

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ–ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Приоритетный национальный проект «Образование»
Национальный исследовательский университет**

Н. Д. БЕЛЯЕВ П. А. ГАРИБИН

ВОДНЫЕ ПУТИ И ПОРТЫ

ПУТЕВЫЕ РАБОТЫ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2013

УДК 627.09: 627.7(075.8)

ББК О 413-045я73

Беляев Н. Д. **Водные пути и порты. Путевые работы:** учеб. пособие / Н. Д. Беляев, П. А. Гарибин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 120 с.

Учебное пособие соответствует учебной программе дисциплины «Водные пути и порты», в нем рассмотрены теоретические основы динамики русловых процессов, современное состояние вопросов проектирования и производства дноуглубительных работ, природоохранные мероприятия при проведении землечерпания.

Главное внимание уделено наиболее сложным частям дисциплины: теории движения влекомых и взвешенных наносов, переформированию русел рек, улучшению судоходных условий на перекатах, допустимым методам проведения дноуглубления.

Пособие предназначено для слушателей курсов профессиональной переподготовки по программе дополнительного профессионального образования «Проектирование и строительство гидротехнических сооружений».

Пособие может быть полезно для студентов высших учебных заведений, обучающихся по образовательной программе «Морские гидротехнические сооружения и сооружения водных путей» направления подготовки магистров «Строительство» и слушателей организаций дополнительного профессионального образования, совершенствующих свою подготовку в области строительства.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики»

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

ISBN

© Беляев Н. Д., Гарибин П. А., 2013

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 5 |
| 1. Основы динамики русловых процессов | 6 |
| 1.1. Формирование русел рек | 6 |
| 1.1.1. Основные элементы рек | 6 |
| 1.1.2. Речные русла и типы руслового процесса | 9 |
| 1.2. Основы теории движения наносов | 13 |
| 1.2.1. Механизм взвешивания и перемещения наносов | 13 |
| 1.2.2. Гидравлическая крупность наносов | 16 |
| 1.2.3. Допускаемые скорости движения воды | 20 |
| 1.2.4. Движение влекомых наносов | 22 |
| 1.2.5. Движение взвешенных наносов | 26 |
| 1.3. Общие исследования деформации русел рек | 30 |
| 1.3.1. Уравнение деформации русла | 30 |
| 1.3.2. Сезонные деформации перекатов | 32 |
| 1.3.3. Паспорт переката | 35 |
| 1.4. Уровенный и русловой режим водохранилищ | 35 |
| 1.5. Особенности руслового процесса рек с зарегулированным стоком | 40 |
| 2. Путевые работы на реках | 43 |
| 2.1. Габариты пути и методы их обеспечения | 43 |
| 2.1.1. Нормирование габаритных размеров судового хода .. | 43 |
| 2.1.2. Мероприятия для поддержания и улучшения судо- ходных условий на водных путях | 46 |
| 2.2. Судоходные прорезы и отвалы грунта | 57 |
| 2.2.1. Требования к судоходным прорезям и значение от- валов грунта | 57 |
| 2.2.2. Трассирование судоходных эксплуатационных про- резей | 61 |
| 2.2.3. Проектирование прорезей по коренному улучшению судоходных условий | 65 |
| 2.2.4. Оценка устойчивости капитальной прорези | 67 |
| 2.3. Производство землечерпательных работ | 76 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 2.3.1. | Типы земснарядов | 76 |
| 2.3.2. | Перемещение земснарядов по прорези | 82 |
| 3. | Природоохранные мероприятия при выполнении путевых работ . | 86 |
| 3.1. | Общие сведения | 86 |
| 3.2. | Понижение уровня воды при производстве землечерпательных работ | 88 |
| 3.3. | Влияние русловых деформаций при землечерпании на рыбное хозяйство | 91 |
| 3.4. | Повышение концентрации взвешенных наносов при землечерпательных работах | 96 |
| 3.4.1. | Методика расчета границы зоны повышенной мутности | 98 |
| 3.4.2. | Методика расчета толщины слоя отложения аллювия на дне реки | 104 |
| 3.5. | Повторное загрязнение воды | 107 |
| 3.5.1. | Рекомендации по снижению повторного загрязнения при производстве работ | 107 |
| 3.5.2. | Методика оценки размывающего действия судовых движителей | 110 |
| | Библиографический список | 118 |

ВВЕДЕНИЕ

Реки и озера являются древнейшими транспортными коммуникациями, и в настоящее время, созданные природой водные пути не утратили своего экономического значения. Искусственные водные пути — каналы и шлюзованные системы получили распространение лишь в последние одно-два столетия и, несмотря на интенсивность развития, составляют по длине небольшую долю всего протяжения водных путей.

Россия является самой богатой страной мира по своим водным ресурсам, в состав ее речной сети входят около 780 тыс. водотоков. Однако реки в их естественном состоянии не пригодны для судоходства без проведения на них *путевых работ*. Простейший вид таких работ — это очистка водного пути от препятствий и оснащение его судоходной обстановкой. Неравномерность глубин в реках резко ограничивает судоходство. Поэтому главная задача путевых работ — углубление судового хода. На нешлюзованных реках это достигается путем дноуглубления и выправления русел рек. Эффективными такие виды работ могут быть только при правильном учете *динамики русловых процессов*.

Решение инженерных задач, связанных с вопросами обеспечения судоходства, невозможно без знания гидрологии, теории движения наносов, вопросов деформации русел, экологических последствий проведения землечерпания. Ввиду сложности проблем все эти вопросы окончательно не решены до настоящего времени, однако гидротехникой накоплен достаточный опыт, позволяющий дать конкретные рекомендации инженерам-строителям.

В данном пособии освещается современное состояние вопросов проектирования и ведения дноуглубительных работ. Особое внимание уделено раскрытию физических явлений русловых перестроений. Пособие направлено на углубленное изучение раздела «Водные пути», связанного производством путевых работ, и предназначено для слушателей курсов профессиональной переподготовки по программе «Морские гидротехнические сооружения и сооружения водных путей».

1. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. ФОРМИРОВАНИЕ РУСЕЛ РЕК

1.1.1. Основные элементы рек

Речная долина представляет собой протяженную, извилистую форму земной поверхности, наиболее глубокую часть которой занимает русло реки.

Речным руслом называется пониженная часть долины, по которой осуществляется сток. Непостоянство во времени речного стока неизбежно приводит к изменчивости речного русла. В период низких меженных и осенне-зимних расходов водный поток сосредотачивается в наиболее заглубленной части русла — *малом* или *меженном* *русле*. В паводковый период резко возрастают расходы (иногда во много десятков раз), река заполняет целиком все русло и часть долины, называемую *поймой*. Поверхность поймы сохраняет на себе следы прежних положений русла в виде *стариц* и *грив* (невысоких серповидных валов). От русла ее отделяет прирусловой вал. Пойменные гривы — это прежние прирусловые валы. И в глубине поймы наблюдается осаждение наносов. Там наблюдается лишь тонкий слой наиболее мелких частиц — *наилок*. Высота пойм над низким меженным уровнем составляет от 2–3 до 7–8 м.

Русла рек характеризуются сложными пространственными формами и в плане обычно криволинейны. Отношение длины реки к длине прямой, соединяющей ее исток и устье называется *коэффициентом извилистости реки* $k_{\text{рек}}$. Отношение длины реки к длине ее долины представляет собой *коэффициент извилистости русла* $k_{\text{русла}}$. *Коэффициент извилистости долины* $k_{\text{долины}}$ определяется как отношение первого коэффициента ко второму. Между этими коэффициентами справедливо следующее отношение $k_{\text{рек}} > k_{\text{русла}} > k_{\text{долины}} > 1$.

В наиболее резкой форме извилистость проявляется в виде *меандр* [по имени очень извилистой реки Меандр (ныне — р. Большой Мендерес) в Малой Азии], т.е. излучин реки.

При впадении реки в крупный водоем в устье скорости течения резко уменьшаются и происходит осаждение транспортируемых потоком частиц, сопровождающиеся возникновением особых форм рельефа — *дельты* и *бара*. Дельта (рис. 1.1) представляет собой много рукавную разветвленность (напоминающая греческую букву Δ) русла перед впадением реки в море или крупное озеро. Самые мелкие частицы, несомые потоком выпадают уже за пределами дельты и образуют приустьевой бар (рис. 1.1), характеризующийся меньшими, чем в реке, глубинами. Иногда устья рек выходят в узкие заливы, сильно врезанные в сушу. Такие заливы называются *лиманами* (отделяются от моря частично или полностью *пересыпями* — низкими наносными косами из песка или гальки) или *эстуариями*, для которых характерно отсутствие пересыпей и в связи с этим соленость воды близкая к морской.

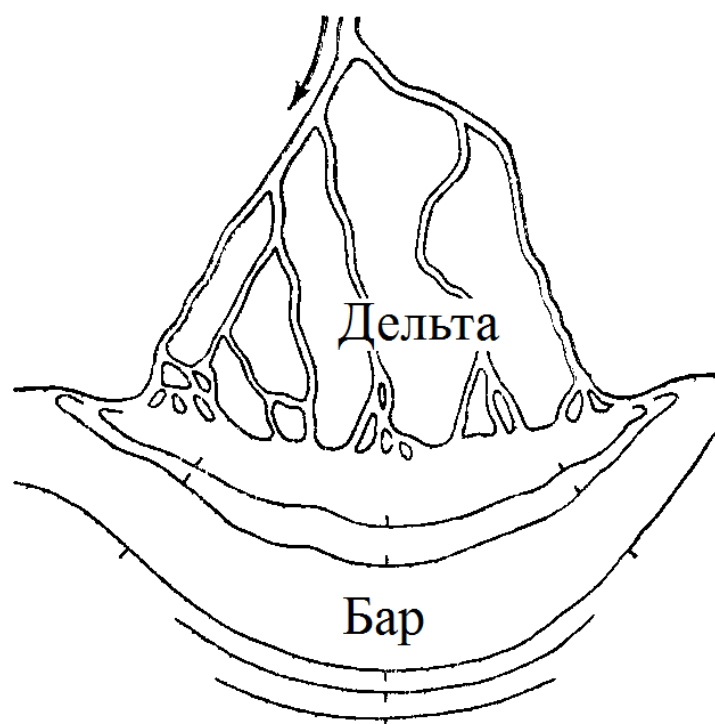


Рис. 1.1. Дельта и приустьевой бар

Продольный профиль рек всегда имеет волнообразный вид с чередованием по их длине глубоких и мелких мест: *песовых лоцин* (плесов) и *перекатов* или *порогов*.

Перекатом называется скопление донного материала, перекрывающее меженное русло по всей ширине и вызывающее уменьшение глубины потока по сравнению с выше и ниже лежащими участками. Пороги же образованы либо скоплением валунов, либо выходами скальных пород, либо сочетанием этих образований.

У всех видов перекатов существуют общие черты их строения (рис. 1.2). Прибрежные, повышенные части называются *побочнями* — *верхним* 1 и *нижним* 5. Расположенная между ними наиболее низкая часть (седловина) называется *корытом* переката 3. Через корыто переката трассируется судовой ход. Соединяющая наиболее высокие отметки перекатного вала линия обозначает *гребень* переката 2. Глубокие части русла, расположенные выше и ниже переката, представляют собой, соответственно *верхнюю* 6 и *нижнюю* 4 *плесовые лоцины*. Низовой скат переката 8 почти всегда круче верхового ската 7. Область сопряжения низового ската с дном нижней плесовой лоцины называется *подвальем* переката 9.

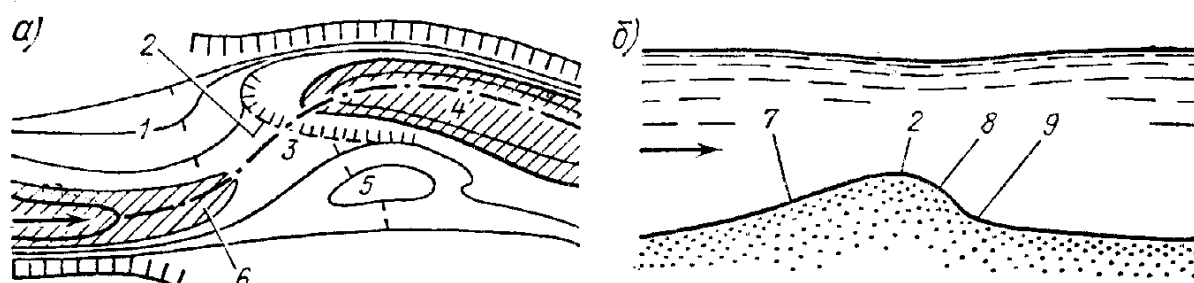


Рис. 1.2. Перекат:
а — план; б — продольный профиль

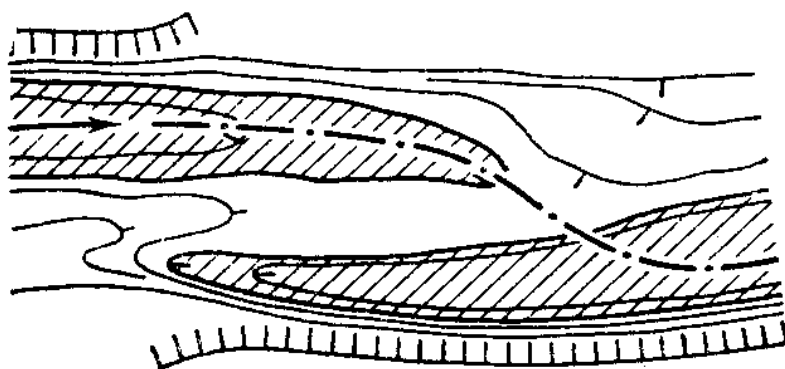


Рис. 1.3. Перекат с затонской частью

Тупиковая оконечность нижней плесовой лощины, заходящая за верхнюю плесовую лощину, называется *затонской частью* переката, а перекаты такого типа называются перекатами с затонской частью (рис. 1.3).

