схема с соответствующими величинами p_{1-2} и p_{2-2}, положение которых определяется величиной $2h$ и коэффициентом ε_n.

Как показали опытные данные, подвижность ординаты $\varepsilon_n(2h)$ в основном обусловливается соотношением между высотой и длиной волны и может быть определена исходя из такой зависимости:

$$\varepsilon_n \approx 0{,}125\left(\frac{2L}{2h}\right). \tag{53}$$

Оказывается, максимальные единичные давления для рассматриваемых эпюр зависят от соответствующих величин для верхней зоны. В порядке первого приближения можно принять такие соотношения

$$\left.\begin{aligned} p_{1-2} &\approx 0{,}4\,p_{1-1} \\ \text{и} \quad p_{2-2} &\approx 0{,}4\,p_{2-1} \end{aligned}\right\}. \tag{54}$$

Результаты исследований позволили впервые установить связь между результирующим давлением и основными исходными величинами $2h$, $2L$ и m. В частности, в работе Курловича [21] отмечается, что величина волнового взвешивания в верхней зоне определяется лишь высотой волны и для всех случаев равна 0,425 ($2h$). Согласно же исследованиям автора, такое значение величины волнового взвешивания будет лишь при длинных волнах и крутых откосах.

2. Швы между плитами закрыты в пределах всей зоны крепления

Следующий этап лабораторных опытов был посвящен установлению расчетных нагрузок на бетонное покрытие при закрытых швах между плитами в пределах всей зоны крепления откоса.

Сопоставляя соответствующие эпюры суммарных давлений в нижней зоне откоса для двух случаев, т. е. при открытых и закрытых швах между плитами (рис. 73), можно заметить, что в последнем случае отсутствует динамический напор под плитой, хотя единичные давления оказались несколько большими, чем в первом случае. Кроме того, как и в первой схеме, для рассматриваемой зоны покрытия откоса максимальное значение суммарного давления всегда совпадает с моментом прохождения над откосом впадины волны (см. рис. 68).

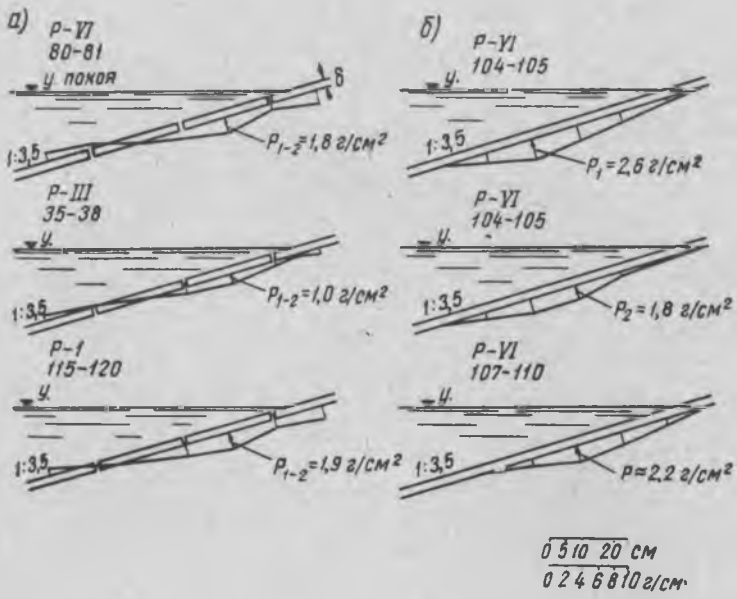


Рис. 73. Результирующие эпюры давлений на плиту в низовой части откоса для случаев $t=1,0\,T$:

а — при открытых швах между плитами; *б* — при закрытых швах между плитами; *р*—VI — волновой режим VI; *80—81* — номера опытов

Наблюдаемое в данной схеме некоторое увеличение суммарного давления согласуется и с физической картиной явления, так как здесь отсутствует фильтрация через швы. Характерно, что на крутых откосах, несмотря на уменьшение волнового давления, суммарное давление увеличивается. Это происходит потому, что с увеличением крутизны откоса заметно уменьшается суммарное давление на верхней поверхности плиты.

Из анализа имеющихся эпюр суммарных давлений для рассматриваемого случая следует, что можно также принять две приближенные схемы, показанные на рис. 74.

По данным схемам положение максимальных ординат p_1 и p_2 определяется высотой волны, а нижняя граница эпюры давления—

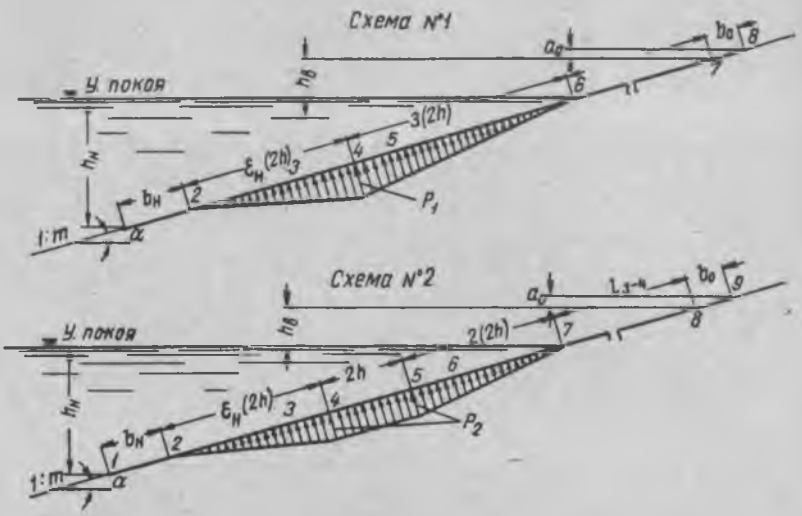


Рис. 74. Расчетные схемы определения суммарного давления на плиты по условию устойчивости (при закрытых швах между плитами по всему откосу)

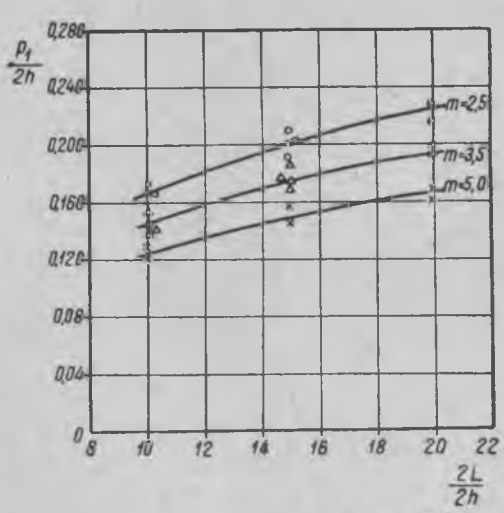


Рис. 75. График зависимости $\frac{p_1}{2h}=f\left(\frac{2L}{2h};\ m\right)$ для случая закрытых швов между плитами

высотой волны и коэффициентом ε_n, значение которого, по аналогии с предыдущим случаем, приближенно можно принять равным

$$\varepsilon_n \approx 0{,}15\left(\frac{2L}{2h}\right). \qquad (55)$$

Результаты основных опытов по определению единичных суммарных давлений сведены в табл. 11. По данным этой таблицы построены соответствующие кривые (рис. 75). Из рассмотренных данных таблицы следует, что величина p зависит как от параметров волны, так и от заложения откоса, причем противодавление увеличивается по мере увеличения $2h$, $2L$ и уменьшения $m=\operatorname{ctg}\alpha$.

Таблица 11

Сводные данные единичных суммарных давлений при закрытых швах между плитами

$m = \mathrm{ctg}\alpha$	$2h = 15$ *см*; $2L = 150$ *см*; $\frac{2L}{2h} = 10$				$2h = 9$ *см*; $2L = 134$ *см*; $\frac{2L}{2h} = 15$				$2h = 12$ *см*; $2L = 240$ *см*; $\frac{2L}{2h} = 20$			
	p_1 *г/см²*	$\frac{p_1}{2h}$	p_2 *г/см²*	$\frac{p_2}{p_1}$	p_1 *г/см²*	$\frac{p_1}{2h}$	p_2 *г/см²*	$\frac{p_2}{p_1}$	p_1 *г/см²*	$\frac{p_1}{2h}$	p_2 *г/см²*	$\frac{p_2}{p_1}$
2,5	2,5	0,167	1,6	0,68	1,8	0,200	1,3	0,73	2,7	0,225	1,8	0,67
	2,6	0,172	1,8	0,69	1,9	0,212	1,3	0,68	2,6	0,217	1,8	0,69
	2,4	0,160	1,7	0,72	1,7	0,190	1,1	0,65	—	—	—	—
	—	—	—	—	1,8	0,200	1,2	0,67	—	—	—	—
3,5	2,3	0,154	1,6	0,70	1,5	0,167	1,0	0,67	2,3	0,192	1,5	0,65
	2,1	0,140	1,5	0,72	1,7	0,190	1,2	0,70	2,4	0,200	1,5	0,62
	2,2	0,144	1,5	0,68	1,5	0,167	1,1	0,74	—	—	—	—
	2,0	0,134	1,2	0,60	1,6	0,179	1,1	0,69	—	—	—	—
5,0	1,8	0,120	1,1	0,61	1,3	0,144	1,0	0,77	2,0	0,166	1,4	0,70
	1,9	0,127	1,3	0,69	1,4	0,156	1,0	0,71	1,9	0,160	1,3	0,69

На основании анализа приведенных данных для рассматриваемого случая представляется возможным предложить следующие зависимости.

$$\left.\begin{aligned} p_1 &= 0{,}085\,\gamma\,(2h)\sqrt{\frac{m}{m^2+1}\left(1+\frac{2L}{2h}\right)} \\ \text{и} \quad p_2 &\approx 0{,}7p_1 \end{aligned}\right\}. \qquad (56)$$

Напомним, что полученные зависимости 51÷56 действительны при условии, что низ бетонного покрытия на $h_н = 1 \div 1{,}5\ (2h)$ ниже расчетного уровня покоя.

3. Дополнительное замечание

Рассмотренные выше схемы конструкции бетонного покрытия могут наблюдаться в различные периоды эксплуатации сооружения.

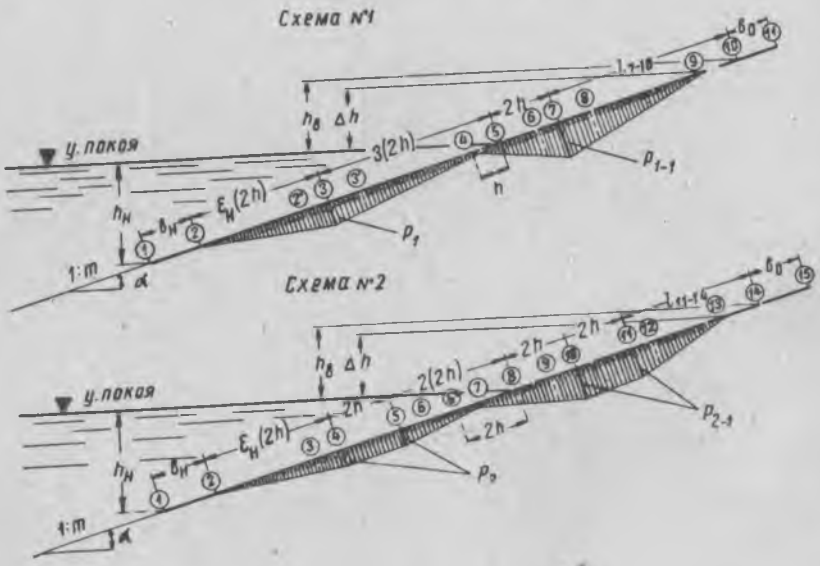


Рис. 76. Расчетные схемы определения суммарного давления на плиту по условию устойчивости (при открытых швах в верхних плитах и при закрытых — в нижних)

В первый период эксплуатации швы преимущественно будут закрыты, раскрытые швы между плитами в пределах всей зоны крепления появляются в последующий период, т. е. при неравномерной осадке тела земляного полотна.

Кроме того, швы между плитами могут быть закрытыми в нижней и открытыми в верхней частях откоса (аварийный случай).

К сожалению, в наших опытах этот случай не подвергался под-

робному исследованию. Однако, судя по контрольным опытам, для построения суммарного давления здесь можно принять схему, приведенную на рис. 76, а для построения эпюр в верхней зоне следует пользоваться формулами (52), в нижней — формулами (55), (56)

§ 15. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛИТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

При расчете плит на устойчивость необходима их проверка на всплывание и на опрокидывание вокруг верхней и нижней кромок плиты. Для выполнения такого расчета необходимо построить эпюры результирующих давлений согласно данным, приведенным в предыдущем параграфе. Расчет следует вести с учетом как трапецеидальной, так и треугольной эпюры, принимая при этом максимальную толщину плиты.

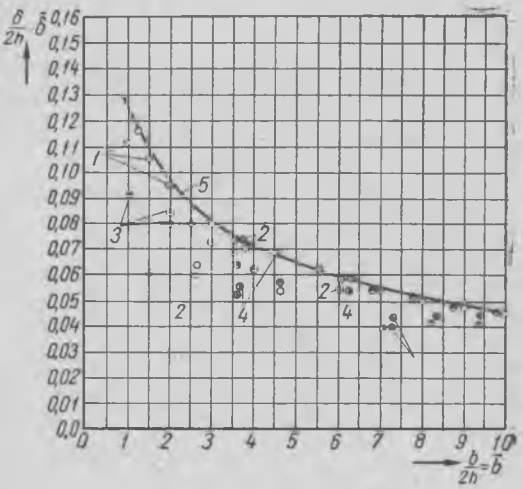


Рис. 77. График зависимости $\bar{\delta}=f(\bar{b})$ по условию устойчивости для случая $\frac{2L}{2h}=15$ и $m=3,5$ (при открытых швах между плитами по всему откосу):

1 — на всплывание по расчетной схеме № 1; *2* — на опрокидывание по расчетной схеме № 1; *3* — на всплывание по расчетной схеме № 2; *4* — на опрокидывание по расчетной схеме № 2; *5* — огибающая

Для этого сначала следует задаться толщиной плиты и ее размером в плане, затем, перемещая плиту по всей зоне крепления откоса, находить наиболее опасное положение как в отношении всплывания, так и в отношении опрокидывания. При этом для плит, расположенных ниже уровня покоя, необходимо учесть статическое взвешивание плиты в воде, т. е. принимать ее вес с учетом $\gamma_n-\gamma_в$; а для плит, расположенных выше уровня воды, статическое взвешивание учитывать не надо, т. е. вес плиты следует принимать с учетом γ_n.

Однако такой прием расчета плит требует значительной затраты времени. Для ускорения расчета можно воспользоваться приведенными ниже расчетными зависимостями, полученными для свободно лежащих плит. В случае анкеровки плит, как это было принято в проектной проработке Гипроречтранса, для расчета на ус-

тойчивость необходимо строить эпюры суммарного давления.

Чтобы получить необходимые зависимости, рассмотрим в отдельности три принятые нами возможные схемы устройства бетонного покрытия, а именно: 1) швы между плитами раскрыты в пределах всего откоса; 2) швы между плитами закрыты по всему откосу и 3) швы открыты в верхних плитах и закрыты в нижних.

Остановимся сначала на первой схеме.

Исходя из условия равновесия плиты на откосе и характера расчетных эпюр суммарного давления (см. рис. 72) и задаваясь различными значениями относительной длины плиты $\frac{b}{2h}$, определяем соответствующую относительную ее толщину $\frac{\delta}{2h}$.

По результатам расчетов строим график (рис. 77), на котором расчетные схемы нагрузок № 1 и 2 взяты согласно рис. 72.

Уравнение огибающей кривой (по максимальным точкам) для данного случая может быть представлено в следующем виде:

$$\delta = 0{,}225\,(2h)\sqrt{\frac{1}{1+2{,}5\frac{b}{2h}}}\,.$$

Аналогичным путем, на основании полученных расчетных показателей, были построены соответствующие графики и для других значений $\frac{2L}{2h}$. Эти графики позволили определить поправочный коэффициент, учитывающий влияние относительной длины волны,

$$\eta_l = 0{,}25\sqrt{1+\frac{2L}{2h}}\,.$$

Для установления влияния заложения откоса также были выполнены соответствующие расчеты для заложений 1 : 2 и 1 : 5 (также при $\frac{2L}{2h}=10$; 15; 20). На основании анализа полученных огибающих кривых в данном случае был установлен следующий коэффициент:

$$\eta_м = 1{,}87\sqrt{\frac{1}{m}}\,.$$

Таким образом, для рассматриваемого расчетного случая, т. е. при открытых швах между плитами по всему откосу и сплошном фильтре под плитой, была получена такая зависимость:

$$\delta = 0{,}105\,(2h)\sqrt{\frac{1+\frac{2L}{2h}}{m\left(1+2{,}5\frac{b}{2h}\right)}}\,. \qquad (57)$$

Полученная зависимость показывает, что необходимая толщина плиты увеличивается по мере увеличения высоты и длины волны и крутизны откоса.

Для второй схемы, аналогично предыдущему случаю, также были выполнены соответствующие расчеты по определению

$$\frac{\delta_{макс}}{2h} = f\left(\frac{b}{2h};\ \frac{2L}{2h};\ m\right)$$

и построены необходимые графики.

Сопоставив полученные огибающие кривые, можно прийти к выводу, что в случае открытых швов и относительно небольшой ширине плиты ($\frac{b}{2h} < 2 \div 4$) ее толщина, по сравнению с раскрытыми швами, будет несколько больше. С увеличением планового размера плиты, т. е. при условии укладки одной плиты на откос в надводной и подводной частях, заметно уменьшается потребная толщина плиты.

На основании результатов расчетов по двум рассмотренным схемам можно установить, что наиболее опасными для устойчивости плит будут раскрытые швы в верхней части откоса при закрытых швах в нижней части. В реальных условиях такое положение может иметь место и должно рассматриваться как аварийный случай.

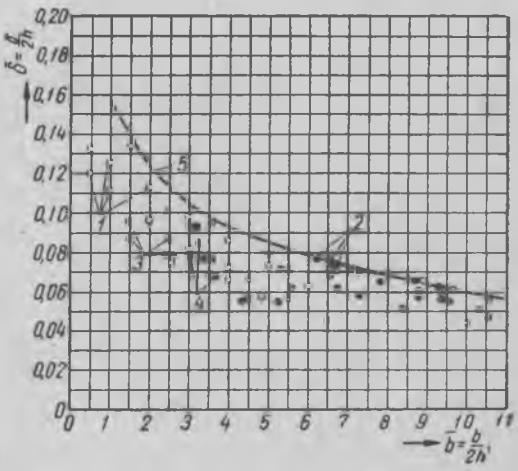


Рис. 78. График зависимости $\bar{\delta} = f\ (\bar{b})$ по условию устойчивости для случая $\frac{2L}{2h} = 15$ и $m = 3{,}5$ (при открытых швах в верхних плитах и закрытых — в нижних); обозначения те же, что на рис. 77

Для третьей схемы аналогичным путем были выполнены необходимые расчеты и построены графики $\delta = f(2L : 2h;\ b;\ m)$; расчетную схему нагрузок принимали в соответствии со схемой, указанной на рис. 76

В качестве примера на рис. 78 приведены результаты расчетов для $\frac{2L}{2h} = 15$ и $m = 3{,}5$; при этом огибающая кривая может быть определена по такому выражению:

$$\delta = 0{,}29\ (2h)\sqrt{\frac{1}{1 + 2{,}5\frac{b}{2h}}}.$$

Сопоставляя это выражение с соответствующей формулой при раскрытых швах между плитами, устанавливаем, что для рассматриваемой схемы толщина плиты увеличивается в 1,3 раза.

Принимая аналогичные зависимости для учета влияния длины волны и заложения откоса, для определения толщины плиты в рассматриваемой схеме получаем следующую формулу:

$$\delta = 0{,}135\,(2h)\sqrt{\frac{1+\frac{2L}{2h}}{m\left(1+2{,}5\,\frac{b}{2h}\right)}}. \qquad (58)$$

Вместо двух последних формул (57) и (58) можно написать обобщенную зависимость такого вида:

$$\delta = K_c\,(2h)\sqrt{\frac{1+\frac{2L}{2h}}{m\left(1+2{,}5\,\frac{b}{2h}\right)}}, \qquad (59)$$

где $K_c=0{,}105$ — для первой расчетной схемы; $K_c=0{,}135$ — для третьей.

Необходимо заметить, что исходя из полученных огибающих кривых, при плитах относительно малого размера $\frac{b}{2h}=1\div3$, их толщина определяется по условию устойчивости на всплывание, так как коэффициент запаса на опрокидывание больше коэффициента запаса на всплывание: $K_{опр}>K_{всп л}$. При плитах большого размера $\frac{b}{2h}>4$ размер плит на откосе в основном определяется по условию на опрокидывание $K_{опр}<K_{всп л}$.

Полученная зависимость (59) может быть несколько упрощена, если учесть, что

$$\sqrt{\frac{1+\frac{2L}{2h}}{1+2{,}5\,\frac{b}{2h}}} \approx \sqrt{\frac{1}{2{,}5}\cdot\frac{2L}{2h}:\frac{b}{2h}} = 0{,}632\sqrt{\frac{2L}{b}}.$$

Такое упрощение при плитах $\frac{b}{2h}>2$ и $\frac{2L}{2h}>10$ не вносит существенной погрешности.

Формула (59) с учетом упрощения будет иметь вид

$$\delta = 0{,}632\,K_c\,(2h)\sqrt{\frac{2L}{mb}}. \qquad (60)$$

Полученные выражения были выведены при условии, что объемный вес плиты $\gamma_n=2{,}3$ $т/м^3$. Для определения влияния объемного

веса плиты были сделаны соответствующие подсчеты, в результате которых получили следующий поправочный коэффициент:

$$\alpha_n \approx 1{,}14 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_n - \gamma}},$$

где γ — объемный вес воды.

Тогда, с учетом приведенных выше зависимостей, для определения толщины бетонного покрытия, необходимой по условию устойчивости, может быть предложена такая формула:

$$\delta = K(2h) \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_n - \gamma} \cdot \frac{2L}{mb}}, \tag{61}$$

где $2h$ и $2L$ — высота и длина волны;

b — размер плиты по откосу (перпендикулярно урезу воды;

γ_n — объемный вес плиты;

γ — объемный вес воды;

K — коэффициент, зависящий от конструкции бетонного покрытия; $K=0{,}075$ при открытых швах между плитами в пределах всего откоса; $K \approx 0{,}10$ — при открытых швах в верхней части откоса и закрытых — в нижней (подводной) части откоса.

Предлагаемая формула (61) применима при следующих условиях:

$$\left.\begin{aligned} 2 \leqslant m \leqslant 5 \\ 10 \leqslant \frac{2L}{2h} \leqslant 20 \\ 1 \leqslant \frac{b}{2h} \leqslant 10 \end{aligned}\right\}. \tag{62}$$

Следует отметить, что расчетная зависимость (61) соответствует сплошному фильтру. Однако, учитывая изложенные выше соображения о работе ленточного фильтра, считаем возможным распространить ее и на этот случай.

§ 16. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛИТ НА ОТКОСЕ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ ДАННЫМ

Для проверки полученной расчетной зависимости (61) был проведен специальный цикл лабораторных опытов с размываемыми моделями. Исследования проводили при следующих условиях: модель земляной дамбы —из мелкозернистого песка с заложением откоса 1 : 3,5; при размере бетонных плит в плане от 5×5 до 45×45 *см* и толщине их от 1 до 3 *см*. Плиты располагали на слое сплошного фильтра, без фильтра и без защемления при ширине шва между ними 0,5÷1,5 *мм*.

Методика проведения опытов состояла в постепенном увеличении волнового режима, который определяли по настройке волно-

продуктора, до начала разрушения рассматриваемой модели. Всего было проведено 52 опыта для 17 типов моделей. В результате были получены данные, связывающие относительные величины:

$$\frac{\delta}{2h} \text{ с } \frac{b}{2h} \text{ и } \frac{2L}{b}.$$

Проведенный цикл опытов позволил выяснить ряд общих закономерностей в вопросе устойчивости бетонного покрытия под действием волнового потока.

Прежде всего было установлено, что перед началом разрушения происходило колебание самой плиты на месте; амплитуда колебания постепенно увеличивалась, и когда размах колебания достигал размера, равного толщине плиты, нижний край ее перемещался на плиту, лежащую ниже, и затем она сползала вниз. Для плиты малого размера зафиксированы случаи опрокидывания вокруг нижнего ребра, а также всплывания (рис. 79).

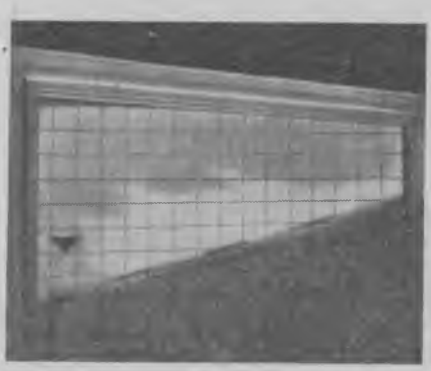


Рис. 79. Общий вид деформации покрытия откоса из бетонных плит

При прочих равных условиях колебание плит, расположенных непосредственно на песчаном откосе, наблюдалось в меньших пределах; разрушение плит на таком откосе происходило после значительного выноса песка через швы.

Разрушение плит на откосе в большинстве опытов начиналось с плит, расположенных в зоне разрушения волны и уровня покоя, причем глубина разрушения, считая от уровня покоя, находилась в пределах $h_{раз} \approx 1{,}0 \div 1{,}25$ $(2h)$. Весьма характерно, что начало подвижки и разрушения плит в большинстве случаев соответствовало моменту прохождения впадин волны над откосом.

В процессе колебания плит на откосе наблюдалось перемещение щебенки под плитами, после чего процесс разрушения плиток происходил весьма интенсивно.

Для проверки влияния «присоса» плит к песчаному откосу и размера щели между плитой и основанием был проведен опыт с плитами, расположенными на жестком откосе (фанере), при различных размерах щелей. Опыт показал, что разрушение такого откоса примерно аналогично процессу разрушения плит, расположенных на сплошном щебеночном основании.

Результаты данной серии опытов представлены на графике (рис. 80) в виде кривых, связывающих безразмерные величины

$\frac{\delta}{2h}=f(\frac{2L}{b})$. Для рассматриваемого случая $m=3{,}5$ и $\gamma_n=2{,}3$ $т/м^3$ формула (61) может быть переписана в таком виде:

$$\frac{\delta}{2h}=0{,}465\,K\sqrt{\frac{2L}{b}}\,.$$

В соответствии с этим выражением кривые на приведенном графике соответствуют разным значениям коэффициента K:

$$K_{ср}=0{,}075;\quad K_{мин}\approx 0{,}068\quad \text{и}\quad K_{макс}\approx 0{,}083\,.$$

Из полученных данных можно установить, что результаты, получаемые по предлагаемой формуле (61) при открытых швах между плитами, совпадают со средними значениями величин, полученных опытным путем ($K_{ср}=0{,}075$); минимальное и максимальное отклонение от этих средних значений составляет примерно $\pm 10\%$.

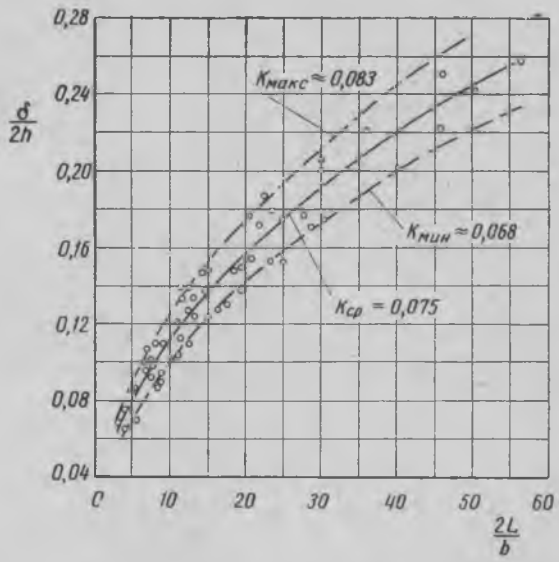


Рис. 80. Сопоставление расчетных и опытных данных приведенной толщины бетонного покрытия для случая открытых швов между плитами при $m=3{,}5$ (лабораторные исследования)

Мы считаем, что из-за осторожности в расчетах следует принимать максимальное значение опытного коэффициента, т. е. увеличивать среднее значение коэффициента на 10%.

Таким образом, для определения необходимой толщины плиты по условию ее устойчивости на откосе при воздействии ветровой волны окончательно можно рекомендовать формулу (61), принимая в ней значение коэффициента K равным 0,11 при открытых швах в пределах верхних плит и закрытых — в нижних и равным 0,083 при открытых швах в пределах всей зоны крепления откоса.

Учитывая, что полученные рекомендации соответствуют максимальным опытным значениям толщины плиты, а также и то, что здесь не учтено влияние защемления плит друг другом, мы считаем нецелесообразным вводить в формулу (61) коэффициент запаса.

В практике строительства берегоукрепительных сооружений часто применяют так называемые сочлененные покрытия, т. е. с шарнирным закреплением отдельных плит между собой. К сожалению, в наших опытах подобный тип не изучался.

В заключение следует остановиться на вопросе о возможности пересчета величин, полученных в лабораторных условиях, в натурные по закону гравитационного подобия.

Как отмечалось выше, величины волнового взвешивающего давления под плитой и скорость фильтрационного потока в порах подстилающегося слоя в момент прохождения впадины волны над откосом зависят от состава фильтрующего слоя. Причем для рассматриваемого расчетного периода взвешивающее давление увеличивается по мере уменьшения крупности частиц грунта основания.

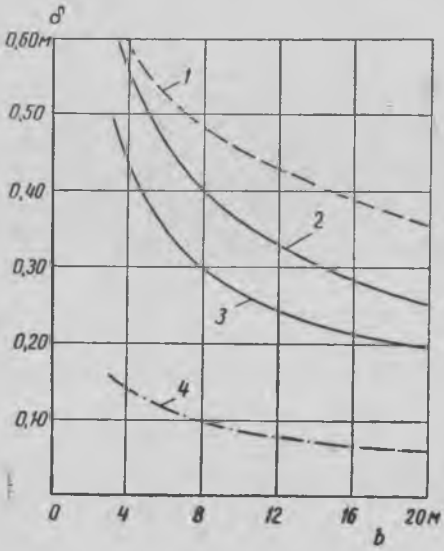


Рис. 81. График зависимости $\delta = f(b)$ по формулам:
1— Курловича; *2*— Шанкина при $K=0{,}11$; *3*— Шанкина при $K=0{,}083$; *4*— Лупинского

Результаты лабораторных опытов с различными составами грунта основания, а именно, с песчаным $d=0{,}10 \div 0{,}25$ *мм* и с гравием, начиная от $d_{50}=3$ *мм* и выше, показали, что заметный скачок в величинах волнового взвешивания наблюдается при переходе от песчаной подготовки к гравийной. Вместе с тем опыты с различными составами гравия свидетельствуют, что взвешивающее усилие под плитой в пределах $d_{50}=3 \div 10$ *мм* не претерпевает существенного изменения, хотя и наблюдается некоторое его уменьшение с увеличением d.

Основные экспериментальные исследования были нами выполнены с грунтом, имеющим размеры частиц $d=3 \div 5$ *мм*. Согласно данным С. В. Избаша [19], для такого состава имеет место так называемый переходный режим. В натурных условиях при сплошном обратном фильтре фильтрация может иметь турбулентный ре-

жим, а при укладке плит на разнозернистую подготовку—переходный режим.

Следовательно, при пересчете величины волнового взвешивающего давления, полученного в лабораторных опытах, в натурные по правилу гравитационного подобия следует ожидать некоторого запаса в размерах бетонного покрытия.

Наконец, представляет интерес сравнение полученной расчетной зависимости по определению толщины бетонного покрытия с результатами расчетов по данным других авторов.

В качестве примера на рис. 81 приведен график $\delta=f(b)$, построенный для $2h=3$ *м*; $2L=45$ *м*; $m=3$ и $\gamma_n=2{,}3$ *т/м*^{3}. Расчеты по всем формулам выполнены при коэффициенте запаса, равном единице.

Рассматривая данный график, а также дополнительные расчеты при других параметрах волны и заложениях откосов, прежде всего можно установить, что в качественном отношении предложения других авторов правильно учитывают влияние планового размера плиты b на расчетную толщину δ.

Вместе с тем имеется значительное расхождение в искомой толщине плиты. По отношению к нашей формуле формула Курловича [49] дает завышение, а Лупинского [48] — значительное занижение, причем последний не учитывает влияния длины волны. Результат, получаемый по формуле Пышкина [47], совпадает с результатами по нашей формуле при $b\leqslant 4$ *м* (при $K=0{,}083$). Такое расхождение в искомой толщине плиты следует объяснить различными условиями экспериментирования.

ГЛАВА IV

ИЗУЧЕНИЕ СУДОВЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ

§ 17. ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СУДОВЫХ ВОЛН

В опубликованной в настоящее время обширной литературе по теории движения корабля главное внимание уделяется вычислению волнового сопротивления, вопрос же о самих волнах освещен весьма скудно. Такое положение следует объяснить тем, что вопрос о действующих на корабль силах является основным в теории его движения; вместе с тем определение вида и размера судовых волн представляет собой значительно более трудную задачу.

К числу наиболее интересных работ по теории корабельных волн следует отнести работы Кельвина, Мичеля, Хавелоха, Хопсона, Н. Е. Жуковского, Л. Н. Сретенского и др. Следует отметить, что теория корабельных волн имеет по существу два различных направления. В основу одного направления легла известная схема Кельвина, в которой сам корабль заменяется импульсом давления, в основу другой — теория Мичеля о волновом сопротивлении.

Из-за принятой условной схематизации Кельвину [109] не удалось связать элементы корабельных волн с размерами и формой самого судна. Вместе с тем было установлено, что размеры элементов волновой системы на поверхности водоема увеличиваются прямо пропорционально скорости движения судна, а высота поперечной волны — обратно пропорционально квадратному корню из расстояния от места возмущения до рассматриваемой точки.

Существенным недостатком данной теории является то, что на границах волновой области величина возвышения обращается в бесконечность. Этот недостаток впоследствии был устранен Хавелохом [110], который решил задачу для случая движения импульса по поверхности жидкости конечной постоянной глубины. В результате этого решения было установлено, что при увеличении скорости движения импульса c в пределах $c<c_{кр}=\sqrt{gH}$ (где H — глубина) угол, ограничивающий волновую поверхность в плане, увеличивается и будет равен 180° при $c=c_{кр}$. При дальнейшем увеличении скорости, т. е. при скорости больше критической, этот угол уменьшается.

В работе Хопсона отмечается, что волновое семейство ограничено не прямыми, а кривыми, асимптоты которых наклонны к пути корабля под углом 19°28′. Л. Н. Сретенский [55] обобщил теорию Кельвина для случая движения корабля на циркуляции. Мичель поставил задачу об отыскании волнового движения возбужденного корабля с заданными обводами, исходя из условия, что поверхность корабля мало уклоняется от диаметральной плоскости. В результате Мичелем был получен потенциал скорости для построения профиля волны. В работе Н. Е. Жуковского [15] дается решение задачи волнового движения, возбуждаемого кораблем на мелководье, при условии, что осадка корабля мало отличается от глубины, а скорость его больше критической

$$v_{кр}=\sqrt{gH}.$$

В другой своей работе Хавелох показал, что размер судовых волн увеличивается пропорционально квадрату скорости движения судна. В работе Г. Е. Павленко [45] приведены материалы опытных исследований сопротивления воды движению судов; описаны методы количественных расчетов волнообразования и даны некоторые соображения по экспериментальной проверке теории волнового сопротивления.

Следует признать, что перечисленные работы, а также и некоторые другие были выполнены при той или иной схематизации действительного волнового движения от судна; больше того, эти работы относятся к водоему значительного размера, т. е. совершенно не пригодны к условиям судоходных каналов. В действительности теоретическое решение задачи по определению размеров судовых волн в водоемах с ограниченной глубиной и шириной связано с большими трудностями.

Вместе с тем при решении ряда практических задач, связанных с проектированием судоходного канала, в том числе и с выбором размера покрытия откоса, возникает настоятельная необходимость с достаточной степенью точности определить размер судовых волн. Это обстоятельство побудило к проведению специальных экспериментальных исследований и получению эмпирических зависимостей для определения расчетных элементов судовых волн в судоходных каналах.

А. А. Саткевич при определении высоты волны в канале в свое время предложил пользоваться следующим выражением:

$$2h=\frac{v^2}{g}, \tag{63}$$

где v — скорость движения судна.

Данное предложение не было проверено в реальных условиях, по этой причине указанная формула оказалась по существу не пригодна к расчету судоходных каналов.

Б. Ю. Калинович в своей работе [26] рекомендует такую зависимость:

$$2h=\frac{v^2}{g\left(1+\frac{2h}{H}\right)}. \tag{64}$$

Эта зависимость отличается от предыдущей тем, что здесь учитывается не только скорость движения судна, но и глубина H воды в канале. К сожалению, данный автор, как и Саткевич, не приводит каких-либо обоснований рекомендуемой им формулы.

Л. С. Кусков и И. Н. Дымент [27] провели цикл наблюдений за судовыми волнами на канале имени Москвы для двух типов судов при постоянной глубине воды. В результате этих наблюдений указанными авторами была получена обобщенная формула следующего вида:

$$2h=\alpha\frac{v^4}{2g}, \tag{65}$$

где $\alpha=0{,}03$ — при движении судна по оси канала; $\alpha=0{,}045$ — при движении судна на расстоянии 20 *м* от берега.

В последующей работе Кусков [28] на основании этих же наблюдений для определения размера судовых волн предложил другую формулу:

$$2h=0{,}0063\sqrt{\frac{20}{b_c}}\cdot\frac{R}{2g}v^2, \tag{66}$$

где b_c — расстояние проходящего судна от берега в *м*;

R — волновое сопротивление судов параболической формы, которое определяется по Жуковскому:

$$R=\frac{24\rho D^2v^2}{Hl^3K}, \tag{67}$$

где l — длина судна;

H — глубина воды;

D — водоизмещение судна;

K — коэффициент, равный $\frac{v}{v_{кр}}$;

$v_{кр}$ — критическая скорость, равная $\sqrt{gH}$.

Высота судовой волны выше уровня покоя, по мнению Кускова, составляет 0,45 ($2h$); ниже уровня покоя — 0,55 ($2h$).

Из сравнительной оценки приведенных здесь формул (63)÷(67) можно установить, что все они дают весьма значительные расхождения с данными натурных наблюдений.

Такое положение следует прежде всего объяснить тем, что эти предложения в большинстве случаев не учитывают размеры, тип судна и размеры самого канала. Более правильные результаты можно получить лишь по формуле Л. С. Кускова (66) для тех условий, при которых были проведены наблюдения.

Наиболее полное и достаточно обоснованное предложение по расчету элементов судовых волн в каналах было разработано П. К. Божичем. Результаты этих исследований подробно описаны в опубликованной нами работе [67], в силу чего здесь мы остановимся лишь на принципиальных положениях и окончательных выводах Божича и сделаем некоторые замечания.

В задачу лабораторных исследований входило установление эмпирической зависимости, связывающей высоту судовой волны с размером моделирующего судна, его осадкой, глубиной воды и со скоростью перемещения модели судна. Исследования проводились в сравнительно небольшом бассейне в масштабе 1 : 80, пересчет в натуру производили по правилу гравитационного подобия. Несамоходные модели проталкивали при испытаниях со скоростями 0,3÷2,4 *м/сек*.

Полученные результаты лабораторных исследований прежде всего позволили установить, что высота судовой волны увеличивается по мере увеличения скорости движения модели прямо пропорционально квадрату этой скорости. Максимальная высота волны зафиксирована при $v = v_{кр} = \sqrt{gH}$; в случае $v > v_{кр}$ наблюдается уменьшение высоты волны.

В результате обработки экспериментальных данных для определения высоты поперечной судовой волны в канале Божичем была получена следующая формула:

$$2h_n = \frac{v^2}{2g}\left(0{,}65 + 3{,}2\,\frac{bt}{BH}\right)^2, \tag{68}$$

где b — ширина модели судна;
t — осадка модели;
H — глубина воды;
B — ширина канала на глубине осадки судна.

При натурных наблюдениях за судовыми волнами на канале имени Москвы применяли стереофотосъемки и киносъемки. В результате этих наблюдений в конечном итоге были получены стереофотопланы судовых волн. На рис. 82 а, б и 83 в качестве примера показаны стереофотопланы и разрезы судовых волн.

Анализируя материалы натурных наблюдений, Божич указывает, что при движении судов со скоростями $v \leqslant 0{,}4\ v_{кр}$ возникают прямолинейные расходящиеся волны, с дальнейшим увеличением скорости образуются криволинейные расходящиеся и поперечные волны; за пределами $v > v_{кр}$ поперечные волны исчезают, а расходящиеся принимают особую форму. Из общей системы волн наибольший интерес представляют носовые поперечные и кормовые расходящиеся волны.

Переходя к вопросу о переформировании судовых волн в пределах судоходного канала, в последних своих работах Божич отмечает, что у берегов канала всегда наблюдается интерферен-

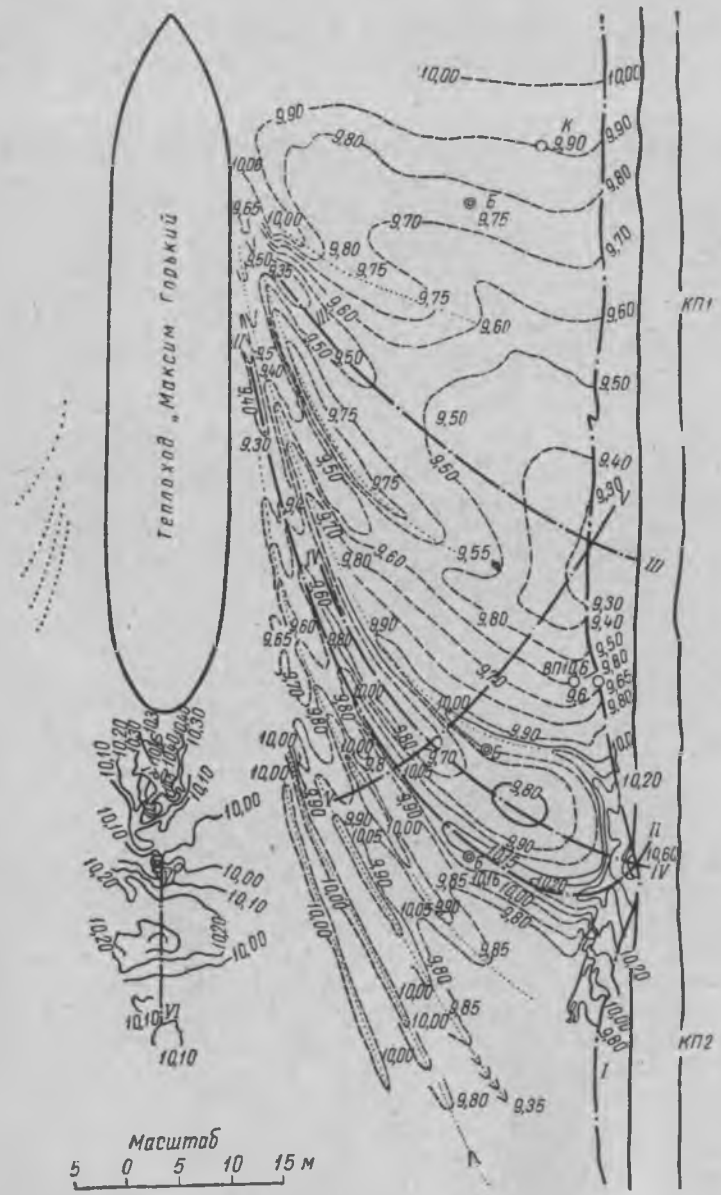


Рис. 82а. Стереофотоплан носовых расходящихся волн (условные обозначения те же, что на рис. 82б)

ция поперечных и расходящихся волн, в результате чего высота волны вблизи откоса резко увеличивается.

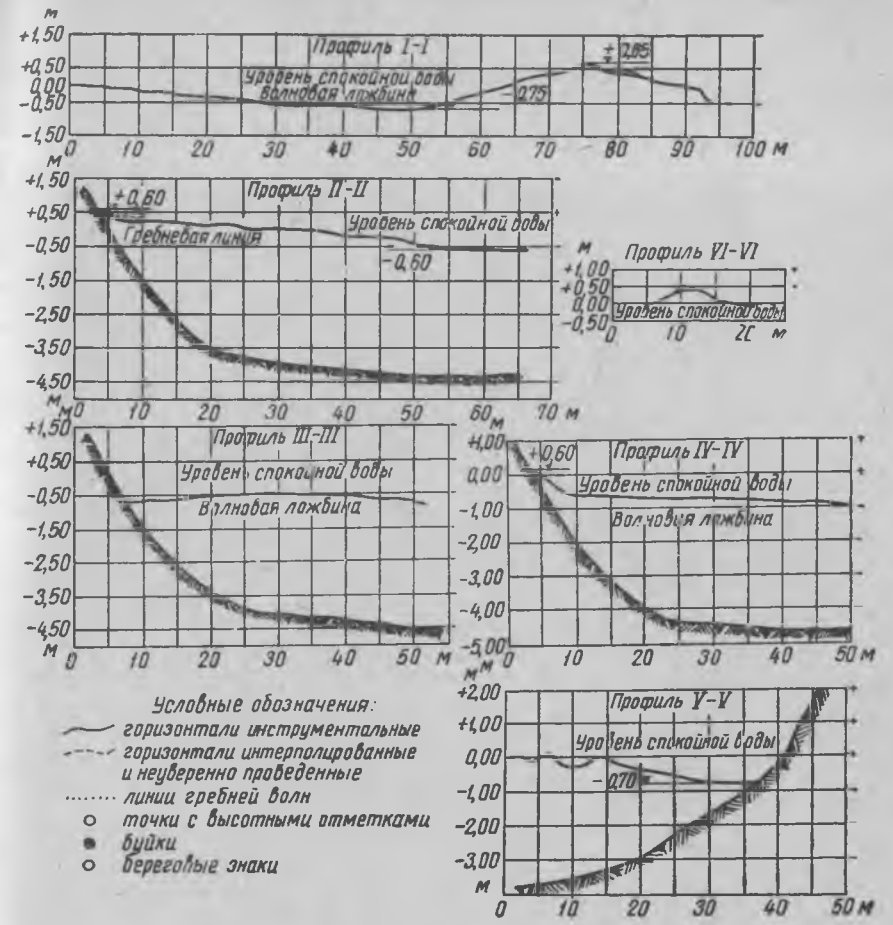


Рис. 82б. Поперечные профили носовых расходящихся волн

Допуская, что поперечная волна при распространении ее к берегам несколько уменьшается, и принимая равенство расходящейся и поперечной волны вблизи судна, для определения высоты поперечной волны вблизи откоса канала Божич счел возможным использовать известную формулу Стивенсона для определения высоты волны в акватории порта. В результате для определения высоты поперечной волны вблизи откоса канала им получена следующая зависимость:

$$2h_n' = 2h_n\left(\sqrt{0{,}73\,\frac{l}{B_0}} - 0{,}1\right), \qquad (69)$$

где l — длина судна;

B_0 — ширина канала поверху (на уровне покоя).

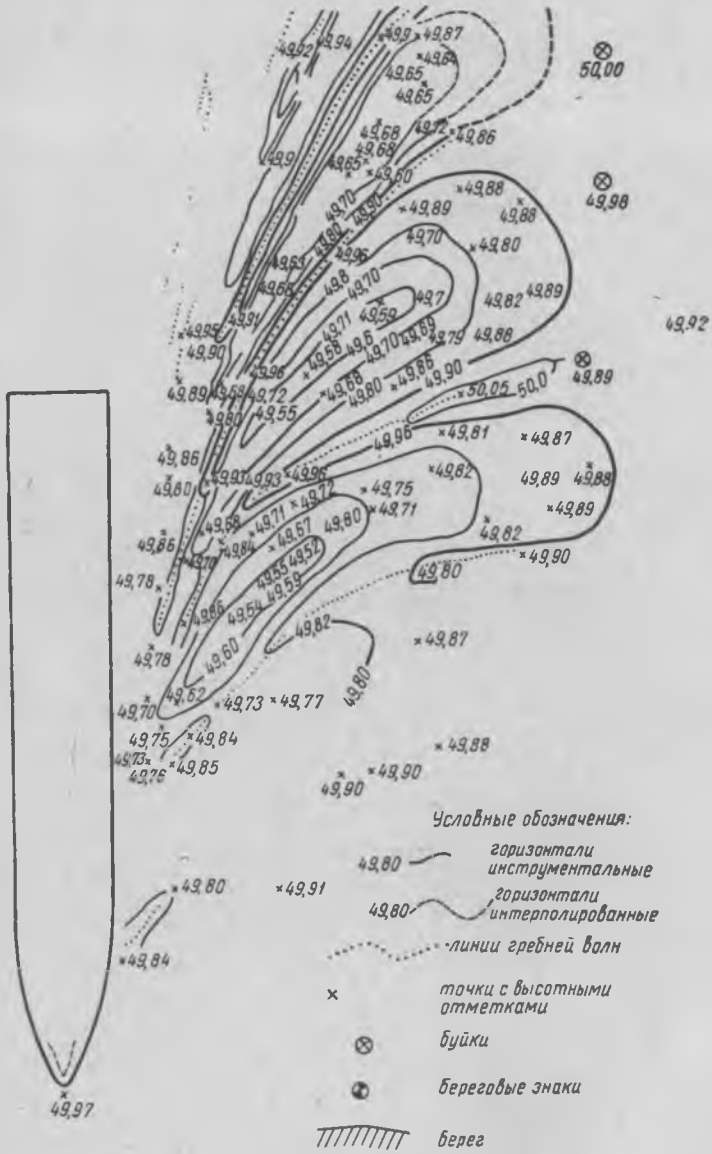


Рис. 83. Стереофотоплан судовых волн по материалам съемок в натуре

Далее, основываясь на возможности полной интерференции у берегов канала расходящейся $2h_p$ и поперечной $2h'_n$ волны, т. е. с учетом того, что

$$2h = 2h_p + 2h_n', \tag{70}$$

а также используя выражения (68) и (69), Божич рекомендует определять высоту волны вблизи откоса канала по следующей формуле:

$$2h = \frac{v^2}{2g}\left(0{,}65 + 3{,}2\,\frac{bt}{BH}\right)^2\left(0{,}9 + \sqrt{0{,}73\,\frac{l}{B_0}}\right). \tag{71}$$

Для определения длины судовой волны применительно к условиям судоходных каналов им была предложена следующая зависимость:

$$2L \approx \frac{2\pi}{g}\,v^2. \tag{72}$$

При рекомендации последней зависимости отмечается, что скорость распространения кормовой и поперечной волн примерно равна скорости движения судна в канале, а потому период волны может быть определен по формуле для волн-зыби, т. е. $2T = \frac{2L}{v}$.

Предложенная окончательная рекомендация (71), к сожалению, не подвергалась непосредственной проверке по материалам натурных измерений судовых волн, хотя в работе Божича приведено достаточное количество таких материалов. Для косвенной проверки была условно использована известная формула проф. Н. Н. Джунковского, определяющая высоту наката разбитой (ветровой) волны на откос. Однако подобная проверка при интерферировании судовых волн не может служить критерием для оценки правильности рекомендуемой формулы. Как будет показано ниже, физический характер взаимодействия судовых волн с откосом не всегда аналогичен характеру взаимодействия ветровых разбитых волн.

Вместе с этим следует указать, что предложенная зависимость (69) для $\frac{l}{B_0} > 1{,}37$ может дать $2h'_n > 2h$, что не соответствует реальному условию волнообразования в канале. Следовало бы также обосновать положение о постоянстве расходящейся волны в пределах судоходного канала; судя по материалам стереофотосъемки, в ряде случаев зафиксировано также и уменьшение расходящейся волны при ее распространении к откосам канала.

Несмотря на отмеченные недостатки, предложение Божича впервые позволило наиболее обоснованно подойти к определению расчетных элементов судовых волн в каналах. Количественная оценка предложения Божича будет дана ниже.

В зарубежной литературе вопрос о судовых волнах в прошлом почти совершенно не освещался; имеются лишь отрывочные данные

о возможной высоте волны применительно к конкретному судну и скорости его движения по каналу [112].

Лишь в самое последнее время опубликованы результаты экспериментальных исследований явлений, сопровождающих движение судов большого тоннажа по Суэцкому каналу [113]. При этих исследованиях касались выяснения следующих вопросов: определения осадки судов, понижения уровня воды около судна, установления обратных течений, размыва откосов и берм при движении судов. Исследования проводили как в лаборатории (Гренобльского общества), так и в натуре. К сожалению, в этих исследованиях также не приводятся рекомендации, касающиеся определения размеров элементов судовых волн в каналах, так как основная задача состояла в разработке конкретных рекомендаций по предотвращению интенсивного размыва берм, наблюдаемого на рассматриваемом канале.

§ 18. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУДОВЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ

Как отмечалось в предыдущем параграфе, впервые наиболее полные исследования судовых волн в каналах в прошлом (до 1949 г.) были проведены под руководством П. К. Божича. В последующем, начиная с 1950 г., эти исследования были продолжены под руководством автора данной работы на канале имени Москвы. Натурные исследования на специальных опытных участках в основном проводили для определения волновых нагрузок на береговые крепления откоса канала, однако попутно изучали и судовые волны, главным образом их размеры вблизи откоса канала.