1.1.2. Речные русла и типы руслового процесса

Выбор способа улучшения судоходных условий на затруднительных участках рек невозможен без знания происходящих русловых процессов.

Совокупность явлений образования и последующих деформаций естественных русел называется *русловым процессом*. Установлено, что в природе встречаются три основных типа руслового процесса и в соответствии с этим все речные русла могут быть отнесены к одному из трех основных видов:

- прямолинейные или слабоизогнутые однорукавные русла;
- извилистые однорукавные русла (меандрирующие);
- разветвленные.

Для первого типа русел определяющими является побочный тип руслового процесса деформаций русла. В данном случае (рис. 1.4) *цепочка побочной* располагается в шахматном порядке с интервалами в 5–7 ширин русла. Плесовые лощины короткие и мелкие, их длины практически равняются длинам перекатов. Судовой ход попеременно переходит от одного берега к другому. Основной процесс состоит в движении и постепенном смещении всех русловых форм — перекатов и плесовых лощин — вниз по течению при относительно стабильных берегах. Перемещение идет во времени очень неравномерно (в основном в течение половодья). Длина пути, проходимого побочными, составляет от нескольких десятков до нескольких сотен метров в год. Так как скорости течения по поперечному сечению распределены неравномерно, то при движении побочной происходит их перекося. Это приводит к образованию затонов, отторжению весенним потоком побочной от берега, т.е. превращению его в *осередок*.

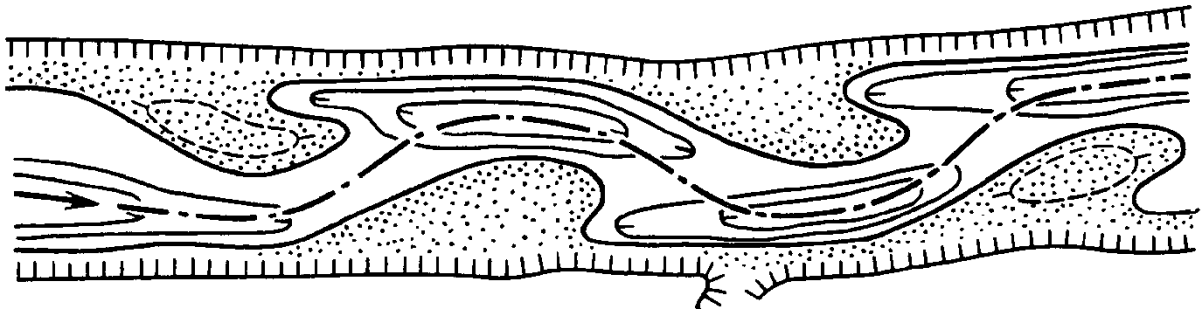


Рис. 1.4. Участок речного русла с побочным типом руслового процесса

Для второго вида русел суть руслового процесса составляют плановые изменения, обусловленные, в первую очередь, размывом вогнутых берегов. Различают три подтипа меандрирования: свободное, незавершенное и ограниченное.

Свободное меандрирование — развивается при наличии широкой поймы, когда переформирование извилин не сдерживается коренными берегами. Русла в таких условиях способны принимать предельно искривленные плановые формы (рис. 1.5, а). Каждая извилина в своем развитии проходит цикл изменений (рис. 1.5, б): постепенное увеличение кривизны; приобретение петлеобразного очертания; прорыв перешейка между сблизившимися частями петли и превращение излучины в пойменную *старицу*.

В случае низкой поймы, сложенной рыхлыми грунтами, или сдерживающего влияния коренных берегов спрямления излучин происходят раньше, чем они достигнут петлеобразной формы (рис. 1.6). Извилины реки могут после этого долго сохранять роль основного русла, пока не разовьется в достаточной степени спрямляющая протока. В данном случае имеет место процесс *незавершенного меандрирования*. На судоходных реках спрямление извилин иногда осуществляется искусственным путем с помощью дноуглубительных снарядов.

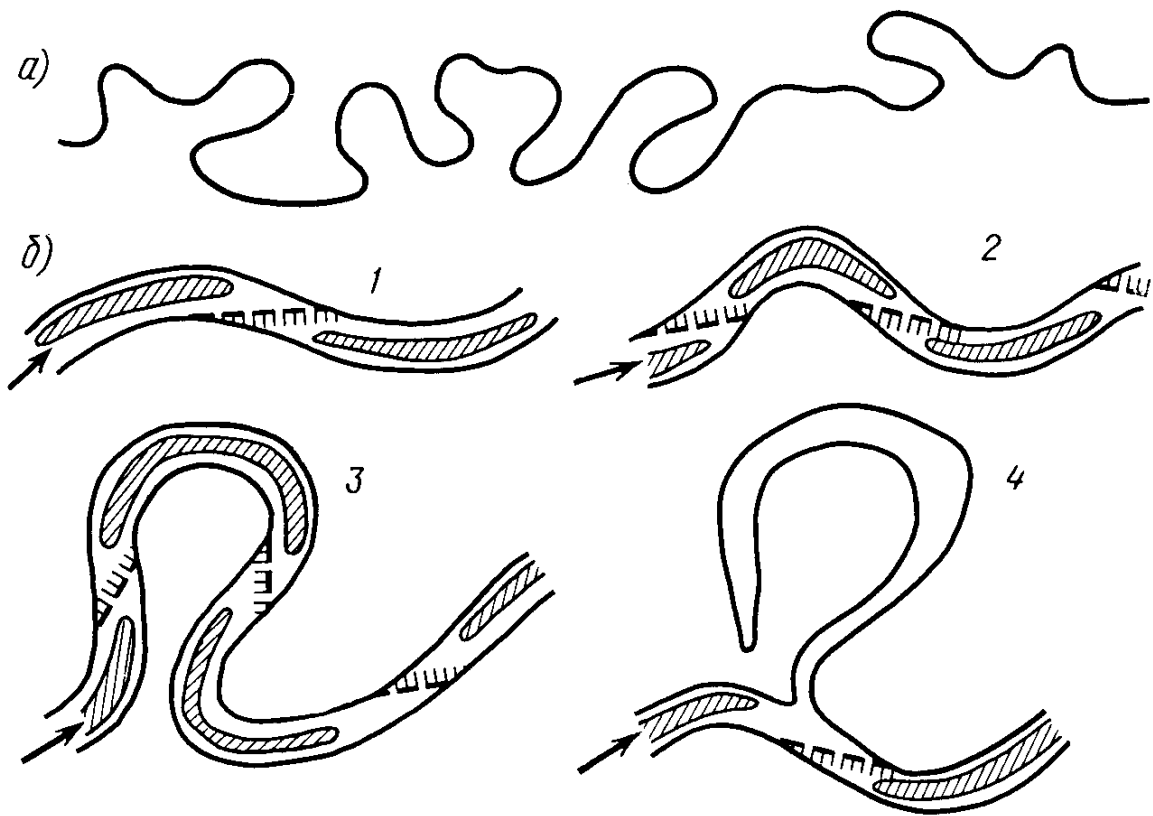


Рис. 1.5. Свободное меандрирование:
a — общая конфигурация русла; *б* — последовательные (1 – 4)
 стадии деформации извилины

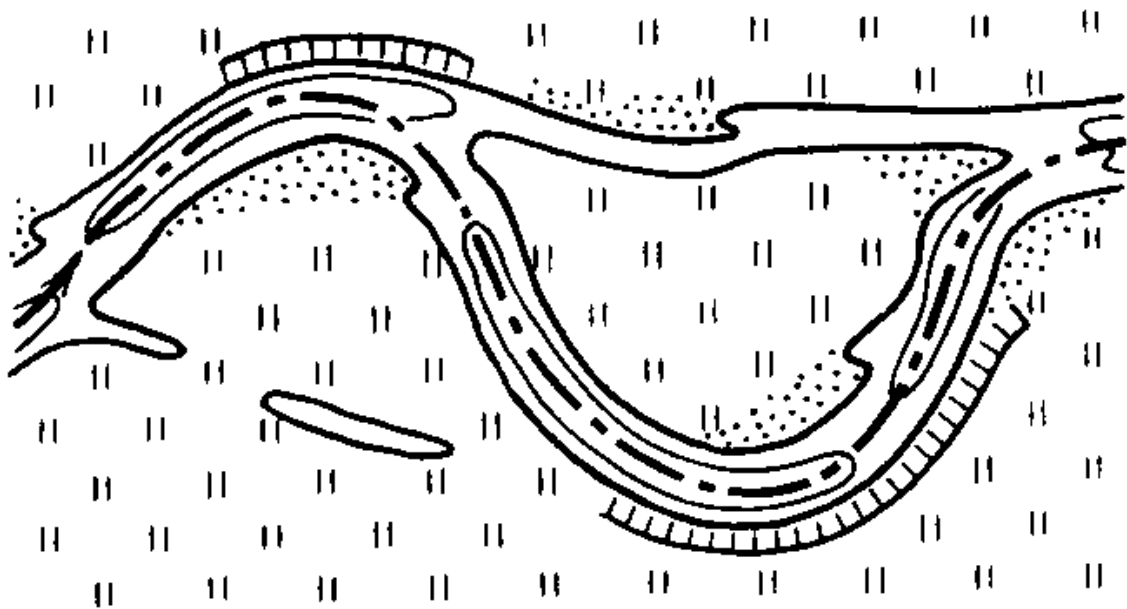


Рис. 1.6. Участок речного русла с незавершенным меандрированием

Ограниченным называется меандрирование рек с узкими долинами. Излучины имеют вид близкий к синусоидальному. Они медленно сползают вниз по долине, практически не меняя своих форм.

Третий тип руслового процесса — *ветвление*, т.е. деление реки на рукава. Разветвленность может быть пойменной и русловой. В случае *пойменной разветвленности* сеть рукавов развивается в пойме, создавая острова значительных размеров (рис. 1.7). При этом сохраняются ярко выраженное главное русло, пропускающее основной расход воды.

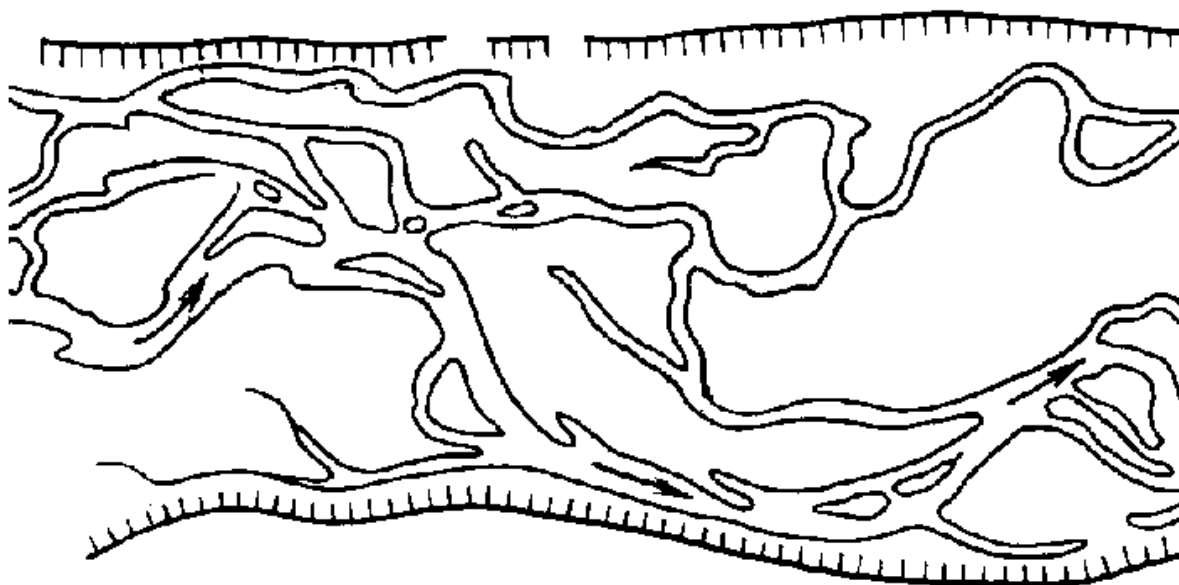


Рис. 1.7. Пойменная многорукавность

При *русловой разветвленности* поток разбивается на рукава, обтекаемые расположенные в русле острова (рис. 1.8). Острова формируются за счет накопления наносов на поверхностях осередков. Длины образующихся островов могут достигать величин нескольких шириин меженного русла. Число параллельных рукавов чаще всего равно двум – трем, но может быть и больше. Набегающий на *приверх* острова поток подмывает его, а в застойной зоне за *ухвостьем* острова происходит отложение наносов. Как следствие этого происходит процесс медленного сползания островов вниз по реке. Часто перенос судового хода из одного рукава в другой производится искусственно, путем

проведения дноуглубительных работ и комплекса мероприятий по уменьшению расходов воды и увеличению расхода наносов в закрываемом для судоходства рукаве.

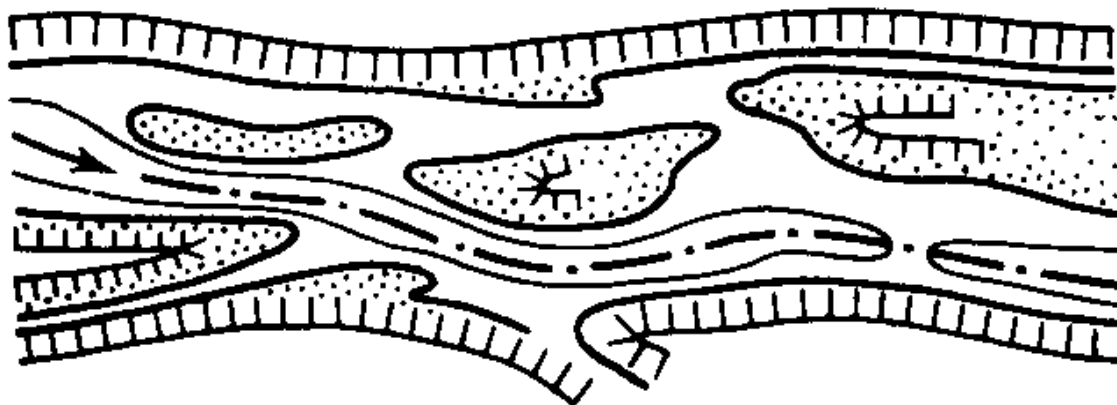


Рис. 1.8. Русловая многорукавность

Вследствие изменений ширины поймы по длине реки меняется и тип руслового процесса, однако для каждой реки можно указать преобладающий тип. Исследованиями Б. Ф. Сниценко установлено, что общим определяющим фактором всех типов руслового процесса является отношение $B_{\text{п}}/B$ — средней ширины поймы к средней ширине русла. Критериальными рекомендуются следующие значения:

- побочный процесс $B_{\text{п}}/B = 2-3$;
- свободное меандрирование $B_{\text{п}}/B > 15$;
- незавершенное меандрирование $B_{\text{п}}/B = 5-15$;
- русловая многорукавность $B_{\text{п}}/B = 1,5-1,3$.

1.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ НАНОСОВ

1.2.1. Механизм взвешивания и перемещения наносов

Процессы переноса потоком твердых частиц во взвешенном состоянии являются следствием турбулентности движущейся жидкости. В ламинарном режиме все твердые частицы, попавшие в поток, неиз-

бежно опускаются на дно и останавливаются в своем движении или перемещаются по дну.

В турбулентном потоке, помимо определяющего движения в продольном направлении, возникают дополнительные поперечные перемещения масс жидкости, обуславливающие перенос твердых частиц из нижних слоев в верхние и транспортирование их во взвешенном состоянии. Ввиду того, что твердые частицы имеют больший удельный вес, чем вода, то для поддержания их во взвешенном состоянии необходимо наличие в придонных слоях постоянных импульсов, вызывающих подъем твердых частиц со дна в верхние слои воды. В речном потоке твердой стенкой является дно, обладающее значительной шероховатостью, особенно за счет наличия гряд, что приводит к вихреобразованию в придонных слоях, в результате чего и появляются силовые воздействия на частицы.

За каждым бугорком шероховатости или за грядой образуется область отрыва, где давление меньше гидростатического, а на лобовой стороне выступающих от дна частиц напротив наблюдается повышенное давление. Таким образом возникает несимметричное обтекание потоком лежащих на дне частиц, являющееся причиной возникновения значительной подъемной силы. Под воздействием лобовой и подъемной сил нарушается устойчивость твердых частиц. Сначала они перемещаются по дну, а при определенных скоростях оказываются вовлеченными в толщу потока.

При заданных гидравлических условиях взаимодействие между потоком и твердыми частицами всегда приводит к устойчивому состоянию, когда имеет место равенство количества твердых взвешенных частиц, поднимающихся вместе с перемещающимися вверх массами жидкости M_1 и количеством частиц, опускающихся вниз за счет сил тяжести M_2 (рис. 1.9).

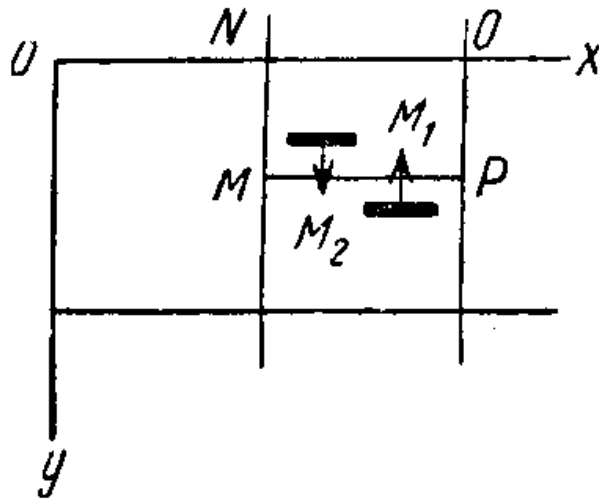


Рис. 1.9. Схема вертикальных перемещений наносов

Это представление является одним из основных положений в теории взвешивания. Таким образом, при равномерном установившемся движении русло потока не будет подвергаться ни размыву, ни заилению. В тоже время при неравномерном режиме русло будет заилиться, если скорости уменьшаются, т. е. $\frac{dV}{ds} < 0$, так как в каждом последующем сечении транспортирующая способность потока будет меньше, чем в предыдущих; или будет происходить размыв, если скорости возрастают, т. е. $\frac{dV}{ds} > 0$, так как в последующих сечениях мутность потока будет меньше, чем в предыдущих (рис. 1.10, 1.11).

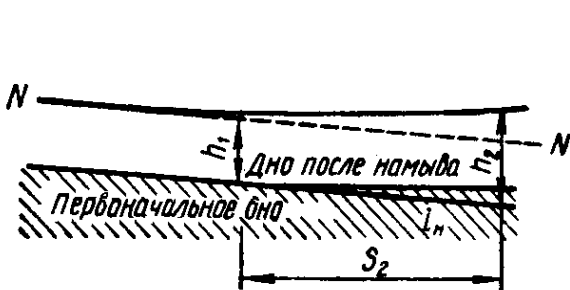


Рис. 1.10. Намыв на участке подпора

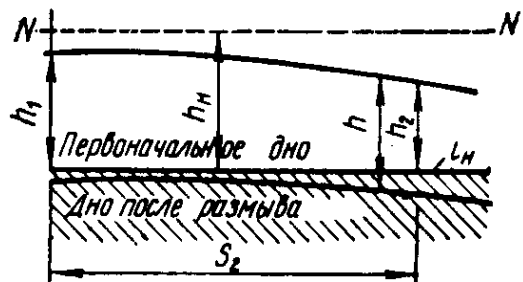


Рис. 1.11. Размыв на участке спада

1.2.2. Гидравлическая крупность наносов

Наносы встречаются разные как по форме частиц, так и по их крупности. Более крупные наносы чаще имеют форму, близкую к шару или эллипсоиду. Мелкие наносы имеют неправильную геометрическую форму, близкую к форме пластинок.

Для характеристики формы частиц наносов имеются несколько способов, например, специальные эталоны, на которых приводятся наиболее характерные очертания частиц. Также применяются различные коэффициенты формы, например, по В. В. Романовскому критерий формы частицы

$$Q = d^2/ab, \quad (1.1)$$

где d — диаметр шара, объем которого W равен объему частицы; a , b — длина и ширина частицы. Для шара $Q = 1$, для очень плоских частиц $Q = 0,5$.

Диаметр равновеликого шара определяется по формуле

$$d = \sqrt[3]{6 \frac{W}{\pi}}. \quad (1.2)$$

Для частиц, кроме очень плоских, диаметр равновеликого шара допускается находить как

$$d = (a + b + c)/3, \quad (1.3)$$

где a , b , c — длина, ширина и высота (толщина) частицы.

Наносы, обычно, характеризуются средним диаметром, который устанавливается на основании анализа гранулометрического состава (средневзвешенный размер) по формуле

$$d = \frac{\sum d_i p_i}{100}, \quad (1.4)$$

где d_i — средняя арифметическая крупность данной фракции, мм; p_i — процентное содержание (по весу) этой фракции.

Крупность речных наносов характеризуется диаметром частиц (в мм) по шкале, представленной табл. 1.1.

Таблица 1.1

Крупность частиц (диаметр) речных наносов (мм)

| Глина | Ил | Пыль | Песок | Гравий | Галька | Бульж- ник | Валуны |
|---------|----------------|---------------|--------------|------------|------------|---------------|--------|
| < 0,005 | 0,005– 0,01 | 0,01– 0,05 | 0,05– 2,0 | 2,0– 20 | 20– 100 | 100– 200 | > 200 |

Русло большинства равнинных рек сложено частицами несвязного грунта — песка и гравия. В верхних течениях рек иногда встречается галька. Для сибирских рек (Енисей, Ангара) характерны участки большой протяженности, где на дне обнажается скала и лежат валуны. В зонах ледниковых отложений (Нева, Свирь) русла рек сложены глиной и валунами.

В инженерных расчетах движения наносов важную роль имеют их *гидравлическая крупность* — скорость равномерного падения твердых частиц в покоящейся жидкости. Гидравлическая крупность частиц наносов w_o зависит от следующих факторов

$$w_o = f(g, \rho, \rho_{\text{ч}}, \mu, d, Q). \quad (1.5)$$

Значения величин плотности воды ρ и плотности частиц наносов $\rho_{\text{ч}}$ при движении наносов в реках практически постоянны, также как и значение ускорения свободного падения g . Плотность частиц наносов меняется в довольно узких пределах 2500–2800 кг/м³. В расчетах пользуются средним значением плотности $\rho_{\text{ч}} = 2650$ кг/м³. Ему соответствует удельный вес частиц $26 \cdot 10^3$ Н/м³. Таким образом значение фактически зависит от двух факторов: вязкости (характеризуемой коэффициентом вязкости μ) и размерами частицы (характеризующимися параметрами d и Q).

Вязкость воды связана обратной зависимостью с температурой. Ранней весной и осенью вязкость относительно велика и падающие в воде частицы наносов испытывают большее сопротивление движению, имея при этом меньшую гидравлическую крупность, чем летом.

Вязкость влияет на гидравлическую крупность частиц грунта тем сильнее, чем мельче частицы. Гидравлическая крупность частиц диаметром $d > 1,5$ мм от вязкости не зависит — она полностью определяется диаметром частиц. Количественной оценкой вышеизложенных соображений служит число Рейнольдса, в котором характерной скоростью является гидравлическая крупность твердых частиц, а характерным поперечным размером — их диаметр

$$\text{Re}_d = \frac{\rho w_o}{\mu} = \frac{w_o d}{\nu}. \quad (1.6)$$

Для частиц наносов квадратичная область обтекания наступает при $\text{Re} \approx 500$. В квадратичной области w_o не зависит от ν (от температуры) при прочих равных условиях. При ламинарном режиме обтекания w_o не зависит от формы частиц наносов.

В табл. 1.2 приведены значения w_o при $t = 15^\circ \text{C}$, $\rho_{\text{ч}} = 2650$ кг/м³ для различных значений $d_{\text{ср}}$ и Q .

При $d_{\text{ср}} < 1,5$ мм к значениям w_o , взятым из табл. 1.2, вводятся поправочные коэффициенты в зависимости от температуры воды (табл. 1.3).

Наносы состоят из частиц различных диаметров, т. е. из разных фракций, обладающих различной гидравлической крупностью. Принято характеризовать наносы средневзвешенной гидравлической крупностью.