В результате проведенных натурных исследований для разных типов судов, скоростей их движения, глубин воды в канале и т. п. были получены дополнительные материалы по элементам судовых волн в канале, которые позволили несколько уточнить предшествующие выводы.

Количественная оценка полученных результатов натурных измерений будет дана ниже, здесь же остановимся на их качественной характеристике и отметим некоторые особенности образования и переформирования судовых волн в пределах канала и взаимодействия их с откосами.

Как известно, образование судовых волн в канале всегда начинается с понижения уровня воды по сравнению с уровнем покоя и с образования течения, обратного ходу судна. Последующее затем возникновение и переформирование системы судовых волн в сильной мере зависит от скорости движения судна.

В общем случае судовые волны можно разделить на следующие типы: носовые расходящиеся; носовые поперечные; кормовые расходящиеся и кормовые поперечные. Из этих систем волн наибольший практический интерес представляют носовые расходящиеся и кормовые поперечные волны, которые и будут нами рассмотрены.

Для краткости изложения будем упоминать только поперечные и расходящиеся волны (рис. 84).

Как отмечалось выше, при движении судов в канале со скоростями в пределах до $v \approx 0{,}4 \div 0{,}5\ v_{кр}$ возникают прямолинейные расходящиеся поперечные волны (рис. 85 а). При дальнейшем увеличении скорости движения судна до $v = v_{кр}$ образуются криволинейные расходящиеся и поперечные волны (рис. 85 б) и, наконец, за пределами $v_{кр}$ поперечные волны исчезают, а расходящиеся—принимают особую форму (рис. 85 в).

Рассматривая характер образования судовых волн в каналах, можно установить, что наибольший практический интерес для расчета береговых укреплений в настоящее время представляют волны, образующиеся при движении судов по каналу со скоростями в пределах $0{,}4 \div 0{,}9\ v_{кр}$, т. е. при обычных скоростях движения в пределах $10 \div 20$ *км/час*. Это обстоятельство и побудило провести натурные наблюдения за судовыми волнами на первом этапе исследований в пределах указанных скоростей движения судов по каналам.

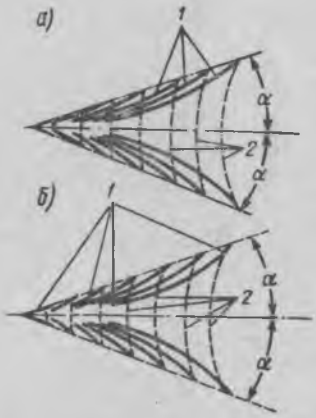


Рис. 84. Схемы криволинейных судовых волн —носовых расходящихся и кормовых поперечных:

а—не пересекающихся между собой; *б* — пересекающихся; *1* — носовые; *2* — кормовые

Вместе с тем следует признать, что уменьшение размера волн при скоростях движения судов $v > v_{кр}$ (см. рис. 85 в) не может служить основанием для заключения о их безопасности. Как показали визуальные наблюдения, при таких скоростях движения судов, особенно, когда глубины малы и суда проходят недалеко от откосов, были зафиксированы случаи интенсивного размыва откоса и сползания всего покрытия. В силу изложенного в дальнейшем необходима постановка специальных исследований гидравлических явлений в каналах при скоростях движения судов за пределами критических. Эта проблема имеет особенно важное значение в связи с требованиями, предъявляемыми к речному транспорту.

Перед тем как перейти к рассмотрению переформирования судовых волн в пределах канала, коротко остановимся на общей характеристике образования расходящихся и поперечных волн.

Расходящиеся волны зарождаются у носа судна в виде отдельных коротких волн, которые затем развиваются в более крупные (см. рис. 83 и 85). Характерной особенностью этих волн является то, что элементы волны, т. е. высота, длина и период, не остаются постоянными. В действительности вблизи судна высота волны вначале незначительна, но с удалением от него она увеличивается и на расстоянии, примерно равном половине длины

судна, достигает максимального значения. В дальнейшем она остается постоянной или несколько уменьшается. Длина волны быстро возрастает по мере удаления от судна.

Рис. 85а. Общий вид судовых волн при движении судна при скорости $v<0,4v_{кр}$

Рис. 85б. Общий вид судовых волн при движении судна при скорости $v\approx0,7\div0,8v_{кр}$

В начальной стадии своего развития расходящиеся волны бывают очень крутыми, но с удалением от судна они переходят в более пологие, причем профиль гребня значительно круче профиля ложбины.

Область развития носовых расходящихся волн ограничивается сектором с углом α (см. рис. 84), который определяет по существу границы волнообразования.

Согласно теоретическому решению Кельвина, этот угол при скоростях движения судна до $v \leqslant 0{,}5 v_{кр}$ имеет постоянную величину и равен 19°28′, при дальнейшем увеличении скорости до $v_{кр}$ угол α быстро возрастает до 90°.

Рис. 85в. Общий вид судовых волн при движении судна при скоростях больше критических ($v > v_{кр}$)

В действительности натурные наблюдения показали иную картину изменения угла границы волнообразования. Оказалось, что при скорости движения судов $0{,}5 \div 1\ v_{кр}$ этот угол равен 20° и сохраняет свое постоянство примерно до $v_{кр}$, а затем уменьшается до $12 \div 15°$ при скоростях движения судов больше $v_{кр}$ (рис. 85 в).

Поперечные волны около образующего их судна напоминают двухмерные волны зыби и распространяются вслед за судном почти прямолинейным фронтом, параллельно друг другу и поперек канала (см. рис. 83). В отличие от расходящихся данные волны имеют примерно постоянную длину, период и скорость распространения. Согласно данным наблюдениям поперечные волны характеризуются соотношением $\frac{2L}{2h}$ в пределах $8 \div 20$, в среднем $12 \div 14$.

Особенность характера судовых волн в каналах состоит в том, что эти волны, образованные посредине канала, при своем распространении к берегам подвергаются существенным переформированиям. Причем характер самого переформирования в значительной мере зависит от скорости движения судна.

Образованная за кормой судна первая поперечная волна имеет наибольшую высоту, которая на некотором расстоянии от судна

заметно уменьшается. Из сравнительной оценки ряда опытов можно установить, что теоретическая формула Кельвина

$$(2h_n)_x = \frac{2h_n}{\sqrt{x}},$$

где $2h_n$ — высота первой поперечной волны;

$(2h_n)_x$ — то же, на расстоянии x от судна,

дает вполне удовлетворительные результаты.

Поперечная волна по мере своего развития к берегам канала почти не меняет направления, т. е. остается примерно перпендикулярной берегам; высота же волны уменьшается также при приближении гребневых линий к откосам. Такое уменьшение высоты поперечных волн связано с распределением запаса энергии волн на большую ширину по фронту их распространения. В действительности при своем возникновении за кормой волнообразующего судна гребневые линии имеют ограниченные протяжения, далеко не достигающие ширины водного зеркала канала, однако вслед за тем они быстро развиваются по фронту и достигают берегов канала. По имеющимся данным наблюдений, степень уменьшения поперечной волны возрастает по мере уменьшения длины судна и увеличения ширины зеркала канала.

Переформирование расходящихся волн в пределах канала в сильной мере зависит от скорости движения судна. При скоростях $v \leqslant 0{,}4 \div 0{,}5\ v_{кр}$ эти волны при распространении к берегам сохраняют свое первоначальное направление и подходят к берегу под острым углом, равным $\alpha' = 20 \div 30°$ (см. рис. 82 а). Угол α' определяется положением гребневой линии и урезом воды. Эти волны можно сравнить с косым подходом ветровых волн к откосному берегу.

Положение изменяется при дальнейшем увеличении скорости движения судна. Расходящиеся волны принимают криволинейное очертание, при распространении к берегам непрерывно разворачиваются и могут подходить к откосам почти под прямым углом, т. е. $\alpha' \approx 90°$. Характерно, что если судно проходит недалеко от откоса, то вне зависимости от скорости его движения в большинстве случаев волны подходят к откосу почти под прямым углом.

Наибольший интерес в теории судовых волн в каналах представляет интерференция носовых расходящихся волн с кормовыми поперечными волнами. Как видно из общих плановых схем судовых волн (см. рис. 84), расходящиеся и поперечные волны в некоторых точках границы зоны волнообразования могут либо сходиться вместе, либо пересекаться. В силу отмеченного обстоятельства в отдельных точках зоны волнообразования происходит интерференция взаимодействующих волн.

Рассматривая полученные материалы натурных наблюдений, можно установить, что в реальных условиях интерференция поперечных и расходящихся волн иногда может иметь место. Ин-

терференция этих волн начинается сразу же за кормой судна, где завершается правильное образование расходящихся волн, высоты этих волн на концевых участках примерно равны между собой. Однако интерференция поперечных и расходящихся волн

Рис. 86. Образование волнового вала на откосе канала

в наиболее выраженной форме проявляется в пунктах пересечения границы волнообразования с берегами канала, где эти волны принимают примерно одно направление (рис. 86).

Как известно, интерференция одной системы любых однообразных волн с другой системой каких угодно, но тоже однообразных волн может протекать весьма различно в зависимости от соотношений между фазами и периодами тех и других волн.

Если интерферирующие между собой волны совпадают по фазе и по периоду, то образуется новая система однообразных волн того же направления и периода, но с увеличением высоты волны до двух раз. Интерференция волн, различающихся между собой по фазе, приводит также к увеличению интерферированной волны, но с высотой, меньшей суммы высот интерферирующих волн. Если интерферирующие волны расходятся между собой по периоду, то получается система неоднообразных волн, состоящая из повторяющихся групп разной высоты, при этом высота наибольшей интерферированной волны также не достигает удвоенной величины.

Из рассмотрения имеющихся материалов наблюдений (стереофотопланов и кинограмм) можно установить, что в реальных условиях образования судовых волн в каналах не было зафиксировано ни одного случая интерференции расходящихся и поперечных волн, совпадающих между собой по фазе и периоду, а следовательно, и не наблюдалось удвоенного увеличения высоты волны в канале. Как правило, эта интерференция давала максимальную высоту до 1,5÷1,6 ($2h_n$), где $2h$ — высоты соответствующих интерферированных волн.

Такое положение вполне можно объяснить, если учесть, что интерферирующиеся между собой волны (поперечные и расходящиеся) либо не совпадали по фазе, либо отличались друг от друга периодами. В силу изложенного мы не можем согласиться с выводом Божича (70) о возможности полной интерференции судовых волн. Кстати сказать, данное предложение Божича не было подтверждено и материалами натурных наблюдений, проведенных им же на канале имени Москвы. Предлагая эту зависимость, он, по-видимому, исходил из желания получить максимальные размеры для береговых укреплений откосов канала.

В результате рассматриваемой интерференции расходящихся и поперечных волн у берегов каналов создаются мощные волновые валы, которые катятся цепочкой вдоль каждого берега за волнообразующим судном и постепенно затухают вследствие трения о береговые крепления. При этом, в зависимости от условий интерференции, подобные волны могут располагаться либо часто — при достаточной интерференции, либо редко — при малой интерференции.

В первом случае расстояние между смежными волновыми валами может ограничиться длиной интерферирующих волн; во втором случае это расстояние может быть более значительным, равным нескольким длинам интерферирующих волн. Однако в обоих случаях наибольшие размеры имеет первый от судна волновой вал на каждом берегу канала (рис. 87), который и представляет наибольший интерес для решения поставленной задачи.

Следующим этапом переформирования судовых волн в каналах является непосредственное взаимодействие интерферированной волны с откосами. Следует напомнить, что этот вопрос, ввиду его малой изученности, трактуется различными авторами по-разному. Одни авторы считают, что при взаимодействии судовых волн с откосами канала во всех случаях происходит полное разбивание волны с образованием на откосе пробойных потоков; другие — что судовые волны полностью отражаются от откоса канала и не происходит даже частичного разбивания волны на откосе.

Анализируя материалы натурных наблюдений, полученные на канале имени Москвы и канале имени В. И. Ленина, можно утверждать, что взаимодействие судовых волн с откосами канала может проявляться в самых различных видах, в том числе подходящие волны могут и разбиваться, и отражаться. В большинстве

же случаев характер взаимодействия судовой волны с откосом имеет промежуточную форму, т. е. волны частично отражаются и частично разбиваются.

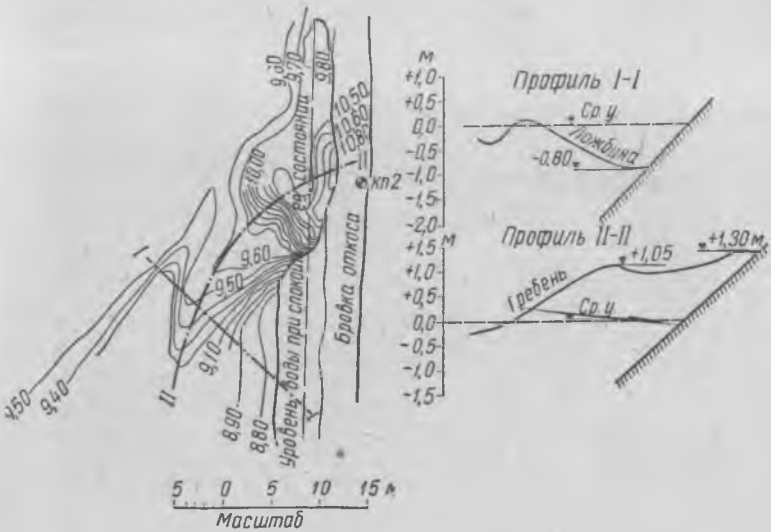


Рис. 87. Стереофотоплан и профили волнового вала

На рис. 88 запечатлены отдельные виды взаимодействия судовой волны с откосом канала при отсутствии на откосе бермы. На

Рис. 88. Общий вид взаимодействия судовых волн с откосом канала

первых трех фотографиях волны частично отражаются от откоса; на последней — разбиваются на откссе.

Форма волнового вала и степень его разбивания на откосе в значительной мере зависят от скорости движения судна и его расстояния от берега, т. е. от глубины воды в месте прохождения

Рис. 89. Общий вид отката и наката судовой волны на откос канала

судна. Если судно проходит вблизи откоса, волновой вал принимает спиралеобразную форму (рис. 89), что особенно видно на участках канала, на откосах которых сделаны относительно большие бермы. Размеры этой «спирали» увеличиваются также по мере увеличения скорости движения судна и уменьшения соотношения между площадью живого сечения канала и площадью миделя судна.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при решении практических задач, связанных с расчетом берегоукрепительных сооружений на откосах судоходных каналов, необходимо учитывать возможность как частичного разбивания подходящей волны на откосе, так и частичного отражения ее от откоса.

§ 19. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ

Все имеющиеся в настоящее время предложения по расчету судовых волн в каналах — эмпирические, в силу чего область их применения весьма ограничена. Такое положение вполне объяснимо, так как на образование и размеры судовых волн в каналах влияет значительное количество факторов, которые не поддаются аналитическому учету.

Вместе с тем, считая, что расчет элементов судовых волн в различных условиях их образования совершенно необходим, мы пред-

лагаем приближенное экспериментально-теоретическое решение с учетом лишь основных факторов, обусловливающих волнообразование в судоходном канале. При этом мы ставим целью несколько расширить диапазон использования имеющихся в настоящее время данных опытных и экспериментальных исследований.

Определение высоты судовой волны в канале

В результате анализа полученных материалов натурных наблюдений за судовыми волнами на действующих судоходных каналах мы пришли к следующим основным выводам.

1. Обтекание судна при его движении и образование при этом судовых волн в каналах в гидромеханическом отношении представляется чрезвычайно сложным явлением. Элементы судовых волн в каналах зависят от большого числа исходных факторов, в силу чего в настоящее время возможность выражения их точными математическими зависимостями чрезвычайно затруднена.

2. Гидравлическое решение поставленной задачи, основанное на рассмотрении осредненных значений скоростей и давлений, вполне возможно, если учесть, что: а) при движении судна наблюдается общее понижение уровня воды в канале, что особенно ярко выражается вблизи самого судна; б) понижение уровня увеличивается по мере увеличения скорости движения судна и уменьшения поперечного сечения канала; в) при движении судна в канале создается обратный ток воды, скорость которого может достичь больших размеров.

Для определения величины спада (понижения) уровня воды в канале можно воспользоваться известным принципом движущихся координат, который широко применяется в теоретической гидромеханике. Если рассматривать движение судна в движущихся координатах, соединенных с судном, то движение воды в канале можно уподобить установившемуся движению воды, обтекающей равномерным потоком неподвижное судно. Основываясь на этом принципе, ряд авторов, в том числе проф. Г. И. Сухомел, проф. Г. Е. Павленко и др., решили несколько задач, связанных с определением осадки судна при его движении, причем полученные ими решения весьма хорошо согласуются с материалами натурных наблюдений [45, 56].

Так как вблизи судна площадь поперечного сечения канала уменьшается, то вследствие постоянства расхода воды скорость движения ее в этом сечении несколько увеличивается по сравнению со скоростью в сечении канала на некотором расстоянии от судна. Увеличение скорости движения воды в свою очередь ведет к уменьшению, а следовательно, и к понижению свободного уровня воды в канале.

Переходя к решению данной задачи, приближенно можно использовать известное уравнение Бернулли для полного потока, т. е. рассматривать все поперечное сечение канала. Использование данного уравнения для решения поставленной задачи основывается

на том, что при конечной площади поперечного сечения потока канала вместо действительного распределения скоростей в потоке можно применить среднее значение скоростей.

Таким образом, применяя данное уравнение для двух поперечных сечений канала, одно из которых проходит через судно, другое — на некотором расстоянии от судна, можно получить

$$H_1 - H = h_л = \frac{1}{2g}\left(v^2 - v_1^2\right), \tag{73}$$

где H — глубина воды в канале в месте прохождения судна;
H_1 — то же, на некотором расстоянии от судна;
$h_л$ — величина понижения уровня воды в канале;
v — скорость движения судна;
v_1 — скорость движения воды в канале.

Из условия постоянства расхода можно написать

$$v_1\Omega = v\left(\Omega - \mathfrak{M} - \omega_n\right),$$

где Ω — площадь поперечного (живого) сечения канала;
$\mathfrak{M}$ — площадь подводной части миделя судна;
ω_n — площадь одной части сечения канала, образованная вследствие понижения уровня;
$(\mathfrak{M} - \omega_n)$ — действительная площадь сечения канала в месте прохождения судна.

Ввиду сложности определения площади ω_n взамен последнего выражения можно принять

$$v_1\Omega = vK\left(\Omega - \mathfrak{M}\right),$$

где обобщенный коэффициент K должен учитывать не только изменение живого сечения в зоне прохождения судна, но и влияние всех прочих факторов.

Тогда вместо выражения (73) можно получить

$$h_л = \frac{v^2}{2g}\left[1 - K^2\left(1 - \frac{\mathfrak{M}}{\Omega}\right)^2\right] \tag{74}$$

или, вводя условное обозначение $n = \frac{\Omega}{\mathfrak{M}}$,

$$h_л = \frac{v^2}{2g}\left[1 - K^2\left(\frac{n-1}{n}\right)^2\right]. \tag{75}$$

Полученное выражение позволит определить величину понижения уровня воды в канале (или величину подпора) вблизи судна в зависимости от скорости его движения и отношения поперечного сечения канала к площади миделя судна. Причем это понижение уровня по существу характеризует величину впадины судовой волны.

Следует еще заметить, что принятая энергетическая схема расчета величины понижения уровня воды в канале является прибли-

женной и по той причине, что здесь не учитывается влияние ряда других факторов и, в частности, влияние сил трения, возможность срыва струй с корпуса судна: завихрение за судном; искривление струй, обтекающих корпус, т. е. не учитываются потери энергии при обтекании судна. Однако все эти и прочие неучтенные факторы косвенным путем могут быть определены обобщенным коэффициентом K, входящим в основную зависимость (75).

Учитывая наличие прямой связи между понижением уровня в канале $h_л$ и высотой волны $2h_n$, принимаем такое выражение:

$$h_л = \alpha_n (2h_n). \tag{76}$$

По данным наших натурных наблюдений установлено, что значение коэффициента α_n колеблется в пределах от 0,3 до 0,5.

Подставляя $h_л$ из выражения (76) в основную зависимость (75), можно получить

$$2h_n = \frac{1}{\alpha_n}\left[1 - K^2\left(\frac{n-1}{n}\right)^2\right]\frac{v^2}{2g}, \tag{77}$$

откуда

$$K^2 = \left[1 - \alpha_n (2h_n)\ \frac{2g}{v^2}\right]\left(\frac{n}{n-1}\right)^2. \tag{78}$$

Для определения коэффициента K^2 воспользуемся данными натурных наблюдений, полученными на канале имени Москвы для различных типов судов при значении n в пределах от 9,4 до 127. Наблюдения производились при глубине воды в канале $H=5{,}5$ *м*, $\Omega=372$ *м*^{2} и при скоростях движения судов в пределах $2{,}92 \div 5{,}7$ *м/сек*.

В табл. 12 (графа 12) приведены результаты вычислений K^2 для среднего значения $\alpha_n=0{,}4$ и исходных данных: n (графа 7); $2h_n$ (графа 10) и v (графа 9). На основании данных таблицы на рис. 90 представлен график зависимости $K^2=f(n)$; из графика для определения K^2 можно получить следующее выражение:

$$K^2_{\alpha_n=0,4} = 1 - \frac{1}{\sqrt{n+4{,}2}}. \tag{79}$$

Аналогичные расчеты были выполнены и для других значений α_n, результаты которых представлены также на рис. 90, причем для этих значений можно получить

$$\left.\begin{aligned} K^2_{\alpha_n=0,3} &\approx 1 - \frac{1{,}2}{\sqrt{n}} \\ \text{и}\quad K^2_{\alpha_n=0,5} &\approx 1 - \frac{1}{\sqrt{30+n}} \end{aligned}\right\}. \tag{80}$$

Сопоставление расчетных данных по судовой волне с материалами

№ п/п	Наименование судна	Габариты судна в *м*			$\mathfrak{M}$	n	Скорость судна v		Высота волны по натурным данным в *м*		K^2	Расчетная высота волны вблизи судна	
		длина l	ширина по миделю b	осадка t			в *км/час*	в *м/сек*	$2h_n$ вблизи судна	$2h$ вблизи откоса		по формуле автора (81)	по формуле Божича (68)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	«Белоруссия»	15,2	16,4	2,4	39,6	9,4	14,0	3,90	0,80	1,15	0,71	0,78	0,73
2	»	115,2	16,4	2,4	39,6	9,4	13,2	3,65	0,70	1,10	0,74	0,68	0,65
3	»	115,2	16,4	2,4	39,6	9,4	12,8	3,56	0,65	1,05	0,73	0,65	0,60
4	»	115,2	16,4	2,4	39,6	9,4	12,5	3,47	0,65	0,95	0,72	0,62	0,58
5	СТ-145	65,2	7,12	2,6	18,5	20	10,5	2,92	0,30	0,45	0,78	0,30	0,29
6	»	65,2	7,12	2,6	18,5	20	11,0	3,05	0,30	0,45	0,82	0,33	0,31
7	»	65,2	7,12	2,6	18,5	20	12,0	3,34	0,45	0,60	0,77	0,40	0,38
8	«Клим Ворошилов»	72,6	8,25	1,46	12,0	31	18,0	5,0	0,70	1,00	0,81	0,71	0,71
9	То же	72,6	8,25	1,46	12,0	31	16,4	4,45	0,55	0,85	0,84	0,56	0,57
10	«Максим Горький»	68,0	6,8	1,8	12,2	30,5	20,5	5,70	0,80	1,25	0,86	0,94	0,92
11	То же	68,0	6,8	1,8	12,2	30,5	19,2	5,35	0,75	1,15	0,86	0,82	0,82
12	»	68,0	6,8	1,8	12,2	30,5	18,8	5,24	0,86	1,20	0,81	0,78	0,77
13	«Гоголь»	81,0	8,55	1,45	12,4	30	17,3	4,80	0,60	0,95	0,84	0,65	0,66
14	«Леваневский»	40,0	6,0	1,46	8,8	42	17,5	4,82	0,50	0,75	0,86	0,56	0,61
15	»	40,0	6,0	1,46	8,8	42	16,0	4,35	0,40	0,60	0,86	0,46	0,51
16	»	40,0	6,0	1,46	8,8	42	14,4	4,0	0,40	0,50	0,84	0,40	0,42
17	»	40,0	6,0	1,46	8,8	42	16,5	4,6	0,50	0,65	0,85	0,52	0,56
18	«Москва-Волга»	21,9	4,5	0,65	2,92	127	18,0	5,0	0,35	0,45	0,91	0,36	0,58
19	То же	21,9	4,5	0,65	2,92	127	18,5	5,1	0,30	0,40	0,92	0,37	0,61

Таблица 12

натурных наблюдений, полученными на канале имени Москвы

$K_u = \frac{2h}{2h_n}$	$\frac{B_0}{l}$	B м	Расчетная высота волны вблизи откоса $2h$		$\frac{2h_m}{2h}$ по автору	$\frac{2h_б}{2h}$ по Божичу	$\frac{v^2}{2g}$	Приведенная высота волны вблизи судна $2\bar{h}_n = 2h_n \frac{2g}{v^2}$			Приведенная высота волны вблизи откоса $2\bar{h} = 2h\frac{2g}{v^2}$			K_u по формуле (82)
			по формуле автора (83)	по формуле Божича (71)				по опытам	по формулам: автора	по формулам: Божича	по опытам	по формулам: автора	по формулам: Божича	
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1,43	0,75	71	1,20	1,38	1,04	1,20	0,772	1,03	1,01	0,94	1,48	1,55	1,77	1,53
1,58	0,75	71	1,05	1,22	0,96	1,12	0,667	1,03	1,00	0,96	1,63	1,56	1,81	1,53
1,62	0,75	71	1,00	1,14	0,95	1,0	0,641	1,02	1,02	0,94	1,64	1,55	1,78	1,53
1,47	0,75	71	0,96	1,09	1,01	1,15	0,612	1,06	1,01	0,95	1,55	1,56	1,78	1,53
1,50	1,33	68	0,44	0,48	0,98	1,07	0,434	0,69	0,69	0,67	1,03	1,01	1,10	1,46
1,50	1,33	68	0,48	0,51	1,06	1,14	0,476	0,64	0,70	0,65	0,95	1,01	1,07	1,46
1,33	1,33	68	0,59	0,62	0,99	1,03	0,568	0,79	0,70	0,66	1,06	1,04	1,08	1,46
1,43	1,19	78	1,05	1,18	0,98	1,18	1,275	0,55	0,56	0,56	0,79	0,82	0,93	1,48
1,55	1,19	78	0,82	0,95	0,97	1,12	1,010	0,54	0,55	0,56	0,83	0,81	0,94	1,48
1,56	1,27	76	1,37	1,52	0,09	1,13	1,655	0,48	0,57	0,56	0,76	0,83	0,92	1,47
1,51	1,27	76	1,20	1,35	1,04	1,18	1,450	0,52	0,56	0,56	0,80	0,83	0,94	1,47
1,40	1,27	76	1,14	1,27	1,09	1,06	1,400	0,60	0,56	0,55	0,86	0,82	0,91	1,47
1,57	1,07	78	0,97	1,14	1,02	1,20	1,170	0,51	0,55	0,55	0,81	0,83	0,98	1,47
1,50	2,16	78	0,84	0,91	0,98	1,21	1,185	0,42	0,47	0,51	0,63	0,71	0,77	1,49
1,37	2,16	78	0,65	0,75	1,08	1,26	0,971	0,41	0,47	0,53	0,62	0,67	0,77	1,40
1,25	2,16	78	0,56	0,63	1,12	1,25	0,812	0,49	0,49	0,52	0,61	0,69	0,76	1,40
1,30	2,16	78	0,73	0,83	1,12	1,28	1,075	0,46	0,49	0,52	0,60	0,68	0,77	1,40
1,28	3,96	83	0,48	0,77	1,08	1,70	1,270	0,27	0,28	0,45	0,35	0,45	0,60	1,33
1,33	3,96	83	0,49	0,81	1,21	2,00	1,325	0,23	0,28	0,46	0,30	0,37	0,61	1,33

Для оценки влияния α_n на точность расчета представим выражение (77) в таком виде:

$$2\overline{h}_n = 2h_n \frac{2g}{v^2} = \frac{1}{\alpha_n}\left[1 - K^2\left(\frac{n-1}{n}\right)^2\right].$$

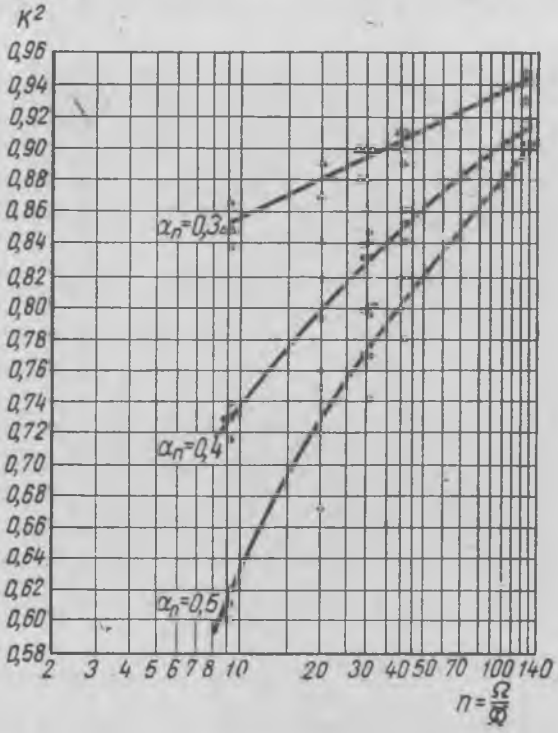


Рис. 90. Определение коэффициента K^2 при различных значениях $\alpha_n = \frac{h_л}{2h_n}$ в зависимости от n

На рис. 91 приведен график изменения безразмерной величины $2\overline{h}_n$ при разных значениях α_n. Из этого графика можно установить, что значение величины α_n в указанных пределах не сказывается на точности практических расчетов.

Таким образом, принимая среднее значение $\alpha_n = 0{,}4$, на основании выражений (77) и (79) для определения высоты судовой волны окончательно можно получить следующую формулу:

$$2h_n = \beta_n \frac{v^2}{2g}, \tag{81}$$

где

$$\beta_n = 2{,}5\left[1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n+4{,}2}}\right)\left(\frac{n-1}{n}\right)^2\right].$$

Для сокращения расчетов последнюю формулу можно упростить, если принять

$$1-\left(1-\frac{1}{\sqrt{n+4,2}}\right)\left(\frac{n-1}{n}\right)^2 \approx \frac{1,22}{\sqrt{n}};$$

тогда вместо выражения (81) можно записать

$$2h_n \approx \frac{3,1}{\sqrt{n}} \cdot \frac{v^2}{2g}. \qquad (81')$$

Сравнивая полученную формулу с формулой Божича (68), можно заметить, что обе формулы конструктивно правильно учитывают значение n (при условии $\mathfrak{W} \approx bt$). Однако чисто эмпирическая формула Божича по сравнению с нашей может дать заметное отклонение при сравнительно малых и больших величинах n.

Обратимся теперь к сравнительной оценке расчетных и фактических величин высоты судовой волны вблизи судна. Для этой цели используем также данные натурных наблюдений на канале имени Москвы (табл. 12).

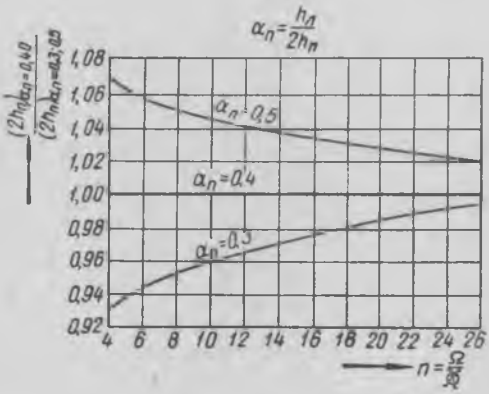


Рис. 91. График зависимости $2\overline{h}_n=f(n)$ по расчетным данным

Сопоставляя полученные данные (графы 10, 13 и 14), можно установить, что предлагаемая нами новая формула по сравнению с формулой Божича дает все же лучшее совпадение с фактически замеренными величинами. К такому же выводу можно прийти и из рассмотрения графика на рис. 92, построенного в безразмерном виде:

$$2\overline{h}_n = 2h_n \frac{2g}{v^2} = f(n).$$

Этот график построен по данным, приведенным в табл. 12 (графы 7, 23, 24, 25).

Из всего изложенного можно сделать следующие выводы:

а) предлагаемая нами новая формула, а также прежняя, рекомендуемая Божичем, при n, изменяющемся в пределах 10÷30, практически дают одни и те же результаты;

б) при $n>30$ формула Божича дает заметное отклонение от опытных данных; наша же формула в этом случае дает лучшее совпадение с опытом;

в) для $n<10$ натурные данные по высоте волны отсутствуют. Однако из сравнительного анализа можно установить, что предложение Божича для этого случая дает заметное завышение судовой волны.

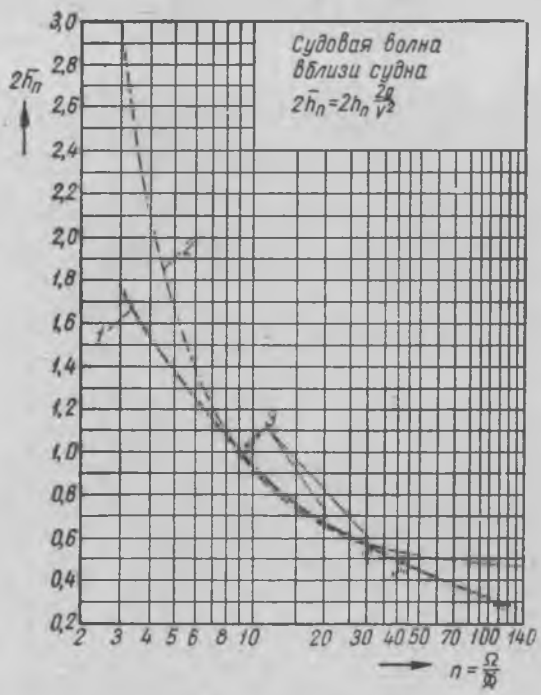


Рис. 92. Сравнение расчетных и опытных величин высоты судовой волны в канале:

1 — по предлагаемой формуле; *2* — по формуле Божича; *3* — данные натурных измерений на канале имени Москвы

Из-за отсутствия в настоящее время данных для случая $n=4\div8$, не представляется возможным дать окончательную оценку полученным результатам расчета. Однако, судя по характеру расположения кривых при других значениях n (см. рис. 92), мы склонны сделать вывод, что наше предложение дает более правильные результаты.

Высота интерферированной волны

Несмотря на проведенные натурные наблюдения, в настоящее время все же не представляется возможным дать хотя бы приближенное теоретическое решение задачи по переформированию судовых волн в канале и определить интерференцию этих волн. Поэтому

при решении поставленной задачи (определении размера интерферированных волн) будем исходить из материалов натурных измерений, полученных на канале имени Москвы.

Сопоставляя высоту волны вблизи откоса $2h$ с высотой волны около судна $2\ h_n$ (см. графы 10, 11, 15 табл. 12), можно заметить, что коэффициент интерференции судовой волны в канале $K_u = \frac{2h}{2h_n}$ в основном зависит от отношения ширины канала поверху B_0 к длине судна l и, как правило, увеличивается по мере уменьшения соотношения $\frac{B_0}{l}$. По отдельным замерам наблюдается некоторое отклонение от данного правила, что, по-видимому, объясняется наличием в этих случаях частичного разбивания волны на откосе.

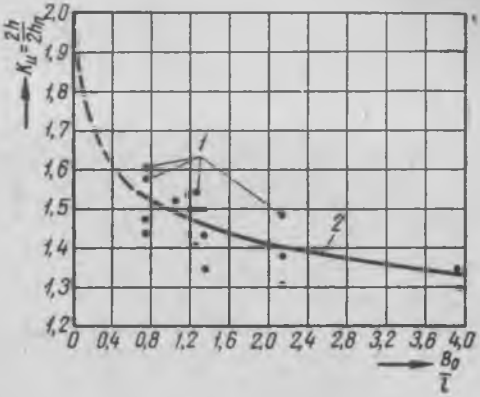


Рис. 93. Данные натурных наблюдений по интерференции судовых волн в канале: 1—по опытным данным $K_u = \frac{2h}{2h_n}$; 2—по формуле

$$K_u = \frac{2+\sqrt{\frac{B_0}{l}}}{1+\sqrt{\frac{B_0}{l}}}$$

Анализируя приведенный график (рис. 93) изменения коэффициента K_u в зависимости от соотношения $\frac{B_0}{l}$, можно получить следующую приближенную зависимость:

$$K_u \approx \frac{2+\sqrt{\frac{B_0}{l}}}{1+\sqrt{\frac{B_0}{l}}}. \tag{82}$$

Сравнивая расчетное значение K_u по данной формуле (см. табл. 12, графа 29) с действительным значением (графа 15), можно установить достаточно удовлетворительное совпадение этих величин.

Таким образом, на основании изложенного, для определения интерферированной высоты судовой волны вблизи откоса канала можно предложить следующую формулу:

$$2h = 2h_n \frac{2+\sqrt{\frac{B_0}{l}}}{1+\sqrt{\frac{B_0}{l}}}, \tag{83}$$

где $2h_n$ находится по формуле (81).

Эту формулу можно представить в более простом виде

$$2h = \frac{3,1}{\sqrt{n}} \left(\frac{2 + \sqrt{\frac{B_o}{l}}}{1 + \sqrt{\frac{B_o}{l}}} \right) \frac{v^2}{2g}. \qquad (83')$$

Для оценки расчетных и фактических величин $2h$ обратимся к материалам натурных наблюдений, полученных на каналах имени Москвы (см. табл. 12) и имени В. И. Ленина (табл. 13 и 14).

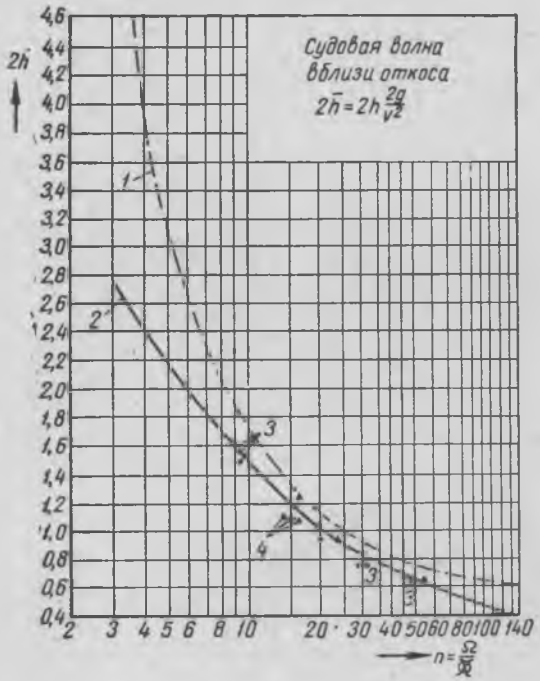


Рис. 94. Сравнение расчетных и опытных величин высоты интерферированной волны в судоходном канале:

1—по формуле Божича; 2—по предлагаемой формуле; 3—данные натурных измерений на канале имени Москвы; 4—то же, на канале имени Ленина

Сравнивая эти величины (см. табл. 12, графы 11, 18, 19, 20, 21, и табл. 14, графы 9, 10, 11), можно установить, что предложенные новые формулы, как и в предыдущем случае, по сравнению с рекомендацией Божича, дают лучшее совпадение с опытными данными. К такому же выводу можно прийти и из рассмотрения графика (рис. 94), построенного в безразмерном виде,

$$2\bar{h} = 2h\,\frac{2g}{v^2} = f(n)$$

на основании опытных данных (см. табл. 12, графы 26, 27, 28; табл. 14, графы 12, 13, 14).

Таким образом, из рассмотрения представленных данных можно прийти к следующим выводам:

а) при $n = 15 \div 50$ формулы дают примерно одинаковые результаты, хотя расчет по формуле Божича в этом случае по сравнению с нашей формулой дает завышение до 10%;

б) при $n > 50$ расчет по Божичу, как и в предыдущем случае, т. е. для $2h_n$, дает большее отклонение от опытов;

Таблица 13

Сопоставление расчетных данных по высоте судовой волны вблизи откоса канала с результатами фактических измерений, полученных на канале Волго-Дон имени Ленина

№ опыта	$\mathfrak{M}$	n	B'_0	$\frac{B'_0}{l}$	Скорость судна в *км/час*	Скорость судна в *м/сек*	$\frac{v^2}{2g}$	Высота волны $2h$ в *м* по опытам	Высота волны $2h$ в *м* по формулам автора (83)	Высота волны $2h$ в *м* по формулам Божича	Приведенная высота $2\bar{h} = 2h\frac{2g}{v^2}$ по опытам	Приведенная высота $2\bar{h} = 2h\frac{2g}{v^2}$ по формулам автора	Приведенная высота $2\bar{h} = 2h\frac{2g}{v^2}$ по формулам Божича	$K_н$ по формуле (82)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	91,5	13,7	84	1,05	12,0	3,34	0,571	—	—	—	—	—	—	—
2	18,6	14,3	76	0,95	10,8	3,00	0,458	0,50	0,56	0,65	1,09	1,21	1,41	1,51
3	18,6	14,3	78	0,98	13,8	3,85	0,755	—	—	—	—	—	—	—
4	16,6	16,0	60	0,89	12,0	3,34	0,571	—	—	—	—	—	—	—
5	11,2	23,8	78	1,09	16,0	4,45	1,015	—	—	—	—	—	—	—
6	17,6	15,0	78	0,98	13,9	3,86	0,755	0,80	0,91	0,98	1,06	1,20	1,30	1,50
7	17,6	15,0	80	1,00	14,4	4,00	0,817	0,85	0,97	1,08	1,04	1,19	1,31	1,50
8	15,2	17,5	82	0,97	14,0	3,88	0,765	0,95	0,85	0,97	1,23	1,14	1,26	1,51
9	10,5	25,3	78	1,82	15,1	4,20	0,895	—	—	—	—	—	—	—
10	10,5	25,3	96	2,24	11,2	3,11	0,495	0,30	0,42	0,46	0,61	0,85	0,93	1,40
11	7,5	35,5	68	3,08	14,7	4,10	0,855	—	—	—	—	—	—	—
12	11,2	23,8	70	1,00	10,9	3,03	0,470	0,45	0,37	0,50	0,96	0,80	1,06	1,50
13	17,6	15,0	68	0,83	13,8	3,83	0,748	—	—	—	—	—	—	—
14	4,8	55,0	80	3,82	18,0	5,00	1,270	—	—	—	—	—	—	—
15	4,8	55,0	50	2,38	17,4	4,84	1,200	0,65	0,70	—	0,74	0,58	—	1,39

Примечание. № опытов соответствуют данным табл. 12.

Таблица 14

Данные натурных измерений элементов судовых волн, полученных на канале имени Ленина в 1954—1955 гг. (по материалам УВДСК)

№ опыта	Тип и название судна	Движитель	Габариты судов в *м*: длина l	ширина b	осадка t	Скорость судна в *км/час*	Габариты канала в *м*: ширина по урезу B_0	ширина по осадке судна B	глубина в канале H	Расстояние судна от берега: правого	левого	Длина волны в *м*: фактическая	по формулам: автора (84)	Божича (72)	$\frac{l}{B_0}$	$\xi = 2L\frac{g}{v^2}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Дизель-электроход «Белоруссия»	Винтовой	80,0	9,3	2,1	12,0	78,0	62,0	4,2	36,0	42,0	4,33	4,5	7,2	0,95	3,8
2	Дизель-электроход «Туркменистан»	»	80,0	9,8	2,0	10,8	77,0	61,0	4,1	39,0	38,0	4,0	4,6	5,8	1,05	4,3
3	Дизель-электроход «Белоруссия»	»	80,0	9,8	2,0	13,8	79,0	65,0	4,3	40,0	39,0	—	—	—	—	—
4	Самоходное судно «Днепр»	»	67,3	8,3	2,0	12,0	79,0	65,0	4,3	49,0	30,0	4,35	5,6	7,5	1,12	—
5	Пароход «Янка Купала»	Колесный	71,1	9,7	1,15	16,0	79,0	72,0	4,3	40,0	39,0	5,80	8,0	12,5	0,92	—
6	Дизель-электроход «Россия»	Винтовой	80,0	9,3	1,9	13,9	78,0	62,0	4,3	39,0	39,0	7,72	7,6	9,5	1,02	5,1
7	Дизель-электроход «Грузия»	»	80,0	9,3	1,9	14,4	78,0	62,0	4,3	38,0	40,0	8,0	8,2	10,2	1,01	6,4
8	Пароход «Лермонтов»	Колесный	84,38	8,0	1,9	14,0	78,0	62,0	4,3	37,0	41,0	7,8	7,6	9,6	1,04	5,1
9	Самоходное судно № 205	Винтовой	43,0	7,5	1,4	15,1	78,0	68,0	4,3	39,0	39,0	9,25	7,2	11,2	0,55	—
10	Самоходное судно № 166	»	43,0	7,5	1,4	11,2	78,0	68,0	4,3	36,0	48,0	—	—	—	—	—
11	Буксирный теплоход № 306	»	22,0	6,3	1,2	14,7	78,0	70,0	4,3	44,0	34,0	8,2	6,9	10,7	0,32	4,3
12	Пароход «Гражданка»	Колесный	69,7	8,0	1,4	10,9	70,0	60,0	4,3	35,0	35,0	—	—	—	—	—
13	Теплоход «Г. Седов»	Винтовой	81,65	9,3	1,9	13,8	70,0	54,0	4,3	36,0	34,0	7,7	7,6	9,4	1,20	5,1
14	Теплоход «Р-413»	»	21,0	3,98	1,2	18,0	70,0	62,0	4,3	30,0	40,0	10,0	10,2	15,9	0,26	3,9
15	Теплоход «Р-415»	»	21,0	3,98	—	17,4	70,0	62,0	4,3	45,0	25,0	9,7	9,7	15,0	0,42	4,0

в) при $n=8\div15$ наше предложение лучше согласуется с опытом; для этого случая Божич дает завышение против опытов на $20\div30\%$.

Из-за отсутствия опытов для $n=4\div8$ не представляется возможным дать окончательную оценку предлагаемым решениям для судовой волны вблизи откоса канала. Вместе с тем, из сравнительной оценки можно установить, что и в этом случае предложение Божича дает значительное завышение высоты волны и мало правдоподобные результаты.

Для окончательного решения поставленного вопроса здесь возникает также настоятельная необходимость постановки натурных исследований судовых волн в каналах при $n=4\div10$.

Предлагаемая формула (83) соответствует прохождению судна по оси канала; в тех случаях, когда судно проходит на расстоянии b_c от берега, в последней формуле вместо B_0 следует принять $2b_c$ (рассматривая условно уменьшение ширины канала поверху).

Длина судовых волн

При рассмотрении вопроса о длине поперечной волны при всех прошлых исследованиях исходили из возможности в этом случае использования общеизвестной формулы для ветровых волн зыби, принимая, что скорость распространения этой волны во всех случаях равна скорости движения судна по каналу, т. е.

$$2L=\frac{2\pi}{g}v^2\operatorname{cth}\frac{\pi H}{L}.$$

П. К. Божич, учитывая, что в условиях судоходных каналов величина $\operatorname{cth}\frac{\pi H}{L}$ при обычных соотношениях $\frac{H}{L}$ близка к единице, счел возможным упростить это выражение и представить его в виде зависимости (72).

Наиболее неопределенным вопросом является определение длины и периода расходящихся волн, учитывая, что для этих волн скорость их распространения всегда меньше скорости движения судна (при угле зоны волнообразования $\alpha=20°$). Этим обстоятельством по существу и можно объяснить отсутствие полной интерференции поперечных и расходящихся волн.

Вместе с тем имеющиеся материалы наблюдений показывают, что наибольшая быстрота распространения носовых расходящихся волн, имеющая место у границы волнообразования, в отдельных случаях все же близка к быстроте распространения кормовых поперечных волн. По этой причине можно считать, что максимальная длина расходящихся волн в пределе может быть близка к длине поперечных волн.

На основании изложенного для простоты дальнейшего изложения всех вопросов, связанных с установлением волновых нагрузок на покрытие откосов судоходных каналов, будем исходить из ус-

ловия равенства длины этих волн, отдавая при этом себе отчет о возможности получения некоторого запаса в искомых величинах.

Рассматривая данные натурных наблюдений за длиной судовых волн, приведенные в табл. 13 (графы 13÷17) и в табл. 15, можно установить, что эта длина волн зависит не только от скорости движения судна v, но и от соотношения между длиной судна l и шириной канала B_0.

Таким образом, для определения длины судовой волны в канале более правильным будет принять такую зависимость:

$$2L = \xi \frac{v^2}{g}, \tag{84}$$

где значение ξ в первом приближении рекомендуется принимать равным:

$$\text{для} \quad \frac{l}{B_0} \leqslant 1 \quad \xi \approx 4; \quad \text{для} \quad \frac{l}{B_0} > 1 \quad \xi \approx 5.$$

Таблица 15

Данные натурных измерений длины судовой волны на канале имени Москвы

Название судна	Длина судна в *м*	$\frac{l}{B_0}$	Замеренная длина волны ($2L$) в *м*	v *м/сек*	$\xi = \frac{g}{v^2} 2L$
«Ворошилов»	72	0,85	9,7	4,6	4,45
»	72	0,85	9,2	5,1	3,45
»	72	0,90	7,2	4,2	3,90
«Ляпидевский»	40	0,50	10,2	5,0	4,00
»	40	0,46	9,4	4,6	4,25
»	40	0,46	7,2	4,2	4,00
«Максим Горький»	68	0,78	13,0	5,2	4,75
»	68	0,78	9,4	5,1	3,50
»	68	0,70	8,5	4,4	4,20
»	68	0,70	7,8	4,5	3,65
»	68	0,70	8,1	4,8	3,40
»	68	0,70	7,6	4,2	4,20
»	68	0,70	7,1	4,3	3,85

Оценка предлагаемой зависимости (84) и предложения Божича (72) даны в табл. 14 (графы 13÷15) по данным измерений на канале имени Ленина и в табл. 15 — по данным канала имени Москвы. Представленные материалы показывают, что предлагаемая зависимость для определения длины судовой волны дает лучшее совпадение с опытом.

В последующих исследованиях все же является желательным данное предложение уточнить по материалам дополнительных натурных наблюдений.

ГЛАВА V

ВОЗДЕЙСТВИЕ СУДОВЫХ ВОЛН НА ОТКОСЫ КАНАЛОВ

§ 20. СОСТАВ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

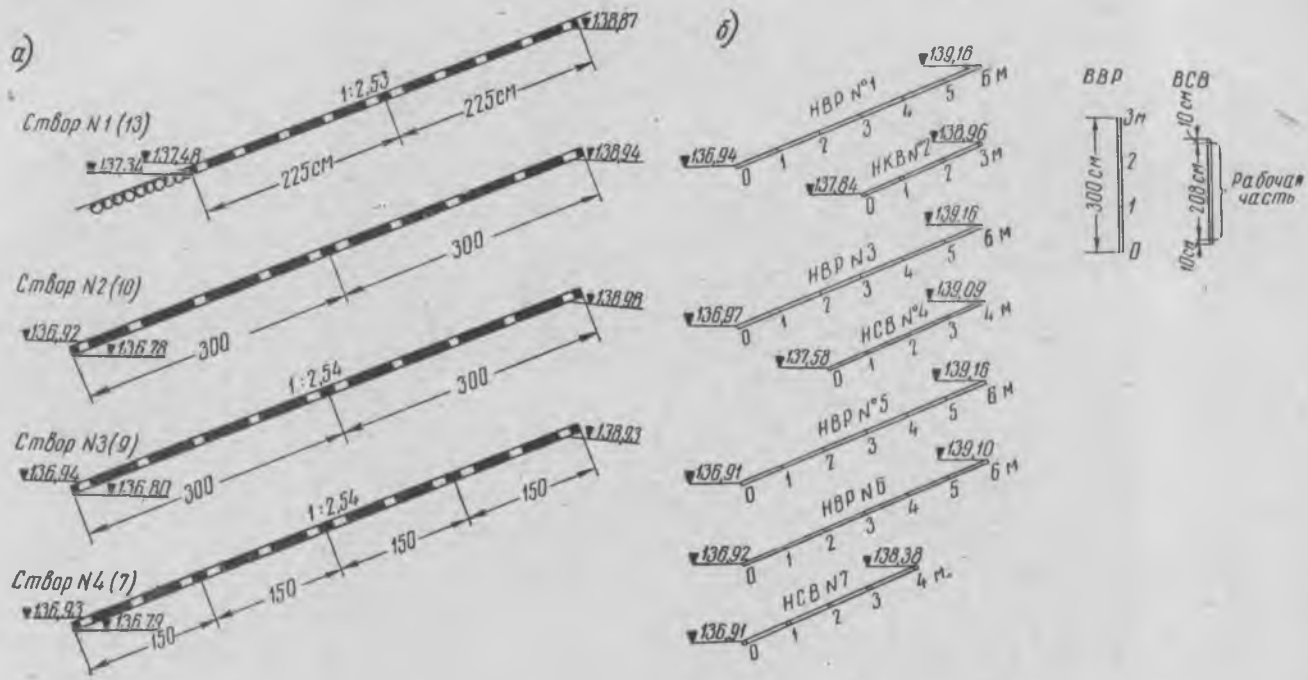
При решении вопроса о расчете покрытий откосов судоходных каналов прежде всего возникает необходимость в определении волновых нагрузок, высоты наката волны на откос, высоты ската волны с откоса и скоростей волнового потока на поверхности откоса.