Для вычисления гидравлической крупности наносы делят на несколько (четыре – пять) фракций и для каждой фракции определяют w_o как среднеарифметическую

$$w_o = \frac{1}{2}(w_{o1} + w_{o2})$$

или как среднегеометрическую величину

$$w_o = \frac{1}{3}(w_{o1} + w_{o2} + \sqrt{w_{o1}w_{o2}}),$$

где w_{01} и w_{02} — гидравлические крупности для крайних значений диаметров частиц в данной фракции (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Гидравлическая крупность частиц наносов

| Область сопротивления | d_{cp} , мм | Значения w_0 при Q | | | | |
|-----------------------|---------------|------------------------|------|------------|------|------|
| | | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Квадратичная | 100,0 | 2,16 | 1,86 | 1,55 | 1,24 | 0,94 |
| | 80,0 | 1,94 | 1,66 | 1,39 | 1,12 | 0,84 |
| | 50,0 | 1,53 | 1,32 | 1,10 | 0,88 | 0,67 |
| | 30,0 | 1,18 | 1,02 | 0,85 | 0,68 | 0,52 |
| | 20,0 | 0,96 | 0,83 | 0,69 | 0,56 | 0,42 |
| | 15,0 | 0,84 | 0,72 | 0,60 | 0,48 | 0,37 |
| | 10,0 | 0,68 | 0,59 | 0,49 | 0,39 | 0,30 |
| | 7,00 | 0,57 | 0,49 | 0,41 | 0,33 | 0,25 |
| | 5,00 | 0,48 | 0,42 | 0,35 | 0,28 | 0,21 |
| | 3,00 | 0,38 | 0,32 | 0,27 | 0,22 | |
| | 2,50 | 0,34 | 0,29 | 0,25 | | |
| | 2,00 | 0,31 | | | | |
| Переходная | 3,00 | | | | | 0,16 |
| | 2,50 | | | | 0,20 | 0,15 |
| | 2,00 | | 0,26 | 0,21 | 0,17 | 0,13 |
| | 1,50 | 0,24 | 0,20 | 0,17 | 0,14 | 0,11 |
| | 1,00 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,09 |
| | 0,50 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| | 0,30 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| | 0,20 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Ламинарный режим | 0,050 | | | 0,00195 | | |
| | 0,040 | | | 0,00125 | | |
| | 0,030 | | | 0,00070 | | |
| | 0,020 | | | 0,00031 | | |
| | 0,010 | | | 0,000078 | | |
| | 0,005 | | | 0,000020 | | |
| | 0,002 | | | 0,0000031 | | |
| | 0,001 | | | 0,00000078 | | |

Таблица 1.3

Поправочные коэффициенты

| d_{cp} , мм | t , °C | | | | |
|------------------|----------|-------|--------|---------|---------|
| | 0 – 2 | 3 – 7 | 8 – 12 | 13 – 17 | 18 – 22 |
| 1,50 | 0,92 | 0,94 | 0,97 | 1,00 | 1,04 |
| 1,00 | 0,83 | 0,87 | 0,93 | 1,00 | 1,07 |
| 0,50 | 0,74 | 0,81 | 0,90 | 1,00 | 1,11 |
| 0,20 | 0,69 | 0,77 | 0,88 | 1,00 | 1,13 |
| 0,10 | 0,67 | 0,76 | 0,87 | 1,00 | 1,14 |
| 0,05 | 0,66 | 0,75 | 0,87 | 1,00 | 1,14 |

По гидравлической крупности отдельных фракций вычисляют *средневзвешенную гидравлическую крупность* наносов

$$w_{0cp} = 0,01 \sum w_{0i} P_i. \quad (1.7)$$

1.2.3. Допускаемые скорости движения воды

В теории наносов выделяют два важных понятия: *размывающую скорость потока* V_p , соответствующую начальной фазе размыва дна русла, и *незаиляющую скорость* $V_{нез}$ — наименьшую скорость, при которой обеспечивается перенос во взвешенном состоянии определенного количества наносов.

Под *допускаемой неразмывающей скоростью* $V_{нр}$ понимается наибольшее значение средней скорости движения воды, при которой поток не может вызвать недопустимого размыва (разрушения) русла. Она является предельной скоростью, соответствующей началу сдвига отдельных частиц, т. е. скоростью начала движения. При расчетах обычно пользуются не придонной, а средней скоростью течения на вертикали.

Знание величины неразмывающей скорости необходимо в ряде инженерных расчетов, при вычислении расхода наносов, при оценке

устойчивости дна каналов, при выборе крупности материала, отсыпка которого позволит защитить дно от размыва и др.

Основными факторами, влияющими на значение неразмывающей скорости, являются те же, что влияют и на гидравлическую крупность — диаметр частиц и вязкость (температура) воды. Аналогичной является и верхняя граница учета вязкости — диаметр частиц около 1,5 мм. Однако механизм влияния вязкости на частицу отличается от случая падения частиц в воде. В явлении начального сдвига мелких частиц на дне возникает ламинарное движение в так называемом *вязком подслое*, покрывающем все дно потока (толщиной в доли миллиметра). Это явление имеет место, в случае если шероховатость дна (крупность частиц, слагающих русло) мала, а скорости течения незначительны. На дне скорость равна нулю, а в пределах подслоя нарастает по линейному закону. При этом частицы с диаметром меньше толщины вязкого подслоя будут подвергаться воздействию скоростей пропорциональных своим диаметрам. Отсюда следует, что сдвиг частиц разных размеров может произойти одновременно, а неразмывающая скорость окажется практически не зависящей от диаметра.

В общем случае, помимо вышеуказанных основных факторов, на $V_{\text{нр}}$ влияют также шероховатость дна и степень неравномерности гранулометрического состава грунта дна.

Для определения $V_{\text{нр}}$ существует ряд зависимостей. Наиболее удовлетворительно согласующимися с натурными данными являются:

- формула В. Н. Гончарова, применимая во всем диапазоне крупностей частиц песка и гравия

$$V_{\text{нр}} = 0,96\sqrt{g}(d_{50} + 0,0014)^{0,3}\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}h\right)^{0,2}; \quad (1.8)$$

- формула И. И. Леви, применимая для частиц гравия $d > 1,5$ мм

$$V_{\text{нр}} = 1,3\sqrt{gd_{50}} \lg 12h/d_{90}. \quad (1.9)$$

Значения диаметров частиц должны подставляться в обе формулы в метрах.

Соотношение между размывающей и неразмывающей скоростями равно

$$V_p = (1,3 - 1,4)V_{np}. \quad (1.10)$$

Для большинства рек с песчаным дном $V_{np} = (0,5-0,6)$ м/с.

Незаиляющая скорость изменяется в зависимости от количества и крупности взвешенных в потоке наносов. Ее минимальное значение соответствует переходной стадии от грядового движения к взвешиванию. Средняя незаиляющая скорость соответствует состоянию, когда мутность потока ρ_n (т. е. содержание наносов в единице объема воды) равна его транспортирующей способности (см. п. 1.2.5). На основании опытных данных Н. П. Кулеш и И. И. Леви получили следующую расчетную зависимость

$$V_{нез} = \sqrt[3]{5g(\rho_n - \rho_1)Rw_0}, \quad (1.11)$$

где ρ_1 — насыщение потока мельчайшими частицами диаметром менее 0,01 мм; R — гидравлический радиус; w_0 — средневзвешенное значение гидравлической крупности частиц $d > 0,01$ мм.

Итак, при проектировании прорези надо обеспечить условие, чтобы средняя скорость находилась в пределах

$$V_{np} > V > V_{нез}. \quad (1.12)$$

1.2.4. Движение влекомых наносов

Влекомые наносы перемещаются в придонном слое потока, совершая прерывистое движение — их подвижки чередуются с периодами покоя. Отдельную подвижку частица совершает либо посредством перекатывания, либо посредством скачка. Такой способ перемещения наносов называется сальтацией — прыжком. Высота скачков имеет порядок диаметра частиц d , длина $10d$. Перекатывание наблюдается у крупных частиц или при малой скорости течения.

Скачки и перекачивания по относительно ровному дну являются элементарными формами движения, которые существуют в очень ограниченном диапазоне скоростей до значения лишь немного превышающего неразмывающую скорость. С дальнейшим увеличением происходит общее нарушение устойчивости движения, сопровождающееся трансформациями дна, характеризующимися образованием волнообразного профиля — *гряд*. Дальнейший транспорт наносов происходит в форме *перемещения гряд*. Дно рек, протекающих в несвязных (сыпучих) грунтах, практически всегда покрыто грядами. Гряды могут отсутствовать либо при малых скоростях течения, когда транспорт русловых наносов слаб, либо при больших скоростях (в 2,5–3 раза превышающих неразмывающие), когда русловые наносы движутся уже во взвешенном состоянии.

Продольный профиль донных гряд несимметричен (рис. 1.12). Они имеют пологий верховой скат и крутой низовой. Обычно низового ската близок к уклону естественного откоса грунта под водой (в среднем 1:3). Высота гряд $h_{гр}$ (превышение гребня над подвалем) растет с глубиной потока. Обычно ее значение составляет от 1/10 до 1/3 глубины. В ручьях и малых реках в межень длины донных гряд составляют от 1 до 3 глубин потока ($h_{гр} \leq 0,1h$). Такие образования называются *рифелями*. Гребни рифелей в плане искривлены и часто имеют подковообразный вид. Дно в этом случае выглядит чешуйчатым. В средних и больших реках длины гряд $l_{гр}$ колеблются в широких пределах — примерно от 10 до 50 глубин. Гребни гряд всегда в плане изогнуты. Они имеют в плане вид дуг, обращенных выпуклостью в направлении течения. Скорость перемещения донных гряд в больших глубоких реках составляет десятитысячные доли скорости течения, а в средних и малых реках — тысячные доли. Рифели движутся быстрее гряд.

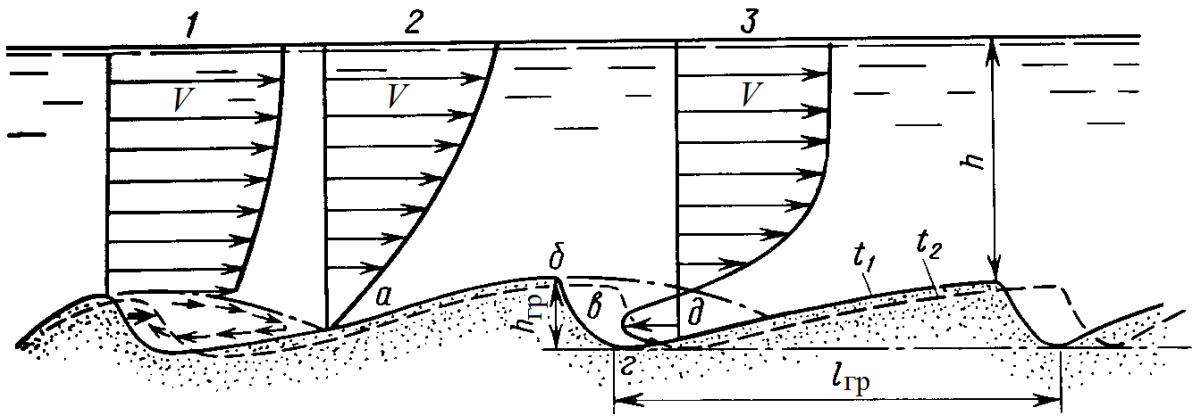


Рис. 1.12. Продольные профили гряд в моменты времени t_1 и t_2 :
 a — напорный скат; b — гребень; $в$ — тыловой скат; $г$ — подвалье; $д$ — валец;
 1, 2, 3 — эпюры распределения скоростей; h — глубина на гребнях гряд;
 V — местная осредненная скорость течения

В естественном состоянии реки при известных (замеренных за определенный период времени эхолотом) значениях $h_{гр}$, $l_{гр}$ и скорости $C_{гр}$ движения гряды удельный расход наносов определится по зависимости

$$q_s = \sigma(1 - \varepsilon)h_{гр}C_{гр}, \quad (1.13)$$

где $\varepsilon \approx 1/3$ — коэффициент пористости песка; $\sigma = 0,6-0,7$ — коэффициент полноты профиля гряды (отношение площади продольного сечения гряды к произведению ее длины на высоту).

Прогнозирование величины расхода влекомых наносов для условий, которые создадутся после выполнения путевых работ, не может быть осуществлено по формуле (1.13). В этом случае используют формулы, связывающие расход влекомых наносов с крупностью донных частиц и с характеристиками потока воды. При этом руководствуются следующими соображениями. Полагается, что движущиеся частицы, расположены лишь в верхнем слое (рис. 1.13) и их число увеличивается с ростом скорости течения. Тогда площадь поперечного сечения потока частиц на единице ширины представляется в виде

$$w_s = (1 - \varepsilon)md, \quad (1.14)$$

где m — отношение числа движущихся частиц к общему числу частиц на единице ширины верхнего слоя; d — диаметр принимаемых условно однородными частиц.

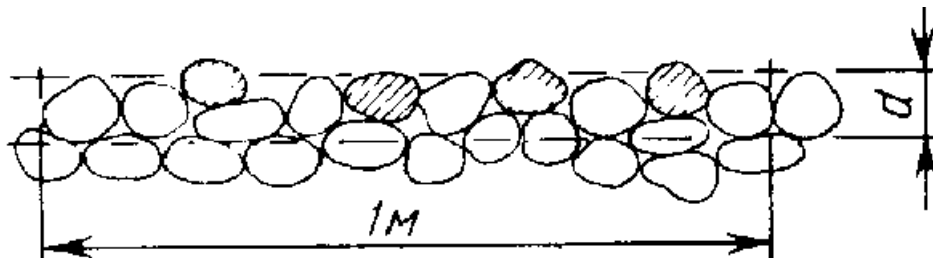


Рис. 1.13. Движущиеся (заштрихованные) и покоящиеся частицы на единице ширины дна

Установлено, что значение m пропорционально кубу отношения скорости течения к неразмывающей

$$m \sim (V/V_{\text{нр}})^3. \quad (1.15)$$

Подставив (1.15) в (1.14) получим

$$w_s = (1 - \varepsilon)(V/V_{\text{нр}})^3 d. \quad (1.16)$$

Вполне обоснованным является предположение о том, что скорость движения частиц V_s пропорциональна превышению фактической скорости течения над неразмывающей

$$V_s \sim (V - V_{\text{нр}}). \quad (1.17)$$

Удельный расход наносов получается умножением скорости движения на площадь в виде

$$q_s = \text{const} (V/V_{\text{нр}})^3 d (V - V_{\text{нр}}), \quad (1.18)$$

где значение постоянной определяется из опыта (величина $(1 - \varepsilon)$ включена в значение постоянной).