Вследствие сложности моделирования воздействий судовых волн на крепление откосов судоходных каналов было признано целесообразным проводить основные исследования в натурных условиях. Организация проведения и проведение натурных исследований на действующих судоходных каналах представляет несомненный интерес, так как здесь исключатся все трудности, возникающие при проведении лабораторных опытов.

Вместе с тем, из-за небольшого диапазона изменений исходных параметров (постоянство заложения откоса, малый диапазон изменения крутизны волны и т. п.) при обработке материалов натурных наблюдений часто возникают трудности в определении количественных зависимостей. В силу этого в отдельных случаях при переходе к количественным зависимостям мы были вынуждены использовать и результаты лабораторных опытов.

Следует заметить, что до настоящего времени по существу отсутствуют рекомендации по определению волновых воздействий на крепления откосов судоходных каналов. Отдельные указания в части определения высоты наката волны на откос судоходного канала и отката с него с использованием формул, полученных применительно к ветровым волнам, не всегда дают правильные результаты и не могут быть рекомендованы для практических расчетов.

Для решения ряда инженерных задач, связанных с установлением характера волновых воздействий на откосы канала, работой различных типов покрытий откосов, исследованием обратных фильтров в условиях волнового потока, определением волновых нагрузок и т. п. были организованы в 1951, 1955 и 1957 гг. и проведены специальные исследования на трех опытных участках канала имени Москвы. При натурных исследованиях также решались конкретные задачи,


а)
Створ N1 (13)
137,34
137,48
138,87
1:2,53
225см
225см
Створ N2 (10)
136,92
136,78
138,94
300
300
Створ N3 (9)
136,94
136,80
138,98
1:2,54
300
300
Створ N4 (7)
136,93
136,79
138,93
1:2,54
150
150
150
150
б)
НВР N°1
136,94
139,16
6 м
НКВ N2
137,84
138,96
3 м
НВР N3
136,97
139,16
6 м
НСВ N°4
137,58
139,09
4 м
НВР N°5
136,91
139,16
6 м
НВР N6
136,92
139,10
6 м
НСВ N7
136,91
138,38
4 м
ВВР
ВСВ
3 м
300 см
10 см
208 см
10 см
Рабочая часть

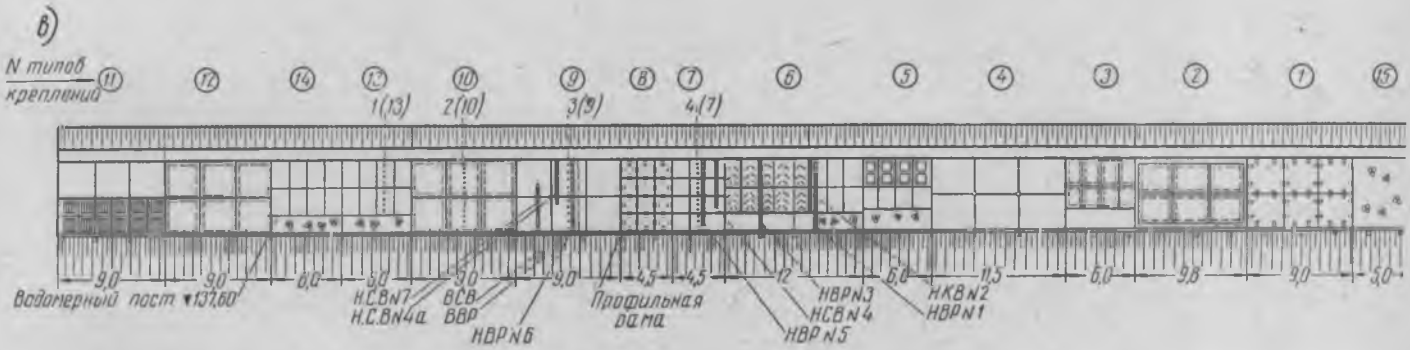


Рис. 95. Схемы расположения ниш на опытном участке (*а*), привязка измерительных реек (*б*), план опытного участка с указанием расположения измерительных приборов (*в*):

НВР — наклонная водомерная рейка; НСВ — наклонный струнный волнограф; ВВР — вертикальная водомерная рейка; ВСВ — вертикальный струнный волнограф, отметки расположения профильной рамы: низ — 136,87, верх — 138,18, длина рамы 365 *см*, высота 50—130 *см*, деления — по 10 *см* (считая от низа)

связанные с оценкой различных типов покрытий и проверкой предложенных рекомендаций по расчету этих покрытий.

На одном из опытных участков было заложено 15 различных типов бетонных покрытий, различающихся размерами железобетонных плит, конструкцией и составом обратного фильтра (сплошные и ленточные фильтры); отметкой низа бетонного покрытия; конструкцией плит без фильтрового основания; различными типами каменных покрытий и т. п. На рис. 95 показан план этого опытного участка с указанием расположения измерительной аппаратуры и приборов (опыты 1957 г.).

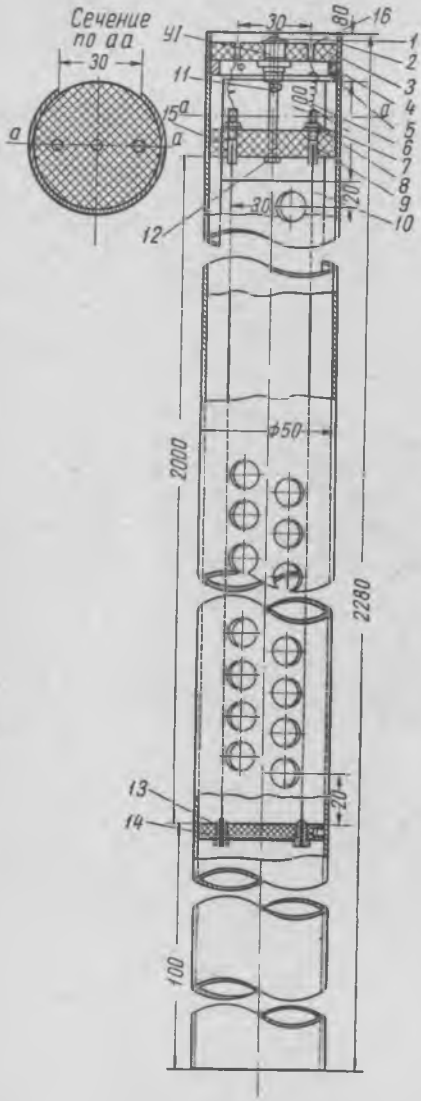


Рис. 96. Струнный волнограф для измерения высоты волны:

1, 7—гайка М6; *2*—труба 100×95; *3, 14, 15*—втулки; *4*—винт М6; *5*—кольцо; *6*—провод; *8*—шайба; *9*—ниппель верхний; *10*—проволока; *11*—лепесток; *12*—болт М6; *13*—ниппель нижний; *16*—контактная втулка; *VI*—разъем

Волны в районе опытных участков образовывали с помощью теплоходов, двигающихся по каналу с различными скоростями. Кроме того, при опытах фиксировали рейсовые суда. На каждом опытном участке исследования продолжались более месяца, что позволило получить значительное количество данных натурных измерений.

Для размещения измерительной аппаратуры, необходимой при проведении натурных исследований (осциллографов, усилителей и т. п.), оборудовали специальные помещения. Для определения высоты судовой волны в канале в основном использовали струнный волнограф. Кроме того, были изготовлены опытные образцы емкостного и контактного волнографов. Однако эти волнографы практически не были использованы по ряду причин: контактный волнограф—из-за потери чувствительности от загрязнения электродов и контактов; емкостный — из-за того, что невозможно было

достичь постоянства положения электропроводки вследствие сложности изоляции электродов.

Необходимо отметить, что существенным недостатком струнного волнографа является то, что он теряет чувствительность из-за загрязнения электродов. Однако проведенные опыты на канале показали, что точность показаний струнных волнографов за месячный период работы ± 5 *см*, т. е., как и по визуальному отсчету на водомерной рейке.

Рис. 97. Ферма с установкой вертикальной водомерной рейки и струнного волнографа:
1—водомерная рейка; *2*—струнный волнограф

Конструкция и размеры струнного волнографа показаны на рис. 96: струны сделаны из константановой проволоки диаметром 0,5 *мм*, корпус — из дюралевой трубы диаметром 50 *мм*, с отверстиями по 20 *мм*. Волнограф устанавливали на специальной ферме (рис. 97). Усилитель для записи высоты волны состоит из усилителя напряжения, генератора, буферного каскада, шлейфового выпрямителя и блока питания.

Высоту наката и отката волны как в лабораторных, так и в натурных условиях измеряли как наклонными водомерными рейками, волнографами (рис. 98), так и по данным киносъемки. Широкое применение киносъемки (при скоростях 24—48 кадров в секунду) позволило установить ряд интересных положений в характере взаимодействия волн с откосом канала.

Для определения скорости отката судовой волны с откоса канала была использована также киносъемка. Для измерения вол-

Рис. 98. Общий вид расположения измерительных приборов на опытном участке:

1—датчики давления; *2*—наклонный струнный волнограф

Рис. 99. Датчик для измерения волновых давлений

новых давлений, как и в лабораторных опытах, были применены тензометрические датчики, однако с несколько большими размерами (рис. 99). Отличительная особенность натурного датчика состоит

в том, что после термической обработки балочки с наклеенными тензометрами и сборки датчика, для большей герметизации тензометров, внутреннюю часть корпуса примерно на $\frac{3}{4}$ объема заполняли вазелиновым маслом и плотно закрывали крышкой. Принципы действия приборов описаны в § 5.

§ 21. ДАВЛЕНИЕ СУДОВОЙ ВОЛНЫ НА ОТКОСЫ КАНАЛА

Перед тем как перейти к рассмотрению данных натурных исследований, коротко остановимся на характере взаимодействия судовой волны с откосом канала.

Как отмечалось выше, при прохождении судна в канале вблизи откоса начинается интенсивное понижение уровня, т. е. скат воды с откоса. По окончании процесса отката волны с откоса начинается образование волнового вала (первого гребня), который подходит к откосу под некоторым углом и после завершения наката волны движется по откосу вдоль канала.

После прохождения первого волнового вала происходит вторичный откат волны с откоса канала и накат ее на откос и последующий процесс до полного затухания волнения в канале, который с момента образования первой волны наступает сравнительно быстро.

Сопоставляя общую картину взаимодействия судовых волн с откосом канала с приведенными выше материалами лабораторных опытов по изучению косых волн (см. § 9), можно установить некоторую их аналогию. Процесс разрушения судовых волн существенно отличается от разрушения при нормальном подходе к откосу ветровых волн.

Судя по материалам киносъемки, взаимодействие судовых волн с откосом может иметь самый различный характер в зависимости от условий их образования (типа и скорости движения судна, расстояния судна от откоса, глубины воды и т. п.). Однако из всех зафиксированных процессов можно выделить некоторые характерные.

При подходе судовой волны на откосе образуется волновой вал спиралеобразной формы (см. рис. 89), который, продвигаясь вдоль берега канала, последовательно выбрасывает на берег массу накатывающейся воды. Здесь после разрушения волны струи воды, сброшенные с гребня, описывают также параболические траектории. Величина волнового давления на откосе в рассматриваемом случае зависит от размера самого волнового вала, а характер осциллографической записи, в виде исключения, может иметь вид импульсного давления.

В большинстве опытов происходил накат волнового потока на откос (без заметного разбивания волнового вала), а сам характер волнового движения перед откосом приближался к типу отраженной волны.

Максимальное местное давление

Проведенные опыты показали, что в момент разрушения волны на откосе максимальное волновое давление, как и в случае воздействия ветровых волн, всегда приложено в точке, находящейся несколько ниже уровня покоя. В силу этого для определения максимального давления и точки его приложения на откосе тензометрические датчики давлений устанавливали в передвижную металлическую раму, которую закладывали затем в специальной нише заподлицо с поверхностью откоса. Эта рама перемещалась вдоль откоса после каждого рейса судна.

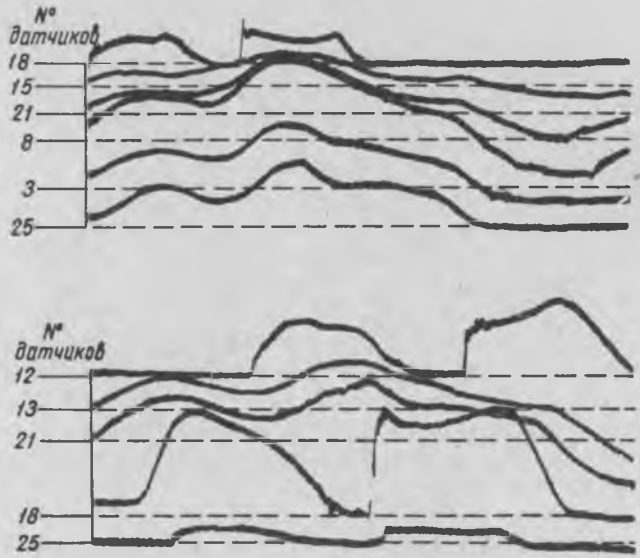


Рис. 100. Осциллографическая запись избыточных (активных) давлений по материалам натурных наблюдений

В результате проведенных исследований было получено значительное количество осциллографических записей волнового давления в отдельных точках откоса. В качестве примера на рис. 100 представлена одна из таких записей волновых давлений на поверхности откоса; на этой диаграмме максимальное местное давление фиксировалось датчиком № 18. Заметим, что представленная осциллографическая запись показывает изменение избыточных (сверхгидростатических) давлений в отдельных точках откоса за период волны.

Из анализа осциллографических записей волнового давления можно установить две его особенности.

Первая особенность состоит в том, что в момент обрушения волны наблюдается резкое возрастание волнового давления, при-

чем время нарастания давления исчисляется также несколькими долями сотых секунды. Наблюдаемая величина пика, по сравнению с последующим давлением «навала», не имеет существенного различия. Эта особенность позволяет сделать вывод, что импульсное давление от судовых волн существенно отличается от наблюдаемого при ударе ветровых фронтальных волн.

Следует также заметить, что в большинстве опытов записи максимального волнового давления характеризуются отсутствием пика, что всегда имело место при переходном режиме волнового движения на откосе, т. е. при режиме между разбиванием и отражением волны.

Вторая особенность диаграммы изменения максимального волнового давления на откосе судоходного канала состоит в том, что после удара волны последующий затем «навал» практически продолжается до момента максимального наката волны на откос, после чего, т. е. начиная с начала отката волны с откоса, происходит сравнительно плавное уменьшение избыточного давления. Вместе с тем в период навала, т. е. от момента удара до начала отката волны с откоса, абсолютная величина волнового давления не претерпевает существенного изменения.

Отмеченные особенности позволяют сделать вывод о том, что при рассмотрении вопроса о расчете бетонного покрытия на прочность в условиях воздействия судовых волн можно не учитывать кратковременность действия пика волновой нагрузки, т. е. расчет вести по величине навала.

Переходя к вопросу определения аналитической зависимости для установления максимального давления в момент удара волны $p_{макс}$, следует заметить, что при проведении этих опытов фиксировали лишь высоту волны вблизи откоса, тип судна и скорость его движения. Вместе с тем можно предположить по аналогии с ударом ветровых волн (см. § 7), что и в данном случае величина $p_{макс}$ будет зависеть не только от высоты волны $2h$, но и от соотношения $\frac{2L}{2h}$. Однако по условиям проведения опытов не представилось возможным одновременно фиксировать длину волны, в силу чего при окончательной обработке материалов для определения длины судовой волны была условно использована формула (84).

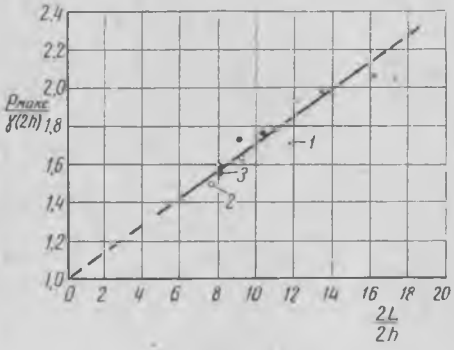


Рис. 101. График зависимости $\frac{p_{макс}}{\gamma\,(2h)} = f\left(\frac{2L}{2h}\right)$ по данным натурных измерений:

1—по опытам 1951 г.; 2—по опытам 1954 г.; 3—по опытам 1957 г.

Результаты основных опытов по определению $p_{макс}$ сведены в табл. 16, на основании данных которой построен соответствующий график (рис. 101). Интересно заметить, что полученный характер изменения волнового давления в лабораторных условиях (см. рис. 43) хорошо согласуется с данными натурных измерений.

Из приведенных материалов для рассматриваемого заложения откоса 1 : 2,5 (m=2,5) можно получить следующую зависимость:

$$p_{макс}=\gamma\,(2h)\left[1+0{,}07\,\frac{2L}{2h}\right]. \qquad (85)$$

Таблица 16

Данные натурных измерений максимального давления на откосе канала

Дата наблюдений	Скорость движения судна v в *м/сек*	$2h$ *м*	$2L$ *м*	$\frac{2L}{2h}$	$p_{макс}$ *т/м²*	$\frac{p_{макс}}{\gamma\,(2h)}$
Август 1951 г.	5,0	0,68	10,2	15,0	1,42	2,08
	4,9	0,73	9,8	13,4	1,42	1,95
	4,8	0,79	9,4	11,9	1,35	1,70
	5,1	0,82	13,2	16,1	1,72	2,08
	4,5	0,85	8,5	10,0	1,35	1,60
Октябрь 1955 г.	3,5	0,45	5,0	11,0	0,80	1,78
	4,2	0,60	7,2	12,0	1,15	1,92
	4,1	0,75	6,9	9,2	1,22	1,64
	4,0	0,85	6,6	7,7	1,27	1,50
	4,4	1,00	8,0	8,0	1,60	1,60
Июнь 1957 г.	4,8	0,90	9,4	10,4	1,56	1,75
	3,7	0,70	5,6	8,0	1,02	1,45
	4,3	0,85	7,6	9,0	1,67	1,92

Если условно распространять полученную выше зависимость (39) на судовые волны, т. е. внести в формулу (85) коэффициент, равный

$$\sqrt{\frac{8-m}{8-2{,}5}}\approx 0{,}43\,\sqrt{8-m},$$

то вместо формулы (85) можно написать

$$p_{макс}\approx 0{,}43\,\gamma\,(2h)\left(1+0{,}07\,\frac{2L}{2h}\right)\sqrt{8-m}\,. \qquad (86)$$

Принятое положение о влиянии заложения откоса на величину $P_{макс}$, полученную применительно к ветровым волнам, можно распро-

странить и на судовые волны, так как характер осциллографических записей идентичен (см. рис. 42 и рис. 100).

Представляет интерес количественное сравнение величины волновых давлений, полученных по формулам для ветровой волны (39) и для судовой волны (86). Соотношение этих результатов может быть представлено в таком виде:

$$\frac{p_{(39)}}{p_{(86)}} = \frac{0{,}51 + 0{,}034\,\frac{2L}{2h}}{0{,}43 + 0{,}03\,\frac{2L}{2h}}.$$

Результаты расчетов для разных соотношений $\frac{2L}{2h}$ даны в табл. 17.

Таблица 17

$\frac{2L}{2h}$	$\overline{p}_{(39)}$	$\overline{p}_{(86)}$	$\frac{p_{(39)}}{p_{(86)}}$	$\frac{p_{(39)}}{p_{(86)}}\cos^2\beta$
8	0,78	0,67	1,16	1,02
12	0,91	0,79	1,15	1,01
15	1,02	0,88	1,16	1,02
20	1,19	1,03	1,15	1,01

Из приведенных данных следует, что величины давлений, подсчитанные по формуле для судовой волны, оказались несколько меньшими подсчитанных по формуле для ветровой волны. Однако, учитывая, что судовая волна подходит к откосу под некоторым углом и что этот угол в среднем составляет $\alpha' = 20°$ (см. § 18), для косого подхода можно написать

$$p_3 = p_\alpha = p_{макс}\cos^2\alpha = 0{,}88\,p_{макс}.$$

В таком случае расхождение между результатами, полученными по этим двум формулам, получается весьма незначительным (см. табл. 17), что в конечном итоге подтверждает возможность моделирования удара разбитой волны по правилу гравитационного подобия (при масштабе моделирования $\lambda \leqslant 20$).

На основании данных натурных наблюдений было установлено, что величина $p_{макс}$, определяемая зависимостью (86), приложена в точке, находящейся от уровня покоя на глубине, равной e_0, которая примерно может быть определена так:

$$e_0 \approx 0{,}35 \div 0{,}45\,(2h). \qquad (87)$$

Сопоставляя полученную зависимость с формулой (37) при $m = 2{,}5$, можно установить, что максимальное давление от судовой

волны составляет примерно 0,85 соответствующего давления ветровой фронтальной волны, что также хорошо согласуется с данными, приведенными в § 9.

Построение эпюр давлений на откосе

Для построения эпюры волнового давления на откосе в бетонном покрытии устраивали отверстия, куда вставляли кассеты с датчиками давлений (схема расположения датчиков показана на рис. 95); кроме того, использовали и передвижную раму. Два синхронно включенных осциллографа позволяли одновременно фиксировать как волновые давления в отдельных точках (в 8—9), так и элементы волны в канале.

При проведении этой серии опытов было принято несколько схем последовательного включения датчиков. Кроме того, в каждом осциллографе всегда записывались давления в связующих датчиках, которые устанавливались на постоянной отметке.

Учитывая, что метод построения волнового давления на откос судоходного канала впервые был разработан нами во время проведения натурных исследований еще в 1951 г. [67], в последующих натурных исследованиях, и особенно в 1957 г., мы ограничились лишь проверкой и уточнением прежних рекомендаций.

Для изучения рассматриваемого вопроса были произведены осциллографические записи для 15 волн; при этом исходная высота волны колебалась в пределах от $2h_{мин}=0{,}75$ *м* до $2h_{макс}=0{,}85$ *м*. Так как соблюсти постоянство высоты волны во время проведения опытов было невозможно, то при оценке полученных результатов была принята осредненная высота $2h_{ср}=0{,}82$ *м* (из 15 волн). Средняя длина волны определялась по формуле (84) при данных значениях скорости движения судна $2L_{ср}\approx 13{,}2$ *м*. Во время проведения этих опытов, кроме того, определяли высоту наката волны на откос $h_в=1{,}25$ *м* (средняя) и глубину над точкой приложения максимального давления $e_0\approx 0{,}30$ *м*.

В результате проведения этой серии опытов были получены соответствующие осциллографические записи волновых давлений в отдельных точках откоса, а также соответствующие эпюры избыточных давлений.

Из анализа полученных материалов можно установить, что эпюры максимального избыточного (сверхгидростатического) давления соответствуют промежутку времени, начиная от начала обрушения волны на откосе и кончая моментом завершения максимального наката волны. В силу изложенного при окончательной обработке материалов натурных измерений эпюры волнового давления строили для двух моментов: момента удара волны на откос при $p_{макс}$ и момента максимального наката волны на откос при p_m; причем эти максимальные величины приложены примерно в одной точке, т. е. на глубине $e_o\approx 0{,}3$ *м*.

Окончательные результаты данной серии опытов представлены

в табл. 18. В этой таблице, как правило, приведено два крайних измерения, соответствующих величинам z. За плоскость сравнения принята верхняя поверхность откоса; соответствующая величина z откладывалась по линии откоса вверх и вниз от точки, расположенной на глубине e_0. Величина $z_в$, характеризующая проекцию суммы величин $h_в$ и e_0, определялась по формуле

$$z_в = (h_в + e_0)\sqrt{m^2 + 1}, \tag{88}$$

что при $h_в = 1{,}25$ *м*, $e_0 = 0{,}30$ *м* и $m = 2{,}5$ для данных опытов составляет 4,2 *м*.

На основании данных табл. 18 на рис. 102 представлены соответствующие эпюры волнового давления. Из рассмотрения полученных эпюр прежде всего можно установить прямую связь между волновым давлением в какой-либо точке p_z от соответствующего максимального давления $p_{макс}$ и p_m. Причем максимальная величина волнового давления для момента наката волны на откос p_m примерно составляет 0,7 $p_{макс}$.

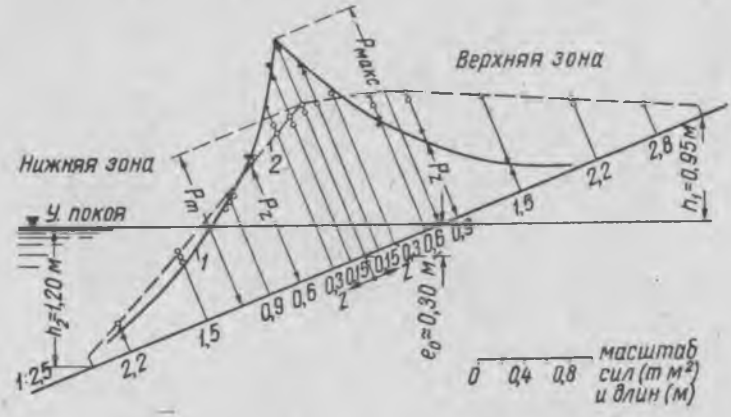


Рис. 102. Эпюры волнового давления на откос канала по данным натурных измерений:

1—на момент обрушения волны; *2*—на момент наката волны

Из изложенного видно, что для построения эпюры волнового давления на откосе в момент удара представляется возможным оставить также предложенные нами зависимости [69], т. е. строить кривые избыточных давлений по таким формулам:

для верхней зоны

$$p_z \approx p_{макс}\, e^{-4{,}1 \frac{z}{z_в - z}}; \tag{89}$$

Таблица 18

Осредненные опытные данные волнового давления на откосе канала

Нижняя зона

z м	$\frac{z}{z_в}$	удар		накат	
		p_z т/м²	$\frac{p_z}{p_{макс}}$	p_z т/м²	$\frac{p_z}{p_m}$
0	0	2,08	1,00	1,45	1,00
		2,00	0,96	1,43	0,99
0,15	0,036	1,85	0,89	1,40	0,96
		1,75	0,84	1,32	0,92
0,30	0,072	1,60	0,77	1,40	0,96
		—	—	1,30	0,90
0,60	0,143	1,25	0,60	1,25	0,86
		1,15	0,55	—	—
0,90	0,214	0,95	0,45	0,92	0,64
		0,90	0,43	0,88	0,61
1,50	0,358	0,56	0,26	0,70	0,48
		—	—	0,67	0,46
2,2	0,525	0,20	0,10	0,25	0,17
		0,15	0,07	—	—

Верхняя зона

z м	$\frac{z}{z_в}$	удар		накат	
		p_z т/м²	$\frac{p_z}{p_{макс}}$	p_z т/м²	$\frac{p_z}{p_m}$
0,15	0,036	1,80	0,87	1,40	0,96
		1,70	0,82		
0,30	0,072	—	—	1,5	1,03
		—	—	—	—
0,60	0,143	1,0	0,48	1,30	0,90
		1,1	0,53	1,20	0,83
0,90	0,214	0,90	0,43	1,20	0,83
		—	—	1,10	0,76
1,50	0,358	0,30	0,15	0,90	0,62
		0,25	0,12	—	—

Верхняя зона

$z_м$	$\frac{z}{z_в}$	удар		накат	
		p_z т/м²	$\frac{p_z}{p_{макс}}$	p_z т/м²	$\frac{p_z}{p_m}$
2,20	0,525	—	—	0,60	0,41
		—	—	0,55	0,38
2,80	0,665	—	—	0,30	0,21
		—	—	—	—

для нижней зоны

$$p_z \approx p_{макс}\, e^{-4,1\frac{z}{z_в}}, \tag{90}$$

где величина $p_{макс}$ определяется по формуле (86), а $z_в$ — по формуле (88). Заметим, что проведенная сплошная линия на рис. 102 соответствует данным выражениям.

Для момента максимального наката волны на откос действительные кривые давления вполне могут быть заменены прямыми линиями.

Однако, учитывая возможные отклонения в опытных значениях волновых давлений, для построения расчетной эпюры давления мы

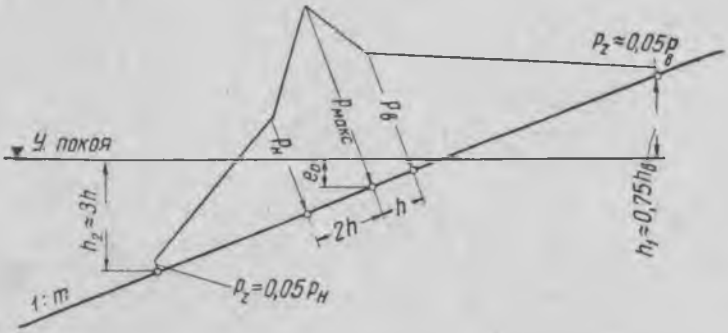


Рис. 103. Схема построения расчетной эпюры волнового давления на откос канала

рекомендуем принять схему, показанную на рис. 103, которая соответствует максимальным показаниям за весь рассматриваемый промежуток времени наката волны на откос.

По этой схеме $p_{макс}$ определяется из формулы (86), а соответствующие значения $p_н$ и $p_в$ — из таких соотношений:

$$\left.\begin{aligned} p_н &\approx 0,5\, p_{макс} \\ \text{и} \quad p_в &\approx 0,7 p_{макс} \end{aligned}\right\} \tag{91}$$

Интересно заметить, что соотношение $\frac{p_н}{p_{макс}}=0{,}50$, принятое в выражении (91), можно аналитически получить из выражения (90), принимая $z=2h$ и $\frac{2L}{2h}\approx 15$.

В заключение считаем необходимым обратить внимание на следующую особенность характера распределения волнового давления вдоль откоса. Сравнивая эпюру суммарного давления на откос, которая может быть построена по приведенным выражениям для избыточного давления, и эпюру соответствующего гидростатического давления в точках, расположенных ниже уровня покоя, с профилем судовой волны на откосе, можно установить довольно близкое их совпадение. Это положение свидетельствует, вообще говоря, о возможности построения суммарного давления на откосе на момент наката волны по профилю волнового вала.

§ 22. ВЫСОТА НАКАТА СУДОВОЙ ВОЛНЫ НА ОТКОС КАНАЛА И СКАТА С НЕГО

По определению высоты наката судовой волны на откос канала к настоящему времени имеется весьма ограниченное количество предложений.

Первая попытка получить аналитическую зависимость для определения высоты наката судовой волны на откос канала была сделана Л. С. Кусковым и И. Н. Дыментом [27]. Основываясь на весьма ограниченных материалах натурных наблюдений, указанные авторы для заложения откоса 1 : 2,5 и каменной одежды предложили такую зависимость:

$$h_в = 1{,}45\cdot 2\,h_n, \tag{92}$$

где $2h_n$ — высота волны, определенная из формулы (66).

П. К. Божич, основываясь лишь на четырех опытах, счел возможным при определении высоты наката судовой волны на откос канала пользоваться формулой Н. Н. Джунковского, полученной применительно к разбитым ветровым волнам, но с несколько другими коэффициентами шероховатости: для каменной наброски он рекомендует $K=0{,}7$; для каменной мостовой $K=0{,}8$ и для случая гладкого покрытия (бетон, асфальт) $K=1$.

Подобная рекомендация была затем повторена и Г. М. Матлиным [40]. Однако, в отличие от предложения Божича, который в формуле Джунковского (7) принимает высоту волны $2h$ вблизи откоса (как сумму расходящихся и поперечных волн), Матлин рекомендует заменять $2h$ высотой волны вблизи судна $2h_n$, которая определяется по формуле Божича (68). С другой стороны, учитывая, что такая рекомендация приводит к занижению верхней границы крепления откоса, Матлин счел необходимым полученную высоту наката волны на откос увеличить на 40—50%. Данное предложение мотивируется тем, что принятая Божичем схема интер-

ференции судовых волн в каналах приводит к завышению границы крепления откоса.

В действительности дело обстоит не совсем так. Если обратиться к рассмотрению коэффициента интерференции судовых волн согласно зависимости (82), то можно установить, что при обычных соотношениях $\frac{B_0}{l}=0{,}7\div2$, $K_u=1{,}55\div1{,}40$. Исходя из этого приходим к выводу о том, что рекомендация Матлина практически совпадает с прежним предложением Божича.

Так как перечисленные выводы основаны на весьма ограниченных данных натурных наблюдений, т. е. на натурных наблюдениях в условиях ограниченной скорости движения судов и их размеров, возникла необходимость организовать и провести систематические наблюдения за высотой наката волны на откос в условиях действующих судоходных каналов. Эти наблюдения велись в течение ряда лет на различных участках канала имени Москвы; наблюдения проводились для различных типов судов со скоростями движения от 6 до 20 *км/час*.

В результате проведенных наблюдений было получено значительное количество значений высоты наката волны на откос; причем $h_в$ измеряли для каждого рейса судна, общее количество рейсов превышало 300. Материалы наблюдений обрабатывали по средним показаниям каждого опыта, причем во время каждого опыта делали от двух до четырех рейсов. При разделении рейсов на отдельные опыты была принята средняя высота волны, которая отличалась от максимальных и минимальных показаний примерно на $\pm10\%$.

Во время первичной обработки материалов натурных измерений было установлено, что высота наката волны на откос с покрытием из отдельных бетонных плит находится в прямой зависимости от высоты волны, которую измеряли вблизи откоса по водомерной рейке и с помощью электроволнографов. Вместе с тем было также установлено, что высота наката волны на откос зависит и от длины волны.

К сожалению, в момент проведения данных опытов не производилось непосредственное измерение длины судовой волны, в силу чего для решения поставленной задачи было признано возможным использовать полученную выше формулу для $2L$ (84). При этом скорость движения судна для каждого опыта принималась по осредненным показаниям всех рейсов судов.

Результаты основных опытов представлены на графике (рис. 104) в виде относительных величин. Следует заметить, что при построении данного графика мы показали лишь часть опытов, результаты остальных опытов хорошо укладываются в полученную зону разброса точек.

Полученные результаты дают зависимость между относительными величинами $\frac{h_в}{2h}$ и $\frac{2L}{2h}$; характерно, что как и в случае вет-

ровых волн, высота наката судовой волны на откос увеличивается по мере увеличения высоты и относительной длины волны.

Таким образом, для рассматриваемых условий, т. е. для бетонного покрытия откоса с его заложением 1 : 2,5, высота наката волны может быть определена из такой формулы:

$$h_в = \left(0{,}9 + 0{,}03\,\frac{2L}{2h}\right)2h, \tag{93}$$

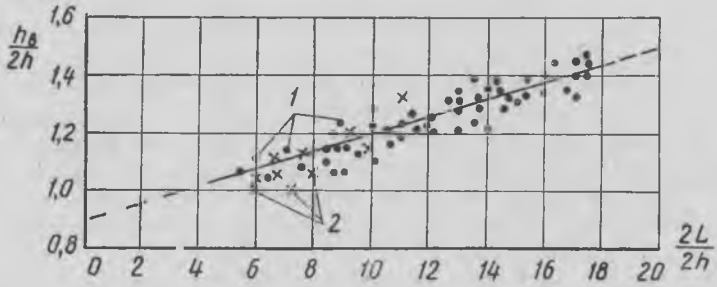


Рис. 104. График зависимости $\frac{h_в}{2h} = f(\frac{2L}{2h})$ по данным осредненных натурных измерений (бетонное покрытие откоса при заложении 1 : 2,5):

1—по опытам 1955 г.; *2*—по опытам 1957 г.

где $2h$ — высота волны вблизи откоса, определяемая по формуле (83).

Формула (93) получена по осредненным показателям; рассматривая имеющиеся материалы по отдельным опытам (табл. 19), можно установить, что максимальная высота наката волны на откос оказалась больше средней примерно на 20%, т. е.

$$h_{в\,(макс)} \approx 1{,}2\,h_{в\,(ср)}.$$

Как отмечалось, проведенные опыты соответствуют заложению откоса 1 : 2,5, т. е. $m=2{,}5$. Если по аналогии с ветровыми волнами допустить, что в рассматриваемом случае (т. е. для судовых волн) влияние заложения откоса на $h_в$, в соответствии с формулой (45) можно определить зависимостью

$$\eta_m = \frac{2{,}75}{m + 0{,}25},$$

(при $m=2{,}5$ $\eta_m=1$), то вместо формулы (93) можно написать

$$h_в = K_0\,\frac{2{,}75}{m + 0{,}25}\left(0{,}9 + 0{,}03\,\frac{2L}{2h}\right)2h, \tag{94}$$

где K_0 — коэффициент шероховатости.

Таблица 19

Сравнение величин высоты наката волны на откос по максимальным и осредненным измерениям

Дата опытов	№ опыта	$2h$ м	$h_в$ (ср) м	$\frac{h_в\ (ср)}{2h}$	$h_в$ (макс) м	$\frac{h_в\ (макс)}{h(ср)}$	v м/сек	$2L$ м	$\frac{2L}{2h}$
Октябрь 1955г.	14	0,65	0,81	1,25	1,00	1,23	4,4	7,8	12,0
	15	0,80	0,95	1,18	1,10	1,16	4,2	7,2	9,0
	18	0,85	1,10	1,30	1,25	1,14	4,6	8,5	10,0
	19	0,55	0,70	1,27	0,85	1,22	3,7	5,5	8,5
	22	0,65	0,78	1,20	0,90	1,16	4,2	7,1	11,0
	76	0,57	0,74	1,30	0,89	1,20	4,6	8,3	14,6
	77	0,84	0,97	1,15	1,20	1,23	4,1	7,0	8,3
	79	1,14	1,14	1,14	1,40	1,23	4,1	7,0	6,2
	81	0,98	1,17	1,20	1,42	1,21	5,2	11,2	11,4
	93	0,60	0,78	1,30	0,93	1,19	4,6	8,3	13,8
	110	0,53	0,72	1,35	0,90	1,24	4,3	7,5	14,1
Июнь 1957 г.	64	0,75	1,02	1,36	1,22	1,19	4,4	8,2	11,0
	65	0,75	0,82	1,10	0,94	1,15	3,7	5,6	7,0
	34	0,80	0,82	1,01	0,96	1,17	3,4	4,8	6,0

Судя по данным натурных измерений высоты наката волны на откос в условиях другого канала, где $m=3$, а также исходя из соображений, приведенных в § 9, предлагаемую формулу (94) можно распространить на условия при $m=2{,}0 \div 3{,}5$, т. е. на обычные условия заложений откосов судоходных каналов.

Во время проведения натурных наблюдений в 1951 г. за высотой наката волны на откос с каменной облицовкой [69] для случая $\frac{2L}{2h} \approx 10$ было установлено, что максимальная высота наката равна $h_в=0{,}96\ (2h)$, средняя $h_в=0{,}86\ (2h)$. При этих условиях для каменной облицовки в соответствии с формулой (94) можно получить $K_0=0{,}80 \div 0{,}72$.

Таким образом, предлагаемую новую формулу можно распространить на любой вид покрытия откоса судоходного канала, принимая следующие значения коэффициента шероховатости: для бетонного покрытия $K_{0(ср)}=1$; $K_{0(макс)}=1{,}2$; для мостовой $K_{0(ср)}=0{,}72$ и $K_{0(макс)}=0{,}8$.

В практических расчетах мы все же рекомендуем принимать среднее значение коэффициента шероховатости, учитывая, что максимальные всплески воды в виде отдельных «язычков» носят слу-

чайный характер и не способны размывать даже незащищенную часть откоса.

При проектировании креплений откосов судоходного канала и, особенно, бетонной облицовки возникает необходимость в определении высоты ската волны с откоса по отношению к уровню покоя. Применительно к судовым волнам в канале правильнее было бы говорить не о высоте ската волны, а о понижении уровня воды вблизи откоса, которое имеет место во время прохождения судов;

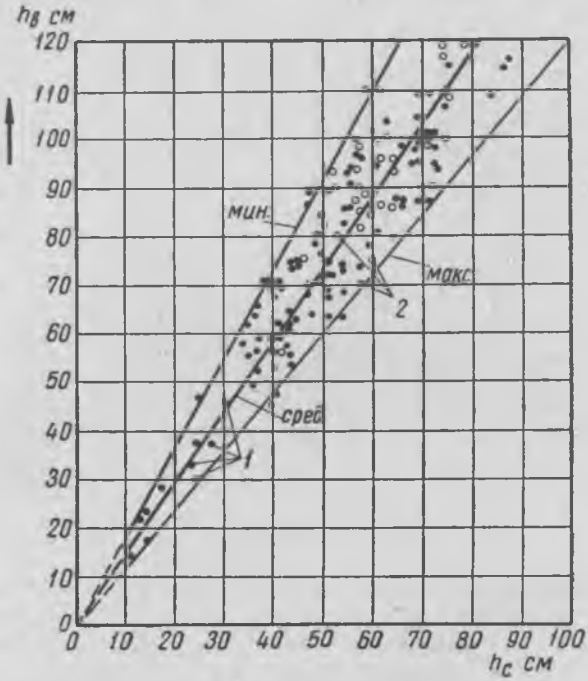


Рис. 105. График связи $h_c=f(h_в)$ по данным натурных измерений:

1—для каменной мостовой; 2—для бетонного покрытия

однако, учитывая, что термин «скат волны» в настоящее время нашел широкое распространение в литературе, в дальнейшем изложении мы будем упоминать скат волны с откоса.

Наблюдения за высотой скатывания волны с откоса велись одновременно с определением высоты наката. Из полученных материалов наблюдений было установлено, что максимальная величина ската волны с откоса h_c находится в прямой зависимости от высоты наката волны на откос $h_в$, т. е. определяется также элементами судовой волны в канале. Поэтому для простоты вся последующая обработка материалов натурных измерений по высоте ската волны с откоса велась в зависимости от величины наката.

Результаты основных материалов наблюдений представлены на рис. 105 в виде графика $h_c=f(h_в)$ для случая покрытия откоса бетонными плитами и каменной мостовой. Из данного графика можно получить такую зависимость для определения ската волны с откоса:

$$h_c = \varepsilon h_в, \tag{95}$$

где значение коэффициента ε будет $\varepsilon_{мин}=0{,}55$; $\varepsilon_{макс}=0{,}85$ и $\varepsilon_{ср}=0{,}7$.

Заметим, что полученная зависимость соответствует замерам, полученным при прохождении по каналу четырех типов судов. Как показали впоследствии контрольные замеры для других типов судов и, в частности, при прохождении по каналу имени Москвы теплохода «Гастелло», не исключена возможность получения $h_c=h_в$, что было замечено особенно при больших скоростях движения судна по каналу. В силу этого в последующем следует уточнить в формуле (95) значение коэффициента ε.

Рассматривая вопрос о высоте наката волны на откос канала и ската с него, следует заметить, что все предлагаемые здесь зависимости были отнесены к высоте волны вблизи откоса канала, т. е. к $2h$. Такое положение было вызвано, с одной стороны, наличием интерференции расходящихся и поперечных волн вблизи откоса канала, с другой — тем, что при столь обширных опытах трудно измерять исходные элементы волн, т. е. волн вблизи судна.

Если же при определении высоты наката волны исходить из учета исходной волны согласно зависимости (81), то полученную величину $h_в$ в соответствии с коэффициентом интерференции (82) следует в среднем увеличить в 1,5 раза.

В заключение приводим результаты сравнительных расчетов величин высоты наката волны на откос для случая бетонной облицовки и заложения откоса 1 : 2,5 (рис. 106) по рекомендациям различных авторов. Из рассмотрения данного графика прежде всего следует, что оба предшествующих предложения не учитывают влияния длины волны, дают завышенные значения $h_в$ при коротких волнах, причем в этом случае всегда $h_в>2h$. Как показали данные последующих наблюдений при волнах с соотношением $\frac{2L}{2h}\leqslant 10 \div 11$, высота наката волны на откос всегда меньше высоты волны вблизи откоса.

Следует напомнить, что при определении высоты наката волны на откос исходную высоту волны Кусков определяет по формуле (66), а Божич — по формуле (71). Так как данные формулы дают завышенные значения для $2h$, расчет по ним высоты наката волны на откос может привести к еще большему завышению.

Наконец, заметим, что предложенные здесь зависимости соответствуют прямолинейному откосу при отсутствии на нем бермы. Наличие бермы на откосе, как это следует из наших исследований для ветровой волны, а также данных исследований, проведенных

на Суэцком канале [113], вносит существенные изменения в характер волнового движения перед наклонной стенкой.

Вместе с тем некоторые данные натурных исследований на участках канала имени Москвы, где имеются сравнительно большие бермы, приводят к выводу о том, что в этом случае в формулу (94) можно вводить коэффициент $K_б$ согласно выражению (44).

Заканчивая на этом рассмотрение вопроса о высоте наката судовой волны на откос канала и ската с него, коротко остановимся на результатах натурных испытаний волногасителей на откосах. Эти испытания были проведены по заданию Управления канала имени Москвы. Задачей исследований было найти такую схему расположения гасителей на откосе, при которой высота наката волны на откос имеет минимальное значение.

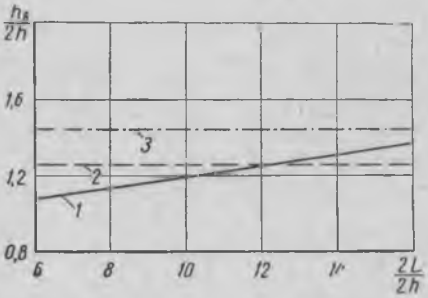


Рис. 106. Сравнение приведенной высоты наката волны на откос по предложениям различных авторов: 1—Шанкина; 2—Божича; 3—Кускова

Рис. 107. Взаимодействие судовой волны с гасителями, установленными на откосе канала

В качестве волногасителей были приняты брусья размером $0{,}20 \times 0{,}12$ *м* и при длине $0{,}78 \div 0{,}95$ *м*. Всего было испытано пять различных схем расположения, которые отличались друг от друга как углом их поворота по отношению к оси канала, так и порядком расположения. Наблюдения за работой волногасителей проводились с помощью киносъемки.

Рассматривая полученные материалы наблюдений, прежде всего можно установить, что установка гасителей на откосе судоходного канала приводит к образованию весьма бурного потока; в результате разбивания волнового вала в пределах гасителей образуется значительный подъем массы воды в виде отдельных струй и брызг (рис. 107).

Оценивая работу данных гасителей, можно установить, что в большинстве случаев высота наката волны на откос при применении гасителей не уменьшается, а увеличивается. Этого не наблюдалось только в отдельных опытах, когда угол между лучом подходящей волны и направлением самого гасителя составлял меньше 90°. Однако и в этих случаях высота наката волны на откос уменьшалась всего лишь на 10÷15% по сравнению с высотой наката без гасителей.

Так как в условиях судоходных каналов судовая волна подходит к откосам под разными углами, а стоимость установки данных гасителей высока, применять подобные гасители было признано нецелесообразным.

§ 23. К ВОПРОСУ О СКОРОСТЯХ СКАТА СУДОВОЙ ВОЛНЫ С ОТКОСА КАНАЛА

При проектировании покрытий откосов судоходных каналов большое значение приобретает вопрос о скоростях волнового потока в пределах самого откоса. В данной работе мы остановимся лишь на некоторых особенностях воздействия судовых волн на бетонные покрытия откосов и приведем результаты натурных измерений скоростей отката волны с откоса канала, которые будут необходимы в дальнейшем в связи с лабораторными исследованиями по устойчивости бетонного крепления.

Как отмечалось выше, образование судовых волн в канале всегда начинается с понижения уровня, что особенно ярко вырисовывается вблизи откоса канала. Понижение уровня воды сопровождается образованием значительных скоростей потока вдоль откоса. Как показали материалы наблюдений, полученные с помощью киносъемки поверхностных поплавков, при откате воды с откоса траектории движения отдельных частиц жидкости почти всегда совпадают с плоскостью откоса.

После завершения процесса отката воды с откоса формируется и накатывается на откос новый волновой вал, причем следующий откат и накат волны по своим размерам всегда меньше предыдущего.

Кинематика движений частиц воды около откоса, вызванных судном, представляет сложный процесс, для изучения которого потребуются специальные исследования.

Вместе с тем материалы натурных наблюдений показывают, что скорость распространения (перемещения) волнового вала вдоль откоса канала во всех случаях соответствует скорости движения судна. В пределах же самого волнового вала происходит сложное орбитальное движение частиц жидкости, скорость движения их всегда остается меньше скорости перемещения волнового вала. В ряде случаев зафиксировано и поступательное движение частиц жидкости, однако скорость этого движения, судя по перемещению поверхностных поплавков, весьма незначительна.

Основываясь на данных опыта эксплуатации бетонных покрытий

откосов судоходных каналов, можно установить, что все имеющиеся начальные повреждения этого покрытия возникали не в момент прохождения по откосу волнового вала, а главным образом в момент первого отката волны с откоса. Это положение прежде всего и привело нас к рассмотрению, во время натурных исследований на опытных участках канала имени Москвы, вопроса о скоростях отката волны с откоса.

Скорости измеряли при помощи киносъемки; на пленке фиксировалось изменение уровня воды, отсчитываемое по наклонной рейке, укрепленной заподлицо с откосом (см. рис. 95). Скорость движения киноленты была постоянной и равнялась 24 кадрам в секунду.

Рис. 108. Кинограмма ската и наката судовой волны на откос канала:
а — откат волны; *б* — накат волны

При принятой методике измерения скоростей отката волны с откоса мы по существу определяли максимальные скорости движения потока по откосу, что требовалось для решения вопроса о покрытиях. Характер процесса отката и наката волны, полученный в результате киносъемки, приведен на рис. 108.

Кинограммы обрабатывали через 5÷10 кадров, т. е. с промежутками 0,21÷0,42 *сек*. Максимальный откат h_c, определяемый от уровня покоя, уточняли по визуальному отсчету.

В результате такой обработки были построены эпюры скоростей отката волны с откоса (рис. 109) и получены значения максимальных скоростей (табл. 20). В прилагаемой таблице дано отношение времени достижения максимального значения скорости на откосе $t_м$ к полному времени ската волны t_c. Время полного ската волны с откоса находилось в пределах $t_c = 2 \div 4$ *сек*.

Из рассмотрения полученных графиков изменения скоростей скатывания потока с откоса (см. рис. 109) можно установить, что нарастание скоростей, как правило, происходит плавно. Максимальных значений скорости достигают в среднем на глубине $h_м \approx \approx 0{,}8\ h_c$, после чего наблюдается обратная картина, т. е. скорости уменьшаются. Такой характер изменения скоростей скатывания с откоса вполне логичен, так как в конце ската волны с откоса ска-

Таблица 20

Сводные данные натурных измерений

№ опыта	Высота волны $2h$ в *м*	h_c *м*	$h_м$ *м*	$\frac{h_м}{h_c}$	$\frac{t_м}{t_c}$	Максимальная скорость v в *м/сек*
40	0,90	0,44	0,35	0,80	0,60	0,82
41	0,90	0,49	0,40	0,88	0,75	0,82
42	0,95	0,51	0,44	0,86	0,70	1,00
43	0,80	0,39	0,30	0,77	0,60	0,67
44	0,80	0,51	0,30	0,60	—	0,76
45	1,00	0,47	0,38	0,80	0,68	1,10
77	1,00	0,58	0,31	0,54	—	1,05
79	0,95	0,64	0,39	0,62	0,84	1,10
82	0,90	0,66	0,45	0,80	—	0,96
84	0,80	0,49	0,35	0,72	0,87	0,77

зывается торможение, вызываемое действием массы воды образующегося волнового вала.

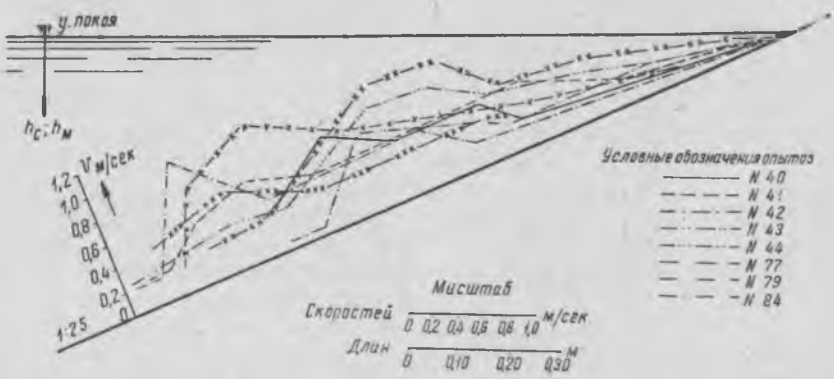


Рис. 109. Эпюры скоростей отката волны с откоса канала по данным натурных измерений

С другой стороны, следует отметить, что скорости отката волны с откоса, определенные с помощью киносъемки, не совсем соответствуют действительным скоростям потока в конце завершения полного отката волны с откоса (в зоне глубин, близких к h_c). В этой зоне, по-видимому, киносъемка может дать заниженные скорости. По этой причине при расчете покрытия откоса следует исходить из предположения, что скорости имеют максимальные значения на глубине h_c.

Рассматривая полученные максимальные скорости, можно установить связь между $v_{макс}$ и элементами судовой волны, т. е. высотой

волны $2h$ и максимальным откатом волны с откоса. Для подтверждения сказанного на рис. 110 представлены соответствующие графики, на основании которых можно получить следующие аналитические зависимости:

$$\left.\begin{aligned} v &\approx 2(2h) - 0{,}9 \\ v &\approx 2{,}5\,h_c - 0{,}45 \end{aligned}\right\}, \qquad (96)$$

где v — максимальная скорость отката волны с откоса канала в *м/сек*;

h_c — высота ската волны в *м*.

Зависимости (96) действительны при $2h \geqslant 0{,}70$ *м* и $h_c \geqslant 0{,}4$ *м*.

В 1954 г. инж. А. Моревым были проведены натурные наблюдения за скоростями ската волны с откоса на канале имени В. И. Ленина.

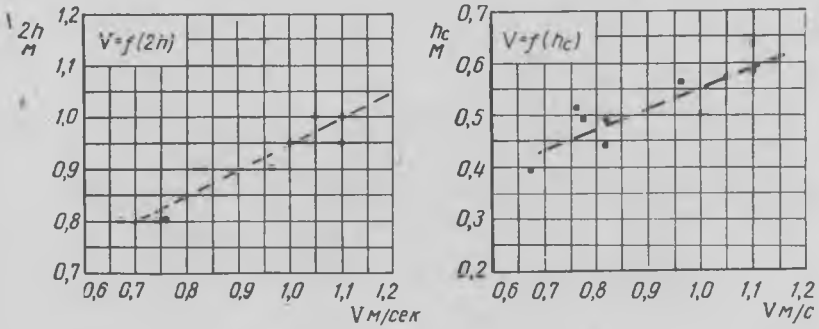


Рис. 110. Графики скоростей отката волны с откоса канала по данным натурных измерений

Наблюдения проводились на участке канала с каменной облицовкой[1]. В результате этих наблюдений были установлены следующие значения максимальных скоростей: при $h_c = 0{,}54$ *м* $v = 0{,}83$ *м/сек*; при $h_c = 0{,}61$ *м* $v = 0{,}92$ *м/сек*.

При этих значениях h_c максимальная скорость согласно формуле (96) будет равна $0{,}90 \div 1{,}07$ *м/сек*. Так как в наших опытах откос был облицован бетоном, результаты, полученные нами и инж. Моревым, весьма хорошо согласуются между собой.

Сопоставляя полученные зависимости для v, можно также установить, что при обычных соотношениях $\frac{2L}{2h} = 8 \div 10$ обе зависимости дают примерно одинаковые значения для v при $m \approx 3$. При $m = 2{,}5$ первая зависимость несколько завышает v, а при $m = 3{,}5$, наоборот, занижает. В практических расчетах мы рекомендуем пользоваться обеими формулами и принимать максимальное значение скорости.

---

[1] А. Морев, Об устойчивости креплений откосов каналов. Техническая страница газеты «Волгодонец», № 95 за 1954 г.

ГЛАВА VI

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ ОТКОСА ПРИ ДЕЙСТВИИ СУДОВОЙ ВОЛНЫ

§ 24. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ БЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СУДОВЫХ ВОЛН

Практика эксплуатации бетонных покрытий откосов судоходных каналов свидетельствует о том, что эти покрытия получают значительные повреждения. К сожалению, до самого последнего времени отсутствовали какие-либо рекомендации по расчету этих покрытий на воздействие судовых волн. Насколько нам известно, по этому вопросу имеется лишь единственная рекомендация П. К. Божича, в основу которой положены ограниченные данные лабораторных исследований. Кроме того, Божич распространял на судовые волны результаты, полученные для ветровых волн.

Согласно выводам Божича необходимая толщина бетонного покрытия по условию его устойчивости на откосе определяется по формуле $\delta \geqslant 0{,}28\ (2h)$. Применительно к условиям действующих судоходных каналов согласно этой формуле при $2h_{макс}=1{,}1 \div 1{,}3$ *м* требуется бетонное покрытие толщиной $0{,}30 \div 0{,}35$ *м*. Это нельзя признать правильным, так как необходимая толщина бетонного покрытия получается непомерно завышенной и, кроме того, не учитываются плановые размеры отдельных плит.

Практика проектирования бетонного покрытия откосов судоходных каналов в основном базировалась на опыте предшествующей эксплуатации данного типа покрытия, работающего примерно в аналогичных условиях.

Для решения задачи, связанной с расчетом бетонного покрытия откоса судоходного канала на воздействие судовых волн, были организованы и проведены сравнительно большие исследования.

Бетонные покрытия откосов каналов изучали на двух специальных опытных участках канала имени Москвы. Во время проведения опытов в 1955 г. в основном были испытаны бетонные плиты двух размеров: $3{,}2 \times 3 \times 0{,}14$ *м* и $2{,}5 \times 2 \times 0{,}14$ *м*, которые располагали на сплошной и ленточный обратные фильтры.

Наиболее обширные натурные исследования были проведены в 1957 г., при которых испытали на действие судовой волны

14 типов различных конструкций бетонных покрытий (см. рис. 95 и 98). Испытываемые покрытия отличались как размерами отдельных плит, так и составами подстилающего слоя. В качестве подстилающего слоя был использован гравий двух составов: состав № 1 с размером частиц $d_{50}=14\div22$ *мм* и состав № 2 с $d_{50}=64\div74$ *мм*. Грунты основания откоса имели различную характеристику; в большинстве случаев это был разнозернистый песок $d_{50}\approx0{,}1\div0{,}25$ *мм* и крупнозернистый $d_{50}\approx0{,}5\div1$ *мм*.

Перед тем как перейти к оценке работы отдельных типов покрытий опытного участка, остановимся на качественной характеристике взаимодействия судовой волны с бетонной облицовкой откоса. Основное отличие между характерами взаимодействия ветровых и судовых волн с бетонным покрытием откоса канала состоит в том, что при судовых волнах под бетонными плитами отсутствует так называемый динамический уровень, который всегда бывает при ветровых волнах в случае раскрытия швов между плитами. С другой стороны, судовая волна воздействует на откос в виде одного мощного ската и наката волны, так как последующие волны быстро затухают и практически не оказывают никакого влияния на работу покрытия.

Оценивая общую работу бетонного покрытия откоса судоходного канала, можно установить, что наиболее опасными моментами для их устойчивости являются или момент отката волны с откоса (начальная стадия образования волн в канале) или момент прохождения по откосу волнового вала. Причем в первом случае в более неблагоприятных условиях находится подводная часть покрытия, во втором — надводная.

Как показали материалы натурных наблюдений, а также опыт эксплуатации сооружений, повреждения бетонных покрытий в основном происходили в момент ската волны с откоса. Устойчивость же плит в надводной части откоса, которая в основном зависит от донных скоростей волнового вала, всегда оказывается обеспеченной при толщине отдельных плит в пределах 8—10 *см* и плановом размере больше $1{,}5\div2$ *м*.

Из анализа повреждения бетонных покрытий откосов судоходных каналов вытекает, что они происходили из-за нарушения устойчивости самих плит, или из-за размыва частиц грунта откоса. Характерным примером первой причины является описанный выше случай вырывания бетонных плит в подводной части откоса канала имени В. И. Ленина (см. рис. 10).

Подобные повреждения вполне согласуются с характером взаимодействия волны с бетонным покрытием откоса. В действительности при откате волны с откоса скорость фильтрационного потока в порах подстилающего слоя, по сравнению со скоростью ската волны на поверхности, весьма незначительна, в силу чего к моменту завершения полного процесса отката волны под плитой создается гидродинамическое взвешивание, которое и способствует выталкиванию плит из своих «гнезд».

В ряде случаев повреждение бетонного покрытия начиналось с размыва частиц грунта откоса или выноса частиц фильтрующего слоя. В качестве примера можно привести повреждения на опытном

Рис. 111. Разрушение бетонного покрытия откоса (опытный участок)

Рис. 112. Выход фильтрационных вод через швы в момент отката волны с откоса

участке бетонного покрытия типа № 13 (рис. 111). В данном случае повреждения начались с интенсивного выноса частиц грунта откоса через открытые швы между плитами. На рис. 112 показан

выход фильтрующего потока из-под плит в момент отката волны с откоса. Представленная фотография служит наглядным доказательством динамического противодавления под плитой в процессе ската волны с откоса.

Разрушения покрытия откоса вследствие размыва основания происходили там, где отсутствовал надежный упор. Подобные повреждения наблюдались при прохождении судна как по оси канала, так и вблизи откоса.

В первом случае, т. е. при следовании судна в канале в пределах проектных глубин, грунт в незащищенной части откоса размывался вследствие образования донных скоростей интерферированных волн, особенно в момент отката волны с откоса канала.

Во втором случае, т. е. при следовании судна вблизи откоса, размыв принимал угрожающие формы, если скорость движения судна превышала критическую. Согласно зависимости $v_{кр}=\sqrt{gH}$ такой скоростью будет скорость, превышающая $14 \div 16$ *км/час*, если глубина воды в месте прохождения судна $1{,}5 \div 2$ *м*. Как отмечалось выше, при такой скорости движения судов значительно уменьшаются элементы судовых волн, однако увеличиваются скорости волнового потока в месте прохождения самого судна и размыв грунта основания происходит непосредственно под движителем, особенно под винтами судов.

В условии эксплуатации каналов следование судов вблизи откосов нельзя считать нормальным, однако в отдельных случаях все же наблюдаются нарушения правил плавания. Характерным примером разрушения крепления откоса может быть разрушение, вызванное движением вблизи откоса канала быстроходного катера со скоростью 40—50 *км/час*. Здесь вследствие размыва основания на одном из участков действующего канала произошло сползание всего крепления.

Следует также упомянуть, что устойчивость бетонных плит, расположенных в надводной части откоса, в значительной степени зависит от состояния поверхности покрытия. При небольших просадках или выступах отдельных плит, являющихся следствием неравномерной осадки земляного полотна, во время прохождения по откосу волнового вала плиты могут выброситься и опрокинуться.

Таким образом, из приведенного материала видно, что для расчета плит на устойчивость прежде всего следует определить характер и величины волновых давлений на лицевой и внешней гранях плит. Вопрос о расчете обратного фильтра под покрытием рассмотрен ниже.

Следует отметить, что ввиду кратковременности работы испытываемых типов бетонных покрытий пока не представляется возможным сделать в отношении их окончательные выводы. Вместе с тем некоторые выводы представляют несомненный интерес.

Оценивая работу плит со щелевыми отверстиями (рис. 113), следует признать, что на судоходных каналах подобное покрытие, по-видимому, не может найти распространения по ряду причин.

Первая причина состоит в том, что данное покрытие требует обязательного устройства многослойного фильтра; вторая — в том, что оно имеет отверстия в плитах, в силу чего при боковом ударе волнового вала наблюдается вибрация всего покрытия откоса.

Подобный тип покрытия может оказаться рациональным при воздействии ветровых волн, когда, исходя из их устойчивости, требуется сравнительно большая толщина покрытия. Кроме того,

Рис. 113. Общий вид бетонных плит с отверстиями на опытном участке

это покрытие необходимо испытать на ледовые воздействия, так как есть основание предполагать, что оно может разрушиться во время образования ледостава.

Предположение о возможности замены обратного фильтра плитами меньшего размера, укладываемыми под швами, не оправдалось. Как показали натурные испытания, в таких случаях образуются щели, через которые происходит интенсивный вынос частиц грунта откоса. Кроме того, укладка таких плит, как и другие конструктивные решения без обратного фильтра, приводит к увеличению стоимости покрытия.

Наиболее надежной и экономичной оказалась сбычная бетонная облицовка со сплошным или ленточным фильтром. Учитывая полученную качественную характеристику работы бетонного покрытия откоса в условиях воздействия судовых волн, все последующие натурные исследования по волновым нагрузкам проводили с обычными бетонными плитами, расположенными на сплошных и ленточных обратных фильтрах.

§ 25. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ И СУММАРНЫХ ДАВЛЕНИЙ НА НЕПРОНИЦАЕМОЕ ПОКРЫТИЕ

Устойчивость бетонного покрытия откоса судоходных каналов при воздействии судовых волн изучали одновременно в лабораторных и натурных условиях. Такое сочетание позволило, с одной стороны, получить количественные зависимости, связывающие по существу все изучаемые факторы, с другой — получить надежные и обоснованные рекомендации, необходимые для расчета бетонного покрытия.

Лабораторные исследования были поставлены для определения характера и величин волнового взвешивающего давления под бетонным покрытием в зависимости от состава грунта подстилающего слоя и величины заглубления низа бетонного покрытия по отношению к расчетному уровню покоя в момент отката волны с откоса.

Моделирование процесса отката волны с откоса канала было выполнено по правилу гравитационного подобия. Продолжительность отката волны с откоса и максимальную скорость отката определяли с помощью полученной выше зависимости (96) по данным натурных исследований.

Согласно данным исследований максимальная величина отката судовой волны с откоса канала, замеренная во время проведения натурных наблюдений на опытном участке $h_{o(н)}=0{,}6\div 0{,}8$ *м*, средняя величина $h_{c(н)}=0{,}7$ *м*. Специальная лабораторная установка позволяла получить максимальный откат волны на модели $h_{c(м)}=0{,}35$ *м*. По этой причине основной масштаб моделирования был принят $1:\lambda=1:2$.

Замеренная в натуре максимальная скорость отката волны с откоса $v_н\approx 1{,}0\div 1{,}6$ *м/сек*, средняя скорость $v_{н.ср.}\approx 1{,}3\div 1{,}4$ *м/сек*. Эти данные хорошо соответствуют получаемым по эмпирической зависимости (96). Продолжительность отката волны с откоса по данным натурных измерений при $h_c=0{,}6\div 0{,}8$ *м* составляла $t_{c(н)}=2\div 3$ *сек*.

На основании приведенных данных, с учетом принятого масштаба моделирования, лабораторные исследования были проведены при скорости отката волны $v_м=0{,}7\div 1{,}2$ *м/сек* и времени ската $t_{c(м)}=1{,}4\div 2{,}1$ *сек*. Кроме того, были проведены контрольные опыты при $t_{c(м)}=0{,}80\div 1{,}35$ *сек*. Глубину воды над отметкой низа покрытия принимали равной $h_н=35\div 50$ *см* с интервалами 5 *см*.

Модель водонепроницаемого покрытия была сделана в виде деревянной доски, которая укладывалась непосредственно на подстилающий слой; откос выполнен из мелкозернистого песка. Подстилающий слой под покрытия выполнялся из различных грунтов, начиная с грунта с размером частиц $\approx 0{,}25$ *мм* и кончая щебенкой размером 18—20 *мм*, толщину подстилающего слоя принимали в пределах $20\div 50$ *мм*; все опыты проводили для заложения откоса 1 : 2,5 (рис. 114).

Избыточные давления измеряли двойными тензометрическими датчиками, которые устанавливали в средней части модели. Одновременно на осциллограмме записывали давления в нескольких точках. Двойные датчики позволили определить непосредственно суммарное давление в любой момент понижения уровня в лотке z_c. Кроме того, на осциллограмме определяли время сброса уровня воды. Скорости ската воды с откоса устанавливали с помощью ки-

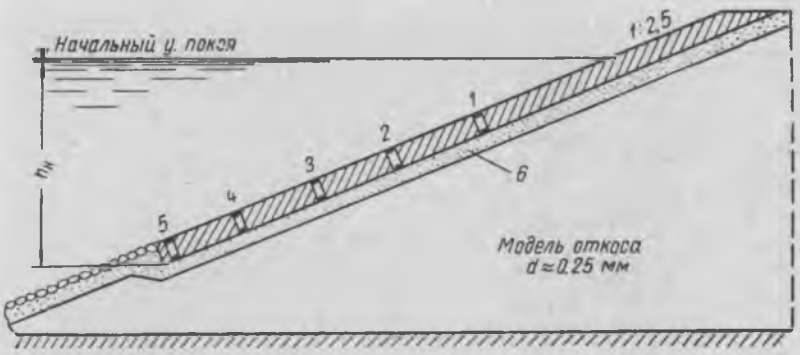


Рис. 114. Схема модели для изучения давлений на покрытие откоса при понижении уровня воды:

1, 2, 3, 4, 5—места расположения датчиков, *6*—подстилающий слой

нограмм; фильтрационные скорости в подстилающем слое определяли по перемещению подкрашенной воды с помощью киносъемки.

Каждый опыт повторяли минимум три раза. Полученные результаты опытных исследований при их обработке осредняли. При обработке показаний верхних датчиков, кроме того, использовали материалы киносъемки перемещения уровня воды в лотке.

В результате проведенных опытов было получено значительное количество осциллографических записей, кинограмм и фотоснимков. При обработке данных экспериментальных исследований схема построения соответствующих эпюр давлений была принята согласно рис. 115, причем соответствующие давления в отдельных точках для построения принимали в виде гидростатического напора.

Таким образом, по принятой схеме величина $x_в$ представляет собой суммарное давление сверху, $x_п$ — снизу. Расчетное суммарное давление на покрытие определяли из такой зависимости:

$$\Delta h = x_в - x_п = z_п - \Delta z_п . \qquad (97)$$

Основные результаты опытов приведены в табл. 21 и на рис. 116. В таблице указаны лишь данные для песчаного основания при $d = 0{,}25$ *мм* и гравийного при $d = 18 \div 20$ *мм*. Эпюры взвешивающего давления при $z_c = 33$ и 40 *см* построены для шести различных грунтов подготовки; при других значениях z_c соответствующие эпюры

находились в пределах эпюр, построенных для $d=0{,}25$ *мм* и $d=$ $=18—20$ *мм*.

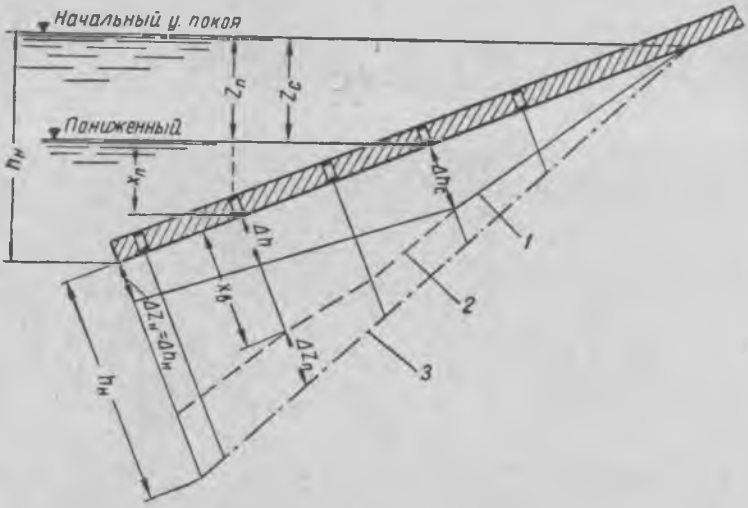


Рис. 115. Схема для построения эпюр давлений на покрытие откоса:
1—суммарное давление; *2*—взвешивающее давление; *3*—гидростатическое давление; z_c — величина снижения уровня воды над рассматриваемой точкой в любой момент времени; z_n — показание верхнего датчика, в большинстве случаев равное z_c; x_n — гидростатическое давление сверху на момент снижения уровня на величину z_c; $x_в$ — взвешивающее давление; Δh — суммарное давление на покрытие; Δz_n — показание нижнего датчика давлений; Δh_c — суммарное давление под покрытием на глубине z_c; $\Delta h_н$ — то же, на глубине $h_н$

Из рассмотрения представленных данных можно установить, что взвешивающее давление в первую очередь зависит от размера час-

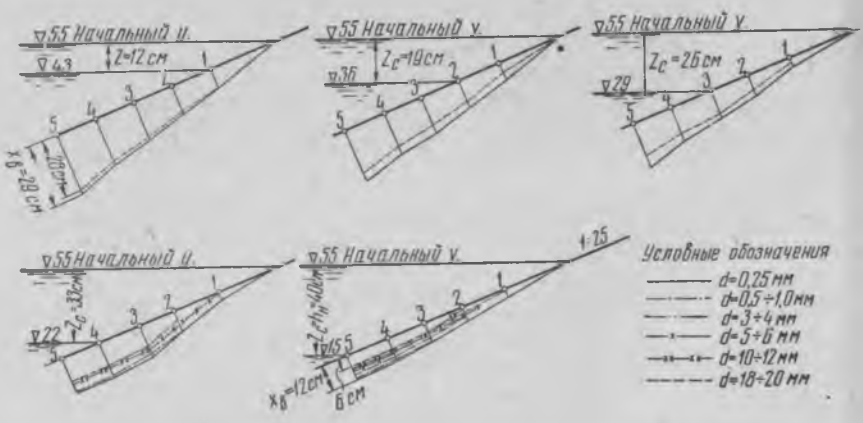


Рис. 116. Эпюры взвешивающего давления в зависимости от размера частиц подстилающего слоя при разных понижениях уровня воды для случая $h_н=0{,}4$ *м*

Таблица 21

Сводные данные осредненных величин давлений в зависимости от величины понижения уровня и состава основания

$h_н = 40$ см								$h_н = 50$ см							
z_c см	№ датчика давления	песчаное основание			гравийное основание			z_c см	№ датчика давления	песчаное основание			гравийное основание		
		$x_в$ см	$x_п$ см	Δh см	$x_в$ см	$x_п$ см	Δh см			$x_в$ см	$x_п$ см	Δh см	$x_в$ см	$x_п$ см	Δh см
12	1	9,5	0	9,5	9	0	9	10	1	9,0	0	9,0	8,5	0	8,5
	2	13	7	6	14	7	7		2	17,5	10	7,5	16	10	6,0
	3	18	14	4	18	14	4		3	25	20	5,0	23	20	3
	4	23	21	2	22	21	1		4	33	30	3,0	32	30	2
	5	29	28	1	28	28	0		5	40	40	—	40	40	0
19	1	8	0	8	7	0	7	20	1	7	0	7,0	7	0	7
	2	13	0	13	11	0	11		2	14,5	0	14,5	12,5	0	12,5
	3	17	17	10	12	7	5		3	21	10	11	19	10	9
	4	20	14	6	17	14	3		4	26,5	20	6,5	24	20	4
	5	24,5	21	3,5	23	21	2		5	33	30	3,0	31,5	30	1,5
26	1	6	0	6	5	0	5	30	1	5	0	5	5	0	5
	2	10	0	10	8	0	8		2	12	0	12	9,5	0	9,5
	3	14	0	14	12	0	12		3	17	0	17	14	0	14
	4	16	7	9	13	7	6		4	21	10	14	18	10	8
	5	20,5	14	6,5	17,5	14	3,5		5	27	20	7	24	20	4

$h_н = 40$ *см*								$h_н = 50$ *см*							
z_c *см*	№ датчика давления	песчаное основание			гравийное основание			z_c *см*	№ датчика давления	песчаное основание			гравийное основание		
		$x_в$ *см*	$x_п$ *см*	Δh *см*	$x_в$ *см*	$x_п$ *см*	Δh *см*			$x_в$ *см*	$x_п$ *см*	Δh *см*	$x_в$ *см*	$x_п$ *см*	Δh *см*
33	1	5	0	5	4	0	4	40	1	5	0	5	4	0	4
	2	8	0	8	6	0	6		2	9	0	9	7	0	7
	3	12	0	12	9	0	9		3	14	0	14	10	0	10
	4	15	0	15	12	0	12		4	19	0	19	13	0	13
	5	16	7	9	11,5	7	4,5		5	21	10	11	16	10	6
40	1	3	0	3	2	0	2	50	1	2	0	2	1	0	1
	2	5	0	5	3	0	3		2	6	0	6	3	0	3
	3	8	0	8	4	0	4		3	10	0	10	5	0	5
	4	10	0	10	5	0	5		4	14	0	14	6	0	6
	5	12	0	12	6	0	6		5	15,5	0	15,5	8	0	8

Примечание. Отметки заложения нижних датчиков давлений (По *НДД*) соответствуют величине понижения уровня z_c при отметке начального уровня покоя 50 *см*.

тиц подстилающего слоя и величины понижения уровня воды z_c, причем эта величина $x_в$ уменьшается по мере увеличения частиц подстилающего слоя и понижения уровня воды. Такая закономерность вполне логична, если учесть, что фильтрационный поток в порах подстилающего слоя имеет различные скорости.

Вместе с тем заметная разница в величинах взвешивающего давления наблюдается лишь при переходе от песчаных грунтов ($d=0{,}25\div1$ *мм*) к щебенисто-гравийному основанию ($d=3\div20$ *мм*). К такому же выводу можно прийти и из рассмотрения полученных осредненных значений скоростей фильтрационного потока. В действительности, согласно данным исследований, при размерах частиц подстилающего слоя $d=0{,}25\div1$ *мм* эта скорость менялась в пределах $v_ф=0{,}2\div1$ *см/сек*, а при $d=2\div3$ *мм*; $3\div4$ *мм*; $5\div7$ *мм* и $10\div12$ *мм* скорость фильтрационного потока во всех случаях практически оказалась одинаковой, равной $4\div6$ *см/сек*. Следует заметить, что полученные здесь выводы об изменении величины взвешивающего давления в качественном отношении целиком согласуются с приведенными выше результатами исследований для ветровых волн (см. § 13; 14).

Учитывая результаты первой серии лабораторных опытов, можно прийти к выводу, что при оценке влияния состава подстилающего слоя на характер и величину взвешивающего давления с практической точки зрения следует отдельно рассматривать лишь два типа: песчаное основание и гравийную подготовку. В силу этого все последующие лабораторные опыты и были проведены применительно к двум принятым типам основания покрытия.

Последующие лабораторные опыты были проведены с целью установления единичных и суммарных давлений на покрытие в зависимости от величины снижения уровня z_c и глубины заложения низа покрытия $h_н$ или в зависимости от соответствующего соотношения $\frac{h_н}{z_c}$. Результаты данной серии опытов обрабатывали в такой последовательности: при заданной величине $h_н$ и скорости снижения уровня в лотке весь процесс ската разбивали на пять промежутков времени и на осциллографических записях проводили линии, соответствующие моментам прохождения уреза воды над данным датчиком давления, т. е. на глубинах z_c, считая от начального уровня покоя. Далее, для каждого момента времени или при данной величине z_c определяли соответствующие давления по всем другим датчикам; при этом суммарное давление определяли по зависимости (97).

В качестве примера на рис. 117 представлены эпюры суммарного давления для песчаного основания и $h_н=50$ *см*, а на рис. 118 даны графики зависимости $\Delta h_н=f(\frac{h_н}{z_c})$, $\Delta h_c=f(\frac{h_н}{z_c})$ и площади эпюры суммарного давления $\omega=f(\frac{h_н}{z_c})$. Из представленных материалов можно сделать ряд интересных выводов.

Прежде всего можно установить, что величина давления в основании покрытия $\Delta h_н$ во всех случаях увеличивается по мере уве-

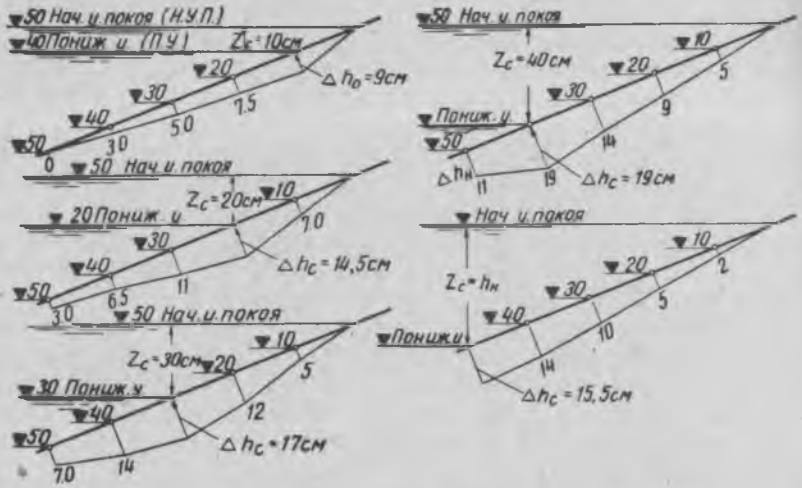


Рис. 117. Эпюры суммарного давления в зависимости от величины понижения z_c (песчаное основание)

личения снижения уровня z_c и достигает максимума при $z_c = h_н$. Совершенно иная зависимость получена для $\Delta h_{c(макс)}$ несмотря на то, что для данного значения z_c эта величина имеет максимум всегда на этой отметке. Существует определенный момент времени, когда величина Δh_c достигает максимума из максимумов. В силу такой закономерности имеет максимум и площадь эпюры суммарного давления ω, причем максимум нарастания величины Δh_c по фазе не совпадает с максимумом площади ω.

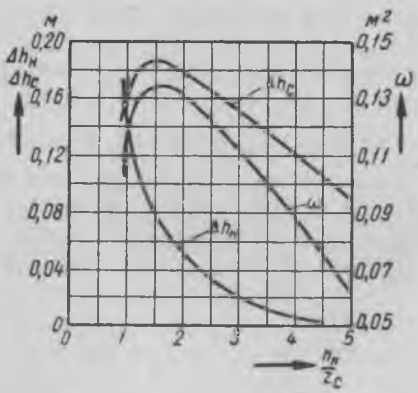


Рис. 118. График зависимости $\Delta h_н$; Δh_c и $\omega = f(\frac{h_н}{z_c})$ для случая $h_н = 0{,}5$ *м* и песчаного основания

Полученная физическая картина изменения суммарных давлений под покрытием откоса за время ската воды позволяет наиболее правильно найти расчетное значение волновой нагрузки и избежать тех ошибок, которые допускали в прошлом при определении противодавления под покрытием откоса судоходных каналов. Напомним, что эти ошибки состояли в том, что во всех случаях,

вне зависимости от соотношения $\frac{h_н}{z_c}$, максимальное давление всегда принимали для случая $z_c = h_н$.

Заканчивая на этом рассмотрение качественных результатов лабораторных исследований, перейдем к данным натурных исследований и предложим теоретическую схему учета волнового взвешивающего давления на непроницаемое покрытие откоса для случая понижения воды (отката волны) в судоходном канале.

§ 26. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ВЗВЕШИВАЮЩИХ ДАВЛЕНИЙ НА БЕТОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ОТКОСА СУДОХОДНОГО КАНАЛА

При изучении волнового взвешивающего давления под бетонным покрытием откоса судоходного канала большое внимание было уделено организации и проведению натурных исследований, которые, как отмечалось выше, были выполнены на двух специальных участках канала имени Москвы.

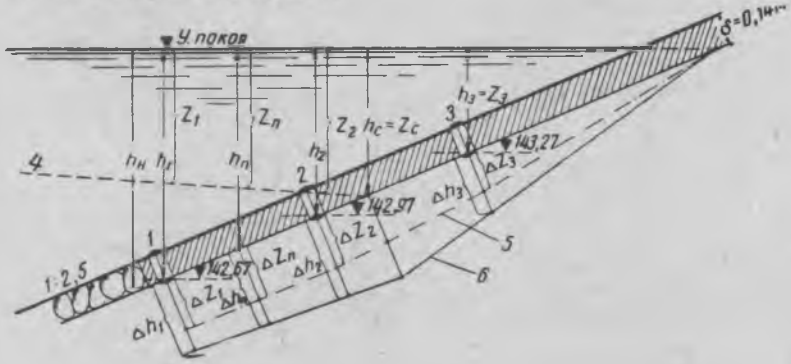


Рис. 119. Схема построения эпюр волнового взвешивающего и суммарного давления на плиту по данным показаний датчиков давлений в натурных условиях:

1, 2, 3—места установки датчиков; *4*—впадина волны; *5*—эпюра волнового взвешивания; *6*—суммарная эпюра нагрузок

Во время проведения натурных исследований в 1955 г. наблюдения за волновыми нагрузками на бетонное покрытие были выполнены на шести створах, в каждом створе устанавливали по три кассеты с двойными датчиками. Размер плит на откосе принимали от 1,5×1,5 до 3,2×3,2 *м* при толщине в пределах 0,10÷0,16 *м*. Под плитами укладывали как сплошной однослойный фильтр толщиной 0,15 *м* из разнозернистого гравия с размером частиц от 1 до 5 *см*, так и ленточный фильтр под швами того же состава.

Схема расположения датчиков давлений по створам рассматриваемого участка показана на рис. 119. При обработке данных натурных измерений были приняты следующие условные обозначения: z_n — показание (запись) верхнего датчика; Δz_n — то же, нижнего

датчика; $\Delta h'_0 = z_n - \Delta z_n$ — суммарное давление на рассматриваемый момент времени.

При проведении натурных исследований было получено значительное количество осциллографических записей волновых давлений (более 200 опытов). В качестве примера на рис. 120а представлена одна из таких записей. При оценке этих записей следует учесть, что каждый датчик имел отличную чувствительность, которую подбирали в зависимости от места его установки на откосе. Характерной особенностью большинства полученных осциллограмм является то, что записи имеют плавные очертания, напоминающие собой кривые процесса ската волны с откоса и наката ее на откос.

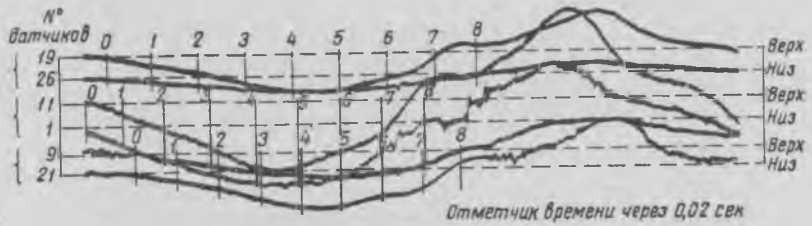


Рис. 120а. Осциллографическая запись избыточных давлений по показаниям верхних и нижних датчиков на момент отката волны с откоса (опыт № 52)

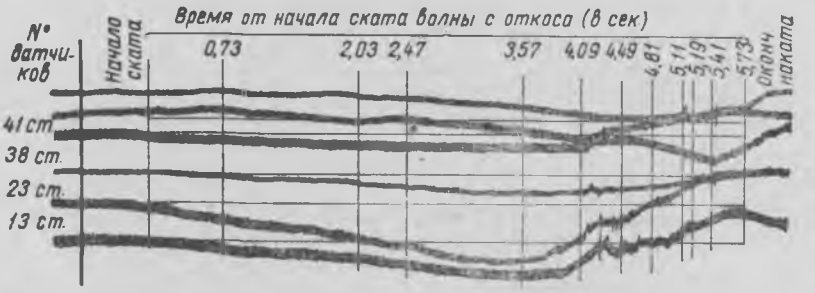


Рис. 120б. Осциллографическая запись волновых давлений по данным натурных измерений (опыт № 46)

Во время проведения натурных исследований на втором опытном участке в 1957 г. волновую нагрузку на бетонное покрытие изучали в четырех створах, которые отличались типами обратных фильтров под плитами, размерами отдельных плит и отметками расположения низа бетонного покрытия (см. рис. 95).

На этом опытном участке также было получено значительное количество осциллографических записей избыточных давлений, одна из которых показана на рис. 120б. Как и в предыдущем случае, характер записей давлений в отдельных точках покрытия находил-

ся в прямой зависимости от процесса понижения уровня воды в канале во время прохождения судна.

Полученные натурные измерения величин избыточных давлений в отдельных точках бетонного покрытия позволяют проследить за характером этого изменения во время наката и ската судовой волны. В данном параграфе остановимся лишь на качественном рассмотрении полученных материалов.

Так как в рассматриваемом случае характер изменения избыточных и суммарных давлений в отдельных точках, а также эпюры наг-

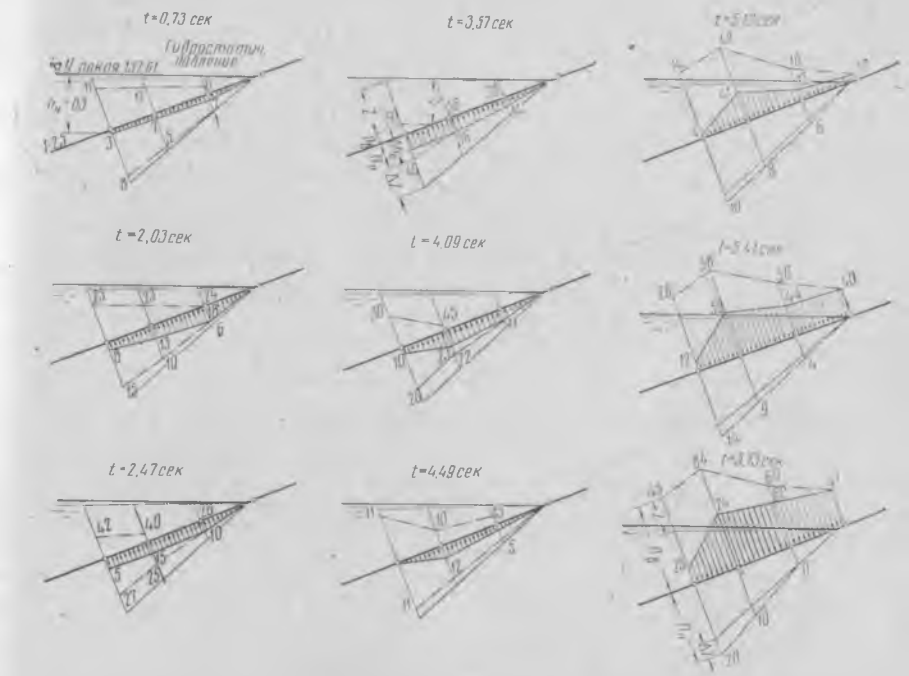


Рис. 121. Изменение избыточных и суммарных давлений на бетонное покрытие откоса судоходного канала за период времени от начала ската волны с откоса до окончания максимального наката (по данным натурных измерений):

z — показания верхних датчиков (—..—..);
Δz — показания нижних датчиков (—·—·);
$П_в$ — суммарное давление сверху; $П_н$ — суммарное давление снизу;
Δh_0— расчетное суммарное давление на покрытие

рузок изменяются в зависимости от времени наката волны на откос и отката ее с откоса, то прежде всего следует установить время достижения максимальных значений этих величин.

В качестве примера рассмотрим осциллограмму, полученную в результате опыта № 46 (см. рис. 120б) в 1957 г. при следующих исходных данных: высота волны $2h=0{,}90$ *м*; $h_c=0{,}60$ *м*, $h_н=0{,}83$ *м* (глубина низа бетонного покрытия по отношению к уровню покоя),7

высота наката $h_в=0{,}75$ *м*. Для определения соответствующих величин в данный момент все время, начиная от начала ската волны с откоса до окончания максимального наката волны на откос ($t=5{,}73$ *сек*), разбиваем на 11 интервалов. В результате выполненной обработки осциллографических записей на рис. 121 представлены соответствующие кривые избыточных и суммарных давлений на бетонное покрытие откоса.

Из рассмотрения полученных материалов можно установить, что характер изменения избыточных, т. е. сверхгидростатических, давлений, а следовательно, и суммарных давлений на непроницаемое бетонное покрытие откоса за время отката волны с откоса и наката ее на откос претерпевает существенные изменения.

Так, например, с момента начала отката волны с откоса до окончания максимального ската, т. е. за время $t=0{,}73\div3{,}57$ *сек*, избыточное давление на плиту как сверху, так и снизу всегда остается меньше гидростатического; в последующий момент времени ($t=4{,}09\div5{,}11$ *сек*) наблюдается перемена знаков в записи избыточных давлений (от нуля балансировки), в силу чего суммарная нагрузка на плиту может иметь знакопеременный вид. В период наката волны на откос ($t=5{,}19\div5{,}73$ *сек*) избыточное давление для рассматриваемого опыта оказалось больше гидростатического.

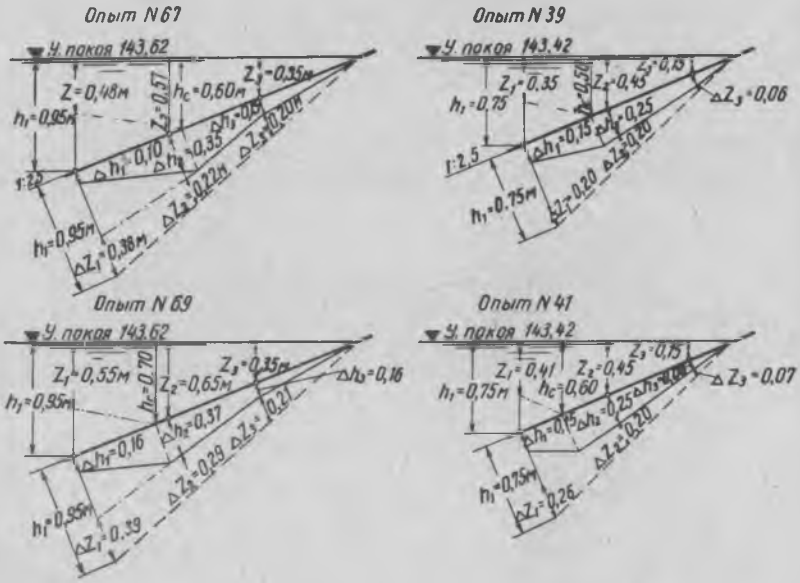


Рис. 122. Эпюры избыточных и суммарных давлений на бетонное покрытие откоса канала по данным натурных измерений:
·—·—·суммарное давление снизу; —··—··—суммарное давление сверху; —результирующее давление; z_n — показание верхнего датчика; Δz_n— показание нижнего датчика; Δh_n — суммарное противодавление

Результаты натурных наблюдений показали, что максимальная величина волновой нагрузки (сверху вниз), необходимая для расчета бетонного покрытия на прочность, всегда соответствует моменту наибольшего наката волны на откос. Это положение и было учтено при решении вопроса о построении эпюры волнового давления на откос (см. § 21).

Наиболее сложным оказалось определение максимальной нагрузки, необходимой для расчета бетонного покрытия на устойчивость. Для решения данного вопроса предварительно было детально проанализировано несколько наиболее характерных осциллографических записей и построены соответствующие эпюры суммарного и взвешивающего давлений. В качестве примера на рис. 122 представлено несколько эпюр избыточных и суммарных давлений на покрытие, построенных по материалам наблюдений на первом опытном участке.

Из анализа полученных материалов было установлено, что максимальное значение ординаты Δh_c (см. рис. 117) не всегда соответствует максимальному скату волны с откоса, т. е. h_c. С другой стороны, величина $\Delta h_{н(макс)}$ во всех случаях имела место при $z_c = h_{c(макс)}$.

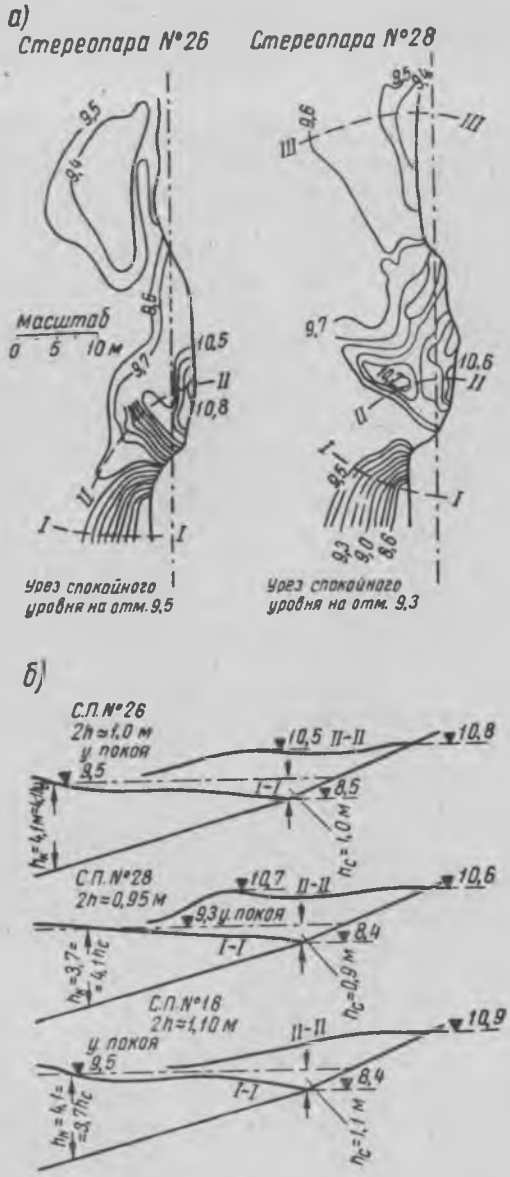


Рис. 123. Стереофотопланы (*а*) и разрезы (*б*) судовых волн по данным натурной съемки

По этим причинам эпюра максимального давления на бетонное покрытие соответствовала не только случаю $\frac{h_н}{z_c}=1$, но и $\frac{h_н}{z_c}\leqslant 1$. Зафиксированная в натурных условиях особенность изменения суммарного давления под бетонным покрытием привела к необходимости проведения более детальных лабораторных опытов, результаты которых частично были освещены выше. Характерно, что полученные результаты лабораторных опытов хорошо согласуются с данными натурных измерений.

Установленная особенность изменения суммарных давлений под бетонным покрытием сильно осложнила всю последующую обработку материалов натурных измерений, однако позволила правильнее подойти к решению поставленной задачи.

Для упрощения обработки материалов натурных исследований рассмотрим теоретическую схему построения эпюры суммарного давления на бетонное покрытие на момент отката волны с откоса канала, исходя из условия, что под плитой уровень грунтовых вод соответствует начальному уровню покоя воды в канале.

По материалам стереофотосъемки судовых волн в канале (рис. 123) можно установить, что в месте пересечения впадины волны с уровнем покоя глубина воды при максимальном откате волны $h_{к(ср)}\approx\approx 4h_c$ и при частичном откате $h_{к(ср)}\approx 4z_c$. Если исходить из этого предположения, то при непроницаемом покрытии откоса схема построения суммарного давления на него может быть принята согласно рис. 124. При этом для простоты решения поставленной задачи действительные кривые суммарного давления заменяют двумя прямыми отрезками (*аб*; *бз*).

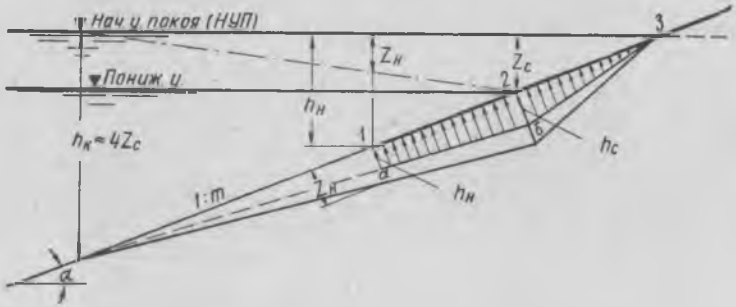


Рис. 124. Схема построения суммарного давления на бетонное покрытие откоса судоходного канала

Исходя из принятой расчетной схемы, суммарное давление в основании покрытия (точка *1*) может быть определено из такой зависимости:

$$\Delta h_н=\varphi_н z_c\frac{h_к-h_н}{h_к-z_c}, \qquad (98)$$

где $\varphi_н$ — опытный коэффициент, зависящий от размера частиц подстилающего слоя.

Принимая $h_к = 4z_c$, вместо выражения (98) можно написать

$$\Delta h_н = \frac{1}{3}\varphi_н (4z_c - h_н). \qquad (99)$$

Из рассмотрения данной зависимости следует, что $\Delta h_н$ увеличивается по мере снижения уровня воды z_c; при $z_c \geqslant 0{,}25\ h_н$ суммарное давление на глубине $h_н$ будет равно нулю. Такая закономерность для $\Delta h_н$ в общем согласуется с приведенными выше данными опытных исследований.

Что касается изменения Δh_c (точка *2* на рис. 124), то по принятой схеме оно определяется как $\Delta h_c = \varphi_н z_c$, т. е. всегда увеличивается по мере понижения уровня воды; предельное его значение $\varphi_н h_c$. В действительности же, как было установлено выше, эта величина при изменении z_c от 0 до h_c может иметь максимум и в случае $z_c \leqslant h_c$ (см. рис. 118).

Ввиду сложности аналитического отыскания функции для Δh_c, автор пришел к выводу о том, что для нее надо устанавливать эмпирическую зависимость исходя из соблюдения граничных условий и учитывая, что при $z_c = h_c$ $\Delta h_c = \Delta h_н$.

В результате обобщения данных лабораторных исследований для определения величины Δh_c была принята следующая зависимость:

$$\Delta h_c = \left(1 - \varphi_c \frac{z_c}{h_н}\right) z_c, \qquad (100)$$

где φ_c — эмпирический коэффициент, зависящий также от размера частиц подстилающего слоя, связанный с коэффициентом $\varphi_н$ зависимостью $\varphi_н = 1 - \varphi_c$.

Обоснование выражения (100) будет дано ниже. Заметим лишь, что оно хорошо отражает установленный выше характер изменения Δh_c в зависимости от соотношения $\frac{h_н}{c}$, в чем можно убедиться из рассмотрения графика, приведенного на рис. 118.

§ 27. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА БЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ИХ АНАЛИЗ

Прежде всего рассмотрим материалы лабораторных исследований. Результаты основных опытов для песчаной ($d = 0{,}25$ *мм*) и гравийной подготовок ($d = 18 \div 20$ *мм*) при разных глубинах заложения низа покрытия $h_н$ приведены в табл. 22, в которой для каждого значения z_c приведены максимальные величины Δh_c и соответствующие им величины $\Delta h_н$. Значения коэффициентов $\varphi_н$ и φ_c (см. графы 8 и 11 табл. 22) определены по формулам:

$$\varphi_н = \frac{3\,\Delta h_н}{4z_c - h_н}$$

и

$$\varphi_c = \frac{h_н}{z_c}\left(1 - \frac{\Delta h_c}{z_c}\right),$$

которые вытекают из зависимостей (99), (100).

Таблица 22

Сводные данные о максимальном суммарном давлении на нижнюю грань покрытия (лабораторные опыты)

Основание модели	$h_н$ см	z_c см	$\frac{h_н}{z_c}$	$\frac{z_н}{z_c}$	По опытам $\Delta h_н$ см	По опытам $\frac{\Delta h_н}{z_c}$	$\varphi_н$	По опытам Δh_c см	По опытам $\frac{\Delta h_c}{z_c}$	φ_c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Гравий	35	14	2,50	0,40	1,0	0,072	0,14	9,5	0,680	0,80
		21	1,66	0,60	2,5	0,119	0,15	10,5	0,500	0,83
		28	1,25	0,80	4,0	0,143	0,16	8,5	0,304	0,87
		35	1,00	1,00	5,0	0,143	0,14	4,5	0,129	0,87
	40	8	5,00	0,20	—	—	—	6,7	0,840	0,80
		12	3,33	0,30	—	—	—	9	0,750	0,83
		16	2,50	0,40	1,3	0,081	0,16	11	0,685	0,79
		19	2,10	0,47	2	0,105	0,17	11	0,580	0,80
		24	1,66	0,60	3,2	0,133	0,17	11,5	0,480	0,86
		26	1,54	0,65	3,3	0,125	0,16	12	0,462	0,83
		33	1,21	0,83	4,5	0,137	0,14	10	0,306	0,85
		40	1,0	1,0	6,0	0,150	0,15	6	0,15	0,85
	45	9	5,0	0,2	—	—	—	7,4	0,82	0,90
		18	2,5	0,4	1,6	0,09	0,18	11,5	0,64	0,90
		27	1,66	0,6	3,3	0,122	0,15	13,0	0,48	0,85
		36	1,25	0,8	5,0	0,139	0,15	13,0	0,362	0,81
		45	1,0	1,0	7,0	0,156	0,16	6	0,133	0,867
	50	10	5,0	0,2	—	—	—	8,5	0,850	0,75
		10	5,0	0,2	—	—	—	8,5	0,850	0,75
		20	2,5	0,4	1,4	0,07	0,14	12,5	0,625	0,94
		20	2,5	0,4	1,5	0,075	0,15	12,5	0,625	0,92
		30	1,66	0,6	3,5	0,117	0,15	12,5	0,420	0,95
	50	30	1,66	0,6	4,0	0,133	0,17	14,0	0,467	0,88
		40	1,25	0,8	5,6	0,140	0,15	10,0	0,250	0,94
		40	1,25	0,8	6,0	0,150	0,16	13,0	0,378	0,84
		50	1,0	1,0	7,5	0,150	0,15	7,5	0,15	0,85
		50	1,0	1,0	8,0	0,160	0,16	8,0	0,16	0,84
Мелкозернистый песок	35	7	5,0	0,2	—	—	—	6,0	0,860	0,70
		15	2,33	0,43	2,5	0,167	0,30	10,5	0,700	0,75
		21	1,66	0,60	5,0	0,240	0,31	12,0	0,580	0,70
		25	1,40	0,72	6,5	0,260	0,30	11,5	0,460	0,74
		28	1,25	0,80	7,5	0,268	0,29	12,5	0,446	0,69
		31	1,12	0,89	8,8	0,284	0,29	9,5	0,308	0,78
		35	1,0	1,0	11	0,314	0,31	11	0,314	0,69

Основание модели	$h_н$ см	z_c см	$\frac{h_н}{z_c}$	$\frac{z_c}{z_н}$	По опытам $\Delta h_н$ см	По опытам $\frac{\Delta h_н}{z_c}$	$\varphi_н$	По опытам Δh_c см	По опытам $\frac{\Delta h_c}{z_c}$	φ_c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Мелкозернистый песок	40	12	3,33	0,30	1,0	0,083	0,37	9,5	0,790	0,70
		19	2,10	0,475	3,5	0,184	0,29	13	0,685	0,67
		26	1,54	0,65	6,5	0,250	0,31	14	0,540	0,71
		33	1,21	0,825	9,0	0,273	0,29	15	0,455	0,65
		40	1,0	1,0	12	0,30	0,30	10	0,25	0,75
	50	10	5	0,2	—	—	—	9	0,875	0,63
		20	2,5	0,4	3,0	0,15	0,30	14,5	0,72	0,70
		30	1,66	0,6	7,0	0,232	0,30	17,0	0,565	0,72
		40	1,25	0,8	11	0,275	0,30	19	0,476	0,66
		50	1,0	1,0	15,5	0,312	0,31	15,5	0,312	0,69

На основании данных, приведенных в табл. 22, построен график зависимости $\frac{\Delta h_н}{z_c}=f\left(\frac{h_н}{z_c}\right)$ (рис. 125) и график зависимости $\frac{\Delta h_c}{z_c}=f\left(\frac{z_c}{h_н}\right)$ (рис. 126); сплошные линии, проведенные на обоих графиках,

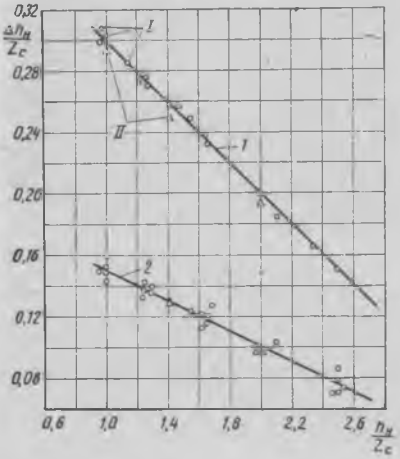


Рис. 125. График зависимости $\frac{\Delta h_н}{z_c}=f\left(\frac{h_н}{z_c}\right)$ по лабораторным данным:

I—по основным опытам; *II*—по контрольным опытам; *1*—песчаное основание; *2*—гравийное основание

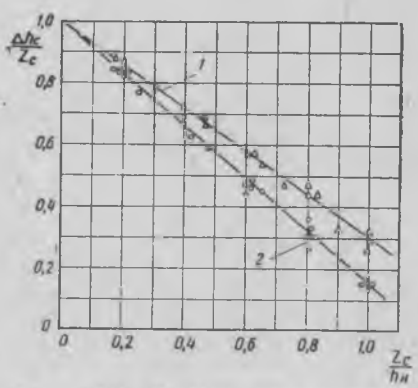


Рис. 126. График зависимости $\frac{\Delta h_c}{z_c}=f\left(\frac{z_c}{h_н}\right)$ по лабораторным данным:

1—песчаное основание; *2*—гравийное основание

соответствуют значениям коэффициентов $\varphi_н$ и φ_c в следующих пределах: для песчаного основания $\varphi_н=0{,}3$, $\varphi_c=0{,}7$; для гравийного основания $\varphi_н=0{,}15$, $\varphi_c=0{,}85$.