В случае дна, сложенного крупным песком и гравием, с относительной зернистой шероховатостью $d/h > 2 \cdot 10^{-4}$ наилучшим образом согласуется с натурными данными формула И. И. Леви

$$q_s = 7,6 \cdot 10^{-4} (V/\sqrt{gd})^3 d (V - V_{\text{нр}}) (d/h)^{0,25}. \quad (1.19)$$

Значение $V_{\text{нр}}$ в (1.19) должно определяться по формуле Леви (1.9).

Если дно сложено средним и мелким песком с относительной шероховатостью $d/h < 5 \cdot 10^{-4}$, то более корректной является формула К. В. Гришанина

$$q_s = 0,015(V/V_{\text{нр}})^3 d(V - V_{\text{нр}}). \quad (1.20)$$

В данном случае значение $V_{\text{нр}}$ должно определяться по формуле В. Н. Гончарова (1.8). Во всех приведенных формулах следует брать медианный диаметр частиц.

1.2.5. Движение взвешенных наносов

Перенос более тяжелых, чем вода, твердых частиц во взвешенном состоянии становится возможным тогда, когда средняя величина вертикальных пульсационных скоростей турбулентного потока начинает превосходить гидравлическую крупность частиц. Среднее квадратичное значение вертикальных пульсационных скоростей близки к значению динамической скорости

$$V^* = \sqrt{\tau_0/\rho}, \quad (1.21)$$

где τ_0 — касательные напряжения на дне.

Таким образом условие взвешивания твердых частиц принято выражать неравенством

$$V^* > w_0. \quad (1.22)$$

Отношение объема твердых частиц к выделенному суммарному объему жидкости и частиц

$$S = \frac{V_s}{V + V_s} \quad (1.23)$$

называется *объемной концентрацией наносов*.

Отношение массы твердых частиц к тому же общему объему

$$S_m = \frac{\rho_s V_s}{V + V_s} \quad (1.24)$$

называется *массовой концентрацией* или *мутностью*.

Так же как скорость течения, концентрация наносов в каждой точке турбулентного потока пульсирует. Далее в рассмотрение будет

принято только осредненное значение концентрации \tilde{S} . Распределение \tilde{S} на вертикали не равномерно: от свободной поверхности к дну концентрация всегда возрастает и чем крупнее частицы, тем это выражено резче.

Элементарный массовый расход взвешенных наносов определяется по зависимости

$$q_{\tilde{S}_m} = \int_0^h \tilde{S}_m V dz. \quad (1.25)$$

Произведение носит название — *единичный расход наносов*. Качественный вид эпюр распределения концентрации и единичных расходов приведен на рис. 1.14.

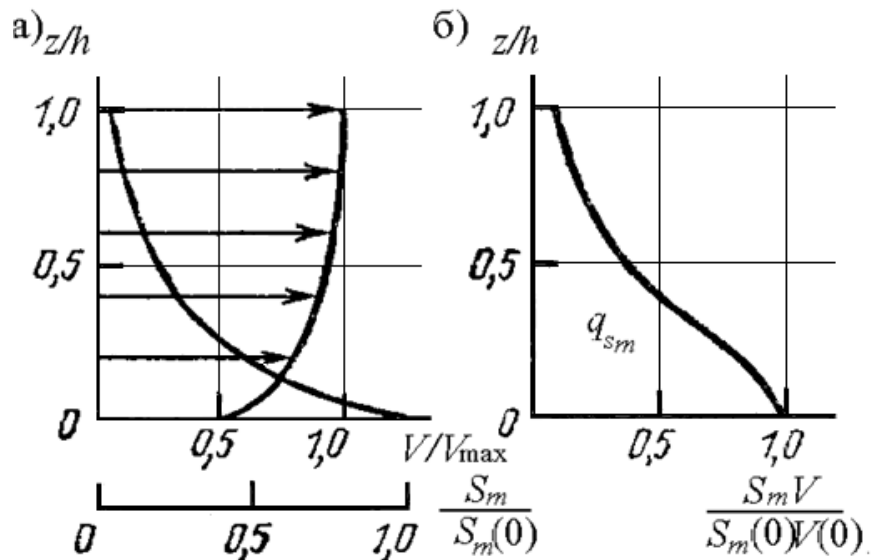


Рис. 1.14. Эпюры:

а — скоростей течения и мутности; *б* — единичных расходов наносов

Рассмотрим прямолинейный открытый равномерный поток, несущий твердые частицы. Установившееся (т. е. не изменяющееся во времени) распределение концентрации наносов по вертикали будет существовать в случае равенства двух противоположно направленных потоков массы: *гравитационного*, направленного сверху вниз, и *диффузного*, имеющего обратное направление. Все частицы под действием силы тяжести падают в воде со скоростью, равной их гидравлической крупности w_0 (для упрощения считаем, что все частицы имеют

одинаковый диаметр d с w_0 удовлетворяющей (1.22)). Гравитационный поток (сверху вниз) обеспечивает перенос масс через единицу площади горизонтальной поверхности в единицу времени (*плотность потока масс*) в количестве $\tilde{S}_m w_0$. Диффузионный поток обусловлен турбулентным перемешиванием, в результате которого через ту же поверхность за тот же промежуток времени вниз и вверх проходят одинаковые объемы смеси воды и наносов. Однако массы этих объемов различны, так как объемы, поднимающиеся снизу, содержат больше твердых частиц, чем движущиеся вниз (рис. 1.15). Таким образом, в данном случае создается результирующий перенос массы наносов из области высокой концентрации в область более низкой концентрации, т. е. снизу вверх. Для определения плотности диффузного потока твердых частиц имеем выражение $v_T \frac{d\tilde{S}}{dz}$, где v_T — коэффициент турбулентной диффузии. Таким образом, условием установившегося взвешивания служит равенство

$$\tilde{S}_m w_0 = -v_T \frac{d\tilde{S}}{dz}. \quad (1.26)$$

Разделяя в (1.26) переменные и интегрируя в пределах от $z = d$ (т. е. от поверхности дна) до текущего z получим

$$\tilde{S}(z) = \tilde{S}(d) \exp\left(-w_0 \int_d^z \frac{dz}{v_T}\right). \quad (1.27)$$

Учтя, что приближенный закон изменения коэффициента v_T по вертикали имеет вид

$$v_T = \alpha V^* h \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{z}{h}, \quad (1.28)$$

(здесь α — численный множитель, известный под названием постоянной Кармана) и подставив это значение в (1.27) получим закон распределения концентрации в окончательном виде

$$\tilde{S}(z) = \tilde{S}(d) \left(\frac{h-z}{z} \frac{d}{h}\right)^{\frac{w_0}{\alpha V^*}}. \quad (1.29)$$

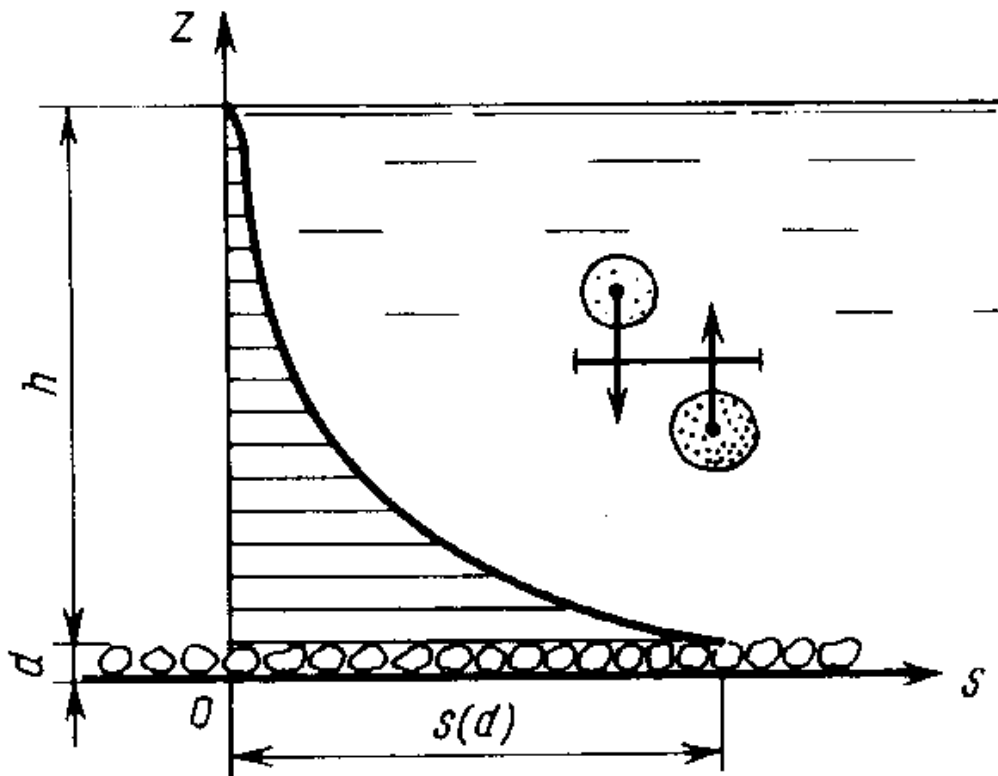


Рис. 1.15. Эпюра распределения концентрации взвешенных наносов на вертикали и схема турбулентного обмена через горизонтальную площадку

При неоднородных грунтах формула (1.29) должна быть применена для каждой фракции и получаемые значения отдельных концентраций должны складываться. Удельный расход взвешенных наносов будет равен

$$q_s = \int_d^h \sum \tilde{S}_i(z) V(z) dz. \quad (1.30)$$

Каждой скорости и глубине потока соответствует некоторое предельное насыщение потока взвешенными наносами определенной крупности. М. А. Великановым для определения предельного насыщения предложена формула придонной концентрации

$$\tilde{S}(d) = 0,8V^{*3} / (ghw_0). \quad (1.31)$$

Расход взвешенных наносов, отвечающий предельному насыщению, называется *транспортирующей способностью потока*, для определения которой существует целый ряд расчетных зависимостей.

Наиболее согласуемые с результатами натуральных наблюдений значения дает формула М. А. Великанова

$$q_s = AV^4/(\rho w_0), \quad (1.32)$$

где A — эмпирический коэффициент (порядка 10^{-5}), определяемый гидрометрическими измерениями.

В равнинных реках в половодье в состав взвешенных наносов попадают донные частицы крупностью до 0,25 мм. В меженный период транспортировки наносов во взвешенном состоянии практически не наблюдается.

1.3. ОБЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ РЕК

1.3.1. Уравнение деформации русла

Устойчивость частиц грунта, слагающего русло, при определенных значениях потока нарушается. Происходит отрыв частиц, их перемещение потоком и в дальнейшем отложение. Все эти явления объединяют одним термином — *русловые деформации*. Уравнение деформации устанавливает связь между расходом наносов и деформациями дна потока. Взаимодействие потока с размываемым руслом описывается законом сохранения массы (объема) наносов.

Рассмотрим некоторый участок русла длиной dx , шириной dy и глубиной h (рис. 1.16). Положим, что расход реки постоянен и поток находится в состоянии медленно изменяющегося режима. Это позволяет трактовать задачу как одномерную, считая, что гидравлические элементы потока зависят только от координаты длины x и от времени t . Обозначим полный расход русловых (взвешенных и влекомых) наносов, поступающих на участок dx через $q_s dy$, тогда расход наносов через нижнюю грань будет равен

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

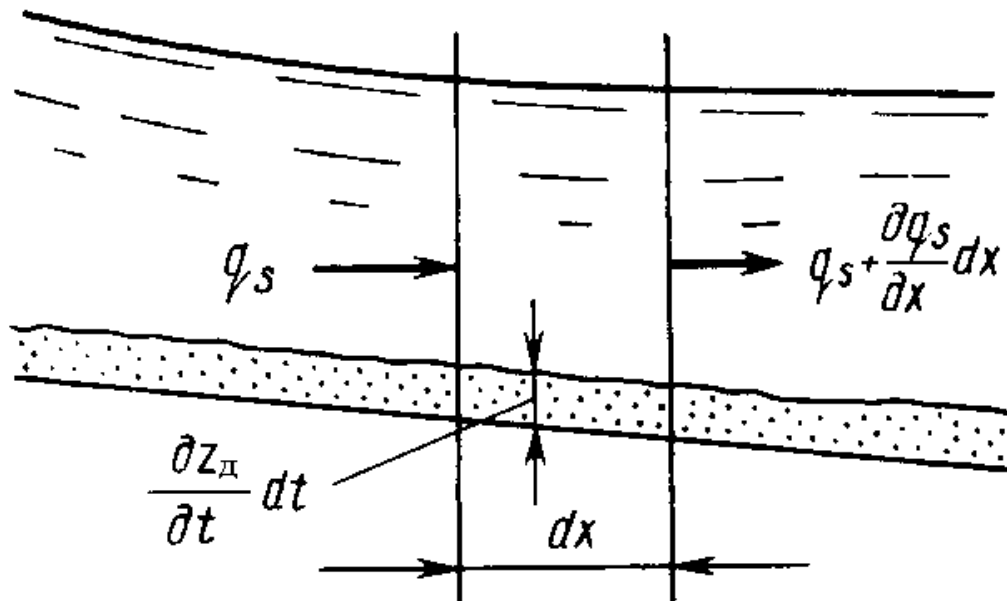


Рис. 1.16. Схема к выводу уравнения деформации

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

$$dV_1 = -\frac{\partial q_s}{\partial x} dx dy dt.$$

Эта разность должна равняться объему размывого (или намывного) грунта, который можно выразить следующим образом

$$dV_2 = (1 - \varepsilon) \frac{\partial z_d}{\partial t} dt dx dy,$$

где z_d — высота дна.

В силу равенства объемов V_1 и V_2 , и сократив члены на величину $dt dx dy$ получим

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial z_d}{\partial t} = 0. \quad (1.33)$$

Для практических расчетов представляет интерес изменение высоты дна, среднее по ширине потока или по ширине выделенной в потоке плановой струи. Проведя осреднение и введя вместо x криволинейную ось l русла (или струи), получим

$$\frac{\partial Q_s}{\partial l} + (1 - \varepsilon) b \frac{\partial z_{d\text{ср}}}{\partial t} = 0. \quad (1.34)$$

Здесь предполагается, что ширина русла (струи) b мало изменяется во времени. Обозначив через $\frac{\partial \omega}{\partial t} = b \frac{\partial z_{\text{дср}}}{\partial t}$ увеличение площади поперечного сечения струи за счет изменения дна русла *уравнение баланса наносов* (уравнение деформации) перепишем в виде

$$\frac{\partial Q_s}{\partial l} = (1 - \varepsilon) \frac{\partial \omega}{\partial t}. \quad (1.35)$$

Уравнение (1.35) может быть использовано как для расчета деформаций дна вдоль каждой из струй при двумерной постановке задачи, так и для всего русла при одномерной постановке.

Интегрирование дифференциального уравнения деформации возможно по двум схемам. Согласно первой в уравнение деформаций вводится заданное выражение для расхода наносов. При этом часто возникают трудности из-за сложности интегрирования. Более простой является численное интегрирование методом конечных разностей, применимое для любой формулы расхода наносов. Поток разбивается на участки конечной длины $\Delta l = l_i - l_{i-1}$. Расчеты ведутся за малые промежутки времени $\Delta t = t_k - t_{k-1}$. Если на момент времени t_{k-1} известны (из натурных измерений или на предыдущем шаге по времени) площади граничных сечений или их средние глубины, то, зная крупность донных отложений, расходы воды (скорости) находят расходы наносов в сечении для t_{k-1} : $Q_s(l_{i-1}, t_{k-1})$; $Q_s(l_i, t_{k-1})$. Тогда определение деформаций в i -ом сечении за время Δt производится по (1.35), записанной в конечных разностях

$$\omega(l_i, t_k) = \omega(l_i, t_{k-1}) + \frac{Q_s(l_i, t_{k-1}) - Q_s(l_{i-1}, t_{k-1})}{(1 - \varepsilon)\Delta l} \Delta t. \quad (1.36)$$

1.3.2. Сезонные деформации перекаатов

В силу того, что течение на перекаате всегда неравномерное, а часто и не плавно изменяющиеся, то перекааты подвержены сильным деформациям. При проектировании путевых работ наибольший интерес представляют ежегодно повторяющиеся циклы намыва и размыва пере-

катов. Их называют *сезонными деформациями перекатов*. Ежегодно весенняя заносимость перекатов определяет необходимость проведения дноуглубительных работ, т. е. обуславливает всю существующую организацию транзитного дноуглубления.

Различают два основных случая: перекаты, расположенные в уширениях меженного русла; перекаты, расположенные на участках с практически постоянной шириной. Первый случай преобладает в меандрирующих руслах, второй — в реках с побочным процессом.

Для первого случая типичным является одностороннее расширение русла. Перед перекатом один из пойменных берегов отворачивает в сторону, и около него образуется обширный нижний побочень. Верхний побочень, как правило, развит слабо (рис. 1.17). В меженный период побочни обнажаются, и ширина живого сечения в верхней плесовой ложине 1–1 и на перекате (сечение 2–2) примерно одинакова. От плесовой ложины к гребню переката глубины уменьшаются и, следовательно, уменьшается площадь живых сечений. Это приводит к увеличению скорости и расхода наносов. В соответствии с уравнением деформации (1.33) на напорном скате переката происходит размыв. Подъем уровней с последующим затоплением побочней приводит к резкому увеличению площадей живых сечений на перекате и, соответственно, уменьшению скоростей. В данный период на перекате происходит процесс отложения наносов. Количественной оценкой смены процесса размыва процессом намыва может служить изменение знака конвективного ускорения $V\partial V/\partial l$ на напорном скате переката. Толщина слоя весеннего намыва перекатов, расположенных в уширении русла, достигает 1,0–1,5 м. Намыв верхового ската в этот период бывает столь значителен, что гребень переката нередко смещается вверх по течению.

В случае, когда перекат расположен между параллельными пойменными берегами, повышение уровней (затопление побочней) увеличивает ширину русла в плесовой ложине так же, как и на перекате (рис. 1.18). Почти пропорционально увеличивается и скорость

течения. Однако направление скорости на перекате изменяется — при низких уровнях оно совпадает с направлением линии наибольших глубин, переходящей от одного берега к другому, а при высоких — становится параллельным берегам.

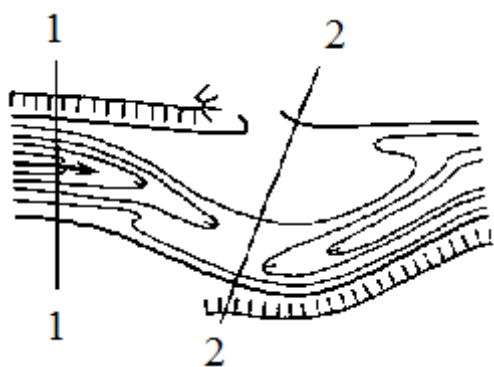


Рис. 1.17. План переката

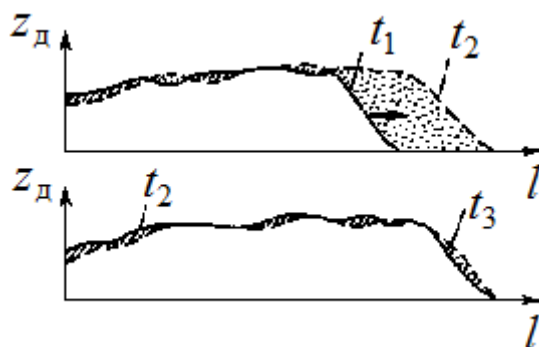


Рис. 1.18. Сезонные деформации перекатана участке с параллельными берегами (продольный профиль дна перед началом половодья t_1 , в середине спада t_2 и в конце навигации t_3)

Таким образом, для рассмотренного типа переката распределение деформаций по длине русла определяется ходом изменения глубин. Глубины в нижней части верхней плесовой лоцины и на пологом напорном скате переката падают относительно медленно и поэтому наблюдающийся здесь размыв русла охватывает слой небольшой толщины, но на участке значительной протяженности. Ввиду последнего обстоятельства к гребню переката транспортируется весьма существенное количество наносов. Попав на крутой тыловой скат (место резкого падения скорости течения), влекомые наносы останавливаются и, аккумулируясь на коротком участке, создают эффект продвижения вала переката в сторону нижней плесовой лоцины (см. рис. 1.18)

За время половодья это продвижение может составлять до 200–300 м. Из анализа уравнения деформаций следует, что $\partial Q_s / \partial l$ становится равным нулю там же, где и $\partial z_д / \partial l$, т. е. на гребне переката.

Это свидетельствует о том, что отметка гребня в нашем случае практически не меняется, а лишь испытывает циклические колебания с амплитудой в несколько десятков сантиметров за счет прохождения донных гряд. Таким образом, сезонные деформации перекатов в русле с малоизменяющейся шириной в основном состоят из их перемещения вниз по потоку во время стояния высоких уровней.

1.3.3. Паспорт переката

При проектировании путевых работ основное внимание должно уделяться обеспечению максимальной устойчивости судового хода. Для получения полных данных о многолетнем режиме русловых преформирований переката составляют *паспорт переката*. В паспорте приводится описание самого переката и подробные геоморфологические данные участка долины реки в границах весеннего затопления. Ежегодно к паспорту должны прилагаться план переката первой съемки и наиболее характерные повторные съемки. На планах наносят все землечерпательные прорезы, отвалы грунта, выправительные сооружения, знаки судоходной обстановки (см. раздел 2).

Подробный анализ русловых деформаций проводится в случае проектирования работ по коренному улучшению судоходных условий. При проектировании на реках эксплуатационных судоходных прорезей для анализа русловых деформаций допускается ограничиваться данными паспортов перекатов и выявлением особенностей их режимов в межень.

1.4. Уровенный и русловой режим водохранилищ

Водоохранилища делятся по гидрографическому признаку на три вида:

- *озерные*, образованные в чаше озер;
- *долинные*, созданные за счет затопления части речной долины;
- *смешанные*, размещенные частично в затопленной долине реки, частично в чаше озера, из которого река вытекает.

Основной характеристикой водохранилища являются кривые зависимости площади его зеркала F и объема V от уровня воды z (рис. 1.19). Их строят на основании подробной съемки чаши водохранилища, выполняемой при проектировании подпорного гидроузла.

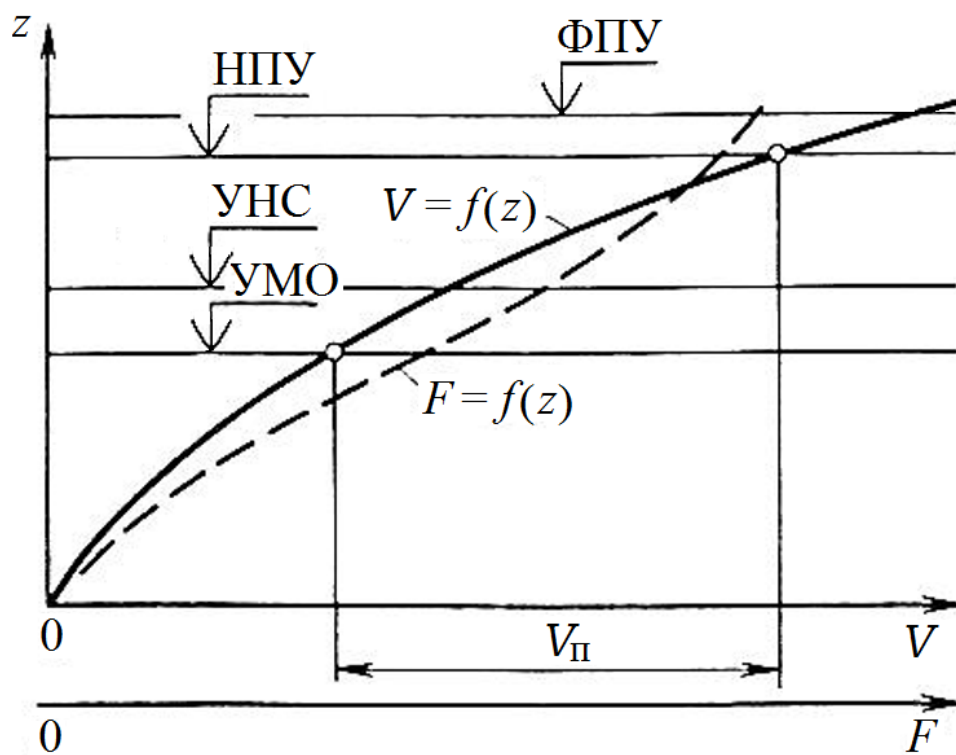


Рис. 1.19. Кривые площади зеркала и объема водохранилища

На эти кривые наносят расчетные уровни воды, которые включают:

- НПУ — *нормальный подпорный уровень*, до которого наполняется водохранилище при нормальной эксплуатации;
- УНС — *уровень навигационной сработки*, до которого разрешается сбрасывать водохранилище в период навигации;
- УМО — *уровень мертвого объема* — предельный уровень сработки;
- ФПУ — *форсированный подпорный уровень*, до которого возможно повышение уровня воды в водохранилище при пропуске половодья с обеспеченностью 0,01% (повторяется один раз в 10000 лет).

Объем, заключенный между нормальным подпорным уровнем и уровнем мертвого объема, называется *полезным объемом водохранилища*, а объем, лежащий ниже уровня мертвого объема, называется *мертвым объемом*.

На реках России много крупных водохранилищ, которые коренным образом меняют режим рек и судоходные условия на них. В зоне водохранилища условия плавания близки к тем, которые имеются в больших озерах. Ниже гидроузла, подпирающего водохранилище, судоходство должно считаться с особым ходом колебаний расходов и уровней и с изменившимся характером руслового процесса.

Амплитуда колебаний подпорных уровней (глубина сработки) у водохранилищ, созданных низко и средненапорными плотинами, всегда бывает меньше амплитуды колебаний в реке в естественном ее состоянии. У водохранилищ, подпертых высоконапорными плотинами, глубина сработки может быть очень большой.

Годовой ход уровней у водохранилищ отличается плавностью, и характер его мало изменяется из года в год.