Из приведенных материалов лабораторных исследований видно, что совпадение расчетных и опытных величин удовлетворительно; наблюдаемый разброс опытных точек находится в пределах точности осредненных показаний нескольких опытов.

Перед сравниванием полученных расчетных зависимостей с данными натурных исследований остановимся на их общем анализе.

Как было установлено выше, величина $\Delta h_н$ достигает максимума при $z_c = h_{c(макс)}$, что и следует из зависимости (100). Для определения максимального значения для Δh_c продифференцируем это выражение по z_c и приравняем его нулю:

$$\frac{d[\Delta h_c]}{d[z_c]} = 1 - 2\frac{\varphi_c}{h_н} z_c = 0,$$

откуда можно получить

$$\left.\begin{aligned} z_c &= \frac{h_н}{2\varphi_c} \\ \text{и} \quad \Delta h_{c\,(макс)} &= \frac{1}{4} \cdot \frac{h_н}{\varphi_c} \end{aligned}\right\}. \qquad (101)$$

При этом значении z_c соответствующая ему величина $\Delta h_н$, согласно выражению (99) определится как

$$\Delta h_н = \frac{1}{3}\varphi_н h_н \left(\frac{2}{\varphi_c} - 1\right). \qquad (102$$

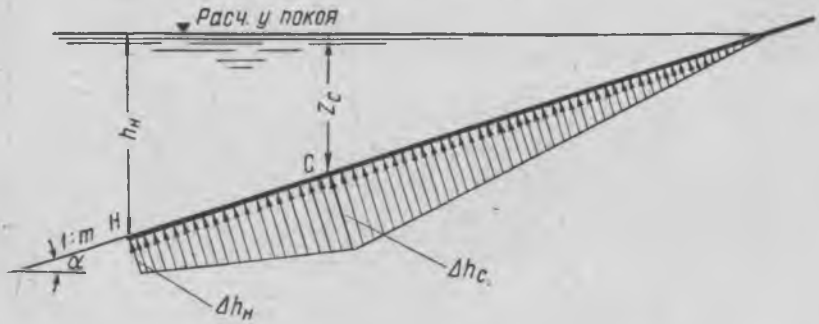


Рис. 127. Схема построения суммарного давления на непроницаемое покрытие откоса судоходного канала (для расчета на устойчивость)

Площадь эпюры суммарного давления на покрытие откоса (рис. 127), согласно выражениям (99) и (100), будет

$$\omega = \frac{1}{2\sin\alpha}\left[z_c h_н\left(1 + \frac{5}{3}\varphi_н\right) - z_c^2\left(\varphi_c + \frac{4}{3}\varphi_н\right) - \frac{1}{3}\varphi_н h_н^2\right].$$

После дифференцирования по z_c и приравнивания выражения нулю получаем

$$\frac{d[\omega]}{d[z_c]} = -2z_c\left(\varphi_c + \frac{4}{3}\varphi_н\right) + h_н\left(1 + \frac{5}{3}\varphi_н\right) = 0,$$

откуда

$$z_c = h_н \frac{3 + 5\varphi_н}{6\varphi_c + 8\varphi_н}. \qquad (103)$$

Сопоставляя зависимость (101) с аналогичным выражением (103), можно установить, что максимальная площадь эпюры давления не совпадает с максимальным значением $\Delta h_{c(макс)}$. Так, например, для песчаного основания максимальная площадь эпюры $\omega_{макс}$ будет при $z_c = 0{,}682\, h_н$, а величина $\Delta h_{c(макс)}$ имеет максимальное значение при $z_c = 0{,}715\, h_н$. Такая закономерность вполне логична и в полной мере отвечает физической сущности рассматриваемого явления.

Принимая полученные значения коэффициентов $\varphi_н$ и φ_c и используя зависимости (99), (100), (103) для построения эпюры суммарного давления на непроницаемое покрытие откоса судоходного канала, окончательно можно предложить следующие расчетные формулы (рис. 127).

В случае укладки покрытия на песчаные грунты и ленточные фильтры

Давления в точке H с ординатой $h_н$ и в точке C с ординатой z_c будут равны

$$\left.\begin{aligned} \Delta h_н &= 0{,}172\gamma h_н \\ \text{и} \quad \Delta h_c &= 0{,}356\gamma h_н \end{aligned}\right\}. \qquad (104)$$

Ордината приложения давления Δh_c составляет

$$z_c = 0{,}68\, h_н. \qquad (105)$$

Зависимости (104) действительны при условии $0{,}68 h_н \leqslant h_c$; в случае несоблюдения данного условия, т. е. при $0{,}68\ h_н > h_c$, соответствующие давления рассчитывают по формулам:

$$\left.\begin{aligned} \Delta h_н &= 0{,}1\gamma\,(4\,h_c - h_н) \\ \text{и} \quad \Delta h_c &= \gamma\left(1 - 0{,}7\frac{h_c}{h_н}\right)h_c \end{aligned}\right\}. \qquad (106)$$

Ордината приложения давления Δh_c в этом случае соответствует $z = h_c$, где h_c — максимальный откат волны с откоса согласно выражению (95).

Таблица 23

Сводные данные натурных величин суммарного давления под бетонным покрытием и сопоставление их с расчетными данными (материалы наблюдений 1954 г.)

Тип основания	№ опыта	$h_н$ м	h_c м	$\frac{h_c}{h_н}$	По расчету				Ниша № 1						Ниша № 2						Ниша № 3					
					z_c м	$z_c \gtrless h_c$	$\Delta h_н$ м	Δh_c м	h м	z м	Δz м	Δh_o м	Δh_p м	$\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}$	h м	z м	Δz м	Δh_o м	Δh_p м	$\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}$	h м	z м	Δz м	Δh_o м	Δh_p м	$\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}$
Мелкозернистые пески	39	0,80	0,50	0,62	0,54	—	0,12	0,29	0,75	0,35	0,20	0,15	0,15	1,00	0,45	0,45	0,20	0,25	0,26	0,97	0,15	0,15	0,06	0,09	0,10	0,90
	40	0,80	0,55	0,69	0,54	—	0,14	0,29	0,75	0,40	0,22	0,18	0,16	1,11	0,45	0,45	0,21	0,24	0,24	1,00	0,15	0,15	0,05	0,10	0,09	1,11
	41	0,80	0,60	0,75	0,54	—	0,14	0,29	0,75	0,41	0,26	0,15	0,16	0,94	0,45	0,45	0,20	0,25	0,24	1,04	0,15	0,15	0,08	0,07	0,09	0,87
	87	0,80	0,60	0,75	0,54	—	0,14	0,29	0,75	0,46	0,30	0,16	0,16	1,00	0,45	0,45	0,20	0,25	0,24	1,04	0,15	0,15	0,06	0,09	0,09	1,00
	89	0,80	0,65	0,81	0,54	—	0,14	0,29	0,75	0,41	0,26	0,15	0,16	0,94	0,45	0,45	0,22	0,23	0,26	0,92	0,15	0,15	0,07	0,08	0,09	0,89
	90	0,80	0,50	0,62	0,54	—	0,12	0,29	0,75	0,38	0,26	0,12	0,15	0,82	0,45	0,45	0,21	0,24	0,26	0,92	0,15	0,15	0,06	0,09	0,10	0,90
Сплошной гравийный фильтр	58	1,00	0,55	0,55	0,60	—	0,06	0,29	0,95	0,44	0,35	0,09	0,08	1,11	0,65	0,53	0,30	0,23	0,24	0,96	0,35	0,35	0,15	0,20	0,18	1,11
	59	1,00	0,65	0,65	0,60	—	0,07	0,30	0,95	0,46	0,36	0,10	0,09	1,11	0,65	0,65	0,38	0,27	0,27	1,00	0,35	0,35	0,19	0,16	0,18	0,89
	67	1,00	0,60	0,60	0,60	—	0,06	0,29	0,95	0,46	0,38	0,08	0,08	1,00	0,65	0,57	0,32	0,25	0,24	1,04	0,35	0,35	0,20	0,15	0,18	0,84
	69	1,00	0,70	0,70	0,60	—	0,07	0,30	0,95	0,55	0,45	0,10	0,09	1,11	0,65	0,65	0,35	0,30	0,27	1,11	0,35	0,35	0,19	0,16	0,18	0,89
	70	1,00	0,65	0,65	0,60	—	0,07	0,30	0,95	0,55	0,46	0,08	0,09	0,89	0,65	0,65	0,40	0,25	0,27	0,93	0,35	0,35	0,12	0,14	0,18	0,78
	60	1,00	0,60	0,60	0,60	—	0,07	0,29	0,95	0,44	0,34	0,10	0,09	1,11	0,65	0,55	0,31	0,27	0,26	1,04	0,35	0,35	0,19	0,16	0,17	0,94
	61	1,00	0,65	0,65	0,60	—	0,07	0,29	0,95	0,44	0,35	0,09	0,09	1,00	0,65	0,65	0,40	0,25	0,26	0,97	0,35	0,35	0,17	0,18	0,17	1,04
	62	1,00	0,50	0,50	0,60	—	0,05	0,26	0,95	0,34	0,26	0,08	0,07	1,14	0,65	0,45	0,27	0,23	0,21	1,10	0,35	0,35	0,15	0,20	0,20	1,00
	63	1,00	0,60	0,60	0,60	—	0,07	0,29	0,95	0,40	0,32	0,08	0,09	0,89	0,65	0,50	0,26	0,24	0,26	0,92	0,35	0,35	0,20	0,15	0,17	0,88
	51	1,00	0,55	0,55	0,60	—	0,06	0,29	0,95	0,45	0,37	0,08	0,08	1,00	0,65	0,50	0,27	0,23	0,24	0,96	0,35	0,35	0,17	0,18	0,18	1,00
	67	1,00	0,60	0,60	0,60	—	0,05	0,29	0,95	0,45	0,35	0,10	0,09	1,11	0,65	0,53	0,30	0,23	0,27	0,84	0,35	0,35	0,20	0,15	0,18	0,83
	69	1,00	0,65	0,65	0,60	—	0,07	0,30	0,95	0,44	0,35	0,09	0,10	0,90	0,65	0,65	0,39	0,26	0,24	1,07	0,35	0,35	0,19	0,16	0,18	0,89
	57	1,00	0,60	0,60	0,60	—	0,06	0,29	0,95	0,42	0,32	0,10	0,09	1,11	0,65	0,51	0,28	0,23	0,27	0,86	0,35	0,35	0,20	0,15	0,18	0,83
	109	1,16	0,65	0,56	0,70	—	0,07	0,34	1,11	0,33	0,24	0,09	0,09	1,00	0,81	0,55	0,28	0,27	0,26	1,04	0,51	0,51	0,26	0,25	0,25	1,00
	111	1,16	0,75	0,65	0,70	—	0,08	0,34	1,11	0,50	0,40	0,10	0,10	1,00	0,81	0,70	0,43	0,27	0,28	0,96	0,51	0,51	0,28	0,23	0,23	1,00
	112	1,16	0,70	0,61	0,70	—	0,08	0,34	1,11	0,40	0,31	0,09	0,10	0,90	0,81	0,65	0,37	0,28	0,28	1,00	0,51	0,51	0,30	0,21	0,23	0,92
	113	1,16	0,70	0,61	0,70	—	0,08	0,34	1,11	0,43	0,34	0,09	0,10	0,90	0,81	0,60	0,33	0,27	0,28	0,96	0,51	0,51	0,30	0,21	0,23	0,92
	114	1,16	0,80	0,69	0,70	<	0,08	0,34	1,11	0,60	0,50	0,10	0,10	1,00	0,81	0,80	0,49	0,31	0,28	1,10	0,51	0,51	0,31	0,20	0,23	0,87
	116	1,16	0,60	0,52	0,70	>	0,06	0,34	1,11	0,42	0,32	0,10	0,08	1,25	0,81	0,55	0,32	0,23	0,26	0,89	0,51	0,51	0,26	0,25	0,26	0,96
	117	1,16	0,65	0,56	0,70	>	0,07	0,34	1,11	0,33	0,23	0,10	0,09	1,11	0,81	—	—	—	0,26	—	0,51	0,51	0,28	0,23	0,25	0,92
	119	1,16	0,65	0,56	0,70	>	0,07	0,34	1,11	0,42	0,34	0,08	0,09	0,89	0,81	0,52	0,26	0,27	0,26	1,04	0,51	0,51	—	—	0,25	—
	121	1,16	0,65	0,56	0,70	>	0,07	0,35	1,11	0,36	0,28	0,08	0,09	0,89	0,81	0,46	0,20	0,26	0,27	0,96	0,51	0,51	0,29	0,23	0,27	0,85
	122	1,16	0,56	0,56	0,70	>	0,07	0,35	1,11	0,42	0,33	0,09	0,09	1,00	0,81	0,53	0,28	0,25	0,27	0,93	0,51	0,51	0,26	0,25	0,27	0,93

В случае укладки покрытия на сплошную гравийно-щебенистую подготовку

Давления определяются из таких зависимостей (см. рис. 127):

$$\left.\begin{aligned} \Delta h_н &= 0{,}07\,\gamma\,h_н \\ \text{и} \quad \Delta h_c &= 0{,}294\,\gamma h_н \end{aligned}\right\}. \tag{107}$$

Ордината приложения давления Δh_c равна

$$z_c = 0{,}6\,h_н\,. \tag{108}$$

Зависимости (107) действительны при $0{,}6\ h_н \leqslant h_c$. Если $0{,}6\ h_н > h_c$, то давление следует вычислять по формулам

$$\left.\begin{aligned} \Delta h_н &= 0{,}05\,\gamma\,(4\,h_c - h_н) \\ \text{и} \quad \Delta h_c &= \gamma\left(1 - 0{,}85\,\frac{h_c}{h_н}\right) h_c. \end{aligned}\right\}. \tag{109}$$

Ордината z_c приложения давления Δh_c и в этом случае равна h_c которое находится по формуле (95).

Заметим, что предложенные здесь зависимости действительны при соблюдении следующего критерия:

$$0{,}25\,h_н \leqslant z_c \leqslant h_{c\ (макс)}. \tag{110}$$

Для оценки предложенной методики расчета бетонного покрытия откоса судоходного канала была проделана большая работа по обработке и анализу осциллографических записей волновых давлений в отдельных точках, полученных во время натурных наблюдений на специальных опытных участках. При построении соответствующих эпюр суммарных давлений время достижения максимума рассчитывали по величине z_c, определяемой по формулам (105) и (108).

Результаты сравнения расчетных величин давлений с опытными данными приведены в табл. 23 и 24. В этих таблицах через Δh_0 обозначено давление на бетонное покрытие в отдельных точках, полученное по опыту, и Δh_p— соответствующее расчетное давление согласно зависимостям (104)÷(110).

На основании данных таблиц построен условный график соотношения $\frac{\Delta h_0}{\Delta h_p}$ (рис. 128) для каждой ниши (места расположения датчиков давлений).

Из представленных материалов можно установить, что результаты, полученные из предложенных зависимостей для определения суммарного давления на бетонное покрытие откоса судоходного канала, в общем почти совпадают с данными натурных измерений.

Сводные данные натурных величин суммарного давления
(материалы наблю

Тип основания	№ опыта	$h_н$ м	h_c м	$\frac{h_c}{h_н}$	По расчету				Ниша № 1					
					z_c м	$z_c < h_c$	$\Delta h_н$ м	Δh_c м	h м	z м	Δz м	Δh_o	Δh_p м	$\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}$
Мелкозернистый песок	41	1,08	0,45	0,42	0,74	>	0,07	0,32	1,03	0,45	0,37	0,08	0,08	1,00
	42	1,13	0,48	0,42	0,77	>	0,08	0,34	1,08	0,48	0,39	0,09	0,10	0,90
	44	0,98	0,52	0,53	0,67	>	0,11	0,33	0,93	0,50	0,36	0,14	0,13	1,08
	46	0,83	0,60	0,72	0,56	<	0,14	0,30	0,78	0,60	0,42	0,18	0,19	0,95
	47	0,98	0,52	0,53	0,67	>	0,11	0,33	0,93	0,55	0,41	0,14	0,13	1,08
	48	0,74	0,52	0,70	0,50	<	0,13	0,26	0,69	0,69	0,52	0,17	0,16	1,06
	49	0,86	0,52	0,61	0,58	>	0,12	0,30	0,81	0,52	0,37	0,15	0,15	1,00
	50	0,98	0,52	0,53	0,67	>	0,11	0,33	0,93	0,50	0,40	0,10	0,13	0,76
	51	0,83	0,45	0,55	0,56	>	0,10	0,27	0,78	0,45	0,32	0,13	0,14	0,93
	52	1,03	0,52	0,50	0,70	>	0,11	0,34	0,98	0,52	0,40	0,12	0,13	0,92
	56	0,88	0,44	0,50	0,60	>	0,09	0,29	0,83	0,44	0,34	0,10	0,11	0,91
	56	1,08	0,56	0,52	0,74	>	0,10	0,36	1,05	0,56	0,44	0,12	0,13	0,92
Сплошной гравийный фильтр	23	1,05	0,49	0,47	0,63	>	0,05	0,22	0,78	0,49	0,41	0,08	0,06	1,33
	24	1,41	0,94	0,67	0,85	<	0,10	0,41	1,14	1,14	1,00	0,14	0,13	1,08
	26	1,27	0,52	0,41	0,76	>	0,04	0,19	1,00	0,52	0,47	0,05	0,05	1,00
	27	1,37	0,74	0,54	0,82	>	0,08	0,22	1,10	0,74	0,62	0,12	0,10	1,20
	28	1,15	0,52	0,45	0,69	>	0,06	0,21	0,88	0,52	0,44	0,08	0,09	0,89
	29	1,27	0,64	0,51	0,77	>	0,07	0,22	1,00	0,64	0,53	0,11	0,09	1,21
	30	1,15	0,59	0,51	0,69	>	0,06	0,25	0,88	0,59	0,50	0,09	0,09	1,00
	32	1,37	0,59	0,44	0,82	>	0,05	0,18	1,10	—	—	—	0,06	—
	33	1,32	0,52	0,39	0,80	>	0,04	0,17	1,05	—	—	—	0,05	—
	34	1,22	0,44	0,36	0,73	>	0,03	0,17	0,95	0,44	0,40	0,04	0,05	0,80
	36	1,17	0,52	0,44	0,70	>	0,05	0,21	0,90	0,52	0,47	0,05	0,06	0,83
	66	0,56	0,40	0,72	0,34	<	0,04	0,17	0,52	0,40	0,32	0,08	0,08	1,00
	67	0,50	0,44	0,89	0,30	<	0,04	0,15	0,44	0,44	0,36	0,08	0,06	1,33
	68	0,40	0,52	0,50	0,24	<	0,03	0,12	—	—	—	—	0,05	—
	71	0,60	0,41	0,68	0,36	<	0,04	0,18	0,55	0,41	0,35	0,06	0,07	0,86
	73	0,62	0,37	0,60	0,37	=	0,04	0,18	0,57	0,37	0,28	0,07	0,07	1,00
	74	0,60	0,37	0,62	0,36	<	0,04	0,18	0,55	0,35	0,28	0,07	0,07	1,00
	75	0,57	0,60	1,05	0,34	<	0,04	0,17	0,52	0,52	0,47	0,05	0,06	0,86
	4	0,96	0,41	0,43	0,58	>	0,04	0,21	0,90	0,41	0,35	0,06	0,06	1,00
	5	1,34	0,27	0,20	0,81	>	0	0,09	1,28	0,27	0,25	0,02	0,02	1,00
	77	1,16	0,67	0,57	0,70	>	0,07	0,27	1,10	0,67	0,58	0,09	0,09	1,00
	84	1,08	0,59	0,55	0,65	>	0,07	0,27	1,00	0,59	0,50	0,09	0,09	1,00
	86	1,16	0,44	0,38	0,70	>	0,03	0,18	1,10	0,44	0,44	0,04	0,04	1,00
	87	1,08	0,30	0,28	0,65	>	0,04	0,14	1,02	—	—	—	0,02	—

под бетонным покрытием и сопоставление с расчетом
дений 1957 г.)

Ниша № 2						Ниша № 3						Ниша № 4					
h м	z м	Δz м	Δh_o м	Δh_p м	$\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}$	h м	z м	Δz м	Δh_o м	Δh_p м	$\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}$	h м	z м	Δz м	Δh_o м	Δh_p м	$\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}$
0,81	0,45	0,29	0,16	0,17	0,94	0,53	0,45	0,20	0,25	0,27	0,92	0,25	0,25	0,08	0,17	0,17	1,00
0,86	0,48	0,29	0,19	0,19	1,00	0,58	0,48	0,16	0,32	0,30	—	0,20	0,20	0,03	0,17	0,20	0,85
0,71	0,50	0,28	0,22	0,23	0,95	0,43	0,43	0,20	0,23	0,26	0,89	0,15	0,15	0,06	0,09	0,09	1,00
0,56	0,56	0,31	0,25	0,26	0,97	0,28	0,28	0,14	0,14	0,14	1,00	—	—	—	—	—	—
0,71	0,56	0,21	0,25	0,23	1,09	0,43	0,43	0,20	0,23	0,26	0,89	0,15	0,15	0,08	0,07	0,08	0,88
0,52	0,52	0,30	0,22	0,25	0,88	0,19	0,19	0,10	0,09	0,10	0,90						
0,59	0,59	0,23	0,26	0,26	1,00	0,31	0,31	0,14	0,17	0,17	1,00						
0,71	0,70	0,55	0,25	0,23	0,09	0,43	0,43	0,17	0,26	0,26	1,00						
						0,28	0,28	0,14	0,14	0,16	0,88						
						0,48	0,48	0,22	0,26	0,31	0,84	0,20	0,20	0,14	0,06	0,07	0,86
						0,33	0,33	0,15	0,18	0,22	0,82	0,25	0,25	0,13	0,12	0,12	1,00
						0,55	0,55	0,29	0,27	0,33	0,82	0,27	0,27	0,10	0,17	0,16	1,06
0,56	0,49	0,35	0,14	0,14	1,00	—	—	—	—	0,22	—	—	—	—	—	0,10	—
0,94	0,94	0,69	0,25	0,26	0,97	—	—	—	—	0,41	—	—	—	—	—	0,28	—
0,78	0,50	0,38	0,12	0,10	1,20	0,67	0,52	0,35	0,17	0,15	1,14	0,45	0,45	0,30	0,15	0,15	1,00
0,88	—	—	—	0,13	—	0,77	0,74	0,57	0,17	0,18	0,94	0,55	0,55	0,35	0,20	0,22	0,92
0,66	0,50	0,35	0,15	0,13	1,14	0,50	0,50	0,27	0,23	0,20	1,15	0,33	0,33	0,15	0,18	0,16	1,13
0,78	0,60	0,48	0,12	0,13	0,92	0,67	0,60	0,37	0,23	0,22	1,04	0,45	0,45	0,30	0,15	0,15	1,00
0,70	0,55	0,38	0,12	0,14	0,86	0,59	0,59	0,35	0,24	0,22	1,09	0,35	0,35	0,25	0,10	0,12	0,84
0,88	0,59	0,49	0,10	0,10	1,00	0,77	0,59	0,47	0,12	0,14	0,86	0,55	0,55	0,39	0,16	0,13	1,23
0,83	0,52	0,39	0,13	0,09	1,44	0,72	0,52	0,40	0,12	0,13	0,92	0,50	0,50	0,35	0,15	0,17	0,88
0,73	0,44	0,36	0,08	0,09	0,88	0,62	0,44	0,33	0,11	0,12	0,91	0,40	0,40	0,30	0,10	0,12	0,84
0,68	0,52	0,40	0,12	0,12	1,00	0,57	0,52	0,33	0,19	0,19	1,00	0,35	0,35	0,21	0,14	0,13	1,07
0,35	0,35	0,20	0,15	0,14	1,07												
0,28	0,28	0,20	0,08	0,10	0,80												
0,28	0,28	0,20	0,08	0,07	1,14												
0,38	0,38	0,23	0,15	0,16	0,94												
0,40	0,38	0,20	0,17	0,16	1,06												
0,38	0,35	0,20	0,15	0,16	0,94												
0,35	0,35	0,33	0,02	0,02	1,00												
0,65	0,41	0,29	0,12	0,13	0,92	0,36	0,36	0,20	0,16	0,17	0,94	0,17	0,17	0,12	0,05	0,05	1,00
1,03	0,27	0,20	0,07	0,06	1,17	0,50	0,27	0,21	0,06	0,07	0,86	0,55	0,23	0,13	0,10	0,09	1,11
0,85	0,67	0,49	0,18	0,17	1,06	0,50	0,50	0,26	0,24	0,24	1,00	0,37	0,37	0,25	0,12	0,13	0,92
0,79	0,59	0,45	0,14	0,16	0,87	0,50	0,50	0,25	0,25	0,24	1,04	0,31	0,31	0,19	0,12	0,13	0,92
0,85	0,44	0,35	0,09	0,08	1,13	0,50	0,44	0,32	0,12	0,11	1,09	0,37	0,37	0,23	0,14	0,16	0,87
0,79	0,30	0,24	0,06	0,07	0,86	0,45	0,30	0,20	0,10	0,11	0,91	0,31	0,31	0,19	0,12	0,13	0,92

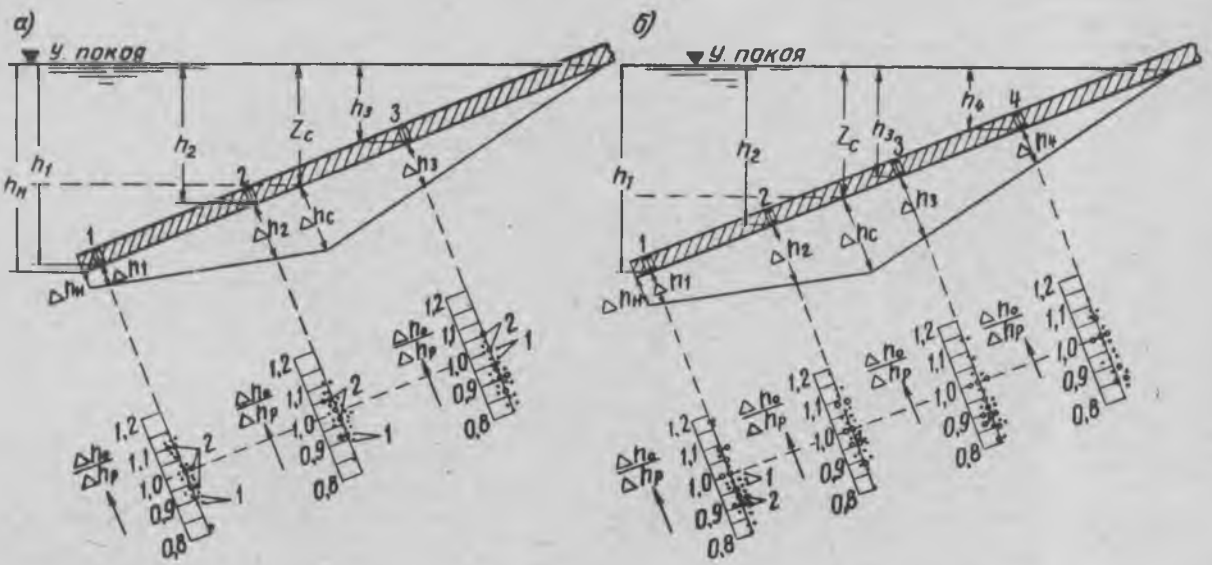


Рис. 128. Сопоставление расчетных и опытных величин единичных суммарных давлений на бетонное покрытие откоса судоходного канала:

Δh_o — суммарное давление по опытным данным; Δh_p — расчетное суммарное давление; *а*—для сплошного гравийного фильтра; *б*—для песчаной подготовки

Наблюдаемые отклонения от среднего соотношения $\frac{\Delta h_o}{\Delta h_p}=1$ находятся в пределах точности измеряемых величин в натурных условиях.

Заметим, что приведенные результаты сопоставлений выполнены для случая закрытых швов между плитами. Как показали дополнительные опыты, в случае раскрытых швов между плитами около этих швов зафиксировано некоторое уменьшение величины взвешивающего давления (на момент отката волны с откоса), однако это снижение не столь большое, чтобы его учитывать в расчете. Для судоходных каналов плиты следует рассчитывать на устойчивость при закрытых швах.

Сопоставляя материалы измерений величин противодавлений в зависимости от типа подстилающего слоя под бетонным покрытием, устанавливаем, что при ленточном фильтре величины Δh_c и $\Delta h_н$ несколько больше, чем при сплошном фильтре. В количественном отношении эта разница, полученная по лабораторным данным, также хорошо согласуется с материалами натурных наблюдений.

В заключение следует обратить внимание на некоторую особенность расчета бетонного покрытия откоса судоходного канала. Из рассмотрения представленных зависимостей следует, что эпюра суммарного давления в общем увеличивается по мере заглубления низа бетонного покрытия, т. е. $h_н$. В силу этого обстоятельства с увеличением $h_н$ (для случая непроницаемого покрытия) увеличивается и толщина бетонного покрытия, необходимая по условию устойчивости. Это увеличение теоретически будет продолжаться до $h_н=4h_c$, после чего наблюдается обратная картина.

Из рассмотрения приведенного в главах V и VI материала следует, что размеры покрытия откосов находятся в прямой зависимости от элементов судовых волн и, в частности, от высоты волны. В свою очередь, высота волны, согласно формуле (81), зависит от скорости движения судов по каналу v.

Расчетная скорость v должна назначаться с учетом допустимого режима движения судов в каналах. Рекомендации по этому вопросу изложены, например, в работе Г. Е. Павленко «Методика определения допустимого режима движения судов на каналах и реках», изд. АН Укр. ССР, 1959 и в работе Г. И. Сухомела, В. М. Засса, Л. И. Янковского «Исследование движения судов по ограниченным фарватерам», изд. АН Укр. ССР, 1956.

ГЛАВА VII

ГРАНИЦЫ КРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЛН

§ 28. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ И ДАННЫЕ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ

До сего времени отсутствуют достаточно обоснованные выводы, которые позволили бы с надлежащей уверенностью устанавливать границы крепления откосов земляных гидротехнических сооружений, находящихся под воздействием волн, определять необходимые запасы и тем самым избегать повреждения креплений откосов из-за уменьшения размера покрытия.

Существующие в настоящее время предложения по назначению границ крепления откоса в большинстве случаев основаны на инженерной интуиции и исходят в основном из опыта постройки аналогичных сооружений.

Верхнюю границу крепления рекомендуют определять в зависимости от высоты вскатывания волны на откос, с учетом некоторого запаса. Божич предлагает этот запас принимать в пределах 0,10÷÷0,15 *м*; Калинович —0,25 $h_в$; Матлин — от 0,5 $h_в$ (при учете статического уровня) до 0,1 $h_в$ (при учете динамического уровня); проектные организации — в пределах до 0,5 *м*.

При назначении заглубления низа крепления откоса в большинстве случаев исходят из предположения, что высота этого покрытия, считая от наинизшего расчетного (статического) уровня, должна быть $h_н \geqslant 1{,}5\ (2h)$. Такой рекомендации, например, придерживаются Н. Н. Джунковский, Б. Ю. Калинович и др.

При назначении нижней границы крепления откосов Н. К. Божич рекомендует исходить из условия, что максимальная орбитальная скорость донных частиц воды на уровне заглубления низа покрытия откоса должна быть равна или меньше допустимой (размывающей) скорости для данного грунта откоса. При этом орбитальную скорость он рекомендует определять по формуле Герстнера, а допустимую скорость — по формуле Великанова.

На основании ряда сравнительных расчетов, применительно к

условиям судоходных каналов, Божич пришел к выводу о том, что низ крепления откосов должен доходить до дна во всех случаях, причем при назначении этой границы размер частиц грунта откоса принимался равным 0,5÷1 *мм* (крупнозернистый песок). При мелкозернистых песках, что наблюдается на большом протяжении существующих каналов, по его рекомендации, потребовалось бы защищать и дно канала.

В свое время [67] нами отмечалась необоснованность данного предложения, которое ни в какой мере не отвечает основным принципам технико-экономического проектирования креплений откосов и противоречит опыту эксплуатации существующих судоходных каналов. Следует добавить, что опубликованная нами критика предложения Божича была затем повторена и Г. М. Матлиным [40].

В работе Матлина рассмотрены вопросы установления расчетных статических и динамических уровней воды в судоходных каналах в связи с назначением границ крепления откосов. Отмечая, что наинизший и наивысший статические (расчетные) уровни устанавливаются в зависимости от условий эксплуатации данного бьефа, для участков каналов, выходящих в свободную реку или водохранилище, он рекомендует уровень обеспеченностью от 1 до 3% принимать за расчетный. При определении динамических уровней воды в каналах Матлин предлагает рассчитывать неустановившееся движение по методу С. А. Христиановича.

Учитывая непродолжительность стояния наивысших и наинизших динамических уровней, а также и то, что границы крепления откоса не связаны с безопасностью плавания по каналу, при определении этих креплений с учетом динамических уровней, Матлин рекомендует принимать: для верхней границы $h_o=1{,}1\ h_в$; для нижней границы $h_н=1{,}2\ h_c$, где $h_в$ — определяется по формуле Джунковского, как для ветровой волны, а h_c — величина ската волны с откоса, приблизительно равная 1,1 $h_в$, т. е. $h_н \approx 1{,}3\ h_в$. При учете статического уровня можно принимать $h_н=1{,}5\ h_c=1{,}65\ h_в$.

В тех случаях, когда определенные границы крепления откоса при статических уровнях не будут соответствовать границам при динамических уровнях, Матлин предлагает уменьшить расчетную скорость движения судов по каналу, т. е. фактически весь расчет сводит только к назначению статических уровней. Далее он излагает некоторые соображения по технико-экономическому расчету скоростей движения судов в каналах.

Ряд проектных организаций (Ленгипроречтранс, Гипроречтранс и др.) при назначении границ крепления в подводной части откоса рекомендуют покрытие откоса разбивать на две зоны и первую зону с усиленным (расчетным) креплением ограничивать глубиной от наинизшего статического уровня равной $3h$, а нижнюю границу облегченного покрытия определять в зависимости от допустимой (неразмывающей) скорости для данного грунта откоса. При этом неразмывающую скорость принимают в соответствии со стандартом 24-4396 Главгидростроя, а действительную, орбитальную, скорость

донных частиц воды определяют по формуле Буссинеска для прогрессивной волны с введением поправочного коэффициента $n=0,9$.

Следует признать, что данное предложение принципиально правильно, так как учитывает характеристику грунта откоса. Однако, как показали сравнительные расчеты, оно может привести к значительным завышениям зоны подводного крепления откоса, а следовательно, к удорожанию сооружения.

В работе Курловича [22] приведены некоторые соображения по назначению границ крепления откосов. Касаясь вопроса верхней границы, автор отмечает, что она должна определяться высотой наката волны на откос и запасом на ветровой нагон; при этом высоту наката волны рекомендуется определять по формуле Н. Н. Джунковского, а ветровой нагон — по Караушеву.

При определении нижней границы он предлагает исходить из условия равенства волновой и неразмывающей скоростей. Волновая скорость на откосе определяется по формуле Буссинеска (13) с поправочным коэффициентом $n=0,6\div0,9$; неразмывающая — по полученным им лабораторным данным для грунтов размером $d=0,1\div10$ *мм*.

Данные, полученные по рекомендации Курловича, сильно завышают объем подводного крепления откоса. Так, например, в рассмотренном им же примере для условий $2h=3$ *м*; $2L=45$ *м*; $H=22,5$ *м*; $d=0,25$ *мм* откос требуется крепить до дна, что представляется не совсем правдоподобным.

Из приведенного обзора работ и предложений по назначению границ крепления откосов можно установить, что все они не имеют достаточных обоснований и дают противоречивые результаты. Причина такого положения состоит в сложности данного вопроса и, прежде всего, в том, что донные скорости волнового потока на откосных сооружениях и размывающие волновые скорости мало изучены. Для решения рассматриваемого вопроса необходима широкая постановка экспериментально-теоретических и особенно натурных исследований.

В данной книге даны предварительные соображения по назначению границ крепления откосов, основанные главным образом на имеющемся опыте эксплуатации сооружений и некоторых материалах лабораторных исследований.

Для сравнительной оценки величин крепления откосов земляных плотин и судоходных каналов интересно рассмотреть некоторые данные из опыта эксплуатации сооружений.

Как отмечалось выше, во время шторма в ноябре 1952 г. на Карповской (№ 80), Береславской (№ 79) и Варваровской (№ 78) плотинах были зафиксированы значительные разрушения каменной облицовки откосов, вызванные в основном размывом незащищенной части откоса ниже крепления. В табл. 25 приведены основные данные по этим плотинам. Высота волны вблизи откоса была определена по формулам с учетом действительной скорости ветра во время шторма и разгона ветра на водохранилище. По справке ра-

ботников канала, эти высоты волн получались весьма близкими к действительным. Длину волны $2L$ принимали приблизительно равной 12 ($2h$), а высоту наката волны на откос $h_в$ определяли по формуле (45). Согласно имеющимся данным, верхняя часть земляного полотна (откоса) была выполнена из песков $d_{50} \approx 0{,}25$ *мм*.

Таблица 25

Данные о высоте крепления откоса земляных плотин

№ плотины	Отметка уровня воды	Отметка низа крепления	Отметка верха крепления	$h_н$, *м*	h_o, *м*	$2h$, *м*	$h_в$, *м*	$\frac{h_o}{h_в}$	$\frac{h_н}{h_в}$
80	141,68	140,0	145,0	1,68	3,32	2,5	3,00	1,10	0,56
79	162,98	161,0	166,0	1,98	3,02	1,8	3,16	1,40	0,94
78	173,91	171,5	176,0	2,41	2,09	1,6	1,93	1,10	1,24

Во время шторма на всех перечисленных плотинах не наблюдалось размыва откоса выше основного покрытия, хотя на плотинах № 80 и 78 отдельные всплески волны переходили отметку верха покрытия откоса. Это указывает на то, что при высоте верхней зоны крепления $h_O \geqslant 1{,}1 \div 1{,}2\ h_в$ безопасность незакрепленной части откоса может быть вполне обеспечена.

На плотинах № 80 и 79 разрушение крепления откоса в большей мере произошло вследствие размыва грунта откоса ниже основного крепления. Из этого можно сделать вывод о том, что при высоте нижней зоны основного крепления откоса в пределах $h_н \leqslant 0{,}94 \div 1{,}0\ h_в$, следует ожидать размыва грунта откоса при $d \approx 0{,}25$ *мм*. Интересно заметить, что на плотине № 80 после шторма был обнаружен размыв грунта откоса в пределах отметок $35 \div 36$ *м*, т. е. при $h_н \approx 5{,}7 \div 6{,}7$ *м*.

На канале имени Москвы верхняя граница крепления откоса по отношению к статическому уровню определяется величиной $h_O = 1{,}20$ *м*, максимальная высота волны в среднем составляет $2h = 1{,}2$ *м*, а высота наката волны на откос $h_в \approx 1{,}3$ *м*. При этих размерах $\frac{h_o}{h_в} \approx 0{,}92$. Из опыта эксплуатации данного канала известно, что принятый размер верхней зоны крепления откоса вполне обеспечивает устойчивость незакрепленной части откоса. Единичные случаи размыва верхней части откоса связаны со стоянием более высоких уровней воды, т. е. происходят при максимальных динамических уровнях.

Нижняя граница крепления откоса на данном канале $h_н = 1{,}1$ *м* на участках канала при упорной заборке и $h_н = 1{,}5$ *м* — при отсутствии такой заборки, т. е. $\frac{h_н}{h_в} \approx 0{,}8$ и $\frac{h_н}{h_в} \approx 1{,}1$. Как показали материалы наблюдений, в первом случае грунт откоса размывался перед

заборкой, что в отдельных случаях приводило к расстройству всей заборки и сползанию каменной облицовки. Во втором случае размыва связных грунтов, как правило, не наблюдалось, мелкозернистые же грунты размывались и делали откос более пологим.

Такая же примерно картина наблюдается и на канале имени В. И. Ленина, где $h_o = 1{,}20$ *м* и $h_н \approx 1{,}15$ *м*, при $\frac{h_н}{h_в} < 0{,}95$ *м* незащищенная часть откоса размывается и при $\frac{h_o}{h_в} \geqslant 1$ верховая часть откоса не размывается. Следует отметить, что границы крепления откоса на данном канале были определены для каждого бьефа в отдельности с учетом колебаний динамических уровней.

Приведенные данные опыта эксплуатации сооружений могут быть использованы при проектировании креплений откосов. Кроме того, эти материалы могут быть полезны при решении вопроса о скоростях движения судов в каналах.

§ 29. НАЗНАЧЕНИЕ ГРАНИЦ ОСНОВНОГО КРЕПЛЕНИЯ ОТКОСА

При назначении границ крепления откосов будем исходить из учета статических, расчетных, уровней воды в водохранилищах и в судоходных каналах, т. е. при назначении верхней границы учитывать наивысший статический уровень, при назначении нижней границы — наинизший статический уровень. Назначение расчетных уровней может быть выполнено по рекомендации Г. М. Матлина [40].

Динамические уровни в водохранилище в основном зависят от ветрового нагона и колебания уровня воды в связи с маневрированием затворами водопропускных отверстий в период сброса воды или быстрого прекращения этого сброса. Динамические уровни в судоходных каналах могут возникать при работе насосных станций, при наполнении и опорожнении шлюзовых камер, а на участках каналов, прилегающих к водохранилищам, — от ветрового нагона, при работе ГЭС и сбросах воды через плотины.

Определение динамических уровней может быть выполнено по существующим методам расчета неустановившегося движения (Христиановича, Бернадского, Архангельского, Чертоусова, Гильденблата, Браславского и др.).

В общем случае при назначении *верхней границы* крепления откоса можно руководствоваться следующей зависимостью (рис. 129):

а) для земляных водохранилищных плотин

$$h_o = 1{,}1\, h_в + \Delta h_д, \qquad (111)$$

где $h_в$ — высота вскатывания волны на откос, определяемая по формуле (45);

$\Delta h_д$ — высота, учитывающая динамические уровни в водохранилище.

Величина $\Delta h_д$ складывается из ветрового нагона, подъема воды от попусков паводков и быстрого прекращения сброса воды через плотины. Эта величина определяется специальным расчетом по

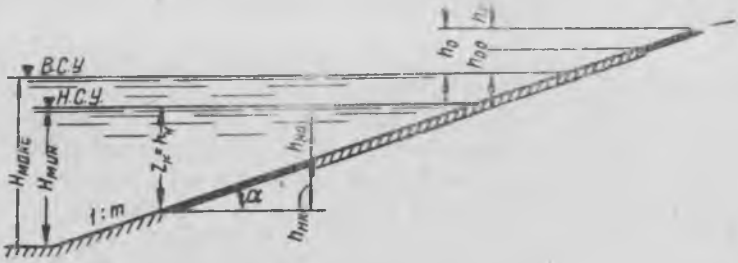


Рис. 129. Схема определения границ крепления откоса

методам неустановившегося движения. Заметим, что h_o, получаемое из формулы (111), по отношению к действительной высоте вскатывания волны на откос имеет запас, равный 0,1 $h_в$;

б) для судоходных каналов

$$h_o = h_в + \Delta h_д, \tag{112}$$

где $h_в$ — высота вскатывания волны на откос канала, определяемая по формуле (94);

$\Delta h_д$ — величина, учитывающая колебания динамического уровня в канале.

Динамический уровень воды в канале, определяется как и в предыдущем случае, по методам неустановившегося движения при работе шлюзов, насосных станций, ГЭС и других водопропускных сооружений.

Мы считаем, что при определении верхней границы крепления откоса судоходного канала нет необходимости принимать запас, так как высота вскатывания волны на откосе определяется с учетом интерференции судовых волн. С другой стороны, как показал опыт эксплуатации каналов, при защите верхней части откоса (выше основного покрытия) дерном не было зафиксировано размыва откоса даже в случае перелива накатывающейся массы воды через верхнюю границу крепления.

Величина h_o во всех случаях откладывается вверх от высшего статического расчетного уровня (ВСУ).

Учитывая, что величина скоростей накатывающего потока по откосу быстро затухает по мере удаления вверх от расчетного уровня, в отдельных случаях может оказаться целесообразным верхнюю зону покрытия разделить на два участка (см. рис. 129): $h_o = h_{o.o} + h_{o.к}$, принимая при этом высоту облегченного покрытия $h_{o.к} \approx \Delta h_д$.

При назначении *нижних границ* крепления откоса всю зону покрытия разбивают на два участка: участок с основным покрытием откоса на высоте $h_{н.о}$ и участок с облегченным покрытием на высоте $h_{н.к}$ (см. рис. 129). В данном случае под основным покрытием подразумеваются крепление и его основные параметры, определенные по условию устойчивости на откосе, в соответствии с изложенными выше методами расчета.

Основные покрытия рекомендуется назначать исходя из условия

$$h_{н.о} = \varepsilon h_в \approx 1{,}3\, h_c, \qquad (113)$$

где $h_в$ — высота вскатывания волны на откос по соответствующим формулам (45) и (94). Значение коэффициента ε может быть принято равным $\sim$1,1. В тех случаях, когда критическая глубина $z_{кр}$ (глубина, на которой прекращается перемещение частиц грунта откоса) будет близка к высоте основного покрытия, т. е. $z_{кр} \approx 1{,}5 \div 2{,}0\ h_в$, можно принять $\varepsilon = 1$. Определение критической глубины излагается ниже.

При проектировании бетонного покрытия судоходного канала в ряде случаев может оказаться целесообразным нижний участок основного покрытия разбить на две зоны:

$$h_{н.о} = h_c + 0{,}3\, h_c,$$

где h_c — высота бетонного покрытия;

$0{,}3\ h_c$ — высота каменного покрытия.

При такой конструкции покрытия в нижней части откоса, как показали сравнительные расчеты, заметно уменьшается толщина бетонного покрытия (необходимая по условию устойчивости).

Во всех случаях в основании основного покрытия должно быть предусмотрено устройство надежного упора в виде небольшой горизонтальной бермы, упорной заборки и т. п.

Необходимо заметить, что при определении границ основного покрытия откоса мы исходили из учета высоты вскатывания волны на откос, считая, что величина отката волны с откоса h_c находится в прямой зависимости от $h_в$. Такой подход при назначении нижней границы покрытия откоса более логичен и правилен, так как величины $h_в$ и h_c уменьшаются по мере уполаживания откоса. Если назначать границу крепления откоса в зависимости только от высоты исходной волны, как это рекомендуют некоторые авторы, можно прийти к нерациональному завышению объема подводного покрытия относительно пологих откосов.

Наконец, следует отметить, что, как показали проведенные нами опыты с размываемыми откосами, после наступления полной стабилизации профиля откоса на глубине, равной примерно высоте наката волны на откос, всегда образовывалась горизонтальная площадка с последующим уполаживанием откоса ниже этой площадки и

образованием на поверхности откоса правильных рифелей (песчаных волн). Это положение свидетельствует о необходимости предусматривать основную зону крепления откоса на указанных глубинах, а также о целесообразности создания горизонтальной бермы.

§ 30. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО НАЗНАЧЕНИЮ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛЕГЧЕННОГО ПОКРЫТИЯ ОТКОСА

Решение вопроса о назначении нижней границы облегченного покрытия откоса, т. е. определение критической глубины $z_{кр}$, при которой не будет размываться грунт откоса, связано с установлением волновой скорости на откосе и с размывающей скоростью для данного грунта.

Выше (см. § 6, п. 4) приведены данные экспериментальных исследований для определения максимальной волновой скорости на поверхности откоса. В результате этих исследований было установлено, что в данном случае можно использовать формулы Буссинеска, введя в них поправочный коэффициент n, зависящий от соотношения $\frac{z}{L}$. Эта зависимость, приведенная выше [формула (35)], имеет следующий вид:

$$v = 1{,}3\, e^{-\frac{z}{L}} \frac{\pi h}{\sqrt{\frac{\pi L}{2g} \operatorname{sh} 2\pi \frac{z}{L}}}.$$

Заменяя здесь $z - z_{кр}$ и вводя обозначения

$$u = \pi \frac{z_{кр}}{L}, \tag{114}$$

для упрощения последующих расчетов представляем формулу (35) в безразмерном виде

$$\bar{v} = v \frac{1}{h} \sqrt{\frac{L}{g}} = \frac{3{,}27}{\sqrt{\operatorname{sh} 2u}}\, e^{-\frac{u}{\pi}}.$$

Задаваясь различными значениями относительной глубины на откосе u и определяя соответствующие значения приведенной волновой скорости $\bar{v}$, все результаты расчетов представим в виде графика $u = f(\bar{v})$ (рис. 130).

Напомним, что формула (35) действительна при соблюдении критерия

$$\frac{z_{кр}}{L} \geqslant \frac{H_{кр}}{L} \geqslant 2\frac{h}{L}.$$

Неясным остается вопрос о допустимых неразмывающих скоростях для различных грунтов откоса. К настоящему времени проведено весьма ограниченное количество опытов по определению неразмывающих скоростей в условиях волнового потока (Пенк, Божич, Ларра).

Рассматривая результаты этих опытов, полученные применительно к несвязным грунтам, можно установить, что все они за-

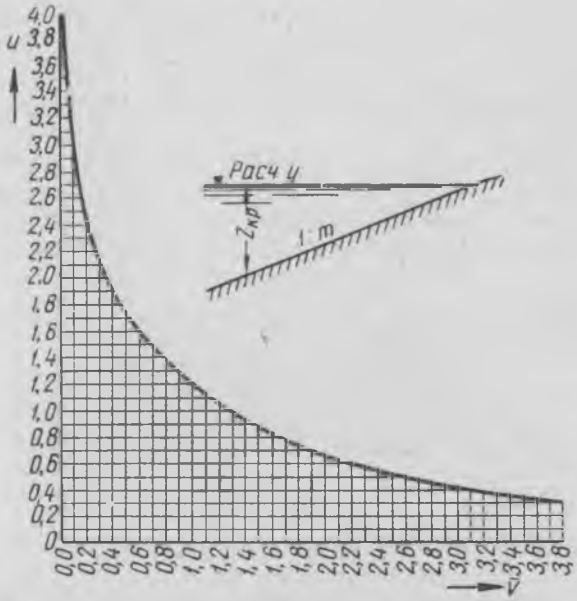


Рис. 130. График зависимости $u = f(\bar{v})$ для расчета облегченной границы покрытия откоса

нижают допустимую скорость. Этого и следовало ожидать, так как все перечисленные авторы получили начальную скорость образования так называемых песчаных рифелей (местных размывов), тогда как местный перенос отдельных частиц происходит в виде коротких импульсов, совпадающих по времени с прохождением гребня волны.

Если нижнюю границу облегченного покрытия рассчитать с учетом рекомендаций, предлагаемых перечисленными авторами и относящихся к неразмывающим скоростям, то можно получить непомерное занижение отметки низа покрытия, т. е. завышение величин $z_{кр}$, причем характерно, что почти во всех практических случаях потребовалось бы крепить не только откос, но и дно водоема перед сооружением.

В то же время из опыта эксплуатации ряда земляных гидротехнических сооружений, работающих в условиях волновых воздей-

ствий, следует, что даже в том случае, если крепления не доведены до дна канала, поверхность откоса не подвергалась размыву.

Приведенные соображения показывают, что при решении вопроса о назначении нижней границы покрытия откоса следует исходить не из начальной скорости образования рифелей, а из скоростей, которые способны переносить частицы грунта на значительное расстояние. Поэтому рекомендации перечисленных авторов следует учитывать не при назначении нижней границы крепления, а в большей мере при расчете устойчивости грунта откоса под обратным фильтром.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют вообще какие-либо рекомендации по определению неразмывающих скоростей волнового потока. Такое положение до некоторой степени не позволяет дать достаточно обоснованные предложения по назначению нижней границы крепления.

Для предварительных рекомендаций мы считаем возможным исходить из данных по неразмывающим скоростям, полученным применительно к условиям руслового потока.

Нижние границы облегченного покрытия откоса могут быть рассчитаны из условия предельного равновесия частиц на откосе, т. е. путем приравнивания действительной волновой (орбитальной) скорости $v_в$ к допустимой неразмывающей скорости для данного грунта откоса $v_д$, т. е. $v_д \leqslant v_в$.

В этом случае расчет можно выполнить с помощью предложенного графика в следующей последовательности. Зная допустимую скорость $v_д$, а также расчетные элементы волн — высоту $2h$ и длину $2L$, прежде всего из выражения

$$\bar{v} = v_д \frac{1}{h} \sqrt{\frac{L}{g}} \tag{115}$$

вычисляем безразмерный параметр, затем по графику (см. рис. 130) при данном значении $\bar{v}$ находим величину u, после чего по формуле

$$z_{кр} \geqslant \frac{L}{\pi} u \tag{116}$$

вычисляем необходимую (критическую) глубину, определяющую нижнюю границу облегченного покрытия.

В тех случаях, когда $z_{кр} \leqslant h_{н.о}$, крепление подводной части откоса следует ограничить величиной $h_{н.о}$, в соответствии с условием (113) при $\varepsilon \approx 1$. В случае $z_{кр} \geqslant H$, где H — глубина воды перед сооружением, в проекте следует предусмотреть крепление дна перед сооружением.

Для примера рассмотрим случай применительно к условиям Карповской плотины, принимая $2h = 2{,}5$ *м*; $2L \approx 25$ *м* и $d_{50} \approx 0{,}25$ *мм* и допустимую неразмывающую скорость согласно ОСТ 24—4396, $v_{доп} \approx 0{,}25$ *м/сек*. При этих данных получаем: по формуле (115) $\bar{v} = 0\ 32$; приведенная критическая глубина (по графику, см. рис. 130) $u = 1{,}98$; необходимая глубина заложения низа крепления по

формуле (116) $z \approx 8$ *м*. Как отмечалось выше, при этих условиях размыв незащищенного грунта откоса наблюдался на глубине до 6÷7 *м*.

При решении задачи, связанной с определением размера каменной облицовки откосов гидротехнических сооружений, на основе лабораторных и натурных исследований, для определения критической глубины на откосе (нижней границы облегченного покрытия) ранее нами была предложена следующая зависимость:

$$z_{кр} = e_o + 0{,}244\,(h_в + e_o)\ln\frac{D}{d}, \qquad (117)$$

где d — размер частиц грунта откоса.

Вывод данной формулы приводится в опубликованной работе автора [69].

Как показали сравнительные расчеты, максимальный размер каменной облицовки D в основном зависит от высоты волны и в среднем может быть принят $D \approx 0{,}25\ (2h)$. С другой стороны, если принять максимальное значение для ординаты $e_o \approx 0{,}45\ h_в$ [см. зависимость (87)], то вместо формулы (117) можно получить

$$z_{кр} \approx 0{,}35\,h_в\left(1{,}3 + \ln\frac{h}{2d}\right), \qquad (118)$$

где $h_в$ — высота наката волны на откос;

ln — натуральный логарифм;

d — расчетный размер частиц несвязного грунта.

При окончательном решении вопроса о нижней границе облегченного покрытия мы рекомендуем пользоваться обеими формулами (116), (118) и принимать максимальные значения $z_{кр}$.

ГЛАВА VIII

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОБРАТНОГО ФИЛЬТРА ПОД ПОКРЫТИЕМ ОТКОСА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВОГО ПОТОКА

§ 31. ОБЗОР ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО РАСЧЕТУ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ

До настоящего времени вопрос о подборе состава и размера обратного фильтра для подстилающего слоя покрытия откоса, работающего в условиях волнового потока, разработан недостаточно. Большинство рекомендаций по расчету обратных фильтров относится к условиям установившейся фильтрации в земляных плотинах и к фильтрам, располагающимся под водобойными плитами водосливных плотин.

При проектировании подстилающего слоя под каменные покрытия откосов канала имени Москвы пользовались коэффициентом неоднородности частиц грунта рассматриваемого слоя

$$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}} \leqslant 5,$$

где d_{60} и d_{10} — диаметры частиц зерен, составляющих по весу по отношению к зернам меньшего диаметра соответственно 60 и 10%.

На канале имени В. И. Ленина для каменных покрытий это соотношение было увеличено до 8. Согласно последней инструкции Гидропроекта этот коэффициент можно принимать $\eta \leqslant 10$.

Помимо коэффициента неоднородности, Гидропроект предлагает учитывать и другой критерий для расчета обратного фильтра, так называемый коэффициент междуслойности α, т. е. соотношение расчетных диаметров частиц соседних слоев фильтра. Учет этого второго критерия значительно улучшил конструкцию обратного фильтра.

Количество слоев принимается в зависимости от состава грунта основания. Так, для оснований из супесей с числом пластичности в пределах $1 \div 20$ рекомендуется устраивать четыре слоя; для песчаных оснований, а также для оснований из суглинков с числом пластичности в пределах $7 \div 20$ — три; для грунтов с числом пластич-

ности более 20 —два. Толщину отдельных слоев следует принимать не менее 20 *см*.

Коэффициенты междуслойности определяют исходя из условия, чтобы отношение расчетных размеров частиц вышележащего слоя фильтра к частицам нижележащего слоя было не более 10, т. е.

$$\alpha_n = \frac{d_n}{d_{n+1}} \leqslant 10,$$

где d_{n+1} — размеры частиц нижнего слоя;
d_n — то же, верхнего слоя.

Причем во всех случаях за расчетный размер частиц принимается $d_p = d_{50}$.

При проектировании креплений откосов сооружений на канале имени В. И. Ленина коэффициент междуслойности принимали для откосов канала $\alpha < 10$; для откосов земляных плотин $\alpha < 15$, причем в этих случаях $\alpha = \frac{d_{60}}{d_{40}}$.

М. И. Лупинский [35] на основании лабораторных экспериментов обратных фильтров под каменным покрытием откоса в условиях волнового воздействия пришел к выводу, что частицы наибольшей крупности подстилающего слоя $d_{н \cdot к}$ не будут проходить через пустоты верхнего покрытия при

$$d_{н.к} \geqslant 0{,}20 \div 0{,}25\, t,$$

где t — толщина слоя. Предлагаемая им формула для определения толщины обратного (однослойного) фильтра может иметь такой вид

$$t \approx 1{,}67\, d_{н.к}.$$

В свое время нами было подробно проанализировано данное предложение и отмечены его недостатки [68]. Следует признать, что строгое соблюдение геометрической непроходимости (что можно было сказать и без проведения экспериментов) требует последовательного идеального расположения частиц по их возрастающей крупности. В действительности в рекомендуемом им составе предусматривается применение разнозернистой смеси, без ограничения частиц с наименьшей крупностью $d_{нм}$.

Кроме того, предложение Лупинского сильно занижает толщину обратного фильтра. Так, например, для $2h = 2$ *м*, $D_к = 0{,}38$ *м* (размер каменной облицовки) и $d_{гр} = 0{,}35$ *мм* следует принять однослойный разнозернистый фильтр толщиной всего лишь 0,2 *м*, что неправдоподобно.

В предложении этого автора заслуживает внимания рекомендация по подбору фракционного состава отдельных слоев обратного фильтра, которая взята им аналогично подбору гранулометрического состава щебня в бетоне (ГОСТ 2719—50); зона рекомендуемого состава подбирается по графику.

Экспериментальные исследования по обратным фильтрам в условиях волнового потока были выполнены П. К. Божичем в 1950 г.

Лабораторные исследования он проводил в условиях воздействия поперечной судовой волны для выяснения качественного характера работы обратного фильтра, установления характера и величин волновых градиентов в толще подстилающего слоя и определения критических скоростей волнового потока.

При опытах принимали заложение откоса 1 : 3, высоту моделируемой волны $2h = 1{,}9 \div 4{,}2$ *см* и длину $2L = 146 \div 104$ *см*, т. е. при значительных соотношениях $\frac{2L}{2h} \approx 50$ и при масштабах применительно к судоходным каналам $\lambda \approx \frac{1}{30} \div \frac{1}{50}$. Во всех случаях исследовали однослойный фильтр из щебенки, ниже которого располагался крупнозернистый песок, укладываемый на жесткое (неразмываемое) основание откоса. Волновые давления определялись с помощью пьезоэлектрических датчиков. Величины волновых градиентов определяли по условной формуле

$$J = \frac{\Delta p}{c \Delta t},$$

где Δp — максимальное давление в рассматриваемой точке;

c — скорость распространения моделируемой волны;

Δt — промежуток времени, в течение которого происходит нарастание давления в данной точке от нуля до максимума, т. е. до Δp.

Датчики давлений располагали на контакте между каменной облицовкой и щебенкой и между щебенкой и слоем песка (мембраной вверх).

Результаты первой серии опытов показали, что интенсивность выноса песчаных частиц через поры однородной щебенки снижается по мере уменьшения коэффициента междуслойности, т. е.

$$\alpha = \frac{d_щ}{d_п},$$

(где $d_щ$ — размер частиц щебенки, $d_п$ — размер частиц песка) и увеличения толщины слоя щебенки $t_щ$.

Основываясь на полученных графиках, связывающих объем выносимого песка с размерами $d_щ$ и $t_щ$, Божич приходит к выводу, что при $t_щ = 5d_щ$ может быть принято $\alpha \leqslant 15 \div 20$.

Несомненно, заслугой Божича является то, что он обратил внимание на учет толщины обратного фильтра, чего не было отмечено в исследованиях других авторов. Однако из-за ограниченности опытов им не была дана количественная оценка влияния этой толщины.

Вторая серия опытов была поставлена с целью выяснения характера распределения волновых давлений по откосу и затухания этих давлений в толще фильтра. Эти опыты показали, что величина волнового давления в толще обратного фильтра зависит от состава фильтра; с увеличением коэффициента α величина волнового давления на контакте с песчаным грунтом возрастает. Пра-

вильнее было бы сказать, что это давление возрастает по мере увеличения размера частиц обратного фильтра.

Отмеченный вывод относится к случаю фиксации разницы максимальных давлений $p_1 - p_2$ в момент удара волн, где p_1—давление на поверхности, направленное в толщу фильтра, p_2 — то же, на контакте фильтра с песчаным основанием (при расположении мембраны датчиков давлений вверх). При определении разницы в момент отката (при расположении мембраны датчиков вниз) также было обнаружено соответствующее затухание, хотя степень этого затухания, по сравнению с первым случаем, несколько уменьшается.

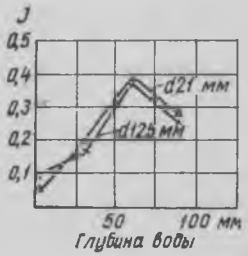


Рис. 131. Кривые затухания волновых градиентов по откосу (по опытным данным П. Божича)

В проведенных опытах не была также установлена количественная связь между давлением на поверхности и давлением в отдельных точках фильтра. В силу этого во всех последующих рассуждениях Божич исходил из того, что волновое давление в контакте фильтра с основанием всегда будет равно поверхностному давлению, т. е. пренебрегал действительным затуханием волновых давлений в толще проницаемого слоя.

Характер распределения градиентов волновых давлений по откосу, на основании опытных данных и условий формулы $J = \frac{\Delta p}{c \Delta t}$, полученной Божичем, представлен на рис. 131. Из рассмотрения этого графика можно установить полную аналогию кривой J распределению волнового давления по откосу.

Теоретическое решение задачи определения волновых градиентов было выполнено Ю. М. Крыловым, который распространил теорию волн малой амплитуды и одиночных на случай переменных глубин и получил зависимости, позволяющие определить волновые градиенты в плоскости откоса.

На основании этих решений Божич счел возможным применить к расчету обратных фильтров теорию одиночных волн. Причем для определения максимального значения градиента на поверхности откоса при глубинах $z \geqslant 2h$ он рекомендует такую формулу:

$$J = \frac{2h}{z} \sqrt{0{,}445 \frac{2h}{z} + \left(0{,}255 \frac{z}{z + 2h} - 0{,}761 \sin \alpha\right)^2} \approx$$

$$\approx 0{,}69 \left(\frac{2h}{z}\right)^{\frac{3}{2}}, \qquad (119)$$

где $2h$ — высота волны;

z — глубина на откосе для рассматриваемой точки (считая от покоя);

α — угол наклона откоса к горизонту.

Для глубин при $0<z<2h$ эпюра градиентов представляет собой прямую линию, параллельную оси глубин; выше этой точки эпюра J ограничивается прямой до границы наката волны на откос.

В качестве примера на рис. 132 представлена эпюра градиентов для случая $2h=1{,}5$ *м* и $2h=3$ *м*. Из рассмотрения приведенных данных устанавливаем, что максимальное значение волнового градиента при $z=2h$ не зависит от силы волнового воздействия и всегда равно $J_{макс}\approx 0{,}69$. Данный вывод, по нашему мнению, является спорным и не всегда соответствует действительности.

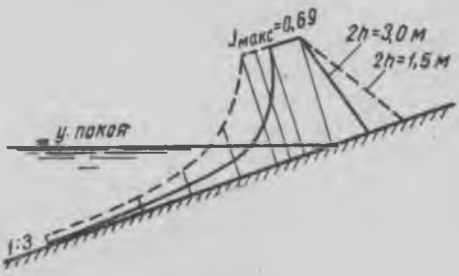


Рис. 132. Эпюры волновых градиентов на откосе (по расчетным данным П. Божича)

Лабораторные исследования третьей серии опытов были посвящены вопросу определения начальной размывающей скорости грунтовых частиц откоса (1 : 3) и горизонтального дна. В этих опытах дно бассейна покрывали слоем грунта толщиной 1 *см* с $d=0{,}2\div 3$ *мм*, а откос — частицами крупностью от 0,2 до 12,5 *мм*. Во время опытов определяли начало подвижки грунта (что фиксировалось визуально) и образования волновых рифелей на откосе и на дне бассейна при заданном волновом режиме и крупности материала. В конце каждого опыта на откосе образовывался законченный профиль, не подвергавшийся в дальнейшем сколько-нибудь существенным изменениям.

Из-за отсутствия специальной аппаратуры, позволяющей фиксировать волновые донные скорости, эти скорости условно определяли по формуле теории волн малой амплитуды при заданной высоте волны, периоде и замеренной глубине размыва $z_{кр}$.

$$v=\frac{\pi h}{T\,\mathrm{sh}\,\pi\frac{z_{кр}}{L}}.$$

В конечном итоге был получен график, связывающий начальную неразмывающую скорость с размером частиц грунта. Аналитически кривая Божича может быть представлена в таком виде:

$$v_p\approx 38\sqrt{d}, \qquad (120)$$

где v_p — допустимая скорость в *см/сек*;
d — размер частиц грунта в *см*.

Интересно заметить, что сопоставляя формулу (120) для волнового потока с имеющимися аналогичными зависимостями для условий руслового потока, можно установить, что в условиях волнового

воздействия допустимые неразмывающие скорости имеют несколько меньшее значение; характерно, что формулы Багнольда и Пенка дают результаты, близкие к формуле (120).

Так как расчет обратного фильтра сопряжен с рядом других допущений и предпосылок, мы считаем, что в данном случае из-за предосторожности следует принять рекомендацию Божича. В действительности, если при назначении нижней границы облегченного крепления откоса в подводной части можно идти на некоторый риск, т. е. на допущение уполаживания откоса, при хорошем упоре основного покрытия, то частичное расстройство обратного фильтра может привести к весьма нежелательным последствиям.

На основании лабораторных исследований работы обратного фильтра в условиях волнового воздействия Божич пришел к выводу, что при определении скоростей фильтрации в порах подстилающего слоя можно использовать известные формулы С. В. Избаша [19] для фильтрации в крупнозернистом материале $v_{ф}$. Максимальное значение градиента на контакте подстилающего слоя с основанием откоса Божич принимает постоянным, равным $J = 0{,}69$, вне зависимости от α и толщины фильтра.

Таким образом, расчет обратного фильтра по данному предложению сводится к соблюдению условия

$$v_{ф} < v_p,$$

где $v_{ф}$ — действительная скорость фильтрации в порах вышележащего слоя фильтра (по Избашу);

v_p — допустимая неразмывающая скорость дна частиц грунта нижележащего слоя.

Предложение Божича по расчету обратных фильтров представляет несомненную ценность. Вместе с тем, как отмечалось выше, принятые им при решении поставленной задачи недостаточно обоснованные положения (рассмотрение теории одиночных волн применительно к расчету откосов при экспериментальных соотношениях для поперечных волн $\frac{2L}{2h} = 25 \div 30$, которое не является расчетным; недостаточный учет влияния затухания волновых давлений и градиентов в порах подстилающего слоя; применение несовершенной измерительной аппаратуры при измерении волновых давлений и т. п.) в значительной мере ограничивают область использования предложенного метода.

Как показали сравнительные расчеты, предложение Божича может привести в одних случаях к необоснованному завышению размера обратного фильтра, в других — к занижению.

§ 32. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАТНОГО ФИЛЬТРА В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВОГО ПОТОКА

Для установления особенности работы обратного фильтра в условиях воздействия волнового потока и для определения степени затухания волнового давления в толще подстилающего слоя были

проведены сравнительно большие лабораторные и натурные исследования под руководством автора данной работы. Лабораторные исследования проводились в условиях воздействия ветровых волн при верхней облицовке откоса в виде камня и бетонного покрытия и в условиях отката судовой волны при бетонном покрытии. Натурные исследования проводили на опытных участках канала имени Москвы, в основном при каменной облицовке откоса. Во время проведения этих опытов были испытаны различные конструкции подстилающего слоя с разными составами грунтов и толщинами отдельных слоев фильтра.

Первая серия лабораторных опытов была проведена в условиях воздействия на откос моделируемой ветровой волны, при различных соотношениях $\frac{t}{d}$ для фильтрующего слоя (где t — толщина слоя; d — средний размер частиц этого слоя). В основании этого слоя были уложены малозернистые пески; сверху подстилающий слой прикрывался каменной облицовкой или металлической сеткой.

При опытах постепенно увеличивали размер волнового режима (высоты и длины моделируемых волн) до момента начала разрушения, т. е. выноса частиц грунта откоса или частиц обратного фильтра, при этом почти во всех опытах определяли величины волновых давлений на контактах отдельных слоев крепления: начало перемещения частиц устанавливали визуально и с помощью киносъемки.

В результате этих опытов было выяснено, что после обрушения волны на откосе в порах подстилающего слоя происходит непрерывная пульсация скоростей и давлений в различных направлениях.

В момент удара волны на откосе, т. е. в точках, расположенных несколько ниже уровня покоя, наблюдается перемещение не только частиц самого фильтра, но и частиц грунта (основания) откоса; в этот момент частицы перемещаются как вверх, так и вниз по откосу.

В последующий момент наката волны по откосу происходит непрерывное уменьшение массы воды; при этом поток вначале двигается с большими скоростями, которые постепенно уменьшаются до нуля в точке максимального наката. В этот момент наблюдается перемещение массы воды как на поверхности, так и в толще проницаемого покрытия с изменением самой массы воды (движение с переменным расходом). При скатывании воды с откоса, к поверхностному потоку, стекающему по откосу, присоединяется фильтрационный поток: при этом скорость поверхностного потока всегда оказывается в несколько раз больше скорости фильтрационного потока. Масса воды перемещается вследствие разности напоров в соседних точках крепления.

Проведенные опыты показали, что в процессе обрушения волны наибольший процент гашения кинетической энергии волны падает на верхний слой покрытия. В этом отношении каменная об-

лицовка откоса находится в наихудших условиях. Назначение подстилающего слоя в основном сводится к уменьшению скоростей на контакте с грунтом основания, в то же время частицы этого фильтра должны быть и сами устойчивы.

Результаты исследований в качественном отношении подтвердили ранее полученный вывод Божича о роли толщины обратного фильтра в обеспечении устойчивости части грунта на контакте фильтра с основанием откоса. В действительности, при всех прочих равных условиях, было установлено, что вынос частиц грунта откоса (песка) через поры фильтровой подготовки (щебня) уменьшается не только по мере уменьшения коэффициента междуслойности $\frac{d_щ}{d_п}$, но и по мере увеличения толщины слоя щебня $t_щ$.

Однако, в отличие от всех предшествующих исследований по обратным фильтрам, в наших опытах было установлено, что рекомендуемые пределы коэффициента междуслойности $\alpha < 10 \div 20$ должны соответствовать определенным толщинам фильтров и не всегда быть равными 5 d, как это рекомендует Божич. Можно получить достаточно устойчивый контакт фильтровой подготовки с основанием и при больших значениях коэффициента α, подбирая при этом необходимую эффективную толщину фильтра.

Сопоставляя результаты исследований по устойчивости частиц грунта на контакте в зависимости от размера и типа фильтровой подготовки, можно заметить, что общая эффективная толщина для многослойного фильтра, по сравнению с однослойным фильтром, во всех случаях будет меньше.

Вторая серия опытов, проведенная в лабораторных и натурных условиях, была поставлена для выяснения затухания волнового давления в толще фильтровой подготовки. Лабораторные исследования проводили с соотношениями между толщиной t и средним размером частиц фильтра d в пределах от 1 до 10 для откоса с заложением 1 : 3. Натурные исследования были проведены при 10 различных типах каменных покрытий, отличающихся количеством слоев крепления и составом каждого слоя[1]. Состав каждого слоя фильтра был принят сравнительно однородным, с соотношением $\frac{d_{макс}}{d_{мин}} = 1{,}5 \div 2$ для лабораторных исследований и $\frac{d_{макс}}{d_{мин}} = 2{,}7 \div 8$ — для натуры.

Для определения величины волновых давлений на поверхности, в основании, а также на контактах между отдельными слоями фильтра устанавливали тензометрические датчики, которые показывали величину давления как снизу вверх, так и сверху вниз. Наличие осциллографической записи давлений одновременно в трех-пяти точках позволяло определить необходимую разницу в показаниях для любого момента периода волны.

---

[1] Подобная характеристика этих типов дана в работе автора [69] на стр. 158 в виде таблицы, и в работе [67] — на стр. 136.

В результате анализа материалов опытных исследований было установлено, что коэффициенты затухания ($\psi = \frac{p_н}{p_в}$) волнового давления существенным образом зависят от толщины и размера частиц фильтровой подготовки; причем было установлено, что давление в любой точке фильтровой подготовки может быть выражено через соответствующие давления на поверхности в зависимости от величины соотношения $\frac{t}{d}$. На основании полученных материалов (рис. 133) представляется возможным принять такую зависимость:

$$p_н \approx p_в e^{-n\frac{t}{d}}. \qquad (121)$$

Значение коэффициента n зависит от состава фильтрующего слоя, вернее, от пористости материала: при относительно однородном ма-

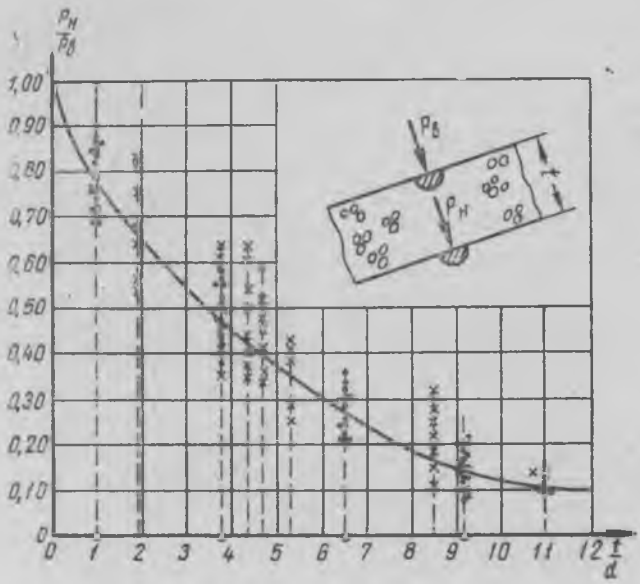


Рис. 133. Данные по затуханию волновых давлений в толще каменного крепления (натурные измерения)

териале $n=0{,}15 \div 0{,}27$, при относительно неоднородном материале значение $n \leqslant 0{,}35$. В тех случаях, когда откос подвергался частично интерферированной волне, что часто имело место в натурных условиях на канале имени Москвы, разница в давлениях ($p_в - p_н = \Delta p$) по существу характеризовала толщину слоя фильтра, т. е. фиксировала гидростатическую нагрузку.

Для последующих расчетов рекомендуется принимать среднее

значение n применительно к относительно однородному составу фильтровой подготовки $n_{ср}=0{,}21$.

Третья серия лабораторных опытов по обратным фильтрам была проведена для установления характера и величины волнового взвешивающего давления под бетонным покрытием откоса. Результаты этих исследований, в части влияния типа самого фильтра на величину взвешивающего давления, описаны в § 13.

Представляют практический интерес опыты с бетонными плитками, уложенными непосредственно на слой песка. Несмотря на то, что плитки укладывали с максимально возможной плотностью друг к другу, под воздействием волн песок высасывался сквозь щели между плитками, что в конечном итоге приводило к полному разрушению всего покрытия откоса. В тех опытах, когда бетонные плитки укладывали на промежуточный слой, состоящий из смеси щебенки и крупнозернистого песка, деформации покрытия, как правило, не наблюдалось.

Такая же в качественном отношении картина работы основания под бетонным покрытием была установлена и в натурных условиях на откосе судоходного канала. Характерно, что в момент ската волны с откоса в швах между плитками образуются сосредоточенные выходы воды, действующие в виде небольших фонтанчиков (см. рис. 112).

Для определения необходимого размера частиц подстилающего слоя d_0 под швами бетонного покрытия в зависимости от размера этого шва $t_ш$ были проведены опыты с различными соотношениями $\frac{d_0}{t_ш}$. На основании полученных данных можно установить, что фильтровая подготовка под швами покрытия будет устойчива в случае, если $d_0 > 1{,}50\ t_ш$, где d_0 — средний размер частиц относительно однородного состава (d_{50}).

Наконец, четвертая серия лабораторных опытов была проведена с целью сопоставления работы обратного фильтра, расположенного под бетонным покрытием откоса, и фильтра, расположенного под каменной облицовкой.

Как показал опыт эксплуатации креплений бетонных покрытий откосов судоходных каналов, наиболее опасным и слабым местом конструкции является сопряжение низа бетонного покрытия с основанием откоса; в этих местах при неудачном подборе состава и размера фильтровой подготовки зафиксированы как вынос частиц грунта на контакте с фильтром, так и вынос частиц самого фильтра.

Сопоставляя полученные данные опытных исследований, можно прийти к выводу, что в наихудших условиях работы находится фильтр под каменным покрытием. Обратные фильтры под бетонным покрытием находятся в более благоприятных условиях, а потому при распространении на них рекомендаций, полученных применительно к каменной облицовке, может получиться некоторый запас прочности.

§ 33. ПРИБЛИЖЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОБРАТНОГО ФИЛЬТРА

Фильтрационные токи, возникающие в порах подстилающего слоя при воздействии на откос волнового потока, находятся в прямой зависимости от наличия волновых градиентов. Волновые градиенты обладают той особенностью, что они в каждой точке откоса являются периодическими функциями времени с периодом, равным периоду волн.

Кроме того, как отмечалось выше, особенность воздействия волнового потока на откосы состоит в том, что в плоскости откоса и в подстилающем слое создается переменное в пространстве и времени поле давлений. Градиенты этого поля в некоторой точке откоса характеризуются вектором, величина которого равна максимальной величине изменения давления в данной точке, а направление совпадает с направлением наиболее интенсивного изменения давления. Наибольшей разрушающей способностью будут обладать максимальные за период волны градиенты давлений.

Общий характер распределения волновых давлений в отдельных точках проницаемого покрытия определяет и характер затухания волновых градиентов.

Ввиду сложности теоретического решения вопроса о распределении волновых градиентов в толще фильтровой подготовки, а также из-за отсутствия в настоящее время достаточно полных опытных исследований работы обратного фильтра в условиях воздействия волнового потока, в свое время нами было предложено приближенное решение данной задачи [67]. Как показала последующая практика проектирования, предложенное решение дает вполне приемлемые результаты и по этой причине получило сравнительно широкое распространение в проектных организациях.

Из материалов опытных исследований по установлению характера распределения волновых давлений в плоскости откоса (рис. 134) видно, что в период разрушения волны на откосе величина волнового давления на контакте двух грунтов, с учетом уравнения (121), может быть выражена следующей зависимостью:

$$p_{zн} \approx p_{zв} e^{-n\frac{t}{d}}, \tag{122}$$

где t и d — толщина и средний размер частиц фильтрующего слоя.

Согласно прежним нашим исследованиям [69] величина волнового давления в любой точке на поверхности откоса может быть определена как

$$p_{zв} = p_{макс} e^{-\varepsilon\frac{z}{z_в}}, \tag{123}$$

где $p_{макс}$—максимальное местное давление на откосе в точке, на-

ходящейся ниже расчетного уровня на величину e_0 (см. рис. 134);

z — ордината, определяющая точку на откосе;

$z_в$ — постоянный параметр;

ε — опытный коэффициент, приблизительно равный 4,1.

С учетом последних двух выражений для определения величины волнового давления на контакте двух слоев можно написать

$$p_{zн} \approx p_{макс} e^{-\varepsilon \frac{z}{z_в}} e^{-n \frac{t}{d}}. \qquad (124)$$

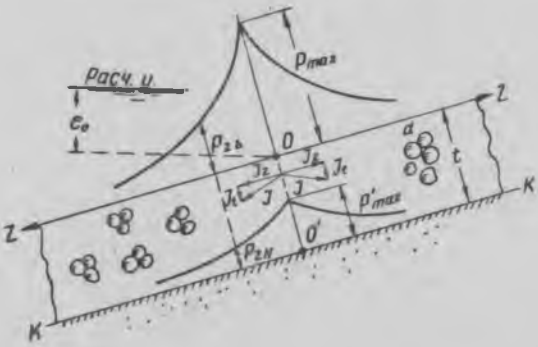


Рис. 134. Схема затухания волнового давления и направление градиентов давлений в толще проницаемого слоя

Как известно, в общем случае градиент волнового давления может быть представлен в следующем безразмерном виде:

$$\overline{J} = \overline{i}_z \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial z}[p] + \overline{i}_t \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial t}[p], \qquad (125)$$

где $\overline{i}_z$ и $\overline{i}_t$ — единичные векторы по осям oz и ot.

На контакте фильтра с грунтом основания (плоскость KK на рис. 134) при t=const значение продольного градиента может быть определено по выражению

$$\overline{J} = \overline{i}_z \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial z}[p]. \qquad (125')$$

Данное выражение позволяет определить величину волнового градиента в плоскости контакта, если известна зависимость для определения давлений в любой точке.

Если принять такую зависимость в виде уравнения (124), то после подстановки $p = p_{zн}$ в (125′) и дифференцирования можно получить

$$J = \frac{p_{макс}}{\gamma} \cdot \frac{\varepsilon}{z_в} e^{-n \frac{t}{d}} e^{-\varepsilon \frac{z}{z_в}}. \qquad (126)$$

Последнее выражение позволяет построить эпюру изменения волновых градиентов вдоль откоса. При расчете обратных фильтров нас будут интересовать максимальные градиенты, которые имеют место при $z=0$, т. е. в точке 0′:

$$J_{макс}=J=\varphi e^{-n\frac{t}{d}}, \tag{127}$$

где значение коэффициента φ определяется из такого выражения:

$$\varphi=\frac{p_{макс}}{\gamma}\cdot\frac{\varepsilon}{z_в}. \tag{128}$$

Входящая в это выражение величина $p_{макс}$ в общем случае может быть определена по формуле (36), а величина $z_в$, характеризующаяся расстоянием от точки удара волны на откосе до точки максимального наката, — по формуле

$$z_в=(h_в+e_o)\sqrt{1+m^2}, \tag{129}$$

где $h_в$ — определяется по формуле (45);
e_o — по формуле (37);
$m=\operatorname{ctg}\alpha$;
α — угол наклона откоса к горизонту;
$\varepsilon=4{,}1$.

Для ускорения расчета значение коэффициента φ может быть взято из графика (рис. 135) в зависимости от коэффициента заложения откоса $m=\operatorname{ctg}\alpha$ и высоты расчетной волны $2h$. Данный график построен из соотношения $\frac{2L}{2h}=15$; при $\frac{2L}{2h}<15$ расчетное значение этого коэффициента может быть определено как

$$\varphi_p\approx\varphi-0{,}03\left(15-\frac{2L}{2h}\right), \tag{130}$$

где φ определяется по приведенному графику.

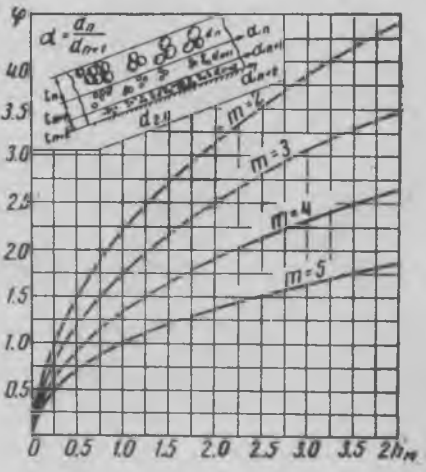


Рис. 135. График для определения коэффициента φ (при $\frac{2L}{2h}=15$) и схема расположения слоев обратного фильтра

Следует заметить, что полученное выражение (127) для определения максимального значения продольного градиента соответствует моменту удара (обрушения) волны на откос. В последующее затем время наката и ската волны предельные значения градиентов будут значительно меньше.

Таким образом, резюмируя все изложенное, приходим к выводу, что значение волнового градиента на откосе существенным образом

зависит не только от исходных элементов волны, но и от заложения откосов и соотношения между толщиной и размером фракций фильтрующего слоя. Приведенные обстоятельства заставляют не согласиться с выводами И. К. Божича по определению волновых градиентов и, в частности, с его формулой (119).

На основании исследований С. В. Избаша [19], В. С. Истоминой [20] и др. считаем возможным в данном случае (т. е. в условиях воздействия волнового потока) среднюю скорость фильтрации в фильтровой подготовке определять по обобщенной формуле для турбулентного фильтрационного потока при равномерном его движении сквозь поры проницаемого слоя:

$$v_ф = C_o p \sqrt{D_ш J}\ , \tag{131}$$

где p — пористость материала фильтра;

$D_ш$—диаметр шара, равновеликого по объему фракции фильтра;

J — гидравлический градиент.

Коэффициент Шези C_0 для турбулентной фильтрации определяем из выражения

$$C_o = 20 - \frac{14}{D_ш}\ .$$

Из предосторожности при распространении формулы (131) на условия волнового потока следует принять $C_0 = C_{макс} = 20$; значение пористости материала принимаем $p_{ср} = 0{,}4$. Тогда вместо выражения (131) получим

$$v_ф \cong 8 \sqrt{D_ш J}\ \ см/сек, \tag{131'}$$

где $D_ш$ — размер фракций в *см*.

Из анализа опытных материалов по размывающим скоростям вытекает, что формула Божича (120) по сравнению с данными Пенка и последующих исследований Истоминой, дает несколько завышенные величины размывающей скорости. На основании изложенного необходимо принять определенный коэффициент, т. е. принять следующие выражения для размывающей скорости:

$$v_p = K_з \cdot 38 \sqrt{d}\ \ см/сек, \tag{120'}$$

где d — размер частиц грунта нижележащего слоя;

$K_з < 1$.

Исходя из условия предельного равновесия, т. е. полагая $v_ф \leqslant v_p$ с учетом выражений (131) и (120′) можно получить[1]

$$8 \sqrt{D_ш J} \leqslant K_з \cdot 38 \sqrt{d}\ . \tag{132}$$

---

[1] Заметим, что предложенный метод расчета обратного фильтра остается в силе и при других данных, определяющих допустимую неразмывающую скорость для грунта; в этом случае необходимо лишь уточнить принятую зависимость (120′).

Принимая

$$D_ш \approx 0{,}85 D_{ср} \approx 0{,}85 D \text{ и } K_з = \frac{1}{1{,}5},$$

для расчета устойчивости контакта получаем

$$\frac{D}{d} \leqslant 12 \frac{1}{J}. \tag{133}$$

Для простоты расчета примем за первый слой фильтра слой, расположенный наверху, за последний слой фильтра — слой, расположенный непосредственно на грунте откоса (см. рис. 135).

При этой схеме для расчета устойчивости частиц на контакте между слоями можно написать

$$\frac{d_n}{d_{n+1}} = \alpha_n \leqslant 12 \frac{1}{J}. \tag{133'}$$

Тогда с учетом выражения (127), при $n=0{,}21$ в общем случае (многослойный фильтр) расчетная формула будет иметь следующий вид:

$$\frac{d_n}{d_{n+1}} \leqslant \frac{12}{\varphi} e^{0{,}21 \frac{t_n}{d_n}}, \tag{134}$$

откуда

$$d_n \leqslant \frac{12}{\varphi} d_{n+1} e^{0{,}21 \frac{t_n}{d_n}} \tag{135}$$

и

$$d_{n+1} \geqslant \frac{\varphi}{12} d_n e^{-0{,}21 \frac{t_n}{d_n}}. \tag{136}$$

Для определения необходимой толщины слоя обратного фильтра из последних выражений можно получить

$$t_n \geqslant d_n \cdot 4{,}75 \ln \left(\frac{\varphi}{12} \cdot \frac{d_n}{d_{n+1}} \right). \tag{137}$$

Так как минимальная толщина слоя соответствует $t_{мин}=d$, то из последнего выражения получаем следующий критерий применимости предлагаемых формул:

$$\frac{d_n}{d_{n+1}} = \alpha_n \geqslant \frac{14{,}8}{\varphi}. \tag{138}$$

Этот критерий по существу характеризует геометрическую непроходимость частиц; при несоблюдении данного критерия толщину фильтра следует принимать по конструктивным соображениям.

В предложенной методике расчета обратного фильтра за расчетный размер частиц грунта во всех случаях принимается

$$d = d_{рас} = d_{50}.$$

Напомним, наконец, что при расчете обратного фильтра под швами бетонного покрытия расчетный размер частиц первого слоя принимается исходя из условия

$$d_o = d_1 \geqslant 1{,}5 t_ш, \tag{139}$$

где $t_ш$ — расчетная ширина шва между плитами.

При расчете обратного фильтра под каменные покрытия откоса размер камня для устройства облицовки определяется в соответствии с имеющимся методом расчета [76], причем из опытов установлено, что в тех случаях, когда размер камня для облицовочного слоя $D_к > 25$ *см*, облицовку рекомендуется укладывать на промежуточный слой из камней меньшего размера:

$$d_o = d_1 \geqslant 0{,}2 D_к. \tag{140}$$

Особенность предложенной методики расчета обратного фильтра, в отличие от других имеющихся предложений, состоит в том, что она учитывает толщину отдельных слоев фильтра, а это в свою очередь дает возможность практически использовать любой имеющийся фрикционный состав гравийной смеси [при соблюдении расчетных формул (134) —(137)]. Вместе с тем предложенный метод расчета, по сравнению с прежними рекомендациями, позволяет значительно повысить значение коэффициента междуслойности

$$\alpha = \frac{d_n}{d_{n+1}},$$

что особенно важно при мелкозернистых грунтах откоса.

Наконец, предложенный метод расчета в ряде случаев позволяет ограничиться однослойным фильтром, что облегчает условия производства работ. Для пояснения рассмотрим два примера расчета.

Пример расчета обратного фильтра под каменное покрытие откоса при следующих исходных данных: $2h = 1{,}5$ *м*; $2L = 15$ *м*; заложение откоса 1 : 3 ($m = 3$); средний размер частиц грунта основания $d_{гр} = d_{50} = 0{,}35$ *мм* $= 0{,}035$ *см*; удельный вес камня $\gamma_к = 2{,}65$ *т/м*^{3}.

При этих условиях по формуле автора [76] получаем, что верхняя облицовка будет устойчива при $D_к = 31$ *см*. Далее, пользуясь формулами (36), (37), (45) и (88), соответственно находим: $p_{макс} = 3{,}2$ *т/м*^{2}; $e_o = 0{,}58$ *м*; $h_в = 1{,}48$ *м*; $z_в = 6{,}55$ *м*. Тогда по формуле (128) имеем $\varphi = 2{,}15$ или по графику (см. рис. 135) и формуле (130)

$$\varphi \approx 2{,}15 - 0{,}03 \cdot 5 = 2.$$

Принимая за первый слой фильтра подготовку под каменное покрытие с $d_1 = 0{,}2\ D_к = 6{,}2$ *см* [см. формулу (140)], расчет обратного фильтра сводим к определению его размера, исходя из устойчивости частиц грунта на контакте гравийной подготовки с грунтом откоса.

Рассмотрим два варианта устройства обратного фильтра: однослойный фильтр и двухслойный фильтр.

Для однослойного фильтра, при $\frac{t_к}{D_к}=1$; $d_1=6,2$ *см* и $d_2=d_{гр}=0,035$ *см* необходимая толщина определяется по формуле (137):

$$t_1=6,2\cdot 4,75\ln\left(\frac{2}{12}\cdot\frac{6,2}{0,035}\right)=100\ см.$$

При такой полученной толщине потребуются значительные затраты на устройство фильтра, поэтому в рассматриваемом случае устройство однослойного фильтра, в виде подготовки для каменной облицовки, является нерациональным.

Рассмотрим двухслойный фильтр, принимая за первый слой $d=6,2$ *см*; $t_1=10$ *см*. Тогда необходимый размер частиц второго слоя определится по формуле (136):

$$d_2\geqslant\frac{2}{12}\cdot 6,2e^{-0,21\cdot\frac{10}{6,2}}=0,73\ см.$$

При этих условиях расчетная толщина второго слоя фильтра (137) будет

$$t_2\geqslant 0,73\cdot 4,75\ln\left(\frac{2}{12}\cdot\frac{0,73}{0,035}\right)=4,3\ см.$$

Такая толщина в производственных условиях невыполнима, поэтому следует принять $t_{мин}=5$ *см*.

Если по фракционному составу имеется гравий с $d_2>0,73$ *см*, например, $d_2=2$ *см*, то при использовании этого состава потребуется толщина второго слоя:

$$t_2=2\cdot 4,75\ln\left(\frac{2}{12}\cdot\frac{2}{0,035}\right)=21\ см.$$

Рассмотренный пример расчета показывает, что при увеличении коэффициента междуслойности (с $\alpha=21$ до $\alpha=57$) для обеспечения устойчивости нижнего контакта потребовалась большая толщина второго слоя фильтра.

Рассмотрим расчет обратного фильтра под швами бетонного покрытия при тех же условиях и при расчетном размере шва между плитами $t_ш=1,5$ *см*.

Принимая размер частиц верхнего слоя фильтра согласно выражению (139) $d_1=2,25$ *см*, необходимую толщину в случае однослойного фильтра определим по формуле (137) при

$$d_n=2,25\ см \text{ и } d_{n+1}=d_{гр}=0,035\ см$$

$$t=2,25\cdot 4,75\ln\left(\frac{2}{12}\cdot\frac{2,25}{0,035}\right)\approx 26\ см.$$

При двухслойном варианте, принимая $d_1=2,25$ *см* и $t_1=10$ *см*, необходимый размер частиц второго слоя определим по формуле (136):

$$d_2\geqslant\frac{2}{12}-2,25e^{-0,21\cdot\frac{10}{2,25}}=0,147\ см.$$

Учитывая, что при данном значении d_2 не соблюдается критерий (138), так как

$$\frac{0,147}{0,035}=4,2<\frac{14,8}{2}=7,4,$$

для рассматриваемого варианта принимаем $t_{2мин}=5$ *см*.

При этих условиях, т. е. при нижнем пределе частиц второго слоя $d_{н_2} = 0{,}147$ *см*, верхний предел частиц может быть определен из формулы (135)

$$d_{в_2} = \frac{12}{2} \cdot 0{,}035\, e^{0{,}21 \frac{5}{d_{н_2}}},$$

откуда подбором находим

$$d_{в_2} = 0{,}79 \text{ см}.$$

Если для однослойного фильтра принять $d=5$ *см*, то необходимая толщина фильтра будет $t=75$ *см*, т. е. почти в 3 раза больше, чем при $d=2{,}25$ *см*. Для двухслойного фильтра при $d_1=5$ *см* и $t_1=10$ *см* необходимый размер частиц второго слоя по выражению (136) $d_2=0{,}55$ *см*, а расчетная толщина по выражению (137) $t_2=2{,}5$ *см*.

§ 34. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ С ОПЫТНЫМИ ДАННЫМИ

Для сравнительной оценки предложенного метода расчета остановимся на рассмотрении данных лабораторных опытов и приведем несколько примеров из опыта эксплуатации построенных сооружений.

В лабораторных условиях была поставлена специальная серия опытов при следующих исходных данных: средний размер частиц грунта откоса $d_{ср}=0{,}3$ *мм*; элементы моделируемой волны $2\ h_{ср}=8{,}8$ *см*, $2\ L_{ср}=110$ *см*, заложение откоса 1 : 3 ($m=3$). По этим данным, согласно приведенным формулам, получаем следующие расчетные параметры: $e_0=3{,}8$ *см*; $h_в=9{,}5$ *см*; $z_в=42$*см*; $p_{макс}=0{,}051$ *т/м*^{2}; $\varphi=0{,}5$.

Лабораторные опыты были проведены с щебенистым слоем толщиной от $t_щ=10$ *мм* до $t_щ=120$ *мм* при расчетных диаметрах щебенки от $d_щ=7{,}5$ *мм* до $d_щ=21{,}5$ *мм*. Для предотвращения размыва слоя щебенки его закрепляли специальной металлической сеткой.

Методика проведения опытов заключалась в визуальном определении состояния контакта щебенки с песком основания после прохождения 1000—1500 волн, т. е. когда завершался (стабилизировался) процесс размыва основания, если последний происходил на модели. Характерно, что в большинстве опытов вынос песка в поры щебенки наблюдался главным образом на линии уреза и несколько ниже уровня покоя.

Результаты наиболее достоверных опытов сведены в табл. 26.

В этой таблице также приведены расчетные параметры, определенные по формуле (134), которая в рассматриваемом случае представляется в таком виде:

$$\frac{d_щ}{d_{гр}} = A \leqslant 24 e^{0{,}21 \frac{t_щ}{d_щ}} = Б,$$

т. е. в случае $A<Б$ — по расчету контакт должен быть устойчив; при $A>Б$ — по расчету контакт не устойчив.

Таблица 26

Сводные данные результатов опытов по состоянию контакта и расчетные показатели

$d_{щ}$ мм	$d_{щ(ср)}$ мм	$t_{щ}$ мм	$A=\frac{d_{щ}}{d_{гр}}$	$\frac{t_{щ}}{d_{щ}}$	$0,21\frac{t_{щ}}{d_{щ}}e$	$0,21\frac{t_{щ}}{d_{щ}}$	$Б=0,21\frac{t_{щ}}{d_{щ}}=24e$	$A \gtrless Б$	Состояние контакта щебня с песком
5÷10	7,5	10	25,0	1,33	0,27	1,31	31,7	<	Нет размыва
5÷10	7,5	20	25,0	2,66	0,54	1,72	41,3	<	Нет размыва
8÷12	10	10	33,3	1,00	0,21	1,23	29,5	>	Есть размыв
8÷12	10	20	33,3	2,00	0,42	1,52	36,5	<	Нет размыва
12÷18	15	30	50,0	2,00	0,42	1,52	36,2	>	Есть размыв
12÷18	15	60	50,0	4,00	0,84	2,32	56,0	<	Нет размыва
18÷25	21,5	90	72,0	4,18	0,88	2,41	59,0	>	Есть размыв
18÷25	21,5	120	72,0	5,60	1,18	3,25	78,0	<	Нет размыва

Сопоставляя расчетные показатели с данными лабораторных опытов, можно установить, что во всех приведенных опытах наблюдаемый размыв контакта подтверждается расчетными показателями.

Следует отметить, что в некоторых опытах размыв контакта в действительности отсутствовал, в то время как по расчету он должен был быть. Это положение следует объяснить, по-видимому, влиянием металлической сетки на откосе, которая несколько гасила энергию волны, т. е. как бы увеличивала толщину щебенки.

Во всяком случае, в большинстве опытов характер состояния контакта щебенки с песком основания хорошо согласуется с расчетными показателями предложенного метода расчета.

Как отмечалось выше, во время проведения натурных наблюдений на опытном участке канала имени Москвы были испытаны различные составы обратного фильтра (см. рис. 95). В результате проведенных испытаний представляется возможным дать качественную оценку предложенных выше зависимостей. Рассмотрим несколько примеров, принимая следующие исходные данные для элементов судовой волны, наблюдаемых во время проведения натурных испытаний: $2h_{ср}=0,9$ *м*; $2L_{ср}=9$ *м*; $\varphi=1,7$ [согласно зависимости (130) при $m=2,5$].

Под каменным покрытием типа № 14 был уложен однослойный фильтр с $d_{50}=d_n=14$ *мм* и толщиной $t=t_n=10$ *см*; грунт откоса состоял из песка с $d_{50}=d_{n+1}=0,1\div0,25$ *мм*. Для рассматриваемого примера устойчивость частиц грунта откоса будет обеспечена, если расчетный размер, согласно формуле (136), будет

$$d_{(n+1)p} \geqslant \frac{1,7}{12}\cdot 14e^{-0,21\cdot\frac{10}{1,4}} = 0,44 \text{ мм}.$$

В действительности размер частиц грунта откоса составлял

$d_{50}=0{,}1\div0{,}25$ *мм*, что, по-видимому, и привело к разрушению данного покрытия.

На другом типе № 13 под каменное покрытие был уложен двухслойный обратный фильтр такой конструкции: размер каменной облицовки $D=20$ *см*; размеры первого слоя фильтра (расположенного непосредственно под каменной облицовкой)

$d_1=64$ *мм* и $t_1=10$ *см*; размеры второго слоя фильтра

$d_2=14$ *мм* и $t_2=10$ *см*; грунты откоса $d_{50}=0{,}1\div0{,}25$ *мм* (песок).

В этом примере, в соответствии с зависимостью (140), устойчивость частиц первого слоя обеспечена, так как $d_{1(рас)}=4$ *см* <6 *см*; то же самое можно получить и в отношении частиц второго слоя, так как в соответствии с формулой (136) имеем $d_{2(рас)}\geqslant6{,}5$ *мм* $<d_2=14$ *мм*. Во время опытов на данном типе покрытия вынос частиц фильтра в действительности не наблюдался.

Разрушение рассматриваемого типа покрытия началось, так же как и в первом случае, с выноса частиц грунта откоса. Если судить по данным расчета, то здесь размер грунта откоса должен быть $d=0{,}44$ *мм*, в то время как в действительности он состоял из мелкозернистого песка.

На другом же типе № 5 обратный фильтр был принят той же конструкции, что и в предыдущем случае, однако разрушения покрытия не наблюдалось. Это положение следует объяснить тем, что в рассматриваемом примере грунты откоса были защищены крупнозернистым песком с $d\approx0{,}5\div1{,}0$ *мм*, т. е.

$$d_{рас}=0{,}44\ мм<d_{действ}=0{,}5\div1\ мм.$$

На типах со сплошным бетонным покрытием откоса в подводной и надводной частях вынос частиц обратного фильтра с размером $d=14$ *мм* наблюдался в тех случаях, где раскрытие швов доходило до $1{,}5\div2$ *см*.

В заключение отметим, что выполненный проверочный расчет обратного фильтра под каменные покрытия Волго-Донского канала имени В. И. Ленина (см. рис. 5, вариант *а*) показал, что устойчивость как частиц самого фильтра, так и грунта основания вполне обеспечена; причем, по нашему мнению, толщину нижнего слоя фильтра вместо принятой 0,15 *м* можно было бы уменьшить до $0{,}05\div0{,}10$ *м*. Как известно, опыт эксплуатации данного канала показывает в общем удовлетворительную работу всего покрытия в целом.

ГЛАВА IX

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕДЯНОГО ПРИПАЯ НА БЕТОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ОТКОСОВ

§ 35. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАБЛЮДЕНИЙ НА ОПЫТНЫХ УЧАСТКАХ

Из различных видов воздействия ледяного покрова на крепления откосов, перечисленных выше (см. § 3), в настоящей главе рассматривается действие примерзшего к покрытию льда (припая) при колебании уровня воды в водоеме, изучением которого занимался автор. Этот вид воздействия является одним из основных при расчете покрытий откосов каналов и земляных дамб на водохранилищах, где в течение зимы возможны колебания уровня воды.

Для изучения характера воздействия ледяного покрова (припая) на бетонные покрытия откосов на канале имени Москвы в течение 1957 — 1959 гг. были организованы и проведены натурные исследования и наблюдения на специальных опытных участках. Один из участков был сделан на Яхромском водохранилище, другой — на одном из бьефов канала. На этих участках были уложены различные типы бетонных и железобетонных покрытий как непосредственно на грунт откоса, так и на фильтрующую подготовку. Общий вид одного из участков показан на рис. 136.

В состав наблюдений и исследований на опытных участках входило следующее: наблюдения за напряженным состоянием ледяного покрова и усилиями, передающимися от него на покрытие откоса; наблюдения за напряженным состоянием железобетонных плит; определение границ промерзания грунта под покрытием; определение сил сцепления бетона с грунтом основания; наблюдения за деформацией ледяного покрова и бетонного покрытия; наблюдение за температурой грунта и ледяного покрова; наблюдения за толщиной льда и т. д.

Весь перечисленный состав наблюдений и исследований был выполнен во время экспериментальных спусков воды, скорость снижения уровня соответствовала 1÷3 *см/час*.