Вследствие большой площади зеркала водохранилищ существенное влияние на уровеньный режим водохранилища оказывает ветер, энергия которого передается массам воды посредством сил трения на границе раздела двух сред. Часть переданной энергии расходуется на образование волн, другая часть — на образование дрейфового течения (движение поверхностных слоев воды в направлении действия ветра). В водоемах ограниченных размеров это приводит к перекосу свободной поверхности: у наветренного берега уровень воды понижается и возникает ветровой сгон, а у подветренного — повышается, т. е. возникает ветровой нагон (разница уровней доходит до 1 м и более).

При длительном ветре перекося становится стабильным и массы воды, которые подводятся к подветренному берегу дрейфовым течением, отводятся в обратную сторону придонным течением. Величина ветрового нагона учитывается при назначении отметок гребней под-

порных сооружений, а значение стока необходимо знать для назначения отметок дна водохранилищ и портовых акваторий.

Русловый процесс в водохранилищах характеризуется тремя основными явлениями:

- аккумуляцией наносов;
- деформацией берегов;
- отложением наносов у входов в заливы и бухты.

Аккумуляция наносов является следствием падения скоростей при переходе от речного потока к водоему с малыми, часто близкими к нулю скоростями. Весь сток русловых и значительная часть внерусловых наносов, транспортируемых реками во взвешенном состоянии, оседает и остается в водохранилище. Для горных рек это может представлять опасность, так как объем годового стока наносов соизмерим с объемом водохранилища. Для большинства равнинных рек это не опасно. Однако необходимо считаться с одним частным проявлением процесса аккумуляции наносов в водохранилищах — с повышением гребней перекатов в верховой зоне водохранилищ. На рис. 1.20 показаны свободные профили свободной поверхности водохранилища при НПУ и УНС, и реки в естественном состоянии при весеннем и меженном расходах воды. Зона водохранилища расположенная между весенним (1–2) и меженным (3–4) участками выклинивания, представляет собой участок переменного подпора: при больших расходах движение потока здесь такое же, как было до сооружения плотины, а с уменьшением расходов воды эта зона попадает в подпор. Поэтому отложение наносов происходит в периоды высоких уровней воды так же, как при естественном состоянии рек, а размыва не происходит. В результате наносы из года в год накапливаются, и, соответственно, растут гребни перекатов. После нескольких годовых циклов рост гребней затухает, достигается равновесие между потоком и руслом.

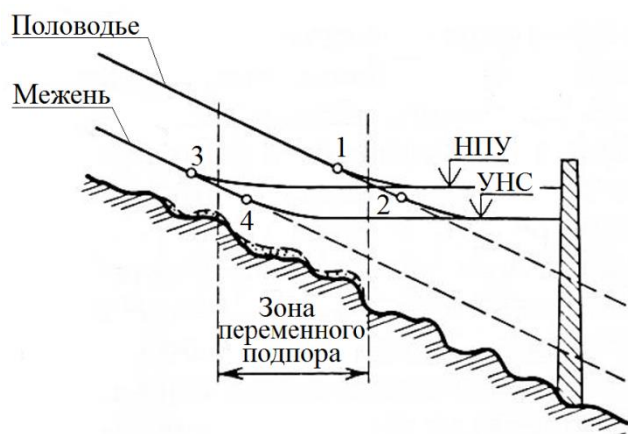


Рис. 1.20. Отложение наносов на перекатах:
1, 2 — русловые границы участка выклинивания подпора в половодье; 3, 4 — то же в межень

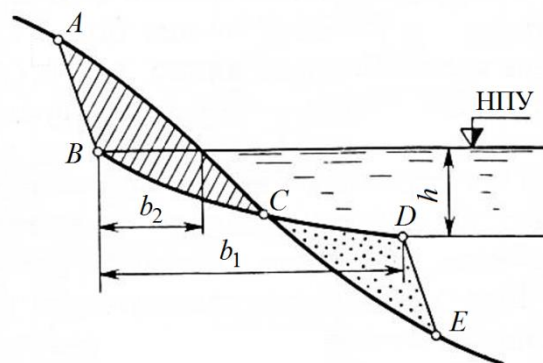


Рис. 1.21. Переформирование берегового склона:
ACE — профиль берега до затопления чаши водохранилища; *ABDE* — после переработки волнением; b_1 — ширина пляжа; b_2 — отступление береговой линии

Берегами водохранилища, созданного затоплением участка долины, могут быть или уступы одной из надпойменных террас, или коренные берега долины. Они обычно имеют крутые склоны, которые начинают обрушаться под действием ветровых волн, что сопровождается отступлением береговой линии и формированием новых берегов с пологими подводными откосами. Отступления составляют на отдельных водохранилищах до 100 м. Переформирование (деформация) берегового склона показано на рис. 1.21.

Переформирование берегов происходит наиболее интенсивно в первые 5–10 лет, а затем в течение 20–30 лет постепенно затухает. Разбиваясь о берег, волны подмывают его примерно на высоте НПУ, надводный откос разрушается и большая часть обрушившегося материала остается в прибойной части, формируя подводный пляж. Процессы подмыва и обрушения прекращаются, когда ширина пляжа становится настолько большой, что вкатываясь по нему разбитая волна теряет свою кинетическую энергию, не достигая берега.

Если волны подходят к берегу под острым углом, то, разбиваясь, они создают вдольбереговое течение воды, скорости которого со-

измеримы со скоростями речного потока (1 м/с и более) и достаточны для перемещения донных частиц. Если на пути этого течения встречаются устья заливов, где дно резко понижается, поток теряет скорость и происходит отложение наносов (рис. 1.22).

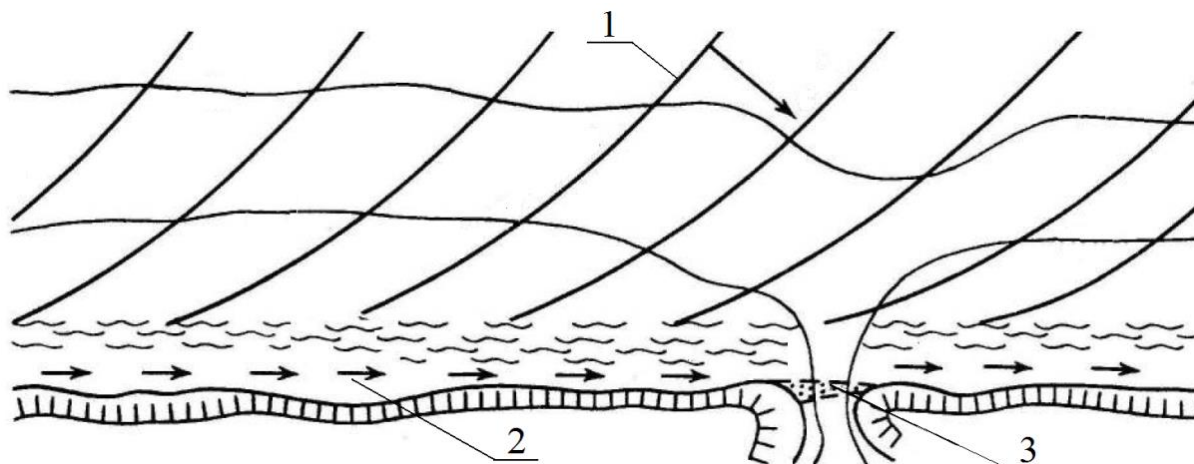


Рис. 1.22. Отложение наносов у входов в заливы и бухты:

1 — фронт волны; 2 — вдольбереговое течение, 3 — отложение наносов

Поэтому после каждого сильного шторма в устье залива остается вал наносов, иногда перекрывающий его по всей ширине. В тех заливах, где расположены пристани и порты-убежища, эти наносы приходится удалять с помощью дноуглубительных снарядов.

1.5. Особенности руслового процесса рек с зарегулированным стоком

В результате годичного и многолетнего регулирования изменяется режим стока ниже водохранилищ — прежде всего, уменьшается или сводится к нулю объем паводков и увеличивается расход воды в летнюю межень, что имеет наибольшее значение для речного транспорта. Многолетнее и годичное регулирование позволяет увеличить эти расходы по сравнению с естественным режимом в 2–3 раза.

Изменения, вносимые в режим речного стока годичным и многолетним регулированием, охватывают протяженные участки рек. На участки реки, прилегающие к плотине, также накладываются колеба-

ния расхода воды, вызванные суточным и недельным регулированием. С удалением от плотины эти колебания постепенно затухают. Суточные колебания расхода воды распространяются на расстояние 50–70 км от плотины, недельные — на 150–200 км.

Так как большой размах колебаний уровней, наблюдающийся у ГЭС, сохраняется и в устье нижнего походного канала к шлюзу, то судоходство испытывает в нижних бьефах серьезные трудности. Они возникают при выполнении в подходных каналах операций входа и выхода, проводке крупнотоннажных судов через перекаты и при перегрузочных операциях в портах.

Перераспределение стока, производимое годичным и многолетним регулированием, вносит существенные коррективы в ход руслового процесса и в состояние глубин на перекатах. Если половодья становятся редкими, а высота их сильно снижается, то:

1) происходит прекращение пойменных деформаций и преобразование русла в свободноеандрирующее или с побочным типом руслового процесса;

2) изменяются условия сопряжения с притоками.

Если половодье на главной реке задержано водохранилищем, кривые свободной поверхности притока принимают форму кривых спада — глубины к направлению к устью уменьшаются, уклоны и скорости растут (рис. 1.23, *а*). Увеличение скоростей на приустьевом участке притока приводит к размыву его русла.

Крупные притоки не только сбрасывают в главную реку наносы, но и во время половодья подпирают ее, из-за чего скорости течения на участке подпора резко падают и создаются условия для общего заиления русла (рис. 1.23, *б*).

Основное направление руслового процесса на участке, прилегающем к гидроузлу, состоит в общем и местном размыве русла (рис. 1.24).

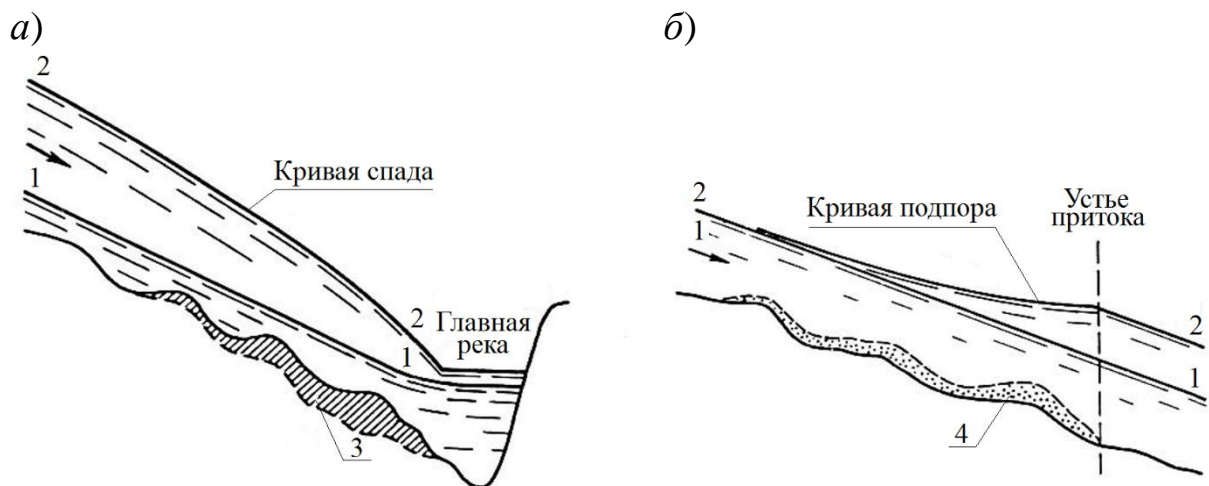


Рис. 1.23. Сопряжение реки с притоком:

a — продольный разрез по притоку зарегулированной реки;
б — продольный разрез по зарегулированной реке выше устья крупного притока: 1-1 — профиль свободной поверхности перед началом половодья на притоке; 2-2 — профиль во время половодья; 3 — размыв дна на приустьевом участке притока; 4 — отложение наносов на перекатах зарегулированной реки

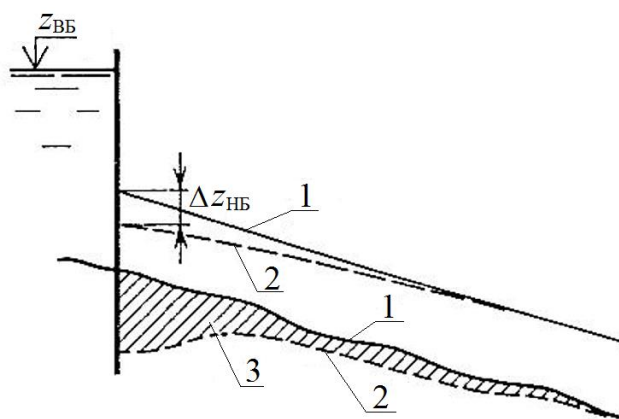


Рис. 1.24. Размыв дна в нижнем бьефе подпорного гидроузла:

1 — профили дна и свободной поверхности в естественном состоянии;
 2 — то же после размыв; 3 — размыв дна

Причиной общего размыва служит задержка стока наносов водохранилищем, а местный размыв в непосредственной близости к сооружению вызван большими скоростями и высокой интенсивностью пульсаций потока. Размыв приводит к понижению свободной поверхности потока $\Delta z_{НБ}$ на 0,5–1,0 м.