Для определения напряжений в железобетонных плитах была использована специальная установка, состоящая из датчиков и

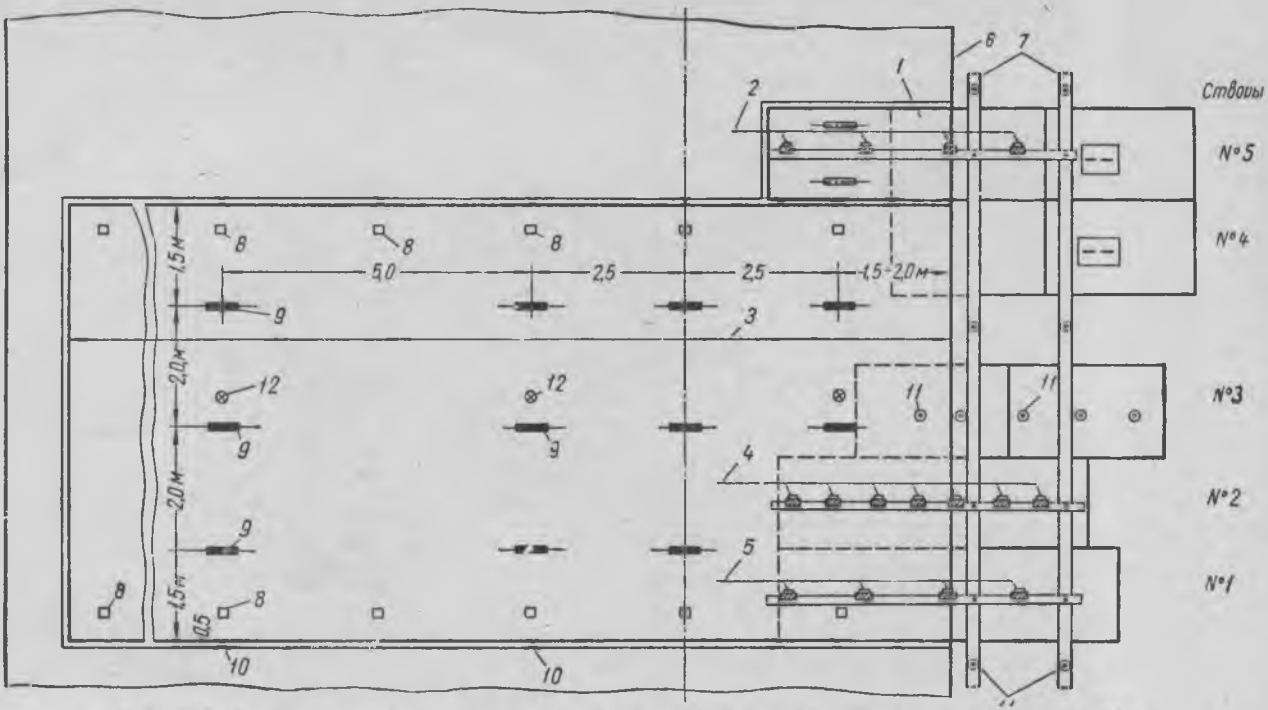


Рис. 136. Схема размещения измерительных устройств и приборов на опытном участке № 1:

1—контрольная консоль; *2*—мессуры для наблюдения за деформациями льда; *3*—основная экспериментальная консоль; *4*—мессуры для наблюдения за деформациями поверхности плит; *5*—мессуры для наблюдения за деформациями льда; *6*—линия припая льда; *7*—насадки *d*=20 *см*; *8*—марка для наблюдения за деформациями льда топографским методом; *9*—тензометрические датчики; *10*—точка измерения толщины льда после образования майны; *11*—мерзлотомер типа МД-50; *12*—точка систематического наблюдения за толщиной льда

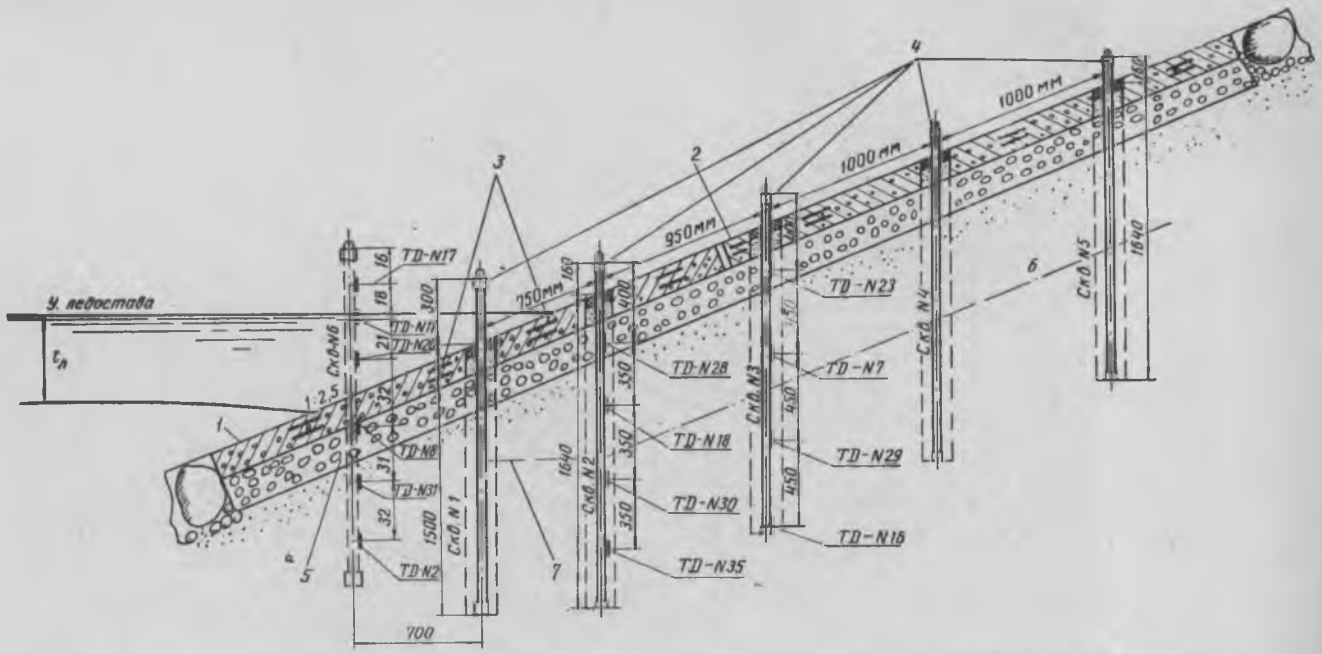


Рис. 137. Разрез по оси створа № 1 с показанием расположения измерительных приборов:

1—плита типа *III*; 2—плита типа *IV* толщиной 13 *см*; 3—тензометрические трубки; 4—мерзлометры системы Данилина; 5—гравийная подготовка $t_п$ =10—15 *см*; 6—мелкозернистый песок; 7—граница промерзания грунта; ДТ — термодатчик

усилителей. В качестве датчика использовалась тензометрическая трубка, показания которой снимались с помощью тензометрического усилителя и миллиамперметра. Тензометрические трубки были установлены в железобетонных плитах во время их бетонирования (рис. 137).

Напряжения в верхней части ледяного покрова измерялись как с помощью струнных тензометров-датчиков и центральной станции (установка Гидропроекта), так и с помощью тех же тензометрических трубок, которые были установлены в плитах покрытия откоса. Перед установкой трубок на место проводилась их тарировка на прессе. Схема расположения трубок в ледяном покрове по опытам 1958 г. показана на рис. 136.

Глубина промерзания грунта откоса измерялась с помощью мерзлотомера системы Данилина и датчиков термосопротивления (конструкции Института мерзлотоведения АН СССР). Примерная схема расположения этих приборов показана на рис. 137.

Деформация поверхности ледяного покрова во время экспериментальных спусков воды определялась с помощью непрерывного нивелирования марок, вмороженных в ледяной покров. Для сравнительной оценки в опытах 1958 г. на одном из участков была вырезана консоль длиной $l=23$ *м*, во время других спусков воды поверхность ледяного поля не отделялась.

Коротко остановимся на описании основных, качественных, результатов опытных исследований и сделаем несколько замечаний по учету нагрузок на бетонные покрытия откоса от воздействия ледяного припая.

1. Наблюдения за деформациями поверхности ледяного покрова показали, что в момент снижения уровня воды в водоеме упругая линия ледяного покрова имеет плавное очертание и меняет знак кривизны в зависимости от места припая льда; причем характерно, что на определенном расстоянии от «заделки» (припая) поверхность ледяного покрова принимает горизонтальное положение.

Во всех проведенных опытах было установлено, что первая продольная трещина во льду (параллельно урезу воды) всегда проходила примерно через точку пересечения нижней кромки льда с поверхностью откоса.

При скоростях снижения уровня воды в среднем 1,5 *см/час* максимальный прогиб ледяного покрова перед моментом образования трещины во льду соответствовал максимальному снижению уровня воды; при скорости снижения уровня 3 *см/час* максимальный прогиб ледяного покрова был меньше критического снижения воды (в обоих случаях толщина ледяного покрова была примерно одинакова: $t_л=0{,}57\div0{,}6$ *м*).

2. Наблюдения за показаниями датчиков, установленных в верхней части ледяного покрова, показали что в момент снижения уровня воды в ледяном покрове возникает напряженное состояние. Причем вначале (в зоне припая льда) верхние волокна ледяного покрова растянуты, а на некотором расстоянии, примерно в $10\div12$ *м* от

припая, наблюдается сжатие. Нарастание величин напряжений происходило по мере снижения уровня воды и заканчивалось в момент появления первой продольной трещины во льду (рис. 138), т. е. в момент наступления предельного состояния ледяного покрова.

Аналогичная картина была получена и при анализе величин напряжений в отдельных точках железобетонного покрытия откоса, т. е. постепенное нарастание напряжений с различными знаками в зависимости от места расположения датчиков до момента появления трещины в ледяном покрове.

3. Проведенные, таким образом, наблюдения за напряженным состоянием ледяного покрова и железобетонного покрытия свидетельствуют о том, что при наличии припая льда и колебании уровня воды в водоеме ледяной покров может передавать на покрытие откосов значительную нагрузку, которую необходимо учитывать при расчете покрытия на устойчивость и прочность.

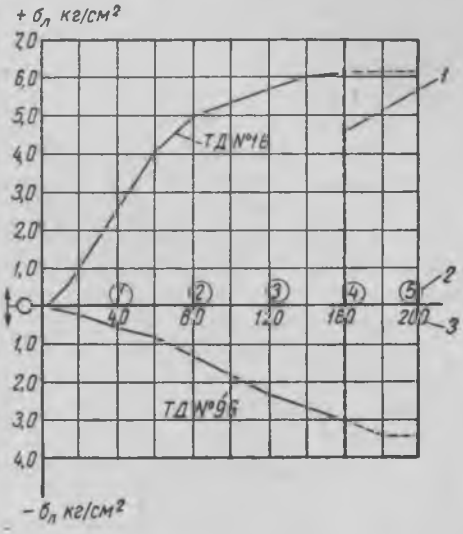


Рис. 138. График изменения показаний датчиков, установленных в ледяном покрове (опыты 1959 г.):

1—момент появления трещины во льду; *2*—величина снижения уровня в *см*; *3*—время от начала снижения в минутах

4. Наблюдения за характером промерзания грунта откоса под покрытием позволили установить очертание эпюры промерзания грунта (см. рис. 137). Для практических расчетов можно считать, что на участке припая льда очертание эпюры промерзания грунта соответствует прямой линии. Кроме того, было установлено, что в том случае, когда бетонное покрытие укладывается непосредственно на фильтрующую подготовку, примерзание плиты к основанию происходит лишь на участке припая льда; если плита укладывается непосредственно на грунт откоса, т. е. отсутствует обратный фильтр, примерзание плиты к откосу возможно и выше зоны припая льда. Величина этого примерзания зависит от состава и температуры грунта, а также от степени увлажненности грунта на момент льдообразования.

5. Наблюдения, проведенные на опытных участках, показали также, что при расчете бетонного и железобетонного покрытия откоса необходимо учитывать влияние промерзшего грунта откоса. Как показали проектные проработки, выполненные Гипроречтрансом, учет влияния промерзшего грунта значительно уменьшает размеры бетонного покрытия.

§ 36. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ СООРУЖЕНИЮ ПРИМЕРЗШИМ ЛЬДОМ

Как отмечалось выше, при колебании уровня воды и наличии примерзшего к сооружению льда последний может создать значительную дополнительную нагрузку, направленную вниз в случае снижения уровня воды и вверх — в случае повышения уровня воды. Эта дополнительная нагрузка может быть опасна для прочности и устойчивости как отдельных элементов, так и всего сооружения в целом. Особое значение этот вопрос приобретает для крепления откосов.

Сложность решения данной задачи состоит, с одной стороны, в недостаточной изученности физико-механических свойств льда, с другой — в том, что неясно, с какой площади льда будет передаваться гидростатическое давление на сооружение.

Наблюдениями за деформациями поверхности ледяного покрова было установлено, что перед образованием трещины в ледяном покрове (в месте его припая) его поверхность, т. е. упругая линия, имеет различный вид: вначале, считая от припая, поверхность ледяного покрова имеет вогнутое очертание, дальше наблюдается перемена знака кривизны, и она принимает выпуклое очертание. На некотором расстоянии от припая поверхность ледяного покрова принимает горизонтальное положение.

Изменение знака кривизны поверхности ледяного покрова свидетельствует о наличии изгибающих моментов различного знака, что подтверждается также показаниями специальных датчиков, установленных в верхней части ледяного покрова.

Характер деформации поверхности ледяного покрова в момент колебания уровня воды позволяет наиболее правильно подойти к решению задачи, связанной с определением вертикальных усилий и изгибающих моментов, передаваемых сооружению (или откосу) примерзшим ледяным покровом, и установить площадь ледяного покрова, с которой будет передаваться на сооружение гидростатическое давление.

Рассмотрим случай понижения уровня воды по схеме, представленной на рис. 139; принимаем длину ледяного покрова l, которая соответствует точке перехода кривизны ледяного покрова в горизонтальное положение, т. е. при угле поворота сечения $\Theta=0°$ и максимальном прогибе f. Кроме того, будем рассматривать общий случай, когда величина понижения уровня ΔH больше величины прогиба f, т. е. $\Delta H>f$. Для сокращения текста введем обозначение $\psi=\frac{\Delta H}{f}$.

При решении поставленной задачи воспользуемся общеизвестным принципом строительной механики, т. е. отбросив правую часть ледяного покрова, заменив ее изгибающим моментом M_0 и перерезывающей силой P_0, будем иметь консоль длиной l, нагруженную силами, указанными на схеме (см. рис. 139). Лед при этом счи-

тается изотропным упругим телом. Кроме того, упругую линию принимаем по прямой, что при обычных расчетных соотношениях $\frac{l}{i_л}$ вполне допустимо.

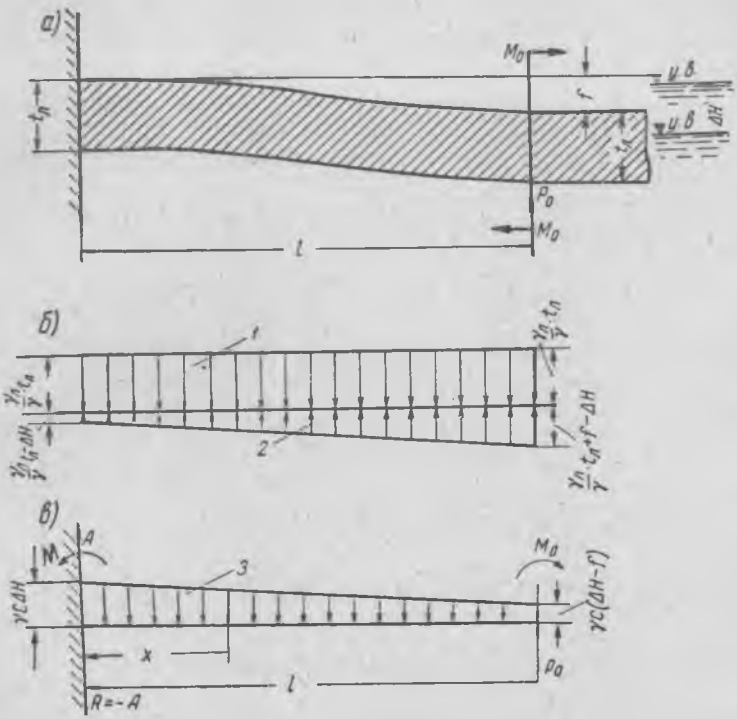


Рис. 139. Схема деформации льда и расчетная схема определения суммарного давления на ледовый покров:

1—собственный вес льда; 2—гидростатическое давление; 3—суммарная нагрузка

Дифференциальное уравнение изогнутой оси ледяного покрова может быть написано в таком виде:

$$E_л I_л \frac{d^2y}{dx^2} = -M_x, \tag{141}$$

где $E_л$ — модуль упругости ледяного покрова;

$I_л$ — момент инерции сечения ледяного покрова.

Принимая условно направление оси oy вниз, а оси ox — вправо (считая начало координат в месте припая льда) для какого-либо сечения на расстоянии x от «заделки» (припая льда), можно написать (см. рис. 139)

$$M_x = Ax - M - \frac{1}{2}\gamma cf\psi x^2 + \frac{1}{6}\gamma cf\frac{x^3}{l}, \tag{142}$$

или, после замены A и M значениями P_o и M_o,

$$M_x = \frac{1}{2}\gamma cfl(2\psi - 1)x - P_o x - \frac{1}{2}\gamma cfl^2\left(\psi - \frac{2}{3}\right) - \\ - M_o + P_o l - \frac{1}{2}\gamma cf\psi x^2 + \frac{1}{6}\gamma cf\frac{x^3}{l}. \qquad (142')$$

После подстановки выражения (142′) в выражение (141), соответствующего интегрирования и некоторого преобразования можно получить величину максимального прогиба при $x=l$, $y=f$ и $\theta=0°$. В окончательном виде получены следующие уравнения:

$$f = \frac{1}{E_л I_л}\left[\frac{1}{8}\gamma cfl^4\left(\psi - \frac{11}{15}\right) - \frac{1}{3}P_o l^3 + \frac{1}{2}M_o l^2\right], \qquad (143)$$

$$\theta = 0 = \frac{1}{E_л I_л}\left[\frac{1}{6}\gamma cfl^3\left(\psi - \frac{3}{4}\right) - \frac{1}{2}P_o l^2 + M_o l\right]. \qquad (144)$$

Используя полученные выражения, а также два основных уравнения статики (см. рис. 139), можно получить следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} A &= \frac{1}{2}\gamma cfl(2\psi - 1) - P_o = -R, \\ M &= \frac{1}{2}\gamma cfl^2\left(\psi - \frac{2}{3}\right) + M_o - P_o l, \\ fE_л I_л &= \frac{1}{8}\gamma cfl^4\left(\psi - \frac{11}{15}\right) + \frac{1}{2}M_o l^2 - \frac{1}{3}P_o l^3, \\ 0 &= \frac{1}{6}\gamma cfl^3\left(\psi - \frac{3}{4}\right) + M_o l - \frac{1}{2}P_o l^2. \end{aligned}\right\}. \qquad (145)$$

После решения данной системы уравнений получаем зависимости:

$$R = \frac{3M}{l}\cdot\frac{\gamma c(10\psi - 3)l^4 + 240E_л I_л}{\gamma c(5\psi - 2)l^4 + 360E_л I_л}; \qquad (146)$$

$$P_o = \frac{3M}{l}\cdot\frac{\gamma c(10\psi - 7)l^4 - 240E_л I_л}{\gamma c(5\psi - 2)l^4 + 360E_л I_л}; \qquad (147)$$

$$M_o = M\cdot\frac{\gamma c(5\psi - 3)l^4 - 360E_л I_л}{\gamma c(5\psi - 2)l^4 + 360E_л I_л}; \qquad (148)$$

$$M = f\cdot\frac{1}{60\,l^2}\left[\gamma c(5\psi - 2) + 360E_л I_л\right]. \qquad (149)$$

Величина изгибающего момента M в «заделке» может быть определена по формуле (149), если известны максимальный прогиб, при котором образовалась трещина в ледяном покрове, модуль упругости льда и его толщина.

При практических расчетах величину момента M можно определить исходя из прочности самого льда.

Так, если учесть, что при изгибе лед следует закону Гука, то исходя из прочности льда на изгиб могли принять

$$M = \sigma_л W = \sigma_л \frac{c\,l_л^2}{6}. \qquad (150)$$

При этом сопротивление льда на изгиб следует принимать из учета средней температуры окружающей среды (в верхних и в нижних волокнах ледяного покрова).

С другой стороны, если учесть, что за пределом текучести лед продолжает работать (не следуя уже закону Гука), и принять момент M, при котором лед получает трещину, равным 1,5 M_m (где M_m — величина изгибающего момента, когда напряжения соответствуют пределу текучести льда), можно написать[1]

$$M = \frac{3}{2} M_m = \frac{c l_л^2}{2} \cdot \frac{\sigma_c \sigma_p}{\sigma_c + \sigma_p}, \qquad (151)$$

где σ_c и σ_p — пределы текучести льда на сжатие и растяжение при данной расчетной температуре окружающей среды.

При практических расчетах, по-видимому, следует принимать максимальное значение M в соответствии с формулами (150) и (151).

Таким образом, величина M при заданных значениях $E_л$ или $I_л$ будет постоянной. Учитывая это обстоятельство, перепишем зависимость (146) в таком виде:

$$\frac{R}{M} = \overline{R} = \frac{3\gamma c(10\psi - 3)l^4 + 720 E_л I_л}{\gamma c(5\psi - 2)l^4 + 360 E_л I_л}. \qquad (146')$$

Анализируя данное выражение (рис. 140), можно установить, что при некоторых значениях l величина R имеет максимум.

Для определения максимального значения R, продифференцировав выражение (146′) по l и приравняв его нулю, окончательно можно получить

$$l = \sqrt[4]{\frac{60 E_л I_л}{\gamma c(10\psi - 3)\cdot(5\psi - 2)}\left[(40\psi - 7) \pm \sqrt{400\psi^2 + 280\psi - 95}\right]}. \qquad (152)$$

Таким образом, максимальное вертикальное усилие, передаваемое сооружению примерзшим ледяным покровом, в общем случае может быть определено по формуле (146) при известных значениях M и l из формулы (152).

В частном случае при $\psi = 1$ можно получить

$$R = \frac{1{,}37M}{\sqrt[4]{\frac{E_л I_л}{\gamma c}}} \qquad (153)$$

и

$$l = 3{,}58 \sqrt[4]{\frac{E_л I_л}{\gamma c}}. \qquad (154)$$

---

[1] Такая зависимость была использована к.т.н. В. С. Шайтаном при рассмотрении вопроса о величине максимального изгибающего момента в сечении ледяного покрова.

Как показали результаты натурных исследований, значение коэффициента $\psi=\frac{\Delta H}{f}$ в основном зависит от скорости снижения уровня воды; при $v_{ур}\leqslant 1{,}5$ *см/час* $\psi\approx 1$; при $v_{ур}=3$ *см/час* $\psi\approx 1{,}3\div 1{,}4$.

В случае повышения уровня воды все изложенные рассуждения остаются в силе, при этом следует принимать $\psi=1$, а направление (вверх) величины вертикального усилия R — обратным.

Полученные зависимости действительны при соблюдении следующих условий:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\gamma_л}{\gamma}t_л \geqslant \Delta H \geqslant f=\frac{60l^2M}{\gamma c(5\psi-2)l^4+360E_лI_л} \\ &\text{и} \\ &B\geqslant 2l, \end{aligned}\right\} \quad (155)$$

где B —ширина водоема при расчетном уровне воды;
l —определяется по формулам (152) и (154).

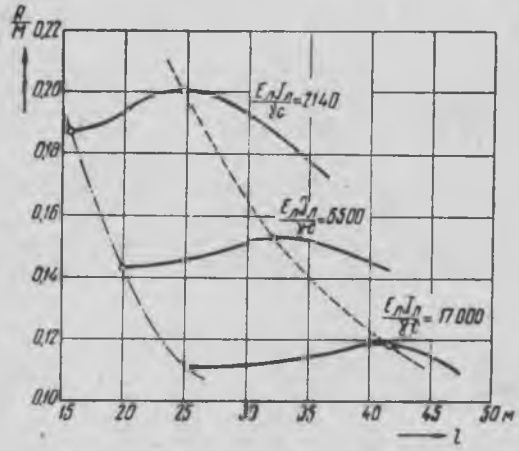


Рис. 140. График зависимости $\frac{R}{M}=f\left(\frac{E_лI_л}{\gamma c};\ l\right)$ при $\psi=1{,}0$

В заключение приведем сравнительные данные теоретических и опытных величин напряжений в ледяном покрове. При проведении натурных исследований на водохранилище были получены следующие исходные данные: толщина льда $t_л=0{,}58$ *м*, модуль упругости льда $E_л\approx 400\,000$ *т/м²*; максимальное снижение уровня воды соответствовало максимальному прогибу ледяного покрова $f=\Delta H=0{,}04$ *м*, т. е. $\psi=1$ (при скорости снижения уровня 1,5 *см/час*); ширина водохранилища по опытному створу $B>1{,}5$ *км*. Для фиксации напряжений в ледяном покрове в него были вморожены специальные датчики, запись показаний по которым велась непрерывно до образования продольной трещины в ледяном покрове; причем максимальные величины напряжений были зафиксированы перед моментом образования этой трещины.

Пользуясь полученными выше зависимостями для рассматриваемых условий, можно получить: $l=32$ *м*; $M=-3{,}58$ *тм*; $M_0=+0{,}142$ *тм*; $A=-R=0{,}54$ *т*; $P_0=0{,}096$ *т*; по этим данным и уравнению (142) построена эпюра изгибающих моментов (рис. 141, *а*).

На рис. 141, *б* показаны расчетные и опытные значения величин напряжений на уровне расположения датчиков (в 3—4 *см* от поверхности льда). Из сравнения этих данных следует, что расчетные

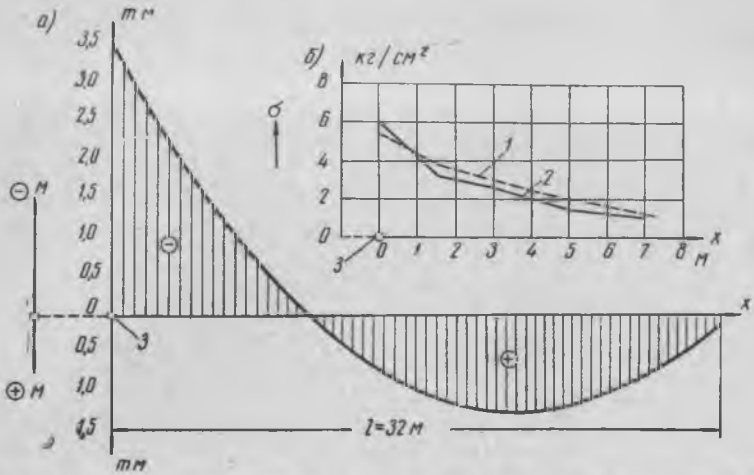


Рис. 141. Эпюра изгибающих моментов (*а*) и график напряжений в ледяном покрове (*б*);

1—по расчетным данным; *2*—по натурным данным; *3*—точка пересечения нижней кромки дна с откосом

величины, как правило, несколько (на 15—25%) больше. Однако такое расхождение следует считать вполне приемлемым, если учесть допущения, которые были приняты при рассмотрении поставленной задачи.

§ 37. О РАСЧЕТЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ БЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ ОТКОСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛЕДЯНОГО ПРИПАЯ

Из опыта строительства и эксплуатации берегоукрепительных сооружений можно привести ряд примеров их разрушений и повреждений от воздействия ледяного припая в случае колебания уровня воды (см. § 1÷3). Эти аварии связаны с тем, что при припае льда и колебаниях уровня воды возникает дополнительная гидростатическая нагрузка на ледяной покров, которая и передается креплению откоса. Эта нагрузка может быть представлена в виде двух величин: опрокидывающего (изгибающего) момента $M_{опр}$ и вертикального усилия R.

При подъеме уровня воды (рис. 142) опрокидывающий момент направлен по часовой стрелке, а вертикальное усилие — вверх; в этом случае R стремится вырвать плиту. При понижении уровня воды (рис. 143) опрокидывающий момент направлен против часовой стрелки, а вертикальное усилие — вниз; здесь сила R будет способствовать увеличению устойчивости плиты.

С точки зрения устойчивости покрытия наиболее опасным случаем будет подъем уровня воды; при максимальном, расчетном, уровне воды в момент ледостава и расположении припая льда в верхней части плиты, когда бетонное покрытие будет находиться в наихудших условиях.

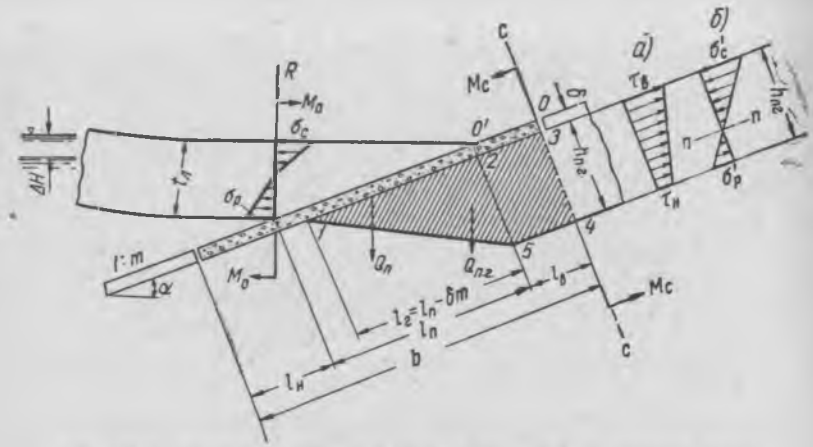


Рис. 142. Расчетная схема в случае повышения уровня воды

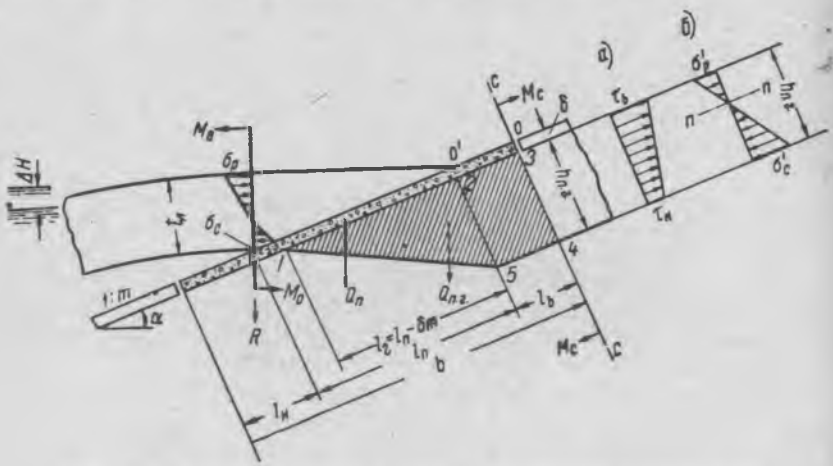


Рис. 143. Расчетная схема в случае понижения уровня воды

В общем случае устойчивость покрытия может быть нарушена вследствие действия опрокидывающего момента $M_{опр}$ или при вырывающем действии вертикальной силы R. Как показали сравнительные расчеты, наименьший коэффициент устойчивости при бетонном покрытии соответствует случаю работы плиты на опрокидывание. В силу этого в данной работе рассматривается устойчи-

вость бетонного покрытия на опрокидывание при подъеме уровня воды.

Внешние нагрузки, т. е. $M_{опр}$ и R, приближенно могут быть определены из приведенных выше зависимостей (150), (151), (153). В расчет рекомендуется принимать максимальное значение $M_{опр}$, полученное в соответствии с формулами (150) и (151).

Как отмечалось выше, образование продольной трещины во льду в момент критического повышения или понижения уровня воды происходит по вертикали, проходящей примерно через точку пересечения нижней кромки льда с откосом. В силу этого предлагаемые зависимости (150), (151) соответствуют моменту перед образованием продольной трещины во льду. После образования данной трещины на откосе будет действовать лишь собственный вес части льда, лежащей непосредственно на откосе.

К внутренним силам следует отнести собственный вес плиты Q_n и вес промерзшего грунта $Q_{n.г}$.

Величина $Q_{n\ г}$ определяется в соответствии с эпюрой промерзания *1-2-3-4-5* (см. рис. 142), полученной на основе данных натурных наблюдений на Яхромском водохранилище. Заметим, что при определении величин Q_n и $Q_{n.г}$ следует иметь в виду, что ниже уровня воды часть плиты и часть промерзшего грунта находятся во взвешенном состоянии.

В частном случае при $l_в=0$ (см. рис. 142), т. е. в случае припая льда в верхней части плиты, что, как отмечено выше, является наиболее опасным моментом, для определения Q_n и $Q_{n.г}$, можно написать:

$$Q_n \approx (\gamma_n - \gamma)\, c\, \delta\, b, \tag{156}$$

и

$$Q_{n.г} = \frac{1}{2}(\gamma_{гр} - \gamma)(l_n - \delta m)\, ch_{n.г}, \tag{157}$$

где γ_n — объемный вес плиты;

δ — толщина плиты;

b — размер плиты по откосу;

$\gamma_{гр}$ — объемный вес мерзлого грунта;

l_n — ширина припая льда, равная $\frac{t_л}{\sin\alpha}$.

Удерживающий момент этих сил относительно точки О (рис. 142) может быть определен выражениями

$$M_n = \frac{1}{2}(\gamma_n - \gamma)\, c\, \delta\, b^2 \cos\alpha, \tag{158}$$

и

$$M_Q = \frac{1}{6}(\gamma_{гр} - \gamma)(l_n - \delta m)^2 ch_{n.г} \cos\alpha. \tag{159}$$

Кроме перечисленных двух сил, к внутренним силам следует отнести усилия, возникающие в сечении *cc* (рис. 142) в результате сопротивления мерзлого грунта. Точное решение задачи, связанной

с определением сопротивления мерзлых грунтов в рассматриваемом случае, весьма затруднительно. Эта сложность обусловливается, с одной стороны, неясностью распределения напряжений в мерзлых грунтах на глубине $h_{п.г}$, с другой — недостаточной изученностью физико-механических свойств мерзлого грунта.

При предварительных расчетах можно исходить из предположения справедливости гипотезы плоских сечений, т. е. принимать характер распределения напряжений в мерзлых грунтах по прямым линиям. При этом следует рассмотреть отдельно два случая:

а) опрокидывание вокруг неподвижной точки О (см. рис. 142), когда мерзлый грунт будет работать на разрыв τ; удерживающий момент в этом случае может быть определен по формуле

$$M_\tau \approx \frac{1}{2} ch_{п.г} \left[\delta (\tau_в + \tau_н) + \frac{1}{3} h_{п.г} (\tau_в + 2\tau_н) \right], \qquad (160)$$

где $\tau_в$ и $\tau_н$ — сопротивление мерзлого грунта на разрыв в соответствующих точках при данной расчетной температуре окружающей среды;

б) точка О подвижна, опрокидывание системы «грунт — плита» возможно вокруг точки, находящейся на некоторой глубине, т. е. на линии *пп* (см. рис. 142); в этом случае

$$M_\sigma \approx \frac{ch^2_{п.г}}{12} \left(\sigma'_c + \sigma'_p \right), \qquad (161)$$

где σ_c' и σ_p' — предельные напряжения мерзлого грунта на сжатие и растяжение при данной расчетной температуре окружающей среды.

В расчет рекомендуется принимать минимальное значение M_c, полученное в соответствии с формулами (160) — (161).

В конечном итоге весь расчет на устойчивость бетонного покрытия при вырывающем действии льда сводится к определению или к проверке заданных размеров плит, т. е. δ и b, по обычному условию

$$K = \frac{\Sigma M_{уд}}{M_{опр}}, \qquad (162)$$

где $\Sigma M_{уд}$ — сумма моментов удерживающих сил;

$M_{опр}$ — опрокидывающий момент.

Величина опрокидывающего момента устанавливается по формулам (150)—(151). Сумма моментов удерживающих сил определится как

$$\Sigma M_{уд} = M_п + M_Q + M_c - Rl_п \cos\alpha. \qquad (163)$$

Рассмотрим пример расчета для случая повышения уровня воды и наличия припая льда в верхней части бетонного покрытия ($l_в$=0). Принимаем следующие исходные данные: $t_л$=0,40 *м*; $l_п$=1,26 *м*;

$h_{п.г}=0{,}70$ *м*; $m=3{,}0$; $\cos\alpha=0{,}95$; $\gamma_п=2{,}4$ *т/м*^{3}; $\gamma_{гр}=1{,}8$ *т/м*^{3} (песчаный грунт); расчетная температура воздуха на момент повышения уровня воды $\theta=-10°$C. Требуется определить коэффициент запаса на устойчивость для случая $\delta=0{,}1$ *м* и $b=3{,}5$ *м*, считая, что подъем воды проходит медленно ($v_{ур}\leqslant 3$ *см/час*).

Согласно данным Б. Д. Карташкина [31], при $\Theta=-10°$C можно принять $\sigma_л=135$ *т/м*^{2}; тогда по формуле (150) получаем $M_{опр}=3{,}6$ *т/м*. По данным А. Н. Комаровского[1], для σ_c и σ_p можно принять: $\sigma_c=252$ *т/м*^{2} (при $\theta=-10°$C); $\sigma_p=54$ *т/м*^{2} (при $\theta=0°$C); тогда по формуле (151) получаем $M_{опр}=3{,}54$ *тм*.

Сопоставляя полученные значения для $M_{опр}$, можно установить их незначительное отклонение, в дальнейшем расчете принимаем $M_{опр}=3{,}6$ *тм*.

Принимая $E_л=400\,000$ *т/м*^{2} и $I_п=\frac{0{,}40^3}{12}=0{,}0053$ *м*^{4}, т. е. $E_л I_л=2120$ *т/м*^{2} по формуле (153), имеем $R=0{,}73$ *т*. По формулам (158) и (159) при принятых исходных условиях можно получить

$$M_п = 0{,}82 \ тм, \quad M_Q = 0{,}08 \ тм.$$

Величину предела прочности мерзлых грунтов (для песка) на разрыв τ, на сжатие σ_c' и на растяжение σ_p' определяем по данным Н. А. Цытовича[2], как для случая медленного приложения нагрузки:

$$\tau_н' \approx 0{,}2 + 0{,}4 \ (\theta)^0 \ кг/см^2.$$

Принимая температуру грунта на глубине $y = h_{п.г}$ $\theta=0°$, получаем $\tau_н=2$ *т/м*^{2}; на поверхности грунта температуру окружающей среды принимаем $\theta=-10°$, тогда $\tau_в=42$ *т/м*^{2}. При этих данных по формуле (160) можно получить $M_\tau=5{,}30$ *тм*.

При определении величины σ_c' для случая медленного приложения нагрузки, согласно данным Цытовича, принимаем

$$\sigma_c' = \frac{1}{10}\sigma_{вр},$$

где $\sigma_{вр}$ — предел прочности мерзлого песка при сжатии по графику (рис. 11, стр. 51, работы Цытовича);

$$\sigma_p' \approx 0{,}4\,\sigma_c'.$$

Тогда можно получить:

$$\sigma_c' = \frac{1250}{10} = 125 \ т/м^2 \ (при \ \theta = -10°C)$$

и

$$\sigma_p' = 0{,}4 \cdot \frac{550}{10} = 22 \ т/м^2 \ (при \ \theta = 0° C).$$

---

[1] А. Н. Комаровский, Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод, 1932.

[2] Н. А. Цытович, Основание и фундаменты на мерзлых грунтах, изд-во АН СССР, 1958.

По формуле (161) имеем

$$M_{\sigma}' = 6 \ тм,$$

в расчет принимаем

$$M_c = M_{\tau} = 5{,}3 \ тм.$$

Сумму удерживающих моментов определяем из формулы (163):

$$\Sigma M_{уд} = 0{,}82 + 0{,}08 + 5{,}3 - 0{,}73 \cdot 1{,}26 \cdot 0{,}95 = 5{,}3 \ тм.$$

Тогда коэффициент запаса на устойчивость для рассматриваемого примера по формуле (162) будет

$$K = \frac{5{,}3}{3{,}6} = 1{,}47.$$

В заключение следует обратить внимание на исключительную роль работы мерзлого грунта в увеличении устойчивости покрытия откоса. Предложенная методика расчета бетонного покрытия на устойчивость от воздействия ледяного припая в качественном отношении была проверена по данным натурных исследований на Яхромском водохранилище.

§ 38. К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ ОТКОСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛЕДЯНОГО ПРИПАЯ

Практика эксплуатации бетонных покрытий откосов, работающих при ледяном припае и колебаниях уровня воды, показывает, что в отдельных случаях нарушалась не только их устойчивость, но и прочность.

При расчете бетонного покрытия на прочность от воздействия ледяного припая, как и в рассмотренном выше случае расчета на устойчивость, к внешним силам следует отнести изгибающий момент M и вертикальные усилия R.

Так как при снижении уровня воды величина прогиба ледяного покрова f может быть меньше величины снижения уровня воды ΔH, вертикальное усилие (см. рис. 139) может оказаться больше по сравнению с повышением уровня воды. В силу этого при рассмотрении данного вопроса следует принимать случай понижения уровня воды.

Таким образом, при расчете плит на прочность от воздействия ледяного припая для определения вертикального усилия следует воспользоваться формулой (146) и величину изгибающего момента определять по формулам (150), (151), принимая при этом максимальное значение момента.

Особенность рассматриваемой задачи состоит в том, что здесь по существу имеется весьма сложная система — плита — грунт — ледяной покров, которую следует отнести к конструкции на упругом основании с переменной жесткостью.

В действительности на участке плиты ниже точки *2* (рис. 144) жесткость балки (плиты) определяется собственным сечением. На участке выше точки *2* жесткость плиты может определяться или только собственным сечением (в случае отсутствия здесь примерзания грунта к плите) или жесткостью приведенного сечения плита — грунт (если имеется примерзание грунта к плите). В более

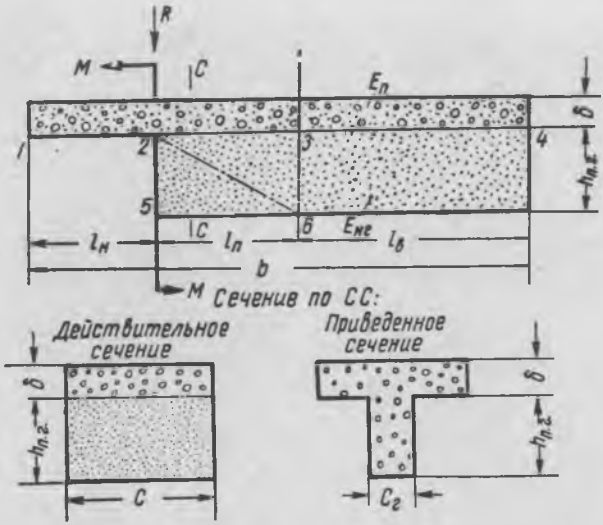


Рис. 144. Расчетная схема для системы плита — грунт

сложных условиях находится участок плиты на длине припая $l_п$; здесь, с одной стороны, имеется примерзание грунта к плите, с другой — примерзание льда к плите.

Для определения расчетного сечения системы на участке $l_п$ следует иметь в виду, что в момент достижения максимального значения нагрузки от ледяного покрова первая трещина во льду всегда появляется в месте припая льда, т. е. проходит примерно по вертикали через точку *2*. Зона же промерзшего грунта под плитой на данной длине, согласно полученным измерениям на опытных участках, ограничивается примерно прямой линией *2—6*. Учитывая отмеченные обстоятельства, а также и то, что модули упругости льда и промерзшего грунта отличаются весьма незначительно, для последующих расчетов расчетное сечение на длине $l_п$ можно определять жесткостью плиты и промерзшего грунта.

На основании изложенного рассматриваемая задача может быть приведена к расчетной схеме, показанной на рис. 144: нагрузка в виде сосредоточенного момента *M* и вертикальной силы *R*, приложенные в сечении, проходящем через точку *2*, т. е. по линии воз-

можной трещины во льду. При этом ширина приведенного сечения понизу определяется как

$$c_з = c\,\frac{E_{п.г}}{E_п},$$

где c — расчетная ширина, равная 1 *м*;

$E_{п.г}$ — модуль упругости промерзшего грунта;

$E_п$ — то же, бетонной плиты.

К сожалению, насколько нам известно, до настоящего времени отсутствует точное решение (по теории упругости) задачи балок с переменной жесткостью на упругом основании, загруженных изгибающим моментом. Решение проф. Б. Н. Жемочкина [16] соответствует случаю загружения данной системы в виде сосредоточенных сил.

Однако для предварительных расчетов мы считаем возможным в данном случае нагрузку от изгибающего момента заменить сосредоточенными силами, после чего всю систему рассчитывать по методу Б. Н. Жемочкина.

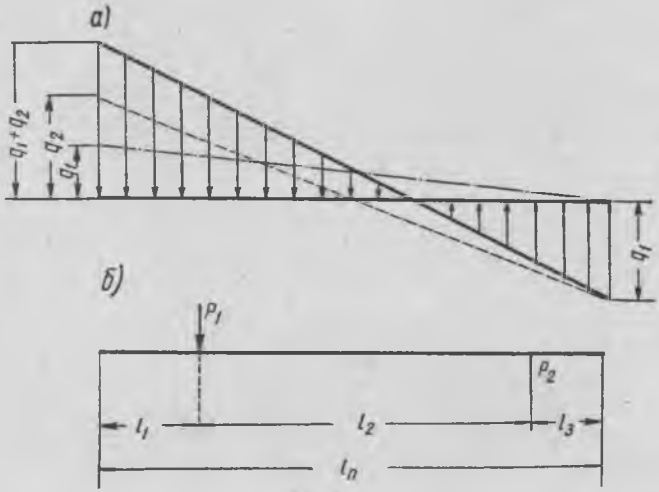


Рис. 145. Расчетная схема нагрузок от воздействия ледяного припая: *а*—суммарная нагрузка; *б*—расчетная нагрузка

В этом случае нагрузка от M и R заменяется треугольными эпюрами по всей длине припая $l_n = \frac{l_з}{\sin\alpha}$ (рис. 145, *а*) с ординатами

$$\left.\begin{aligned} q_1 &= \frac{6M}{l_n^2} \\ \text{и} \quad q_2 &= \frac{2R}{l_n} \end{aligned}\right\}. \qquad (164)$$

Суммарная нагрузка в левой части сечения определяется сосредоточенной силой p_1, в правой — p_2 (рис. 145, *б*). Исходя из принятых условий можно получить следующие зависимости:

$$p_1 = \frac{1}{2} l_n \frac{(q_1+q_2)^2}{2q_1+q_2}$$

и

$$p_2 = \frac{1}{2} l_n \frac{q_1^2}{2q_1+q_2} \qquad (165)$$

Точки приложения указанных сил определяют из следующих выражений:

$$l_1 = \frac{1}{3} l_n \frac{q_1+q_2}{2q_1+q_2}$$

$$l_2 = \frac{2}{3} l_n \qquad (166)$$

$$l_3 = l_n - (l_1 + l_2)$$

Для сравнительной оценки расчетных и фактических напряжений в бетонном покрытии приведем результаты натурных исследований, полученные на опытном участке Яхромского водохранилища.

Исходные данные, соответствующие натурным условиям, следующие: толщина плиты $\delta = 0{,}13$ *м*; размер плиты по откосу $b = 6$ *м*; толщина льда $t_л = 0{,}58$ *м*; ширина припая $l_п = 1{,}56$ *м*; $m = 2{,}5$; $\cos\alpha = 0{,}93$; $\sin\alpha = 0{,}371$; $l_н = 1{,}50$ *м*; $l_в = 2{,}94$ *м*; глубина промерзания грунта под плитой $h_{п\,г} = 0{,}50$ *м*; модуль упругости бетонной плиты $E_п = 340\,000$ *кг/см²*; то же, промерзшего грунта $E_{п.г} = 310$ *кг/см²*; то же, льда $E_л = 40\,000$ *кг/см²*; ширина водохранилища в районе опытного створа $B > 1{,}5$ *км*; $E_л I_л = 6\,500$ *тм²*.

Во время экспериментального спуска воды из водохранилища (февраль 1958 г.) скорость снижения была $v_{ур} = 3$ *см/час*; при этом продольная трещина во льду появилась после снижения уровня воды на $\Delta H \approx 7{,}3$ *см*; максимальный прогиб поверхности ледяного покрова перед образованием трещины во льду, по данным нивелирования, был равен $f = 5{,}2$ *см*. Заметим, что в отличие от опытов 1959 г., при которых скорость снижения была $v_{ур} = 1{,}5$ *см/час* и $\Delta H = f = 0{,}04$ *м*, т. е. в этом случае при большей скорости снижения ΔH оказалась равной f.

Учитывая, что во время опытов были зафиксированы величины ΔH и f для определения величины изгибающего момента M и вертикального усилия R, воспользуемся формулами (149) и (146), принимая $\psi = 1{,}4$. Предварительно по формуле (152) определим $l = 27{,}6$ *м*. Тогда согласно исходным данным, можно получить: $M = 6$ *тм*, $R = 1$ *т*. Интересно заметить, что во время натурных исследований опытным путем был определен предел прочности льда на изгиб, который оказался равным $\sigma_л = 11$ *кг/см²*; при этих

данных, с учетом формулы (150), можно получить $M=6{,}2$ *тм*, что весьма близко к полученной теоретической величине.

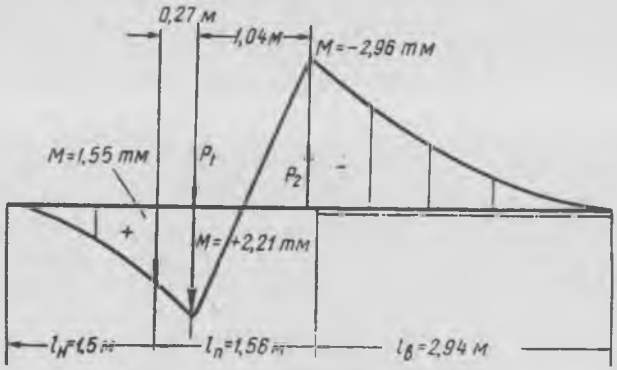


Рис. 146. Эпюра изгибающих моментов по расчетным данным

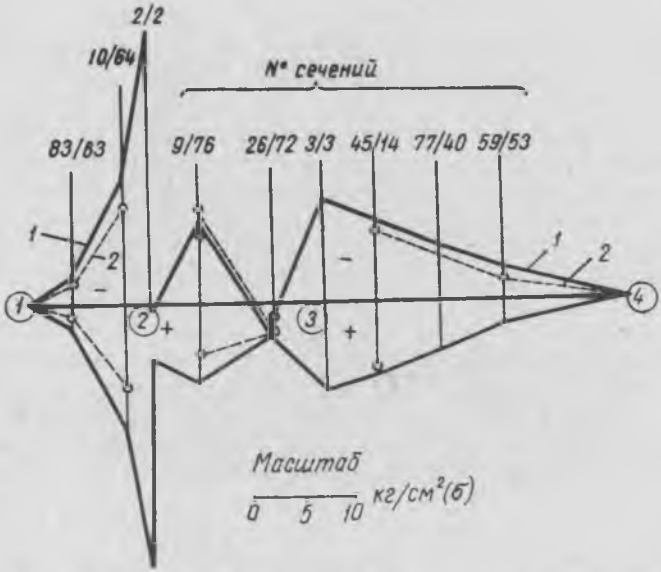


Рис. 147. Сравнение расчетных и фактических напряжений в бетонной плите (на уровне расположения датчиков): *1*— расчетное; *2*— фактическое

Тогда, в соответствии с формулами (164)÷(166), находим: $q_1=14{,}8$ *т/м*; $q_2=1{,}28$ *т/м*; $p_1=6{,}5$ *т*; $p_2=5{,}3$ *т*; $l_1=0{,}27$ *м*; $l_2=1{,}04$ *м*, $l_3=0{,}25$ *м*.

Весь последующий расчет ведем по методу Б. Н. Жемочкина, принимая жесткость плиты на участке $l_н E_п I_п=620$ *тм*² и приведен-

Таблица 27

Сводные данные расчетных и фактических напряжений в бетонной плите
(на уровне расположения датчиков)

№ сечения	Расчетный изгибающий момент в *тм*		Расчетные напряжения в крайних волокнах плиты в *кг/см²*		Расчетное напряжение на уровне датчиков в *кг/см²*		Фактическое напряжение на уровне датчиков $\sigma_{факт}$ в *кг/см²*				Расхождение в % $\frac{\sigma_{рас}}{\sigma_{факт}}$	
							верхнего		нижнего			
	M	M_n	верхних	нижних	верхнего	нижнего	№	$\sigma_{факт}$	№	$\sigma_{факт}$	верхний датчик	нижний датчик
82/63	0,13	0,13	—4,60	+4,60	—2,50	+2,50	82	—2,30	63	+1,70	1,09	1,47
10/64	0,64	0,64	—22,7	+22,7	—12,2	+12,2	10	—9,80	64	+9,40	1,25	1,30
Слева 2—2	1,39	1,39	—50,0	+50,0	—27,0	+27,0	—	—	—	—	—	—
Справа	1,39	—	0,0	+6,65	+1,55	+5,15	—	—	—	—	—	—
9/76	1,23	—	—14,5	+14,5	—7,90	+7,90	9	—8,7/—7,1	76	+6,00	0,91/1,12	1,32
26/72	0,92	—	+5,50	—0,45	+4,10	+0,92	26	+3,8/+2,5	72	—	1,08/1,64	—
3—3	2,12	0,485	+17,3	—17,3	+9,40	—9,40	—	—	—	—	—	—
45/14	1,51	0,415	+14,7	—14,7	+7,95	—7,95	45	—7,80	14	—	—	1,02
77/40	1,01	0,280	+10,0	+5,40	—5,40	—5,40	47	—	40	—5,15	1,05	—
59/53	0,42	0,116	+4,15	—4,15	+2,24	—2,24	59	—2,45	53	—	—	0,92

Примечание: + растяжение; — сжатие

ную жесткость сечения на остальной части плиты $E_n I_{пр} = 41\,000\ тм^2$. Результаты расчетов представлены на рис. 146 в виде эпюры изгибающих моментов.

Результаты расчетов по всем сечениям плиты, где были установлены датчики, а также фактические величины напряжений сведены в табл. 27, по данным которой построены сравнительные эпюры (рис. 147). Заметим, что на участке *3—4* примерзание плиты к основанию отсутствует.

Из рассмотрения полученных материалов прежде всего можно установить удовлетворительные совпадения расчетных и фактических величин напряжений; максимальные расхождения до 47% в данной схеме можно считать вполне допустимыми. Заметим, что данные по датчику № 26 расходятся с расчетными до 64%, однако это расхождение связано с тем, что в опытах 1959 г. скорость снижения уровня воды в водохранилище по сравнению с опытами 1958 г. была в полтора раза меньше.

Характерно, что напряжения в бетонной плите наибольшие в сечении, проходящем через точку пересечения нижней кромки льда с откосом (сечение *2—2* на рис. 147). Это сечение является расчетным.

В заключение следует отметить, что приведенные фактические величины напряжений в бетонной плите соответствуют скоростям снижения уровней воды в пределах $1 \div 3$ *см/час*. При меньших скоростях снижения уровня воды следует ожидать уменьшения напряжений в бетонной плите, что в конечном итоге связано с релаксацией льда. Для разрешения этого вопроса требуется постановка дальнейших натурных исследований на нескольких опытных участках при различных исходных условиях.

ГЛАВА X

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

§ 39. НЕКОТОРЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ОТКОСОВ

При конструировании бетонных покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений и судоходных каналов возникает необходимость в разрешении ряда вопросов, к которым, в частности, относится выбор толщины и планового размера отдельных плит; типа и размера обратного фильтра и подстилающего слоя; расположения арматуры в плитах; устройства упора; требование к основанию и т. п.

Правильное решение перечисленных и других вопросов, связанных с выбором конструкции бетонного покрытия, вполне естественно, может быть получено при учете конкретных условий проектирования, т. е. с учетом исходных данных для проектирования; условий производства работ; условий эксплуатации сооружения. Вместе с тем имеется ряд общих положений, которые должны быть учтены при любых условиях проектирования бетонных покрытий.

Крепления откосов земляных сооружений бетонными или железобетонными плитами могут быть нескольких типов, в том числе плитами, бетонируемыми на месте (монолитные плиты); сборными плитами, замоноличенными в карты по контуру; железобетонными коврами (тюфяками) и т. п.

При выборе типа бетонного покрытия необходимо предусматривать следующие обстоятельства: бетонные плиты должны иметь наибольшие размеры в плане (так как они работают в основном за счет собственного веса) и надежную связь с телом откоса; следовать деформациям откоса; воспринимать температурно-усадочные напряжения.

При бетонировании плит непосредственно на месте (монолитное покрытие), на откосах судоходных каналов, продольную арматуру рекомендуется пропускать через все плиты, укладываемые вдоль откоса. При такой конструкции улучшается работа покрытия на устойчивость, достигается лучшее сопряжение и исключается возможность образования выступающих граней.

Бетонное (слабо армированное) покрытие откосов рекомендуется применять при бетонировании плит на месте, когда на них не воздействует ледяной припай. Количество арматуры для этих плит определяется конструкцией продольных связей.

Размеры монолитного покрытия назначают из условия устойчивости под действием волновых и ледовых нагрузок. Сечение расчетной арматуры (расположенной перпендикулярно урезу воды) определяется по максимальному изгибающему моменту от перечисленных нагрузок.

На основе опыта проектирования, строительства и эксплуатации железобетонных покрытий откосов земляных гидротехнических сооружений и судоходных каналов представляется возможным дать следующие приближенные рекомендации:

а) для откосов земляных плотин и волнозащитных дамб можно рекомендовать такие соотношения между $\frac{b}{\delta}$: с учетом наименьшей стороны плиты $b_м$ (укладываемой вдоль наклонной части откоса) $\frac{b_м}{\delta} \leqslant 20 \div 25$; с учетом наибольшей стороны плиты $b_б$ (укладываемой вдоль откоса, параллельно урезу воды) $\frac{b_б}{\delta} \leqslant 25 \div 30$; при таком соотношении для обычных условий при $2h = 2{,}5 \div 3{,}5$ *м* размер плиты в плане будет в пределах $b \approx 8 \div 12$ *м*;

б) для откосов судоходных каналов можно рекомендовать $\frac{b_м}{\delta} \leqslant 25 \div 30$; $\frac{b_б}{\delta} \leqslant 30 \div 35$, что при обычных условиях будет соответствовать размеру плиты в плане в пределах $b \approx 3 \div 5$ *м*.

По длине откоса крепление монолитными плитами делится температурно-усадочными швами на секции. При бетонировании откосов судоходных каналов опалубка может оставляться на месте в качестве уплотнения швов, с дополнительной пропиткой ее битумом.

Сборные железобетонные плиты с применением обычной и предварительно напряженной арматуры могут быть двух типов: 1) максимальных размеров по условиям транспортировки и укладки на откосе, замоноличенных в укрупненные карты, которые разделяются между собой деформационными швами и 2) незамоноличенные сборные, разделенные деформационными швами и уложенные на сплошном фильтре.

Лимитирующими условиями при выборе плановых размеров сборных плит являются транспортабельность плит (при перевозке до места укладки) и возможность укладки их на откосе кранами при значительных вылетах стрелы. Вне зависимости от этих условий и расчетных величин основных нагрузок размер отдельных сборных плит по откосу (перпендикулярно урезу воды) должен быть не менее $2 \div 3$ *м*.

При расчете толщины бетонного покрытия по условию устойчивости плановые размеры принимают равными замоноличенной

карте. Причем размеры замоноличенных карт могут быть увеличены за счет допущенных отрицательных изгибающих моментов в покрытии, как это принято в проектах Гипроречтранса.

Крепление откоса сборными незамоноличенными плитами рекомендуется применять в тех случаях, когда откосы в дальнейшем могут подвергаться осадкам. В тех случаях, когда к моменту укладки плит осадка откоса в основном стабилизировалась, рекомендуется применять конструкции из замоноличенных плит.

Вопрос о способе покрытия откоса, т. е. о бетонировании плит на месте или о применении сборных железобетонных плит, должен быть решен на основе специального технико-экономического расчета с учетом условий производства работ и наличия механизмов.

Однако при выборе типа железобетонного покрытия следует иметь в виду следующие достоинства сборного железобетона: качество плит, изготовленных на заводе, всегда выше качества плит, выполненных на месте; применение сборного железобетона снижает трудоемкость работ и создает условия для полной их индустриализации; дает возможность возводить сооружения в зимнее время, не ухудшая качества, сборные плиты лучше воспринимают осадки грунта основания и т. п.

К числу недостатков сборного железобетонного крепления следует отнести: необходимость тщательной планировки откосов для создания лучшего контакта между основанием плиты и откосом во избежание образования выступающих граней плит; трудоемкость работ по соединению плит в карты и замоноличиванию швов; необходимость, в большинстве случаев, устройства сплошного обратного фильтра.

Вопрос о применении сплошного или ленточного фильтра под бетонное покрытие из монолитных или сборных плит следует связать с размером отдельных плит и характеристикой грунта откоса. Как показал опыт эксплуатации больших монолитных плит (с размером $b > 4 \div 5$ *м*), можно ограничиться применением ленточного фильтра, т. е. фильтра, располагаемого только по швам. Однако при применении ленточного фильтра следует предусмотреть устройство на остальной части откоса втрамбованного слоя из гальки или щебня на толщину до $5 \div 10$ *см*.

Окончательное решение вопроса о выборе типа фильтрующей подготовки, т. е. сплошным слоем или ленточными фильтрами, следует связать с технико-экономическими и производственными условиями.

Вместе с тем устройство сплошного обратного фильтра необходимо почти для всех типов покрытий из сборных плит, а ленточного фильтра — для монолитных плит. Кроме того, устройство сплошного фильтра желательно во всех случаях, когда откосы сложены из пучинистых грунтов.

Учитывая своеобразный характер эпюр суммарных волновых нагрузок на бетонное покрытие откосов земляных плотин в стадии

проектирования следует рассмотреть варианты переменного сечения плиты по откосу.

Во всех случаях, исходя из условий долговечности бетонного покрытия, толщина его не должна быть меньше 10 *см*. В случае применения сборных железобетонных плит с предварительным напряжением арматуры толщина покрытия должна быть принята в соответствии с данными экспериментальных исследований.

Бетонное покрытие откоса желательно укладывать с двойной арматурой, так как оно работает со знакопеременной нагрузкой как от волнового воздействия, так и от ледовой нагрузки, кроме того, возможны неравномерные осадки тела земляного полотна.

При проектировании бетонного покрытия откоса следует иметь в виду, что в тех случаях, когда укладка плит производится непосредственно после устройства или в процессе возведения тела земляного сооружения, из-за последующей неравномерной осадки в бетонном покрытии могут появиться трещины и раскрытия швов между плитами. Это обстоятельство, с одной стороны, может вовсе исключить экранирующий эффект от бетонного покрытия земляной плотины, с другой — приводит к необходимости несколько уменьшить соотношение $\frac{b}{\delta}$ против указанных выше величин.

Крепление откосов бетонными плитами весьма желательно производить после некоторого перерыва, отделяющего эту работу от работы по возведению тела земляного полотна. Это обстоятельство особенно следует иметь в виду при возведении земляных дамб, состоящих из связных грунтов.

Опыт эксплуатации бетонных покрытий в виде отдельных тюфяков, т. е. покрытий из плит небольших размеров, соединенных между собой шарниром, свидетельствует, что такое покрытие в ряде случаев может оказаться весьма рациональным. При такой конструкции обеспечивается полная гибкость, т. е. исключается опасность появления трещин в бетонных плитах из-за неравномерной осадки тела земляной насыпи.

Вместе с тем следует заметить, что устройство таких тюфяков, равно как и разного рода дырчатых плит, приводит к необходимости значительного увеличения толщины обратного фильтра, причем в виде сплошного многослойного фильтра. Таким образом, при рассмотрении возможных вариантов с бетонными тюфяками и дырчатыми плитами особое внимание следует обратить на экономическую сторону вопроса.

При конструировании бетонного покрытия откоса особое внимание следует обратить на устройство надежного упора в низовой части; такой упор предохраняет откос от размыва и сползания покрытия. Конструкция и размеры упора определяются с учетом исходных данных проектирования, а также принятой отметки низа основного покрытия.

При выходах грунтовых вод на откосы судоходных каналов должны быть разработаны специальные мероприятия, связанные с

преграждением пути и сбросом этих вод. В случае, если выклинивание грунтовых вод происходит на сравнительно небольших отметках, по сравнению с уровнем воды в канале, для нормального отвода их следует предусмотреть обязательное устройство сплошного обратного фильтра под бетонным покрытием.

§ 40. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И СУДОХОДНЫХ КАНАЛОВ

А. Пример расчета бетонного покрытия откоса земляной плотины

Исходные данные для расчета: напорный откос плотины состоит из среднезернистых песков $d_{гр}=0{,}3$ *мм*; заложение откоса 1 : 3 ($m=3$); отметка максимального статического уровня 26 *м* ($H_{макс}=26$ *м*); минимального статического уровня 21 ($H_{мин}=21$ *м*);высота волны $2h=3$ *м*; длина волны $2L=45$ *м*.

Для данных условий требуется: а) установить границы крепления откоса; б) определить толщину бетонного покрытия из условия устойчивости; в) выбрать тип и рассчитать обратный фильтр; г) определить суммарную нагрузку на бетонное покрытие, необходимую для расчета его на прочность.

1. Для определения высоты наката волны принимаем $K_o=1{,}25$, $K_в=1{,}11$ [по формуле (42)]; тогда по формуле (45)

$$h_в = 1{,}25 \cdot 1{,}11 \cdot 1 \cdot 3 \approx 4{,}2 \text{ м}.$$

Принимая колебание динамического уровня 0,6 *м*, верхнюю границу покрытия можно определить из условия (111)

$$h_o = 1{,}1 \cdot 4{,}2 + 0{,}6 = 5{,}2 \text{ м},$$

при этом отметка верха крепления будет $26+5{,}2=31{,}2$ *м*.

Высота основного (бетонного) покрытия в подводной части будет определяться по условию (113), при $\varepsilon=1{,}1$, $h_{но}=1{,}1\times4{,}2=4{,}6$ *м*, т. е. высота крепления должна доходить до отметки $21-4{,}6=16{,}4$; на этой отметке устраиваем горизонтальную берму шириной $б=3$ *м*. Так как верхняя отметка 31,2 была вначале определена без учета влияния бермы, то для уточнения по формуле (43) определяем

$$K_б = 0{,}88 \left(\text{при } \frac{б}{2h} = 1 \text{ и } \frac{t_o}{H} = \frac{26-16{,}4}{26} = 0{,}37\right);$$

при этих данных уточненная высота наката волны будет

$$h_в = 1{,}25 \cdot 1{,}11 \cdot 0{,}88 \cdot 3 = 3{,}7 \text{ м}.$$

Тогда окончательно принимаем

$$h_o = 1{,}1 \cdot 3{,}7 + 0{,}6 = 4{,}7 \text{ м},$$

т. е. отметка верха покрытия будет $26+4{,}7=30{,}7$ *м*. Отметку низа основного покрытия не уточняем, оставляя ее равной 16,4 *м*.

2. Для определения размера облегченного покрытия воспользуемся соображениями, приведенными в § 30, принимая $v_д=0{,}37$ *м/сек* (при $d=0{,}3$ *мм*); по (115) находим $\bar{v}=0{,}37$; по графику (см. рис. 130) получаем $u=1{,}9$ и, наконец, по формуле (116) находим

$$z_{кр} = \frac{22{,}5}{3{,}14} \cdot 1{,}9 = 13{,}6 \text{ м}.$$

Таким образом, облегченное покрытие откоса должно быть выполнено с отметки 16,4 *м* до отметки 21—13,6 = 7,4 *м*, т. е. на высоте 16,4—7,4 = 9*м*. Облегченное покрытие откоса в пределах указанных отметок может быть выполнено в виде пригрузки (шлейфа) откоса карьерной мелочью (рис. 148а), которая одновременно будет защищать низовой откос в период наполнения водохранилища.

3. Максимальную толщину бетонного покрытия, необходимую по условию устойчивости, определяют по формуле (61), принимая $k=0,11$; $\gamma_п = 2,3$ $т/м^3$ и размер плиты по откосу $b=10$ *м*

$$\delta = 0,11 \cdot 3 \sqrt{\frac{1}{2,3-1} \cdot \frac{45}{3 \cdot 10}} \approx 0,35 \text{ м}.$$

Согласно полученным данным по откосу укладываем четыре плиты по 10 *м* и одну плиту наверху 5 *м*, толщину которой можно несколько уменьшить. Горизонтальную берму защищаем одной плитой (см. рис. 148).

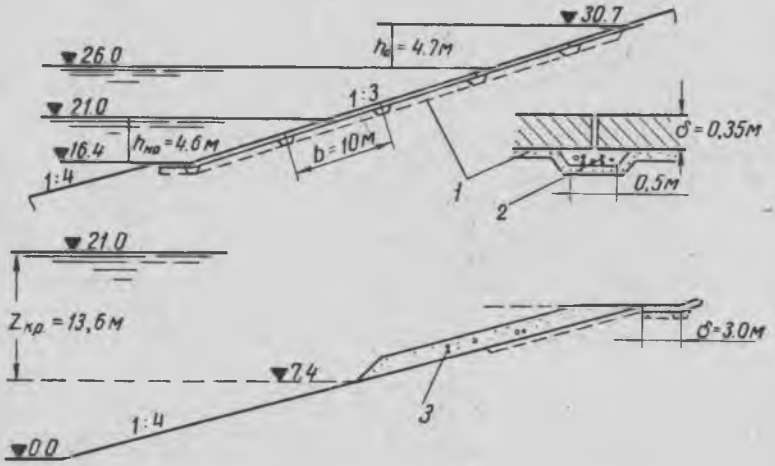


Рис. 148а. Схема крепления напорного откоса земляной плотины (к примеру расчета):

1—гравийно-песчаная смесь $d=0,28$—$0,63$ *см*; *2*—гравийно-песчаная смесь $d=2,5$ *см*, $t=10$ *см*; *3*—карьерная смесь

4. Учитывая относительно большой размер плит в плане, принимаем ленточный фильтр, располагая его под горизонтальными и вертикальными швами.

В качестве примера толщину шва между плитами принимаем $t_ш=1,5$ *см*, тогда, исходя из выражения (139), минимальный размер частиц верхнего слоя фильтра получаем $d_1 \geqslant 2,5$ *см*. При однослойном фильтре необходимую толщину определяем по формуле (137), при $\varphi = 3,1$ (см. график на рис. 135), для $m=3$ и $2h=3$ *м*.

$$t = 2,5 \cdot 4,75 \ln\left(\frac{3,1}{12} \cdot \frac{2,5}{0,03}\right) = 37 \text{ см}.$$

Полученная толщина однослойного фильтра практически вполне приемлема. Если принять двухслойный фильтр при $d_1=2,5$ *см* и $t_1=10$ *см*, то для частиц второго слоя по формуле (136) будем иметь

$$d_2 = \frac{3,1}{12} \cdot 2,5 e^{-0,21 \frac{10}{2,5}} = 0,28 \text{ см}.$$

Расчетная толщина второго слоя (137)

$$t_2 = 0,28 \cdot 4,75 \ln \left(\frac{3,1}{12} \cdot \frac{0,28}{0,03} \right) \approx 1 \text{ см}.$$

Принимая $t_2=5$ *см*, для определения верхнего предела частиц второго слоя, согласно формуле (135), имеем

$$d_2 = \frac{2}{3,1} \cdot 0,03 e^{0,21 \frac{5}{d_2}},$$

откуда подбором находим $d_2=0,63$ *см*. Таким образом, при принятой толщине второго слоя $t_2=5$ *см* размер частиц этого слоя может быть принят в пределах $d_2=0,28-0,63$ *см*.

Интересно заметить, что если по фракционному составу имеются частицы $d_2=0,63$ *см*, то при той же толщине первого слоя $t=10$ *см* размер наибольших частиц этого слоя может быть определен из выражения (135):

$$d_1 = \frac{12}{3,1} \cdot 0,63 e^{0,21 \frac{10}{d_1}},$$

откуда подбором находим $d_{1макс}=4$ *см*.

5. Максимальное волновое давление на откосе определяется по формуле (36) $p_{макс}=10,6$ *т/м²*, точка приложения максимального давления (37) $e_0 \approx 1,4$ *м*. Необходимые параметры для построения эпюры избыточного давления определяют из условия (40):

$$z = 7,2 \text{ м}; \quad a = 1,45 \text{ м};$$
$$p_н = 5 \text{ т/м}^2; \quad p_в = 2,5 \text{ т/м}^2.$$

Схема построения эпюры избыточного давления на бетонное покрытие, которое принимается за суммарную расчетную нагрузку, для случая удара волны в центр плиты показана на рис. 148 б.

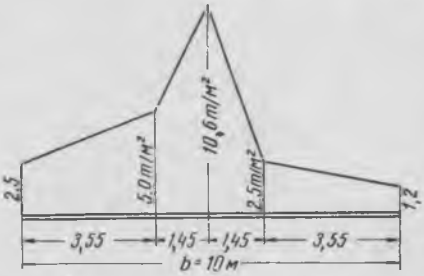


Рис. 148б. Расчетная нагрузка на бетонную плиту (для расчета на прочность)

Имея данную эпюру нагрузок, дальнейший расчет бетонного покрытия на прочность производим по обычным методам строительной механики, как для конструкций на упругом основании. В результате этого расчета в конечном итоге должна уточниться принятая толщина бетонного покрытия и определиться необходимый процент армирования.

Б. Пример расчета бетонного покрытия откоса судоходного канала

Требуется рассчитать бетонное покрытие откоса судоходного канала при следующих исходных данных: ширина канала понизу 32 *м*; заложение откосов 1 : 4 от дна канала (отметка которого условно принята за нуль) до отметки 3,50 и 1 : 3 от отметки 3,50 *м* и выше; грунт откоса канала — разнозернистый песок с $d_{50гр}=0,20$ *мм*; отметка нормального судоходного горизонта 5 *м*, колебание динамического горизонта $\Delta h_д \pm 10$ *см*.

Расчетное судно имеет следующие размеры: длина $l=72$ *м*; ширина по миделю $b=8,25$ *м*; осадка $t=1,43$ *м*; расчетную скорость судна принимаем $v=18$ *км/час*$=5$ *м/сек*.

1. Размеры судовых волн определяем для случая $H=5$ *м*, при $\Omega=266$ *м*², $\mathfrak{W}=11,8$ *м*², $n=22,6$ и $B_0=70$ *м*; тогда по формулам (83) и (84) имеем $2h=1,25$ *м*; $2L=12,7$ *м*. Высота наката волны на откос при данных размерах волны и $m=3$ в соответствии с формулой (94) будет $h_в \approx 1,30$ *м*; максимальный откат волны с откоса $h_c \approx 1,1$ *м*.

2. С учетом колебания динамического уровня отметка верха бетонного покрытия будет $5,1+1,3=6,4$ *м*. Нижнюю границу основного покрытия, в соответствии с условием (112), ограничиваем на отметке $4,9-1,1$ $h_в \approx 3,50$ *м*. Нижняя граница облегченного покрытия определяется в соответствии с указанием § 30, принимая $v_д=0,32$ *м/сек* (при $d=0,20$ *мм*) по формуле (115) имеем $v=0,41$, по графику (см. рис. 130) находим $u=1,82$, тогда критическая глубина (116) будет

$$z_{кр} = \frac{6,35}{3,14} \cdot 1,82 = 3,6 \text{ м};$$

при этих данных отметка низа облегченного покрытия будет

$$4,9 - 3,6 = 1,3 \text{ м}.$$

3. Для облегчения работы крепления считаем рациональным зону непроницаемого покрытия ограничить отметкой $4,9 - h_c=3,8$ *м*, тогда общая длина непроницаемого бетонного покрытия по откосу в пределах отметок $3,8 \div 6,2$ *м* будет $b=8,2$ *м*. В пределах остальной зоны основного покрытия, т. е. в пределах отметок $3,5 \div 3,8$ *м*, поверхность откоса может быть защищена каменной облицовкой или бетонным покрытием с отверстиями.

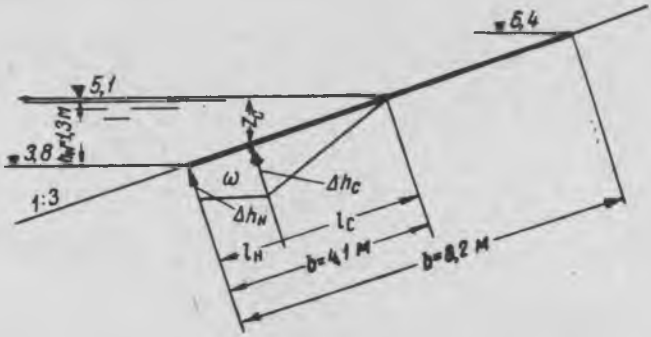


Рис. 149а. Схема построения суммарной эпюры (для расчета на устойчивость

Суммарную нагрузку на бетонные покрытия, необходимую для расчета на устойчивость, определяем в соответствии с указаниями § 30, при $h_н=5,1-3,8=1,3$ *м*. Для пояснения рассмотрим два варианта: плиты расположены на сплошном обратном фильтре и плиты расположены на ленточном фильтре, принимая в обоих случаях размер плиты по откосу $b=4,1$ *м* и $b=8,2$, т. е. перекрывая всю зону крепления откоса либо одной, либо двумя плитами (рис. 149а).

Так как в обоих случаях

$$z_c = 0,68 \times 1,3 \approx 0,8 \text{ м} < h_c = 1,1 \text{ м}$$

и

$$z_c = 0,6 \cdot 1,3 \approx 0,8 \text{ м} < h_c,$$

определение единичных давлений производим по формулам (104) и (107). Результаты расчетов необходимой толщины бетонного покрытия на устойчивость при $\gamma_п=2,3$ *т/м*³ представлены в табл. 28; в этой таблице толщина по условию на опрокидывание определена исходя из определения опрокидывающего момента вокруг верхнего ребра плиты.

Таблица 28

Результаты расчетов бетонного покрытия на устойчивость
(на 1 *пог. м*)

Фильтр	Δh *м*	Δh_c *м*	z_c *м*	l_c *м*	$l_н$ *м*	ω *м*	b *м*	δ *м* на всплывание	δ *м* на опрокидывание
Ленточный	0,22	0,46	0,90	2,84	1,26	1,17	4,1	0,13	0,15
	—	—	—	—	—	—	8,2	0,07	0,10
Сплошной	0,09	0,38	0,80	2,54	1,56	0,85	4,1	0,10	0,11
	—	—	—	—	—	—	8,2	0,05	0,08
	—	—		—					

Из представленных данных следует, что в случае перекрытия всего откоса одной плитой ($b=8{,}2$ *м*), толщина бетонного покрытия соответственно уменьшается. Однако, учитывая необходимое соотношение между шириной и толщиной плиты, в рассматриваемом примере, по-видимому, рациональнее принять ленточный фильтр при толщине нижней плиты $\delta=0{,}15$ *м* и $b=4{,}1$ *м* $\left(\frac{b}{\delta}=27{,}4\right)$; толщина верхней плиты, укладываемой на откосе в пределах отметок $5{,}1 \div 6{,}4$, может быть принята конструктивно равной 0,1 *м*.

Из данных расчетных показателей следует, что наибольшая толщина бетонного покрытия получается из условия на опрокидывание вокруг верхнего ребра плиты. Вследствие этого весьма желательны устройство в основании бетонного покрытия упора и связь бетонного покрытия с этим упором.

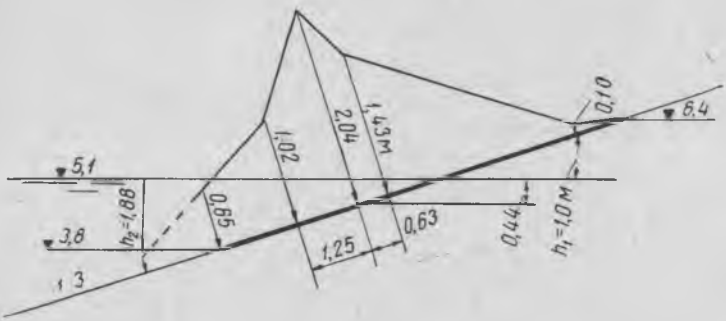


Рис. 149б. Суммарная эпюра давления на бетонное покрытие (для расчета на прочность)

4. Определение суммарного давления, необходимого для расчета плиты на прочность, производим по формулам, приведенным в § 21. При данных исходных величинах получаем:

$$p_{макс}=2{,}04\ т/м^2,\quad p_н=1{,}02\ т/м^2,$$

$$p_в=1{,}43\ т/м^2;\quad e_0=0{,}44\ м;\quad h_1\approx 1\ м;\quad h_2=1{,}88\ м;$$

на рис. 149 б представлена соответствующая эпюра.

5. Расчет обратного фильтра под бетонным покрытием производим по ширине конструктивного шва между плитами $t_ш=1{,}5$ *см*, при этом, согласно условию (139), размер частиц под швами должен быть $d_1=2{,}5$ *см*. Для при-

нятых условий значение коэффициента φ определяем по графику (рис. 130). При $2h=1{,}25$ *м* и $m=3$, $\varphi=1{,}95$. Полученное значение φ соответствует соотношению $\frac{2L}{2h}=15$, для наших условий расчетное значение будет определяться (130)

$$\varphi = 1{,}95 - 0{,}03\,(15 - 10) = 1{,}8.$$

При однослойном фильтре необходимая толщина определится по формуле (137):

$$t = 2{,}5 \cdot 4{,}75 \ln\left(\frac{1{,}8}{12} \cdot \frac{2{,}5}{0{,}02}\right) \approx 35 \text{ см},$$

где 0,02 *см* — размер частиц грунта откоса.

Для уменьшения толщины фильтра рассмотрим двухслойный вариант при следующих условиях: $d_1=2{,}5$ *см*; $t_1=10$ *см*; при этих данных размер частиц для второго слоя определится по формуле (136)

$$d_2 = \frac{1{,}8}{12} \cdot 2{,}5 e^{-0{,}21 \cdot \frac{10}{2{,}5}} \approx 0{,}16 \text{ см}.$$

Тогда расчетная толщина для второго слоя определится так (137):

$$t_2 = 0{,}16 \cdot 4{,}75 \ln\left(\frac{1{,}8}{12} \cdot \frac{0{,}16}{0{,}02}\right) \approx 0{,}16 \text{ см},$$

откуда следует, что устойчивость частиц грунта откоса теоретически будет обеспечена даже при $t_2=d_2$. По производственным соображениям принимаем $t_2=5$ *см*.

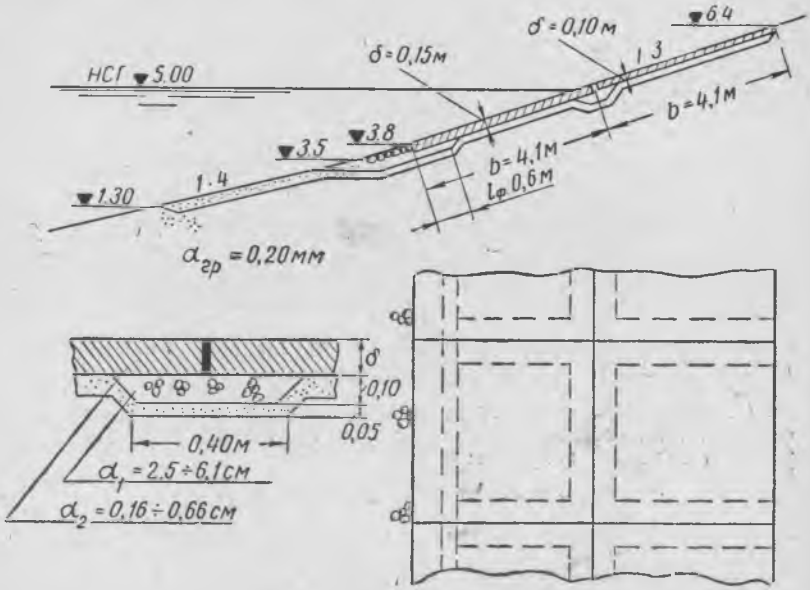


Рис. 149в. Схема бетонного покрытия откоса судоходного канала (к примеру расчета)

При принятой толщине $t_2=5$ *см* размер частиц для второго слоя может быть увеличен до $d_2=0{,}66$ *см*, что определяется из условия (135) в результате решения такого выражения:

$$d_2 = \frac{12}{1{,}8} \cdot 0{,}02 e^{0{,}21 - \frac{5}{d_2}}.$$

В свою очередь при таком размере частиц второго слоя размер частиц первого слоя может быть увеличен до $d=6{,}1$ *см* [что также определяется подбором из выражения (135), при $t_n=10$ *см*; $d_{n+1}=0{,}66$ *см*].

Рассмотренный пример расчета еще раз подтверждает исключительную роль толщины обратного фильтра в подборе состава и размера этого фильтра. Характерно, что при полученных расчетных размерах частиц отдельных слоев обратного фильтра максимальное значение коэффициентов междуслойности будет: на контакте первого слоя

$$\alpha_1 = d_{1\,(макс)} : d_{2\,(макс)} = 6{,}1 : 0{,}16 = 38;$$

на контакте второго слоя

$$\alpha_2 = 0{,}66 : 0{,}02 = 33.$$

Схемы расположения и конструкции обратного фильтра для рассматриваемых вариантов показаны на рис. 149в.

6. Размер каменной облицовки, располагаемой на откосе между отметками 3,5÷3,8 *м*, конструктивно принимаем $D_к=15$ *см*. При этих размерах камня размер частиц подстилающего слоя может быть принят $d_1=3$ *см* (140).

При принятых условиях расчет обратного фильтра под каменным покрытием сводится к нахождению толщины и состава промежуточного слоя между частицами $d_1=3$ *см* и $d_{гр}=0{,}02$ *см*, т. е. для рассмотренного выше условия применительно к швам бетонного покрытия.

В заключение заметим, что при окончательном выборе размера бетонного покрытия в обоих рассмотренных здесь примерах следует сделать проверочный расчет на воздействие ледяного припая согласно указаниям, изложенным в главе IX.

СПИСОК

ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейчук И. Я., О расчете плит, предохраняющих напорные откосы земляных сооружений от разрушения ветровыми волнами, «Гидротехника и мелиорация», № 9, 1955.

2. Богословский Н. Н., Основание и фундаменты, Стройиздат, 1947.

3. Божич П. К., Джунковский Н. Н., Морское волнение и его действие на сооружения, Машстройиздат, 1949.

4. Борисова Л. Н., Экспериментальное исследование волнового воздействия на гидротехнические сооружения откосного типа, Автореферат диссертации, ВНИИ ВОДГЕО, 1955.

5. Боголепов И. А., Основы теории морских волн, Гострансиздат, 1936.

6. Водарский Е. А., Берегоукрепительные и выправительные сооружения на реках и укрепление берегов судоходных каналов, Гострансиздат, 1934.

7. Высоцкий А. Ф., Укрепление откосов насыпей на мостовых переходах через водохранилища, ЦНИИС, 1955.

8. Высоцкий А. Ф. Выбор формулы высоты наката волн на откос, Информационное письмо ЦНИИС, № 4, 1955.

9. Гугняев Я. Э. и др., Плиты с отверстиями для защиты откосов земляных сооружений от воздействия волн, Железнодорожное строительство, № 10, 1952.

10. Джунковский Н. Н., Действие ветровых волн на гидротехнические сооружения, Стройиздат, 1940.

11. Денисова В. А., Устойчивость на всплывание непроницаемых креплений верховых откосов земляных плотин, Гидротехническое строительство, № 11, 1952.

12. Дмитриева А. А. и Бончковская Т. В., Наблюдения на моделях движений, возникающих при фронтальном ударе волны об откос, и некоторые соображения о циркуляциях при косом подходе волны к плоскому наклонному берегу, Труды МГИ, т. IV, 1954.

13. Зайцев Н. Н. и Жуковец А. М., Воздействие волн на сооружения откосного типа, Госстройиздат, 1956.

14. Жуковец А. М., Результаты исследования по определению действий волн на некоторые типы портовых оградительных сооружений, ГИУ ВМС, 1955.

15. Жуковский Н. Е., О спутной волне, Полное собрание сочинений, том IV, 1937.

16. Жемочкин Б. Н. и Синицын А. П., Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании, Стройиздат, 1947.

17. Златоверховников Л. Ф., Определение напряжений в основании массивных гидротехнических сооружений, Труды ЦНИИЭВТа, вып. 1, 1955.

18. Зенкович В. П., Динамика и морфология морских берегов, ч. I, Волновые процессы, Морской транспорт, 1946.

19. Избаш С. В., Гидравлика в производстве работ, Стройиздат, 1949.

20. Истомина В. С., Исследование контактного размыва песчаных и гравелистых грунтов, Стройиздат, 1956.

21. Курлович Е. В., Экспериментальное исследование действия волнения на бетонные покрытия откосов земляных сооружений, Сборник трудов МИСИ, № 20, 1957.

22. Курлович Е. В., К вопросу о назначении границ крепления откосов земляных сооружений, подверженных воздействию волн, Сборник трудов МИСИ, № 20, 1957.

23. Кондратьев Н. Е., О трансформации волн на мелководье при постоянно уменьшающихся глубинах, Труды ГГИ, вып. 22 (76), 1950.

24. Кондратьев Н. Е., Затухание волн при частичном отражении, Труды ГГИ, вып. 35 (89), 1952.

25. Кондратьев Н. Е., Расчеты ветрового волнения и переформирования берегов водохранилищ, Гидрометеоиздат, 1953.

26. Калинович Б. Ю., Шлюзование водных путей, Речиздат, 1948.

27. Кусков Л. С. и Дымент И. Н., Судовые волны в каналах. Опыт эксплуатации сооружений канала Москва — Волга, вып. 1945.

28. Кусков Л. С., Водное хозяйство гидроэлектростанций, Госэнергоиздат, 1954.

29. Кочин Н. С. и др., Теоретическая гидродинамика, Гостехиздат, 1948.

30. Крылов Ю. М., К вопросу о распространении волн по поверхности тяжелой жидкости переменной глубины, Метеорология и гидрология, № 1, 1948.

31. Карташкин Б. Д., Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда, Труды ЦАГИ, № 607, 1947.

32. Кульчицкий А. В., Исследование донных скоростей ветровых волн в зоне их разрушения на гидротехнических сооружениях с наклонной стенкой, Автореферат диссертации, МИСИ им. Куйбышева, 1953.

33. Лупинский М. И., Об определении скорости частиц на гребне волны, Гидротехника и мелиорация, № 8, 1952.

34. Лупинский М. И. Крепление верховых откосов земляных плотин из плит, Гидротехника и мелиорация, № 10, 1953.

35. Лупинский М. И., Исследование работы каменных креплений верховых откосов земляных плотин, Стройиздат, 1953.

36. Ляхницкий В. Е., Портовые гидротехнические сооружения, ч. I, «Речной транспорт», 1955.

37. Маккавеев В. М., Проблемы теоретического изучения волнообразованного движения водных масс, Труды II гидрологического съезда, 1930.

38. Молеро Ф. Ф., О динамическом расчете сплошных креплений откосов гидротехнических сооружений, подвергающихся удару разбитых волн, Доклады АН СССР, том 105, № 5, 1955.

39. Марченко А. С., Теоретические основы проектирования волновых установок гидротехнических лабораторий, Автореферат диссертации, МИСИ им. Куйбышева, 1955.

40. Матлин Г. М., Методика установления расчетных уровней воды и главнейших размеров судоходных каналов внутренних водных путей, Труды ЦНИИЭВТа, вып. V, 1955.

41. Пышкин Б. А., О взвешивающем действии волны на крепление откоса в виде мостовой, «Морской флот», № 4, 1945.

42. Пышкин Б. А., Вопросы динамики берегов водохранилищ, Изд. АН УССР, 1954.

43. Пышкин Б. А., О влиянии длины волны на высоту наката на откос, Гидротехническое строительство, № 4, 1957.

44. Полухин В. А., К вопросу о волновом взвешивающем давлении

в основании оградительных сооружений вертикального типа, Автореферат диссертации, МИСИ им. Куйбышева, 1955.

45. Павленко Г. Е., Сопротивление воды движению судов, Водтрансиздат, 1953.

46. Пащенко Б. В., Защита железнодорожного земляного полотна от размыва, Трансжелдориздат, 1952.

47. Петрашень В. И., Опытное изучение действия разбитой волны на сооружения типа вертикальной стенки. Динамический расчет оградительных сооружений типа вертикальной стенки, Труды ВНИИГС, вып. 5, 1954.

48. Руднев Е. Е., О физической сущности явления разбивания волны о вертикальную стенку, Сборник трудов ЛОНИТОВТа, 1952.

49. Рабинович И. М., К расчету сооружений на действие сил, меняющихся во времени по произвольному закону, Вестник ВИА, Сборник по строительной механике, 1937.

50. Смирнов Г. Н., Природа и методика определения давления разбитой волны, Автореферат диссертации, МИСИ им. Куйбышева, 1955.

51. Сидорова А. Г., Взаимодействие волн с наклонной стенкой, Автореферат диссертации, МИСИ им. Куйбышева, 1952.

52. Сидорова А. Г., Высота наката волны на откос, Труды МИСИ, вып. № 20, 1957.

53. Смирнов Г. Н., Техника измерения давления разбитой волны и методика обработки опытных данных, Труды МИСИ, вып. № 20, 1957.

54. Смирнов Г. Н. и Сидорова А. Г., Изменение параметров волны при ее движении над наклонным дном, Труды МИСИ, вып. № 20, 1957.

55. Сретенский Л. Н., Теория волновых движений жидкости, ОНТИ, 1936.

56. Сухомел Г. И. и Засс В. М., Об изменении осадки судна при его движении, «Речной транспорт», № 11, 1955.

57. Саркисьян Г. А., Крепление откосов земляных гидротехнических сооружений асфальтобетоном, Строительство № 3, 1953.

58. Смирнов В. И., Курс высшей математики, т. II, Гос. изд. Физико-математической литературы, 1953.

59. Тимошенко С. П., Теория колебаний в инженерном деле, Гостехиздат, 1948.

60. Хасхачих Г. Д., Исследования механизма разбивания волн на непроницаемом откосе, Автореферат диссертации, МИСИ им. Куйбышева, 1958.

61. Хасхачих Г. Д., Механизм разрушения ветровых волн на наклонной стенке, Гидротехническое строительство, № 6, 1957.

62. Цытович Н. А., Основание и фундаменты на мерзлых грунтах, Изд. АН СССР, 1958.

Цытович Н. А., Основание механики мерзлых грунтов, изд. АН СССР, 1937.

63. Шиманский Б. А., Динамический расчет судовых конструкций, Судпромиздат, 1948.

64. Шулейкин В. В., Физика моря, изд. АН СССР, 1953.

65. Шанкин П. А., Поведение креплений откосов судоходных каналов, Речиздат, 1944.

66. Шанкин П. А. О расчете каменных креплений откосов земляных плотин, Гидротехника и мелиорация, № 11, 1952 и № 6, 1953.

67. Шанкин П. А., Основы расчета каменных креплений откосов каналов на судовую волну, Труды МОЦНИИРФа, вып. IV, 1953.

68. Шанкин П. А., К вопросу расчета каменных креплений откосов земляных плотин, Гидротехническое строительство, № 11, 1953.

69. Шанкин П. А., Воздействие волн на гидротехнические сооружения, Издательство «Речной транспорт», 1955.

70. Шанкин П. А., Экспериментальные исследования бетонных покрытий откосов земляных сооружений, подверженных воздействию ветровых волн, Труды ЦНИИЭВТа, вып. XV, 1958.

71. Шанкин П. А., Изучение судовых волн в каналах, Речной транспорт № 9, 1958.
72. Шанкин П. А., О границах креплений откосов, подверженных воздействию волн, Гидротехническое строительство, № 9, 1958.
73. Шанкин П. А. Расчет обратного фильтра в условиях волнового потока, Гидротехника и мелиорация, № 11, 1958.
74. Шанкин П. А. Расчет фильтрации в земляных плотинах, Речиздат, 1947.
75. Щевелев Б. Н. и др., Бетонные крепления откосов земляных сооружений, Гидротехническое строительство, № 4, 1954.
76. ЦНИИЭВТ, Указания по проектированию и эксплуатации каменных креплений откосов земляных гидротехнических сооружений, изд-во «Речной транспорт», 1955.
77. «Review of slope protection methods», Report of the subcommitee on slope protection of the commitee on earth dams of the soil mechanics and foundations division. Proceedings American Society of Civil Engineers, June, 1948, vol. 74, N 6.
78. «Review of slope protection methods», (Discussion). Proceedings American Society of Civil Engineers, 1948 т. 74, 1949 т. 75.
79. Bertram, slope protection for earth dams, IV конгресс по большим плотинам, 1951 г., Н. Дели.
80. La Houille blanche, 1953 г., № 3.
81. Stabilite′ des digues à talus a carapace en vrae, La Houille blanche, 1955, № special, p 332—339.
82. Thomas A, Middlebrooks, A. M. Asce, «Progress in earth dam design and construction in the United States», Civil Engineering, 1952, № 9, p 118.
83. «Rock Riprap Replaces Porous concrete slope protection at Santee-Cooper pooject» By Henry H. Jewell, Civil Engineering, January, 1948.
84. «Review of slope protection methods», Report of the subcommitee on slope protection of the commitee on earth dams of soil mechanics and foundations division. Proceedings American Society of Civil Engineers, June, 1948, vol, 74, № 6, 1949 т. 75.
85. Der Bantechik, 1956, № 10.
86. Maschinen für die Betonauskleidung von Kanälen und Böschungen, vor Obering. A. Woll p 368, Die Bautechnik, № 10, 1956.
87. «Discussion of bank stabilization by revetments and dikes». Proceedings American Society of Civil Engineers, Separate 1953, № 368.
88. «Wave—wach control on Missisipi river leveles», by R. Herzberg. Proceedings American Society of Civil Engineers Separate № 275, 1953.
89. L'emploi des produits bitumeux dons les reveteivents de canaux et revieres, technigues Americaines, par. I Tcherepennikoff, Jngenieur des Ponts et Chaussees, 1951, № 5.
90. «Construction of Harlingen Breakwater. New and Economical method Employed».
The Dock and Harbour Anthority, March, 1951, vol. XXXI, № 365.
91. La protection des berges de canaux par plaques bitumineuses préfabriquées, par. M. Duteil Travaux, № 228, Octobre, 1953.
92. Essai de plaques en bitume préfabriquées par revetments des berges, effectué à Poses — Amfreiville sur la Seine fluviale», par. z. Moineau.
93. «Nouvelles methodes de protection Des Berges de la Basse seine», R. Poitrat, 1952, № 1, стр. 8.
94. Die Wasserwirtschaft, 1956, № 6, стр. 155—159.
95. «Bank Protection for Suez Canal Combating Erosion by Bituminous Facings», By Philippe Prieur, Philippe Gillet, The Dock and Harbour Authority, 1956, № 6, стр. 22—24.
96. La protection des risbermes du Canal de Suez par revetements bitumineux, Philippe Prieur, Philippe Gillet, Travaux, 1955, № 253, 254, стр. 809—813, 847—852.
97. Bagnold R. A., Interim Report on wave Pressure Research, I. of the Jnstitution of Cuvil Engineers, № 7, june, 1939.

98. Biesel E., Study of wave propagation in water of gradually varying depth. National Bureau of standards Circular 521, Washington, 1952.
99. Cook S. S., Errosion by Watter-Hammer, Proceedings oft he Roy Society of London (A), v —119, 1928.
100. Eckart C., The propagation of gravity waves from deep to shallow water, National Bureau of standards Circular, 521, Washington, 1952.
101. Iversin H. W., Laboratory study of breakers, Natuonal Bureau of Standards Circular, 521, Washington, 1952.
102. Etat actuel des connoissances theorigues sur les mouvements ondulatiores de la mer, par M. У. Larras «Annoles des Ponts et Choussces, 1947, № 5, стр. 677—692.
103. Masson M. Some observations of breaking waves, National Bureau of Standards Circular, 521, Washington, 1952.
104. Miche M. R., «Annales des Ponts et Chaussèes», m. 114, № 2, 3, 4, 1944.
105. Le Pouvoir Reflechissant des ouvrages maritimes exposes a L'action de la houle, par. M. Miche, Annoles des Ponts et chaussèes, 1951, № 3, стр. 285—319.
106. Miche M. R., Les digues maritimes du type vertical, science et Industril, Construction et travaux Publigues, Paris. I, II, III, 1933.
107. Gourret M., «Annales des Ponts et Chausse'es, III, IV, 1937.
108. Iohanson I. W., Proceedings of the first conference on ships and waves, Hoboken, New Jerreey, 1955.
109. Havelock, The propagation of groups of wawesin Dispersive Media with Application to waves on water Produced by a Travelling Disturbance, Proc. Roy, Sos., Land on (A), vol. 81, p. 398—403.
110. Havelock, Ship waves, The Calculation of wave — Profies Proe. Pay. Sos. Land (A), vol. 135, 1932.
111. Michel, The wake Resistance of spip, Phil. Mog. vol. 45, 1898.
112. Lokvenc, Navrhovania vysky koruny nradze na derivacnych energeticuych a plavebnych kanaloch, vodni, Hospodarstvi, № 2, p. 37—41, 1956.
113. Suquet, Barbier et Gamot, Etude expèrimentale des Phènomènes accompagnant le trausit des navires de fort tonnage dans le canal de Suez, «Annales des Ponts et Chaussèes», 1957, № 6.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

ГЛАВА I

Опыт строительства и эксплуатации креплений откосов

§ 1. Отечественная практика применения различных типов покрытий откосов 7
§ 2. Краткий обзор применения различных типов покрытий откосов в зарубежной практике 27
§ 3. Основные факторы, воздействующие на крепление откосов . . . 43

ГЛАВА II

Исследование воздействия ветровых волн на откосные сооружения

§ 4. Обзор работ, рассматривающих взаимодействие волн с наклонной стенкой 46
§ 5. Состав задачи и методика экспериментальных исследований . . . 55
§ 6. Определение основных параметров волновых воздействий на откос
1. Общий характер волнового движения перед наклонной стенкой 61
2. Параметры, определяющие характер волнения перед наклонной стенкой 64
3. Критическая глубина на откосе 66
4. Максимальные скорости на поверхности откоса 69
§ 7. Давление разбитой волны на наклонную стенку . . . . . .
1. Общие замечания 73
2. Максимальное местное давление 75
3. Построение эпюры волнового давления 81
§ 8. Высота наката волны на откос 84
§ 9. Особенности взаимодействия косых волн с наклонной стенкой 91
§ 10. Замечания к установлению величины волновой нагрузки при расчете бетонных покрытий на прочность 97

ГЛАВА III

Исследование устойчивости бетонного покрытия откоса на действие ветровой волны

§ 11. Краткий обзор предложений по расчету бетонного покрытия на устойчивость 101
§ 12. Постановка задачи и условия проведения экспериментальных исследований 104
§ 13. Избыточные и суммарные давления на бетонное покрытие . . 110
§ 14. Определение расчетных величин избыточных и результирующих давлений на бетонное покрытие 116
§ 15. Предлагаемые зависимости для расчета плит на устойчивость 127

Стр.

§ 16. Исследование устойчивости плит на откосе по лабораторным данным 131

ГЛАВА IV

Изучение судовых волн в каналах

§ 17. Обзор предшествующих исследований судовых волн 136
§ 18. Натурные исследования судовых волн в каналах 144
§ 19. Приближенное решение задачи по определению элементов судовых волн в каналах 152

ГЛАВА V

Воздействие судовых волн на откосы каналов

§ 20. Состав и условия проведения опытных исследований 167
§ 21. Давление судовой волны на откосы канала 173
§ 22. Высота наката судовой волны на откос канала и ската с него . . 182
§ 23. К вопросу о скоростях ската судовой волны с откоса канала . . 189

ГЛАВА VI

Исследование устойчивости бетонного покрытия откоса при действии судовой волны

§ 24. Особенности работы бетонного покрытия в условиях воздействия судовых волн 193
§ 25. Лабораторные исследования избыточных и суммарных давлений на непроницаемое покрытие 198
§ 26. Натурные исследования волновых взвешивающих давлений на бетонные покрытия откоса судоходного канала 205
§ 27. Предлагаемые зависимости для расчета бетонного покрытия на устойчивость и их анализ 211

ГЛАВА VII

Границы крепления откосов земляных сооружений, находящихся под воздействием волн

§ 28. Обзор существующих предложений и данные опыта эксплуатации 222
§ 29. Назначение границ основного крепления откоса 226
§ 30. Предварительные соображения по назначению нижней границы облегченного покрытия откоса 229

ГЛАВА VIII

Исследование работы обратного фильтра под покрытием откоса в условиях воздействия волнового потока

§ 31. Обзор предложений по расчету обратных фильтров 233
§ 32. Экспериментальные исследования обратного фильтра в условиях волнового потока 238
§ 33. Приближенный экспериментально-теоретический метод расчета обратного фильтра 243
§ 34. Сопоставление результатов расчетов с опытными данными . . . 250

Стр.

ГЛАВА IX

Исследование воздействия ледяного припая на бетонные покрытия откосов

§ 35. Основные результаты натурных исследований и наблюдений на опытных участках 253
§ 36. Определение усилий, передаваемых сооружению примерзшим льдом 258
§ 37. О расчете на устойчивость бетонного покрытия откоса при воздействии ледяного припая 263
§ 38. К вопросу о расчете на прочность бетонного покрытия откоса при воздействии ледяного припая 268

ГЛАВА X

Практические рекомендации и примеры расчета

§ 39. Некоторые конструктивные особенности бетонных и железобетонных покрытий откосов 275
§ 40. Примеры расчета бетонных покрытий откосов земляных плотин и судоходных каналов 279
Список использованной литературы 286

ШАНКИН ПЕТР АНДРЕЕВИЧ

Расчет покрытий откосов гидротехнических сооружений

Редактор изд-ва *Макрушина А. Н.*
Техн. редактор *Бодрова В. А.*
Корректоры: *Сидор В. В* и *Кошарова В. Г.*

Сдано в набор 17/V-1960 г. Подп. к печ. 11/I—1961 г.
Т—00210. Бумага 60×92 1/16 —9,25 б. л.=18,5 п.л=15,5 уч-изд.л.
Изд. № Н.А. 1418-Р. Тираж 1000. Цена 1 р. 24 к. Заказ 460.

Полиграфический комбинат Ярославского совнархоза,
г. Ярославль, ул. Свободы, 97.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
65	Знаменатель формулы 32	$1 - e^{-\pi\frac{Hh}{L}}$	$1 - e^{-\pi\frac{h}{L}}$
261	3 снизу	использована	предложена

Зак. 460