2. ПУТЕВЫЕ РАБОТЫ НА РЕКАХ

2.1. ГАБАРИТЫ ПУТИ И МЕТОДЫ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

2.1.1. Нормирование габаритных размеров судового хода

Для движения судов требуется пространство ограниченной глубиной h и ширины b (рис. 2.1). При этом его очертания в плане, которые характеризуются не только шириной, но и минимальным радиусом r кривизны, должны быть плавными. Кроме того, для движения надводных судов требуется свободное пространство над уровнем воды, в тех местах, где водный путь пересекает мосты и линии электропередач. Высота h_{br} и ширина b_{br} также определяют возможность плавания судов. Элементы h , b , r , h_{br} называются *габаритами судового хода*.

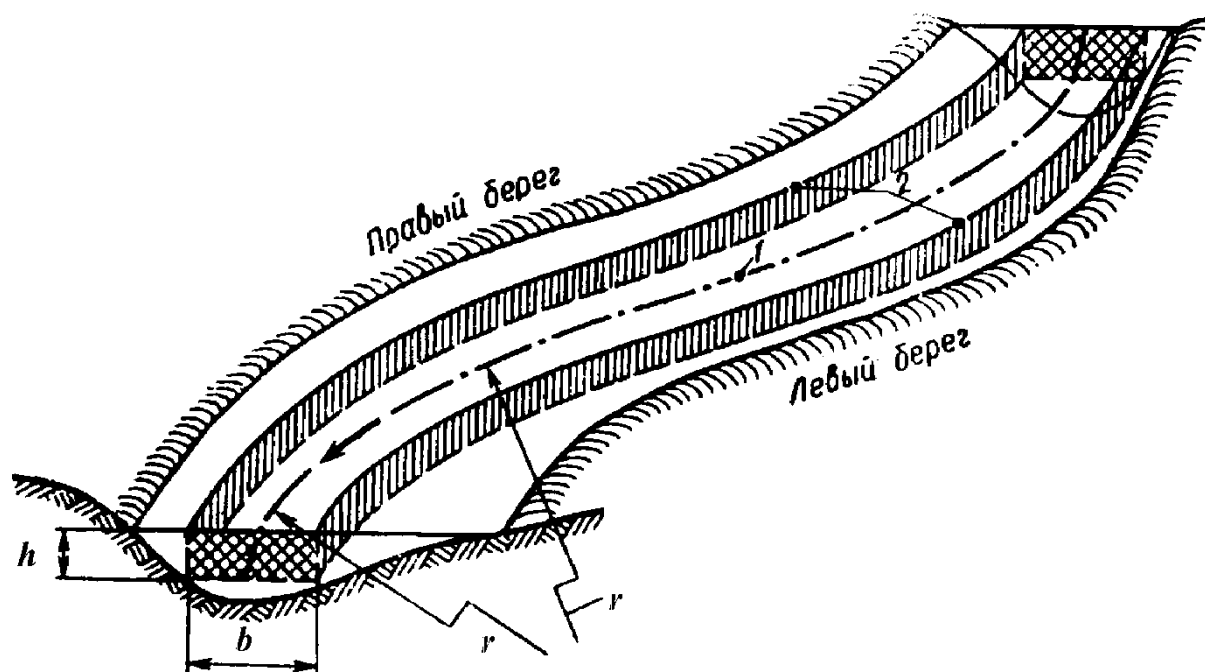


Рис. 2.1. Габариты судового хода:
1 — ось судового хода; 2 — кромки судового хода

Судовым ходом называется водное пространство, ограниченное указанными габаритами и обозначенное на местности знаками судо-

ходной обстановки. Судоходные условия на водных путях характеризуются, кроме габаритов, также ветроволновым режимом, скоростью и направлением течения, и качеством действия судоходной обстановки.

Единой классификации внутренних водных путей по их значимости для всех видов деятельности пока нет. Наиболее полно отражает большое число характеристик внутренних водных путей классификация представленная в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Классификация внутренних водных путей

| Класс внутреннего водного пути | Гарантированная глубина судового хода h_r , м | Ширина судового хода b_r , м | Радиус закругления r , м |
|--------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------|
| I (сверхмагистральные) | > 3,2 | 100–85 | 1000–600 |
| II (магистральные) | 2,5–3,2 | 75–70 | 600–350 |
| III (магистральные) | 1,9–2,5 | 75–70 | 600–350 |
| IV (магистральные) | 1,5–1,9 | 50–40 | 300–200 |
| V (местного значения) | 1,1–1,5 | 50–40 | 300–200 |
| VI (местного значения) | 0,7–1,1 | 20–14 | 120–90 |
| VII (местного значения) | 0,5–0,7 | 20–14 | 120–90 |

Габариты судового хода по глубине и ширине устанавливаются как минимальные, так и дифференцированные, в зависимости от уровня воды. Габариты, которые должны обеспечиваться в течение всей навигации, называются *гарантированными габаритами* судового хода.

Минимальные габариты судового хода определяют типы и размеры судов, пригодных для плавания на данном участке. Основные размеры судов — осадка, ширина, длина, высота надводного борта с надстройками — должны быть меньше минимальных габаритов судового хода для того, чтобы обеспечить сохранность корпусов и меха-

низмов судов, а также сооружений. Величины запаса по глубине и ширине определяются Правилами плавания по внутренним судоходным путям Российской Федерации.

Минимальный запас по глубине зависит от характера грунта (песок, камень), типа судна (самоходные и несамоходные), рода груза (нефтепродукты, сухогрузы), глубины судового хода и составляет от 5 до 40 см.

Запас по ширине должен обеспечивать возможность маневрирования судов в пределах судового хода и расхождения судов.

Максимальная длина судов и составов лимитируется минимальным радиусом кривизны судового хода.

Запасы по высоте зависят от типа надводного перехода (линия электропередачи, линия связи, мост (рис. 2.2)). Они устанавливаются в зависимости от класса внутреннего водного пути (табл. 2.2, 2.3).

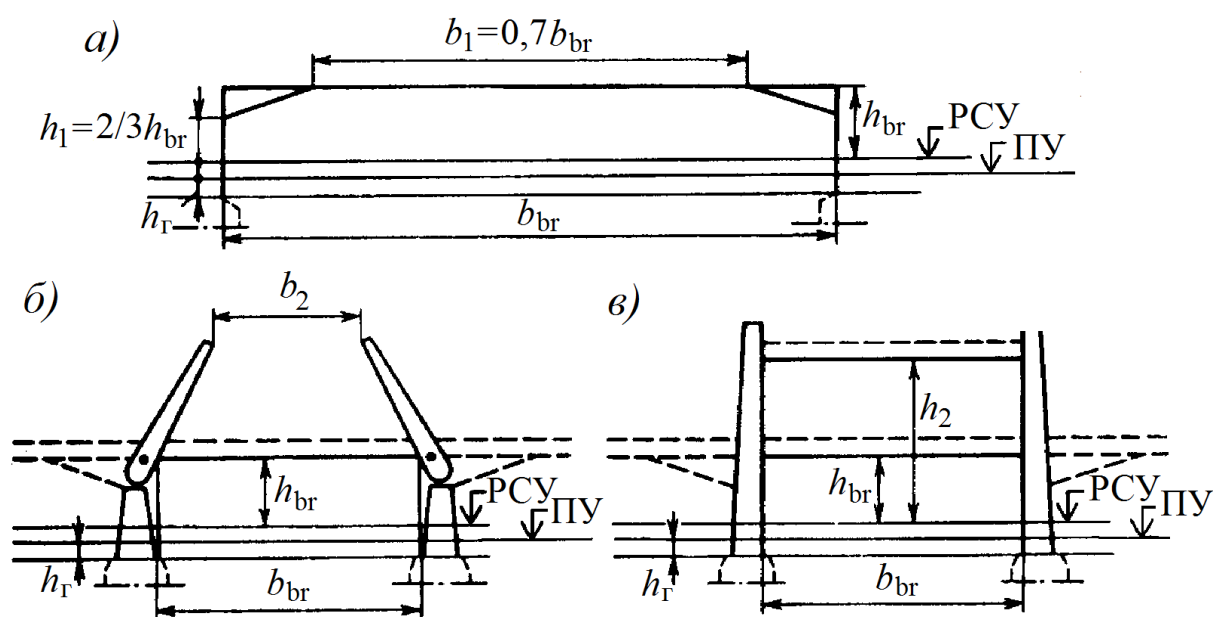


Рис. 2.2. Схема судового пролета мостового перехода:
 а — неразводного моста; б — раскрывающегося моста;
 в — вертикально-подъемного моста

Таблица 2.2

Значения подмостовых габаритов

| Класс внутреннего водного пути | Высота от РСУ, h_{br} , м | Ширина подмостового пути, м, при | | |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------|---------------------------|
| | | неразводных пролетах, b_{br} | | разводных пролетах, b_2 |
| | | основном | смежном | |
| I | 16,0 | 140 | 120 | 60 |
| II | 14,5 | 140 | 100 | 60 |
| III | 13,0 | 120 | 80 | 50 |
| IV | 11,5 | 100 | 80 | 40 |
| V | 10,0 | 80 | 60 | 30 |
| VI | 7,5 | 60 | 40 | – |
| VII | 5,0 | 40 | 30 | – |

Таблица 2.3

Значения расстояний от проводов воздушных линий

| Расстояние от воздушной линии | Наименьшие расстояния, м, при напряжении воздушной линии, кВ | | | |
|--|--|-----|-----|-----|
| | < 110 | 220 | 330 | 500 |
| До максимального уровня воды | 6,0 | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
| До верхних частей судов при максимальном уровне воды | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 4,5 |

2.1.2. Мероприятия для поддержания и улучшения судоходных условий на водных путях

Для поддержания и улучшения судоходных условий на водных путях применяют следующие мероприятия:

- траление;
- руслоочищение;
- землечерпание;
- скалоуборочные работы;
- выправление;
- оснащение пути судоходной обстановкой.

Траление — это проверка чистоты судовых ходов и обнаружение подводных препятствий, представляющих опасность для плавающих судов. Данный вид работ производится с помощью специальных плавучих устройств — тралов.

В зависимости от характера и сроков проведения различают:

– местное траление проводят один раз в 7–30 дней на участках верхних и нижних плесовых лощин, прилегающих к перекатам с песчаным руслом, глубина на которых равна гарантированной или превышает ее не более чем на 30–50 см;

– сплошное траление, как правило, выполняется на спаде половодья, при наступлении межени и в дальнейшем через каждые 1,5–2 месяца, в зависимости от интенсивности движения на участке.

– аварийное траление на ограниченном участке в случае аварии с судном или плотом, если утерян якорь, лот и т. п.

Для проведения работ используют мягкие, полужесткие и жесткие тралы.

Мягкий (гибкий) трал, представляющий собой пеньковый или стальной трос, волочащийся по дну, используют для сплошного траления участков с песчаным грунтом (рис. 2.3, а). Обнаруживаемые в процессе траления подводные препятствия извлекают с помощью дноочистительных снарядов.

Для траления судовых ходов на крупных реках, озерах и водохранилищах применяется полужесткий поплавковый трал с тросом, поддерживаемым на заданной глубине металлическими буюми. Ширина протраливаемой полосы — до 150 м, а буксируется трал в этом случае двумя судами, движущимися против течения.

С помощью *жестких тралов* проверяют чистоту судовых ходов тралением на заданной глубине. Основными типами являются лодочный (промерная рама), судовой, сцепной и понтонный тралы. Простейшим жестким тралом является тральная рама (рис. 2.3, б). Наиболее распространены счалы жестких лодочных тралов с длиной каждой секции 6 м, которыми производится местное траление каменистых

участков для определения глубины последовательными заездами с обязательным перекрытием смежных протраливаемых полос. На рис. 2.4 показан жесткий буксируемый секционный трал на понтонах, который является более совершенным и удобным в эксплуатации устройством.

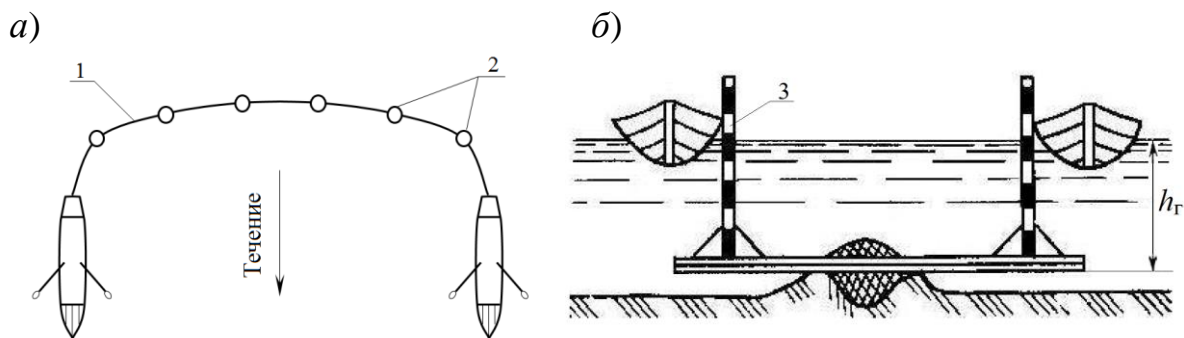


Рис. 2.3. Тралы:
a — мягкий; *б* — жесткий лодочный:
 1 — трос; 2 — грузы; 3 — тральная рама

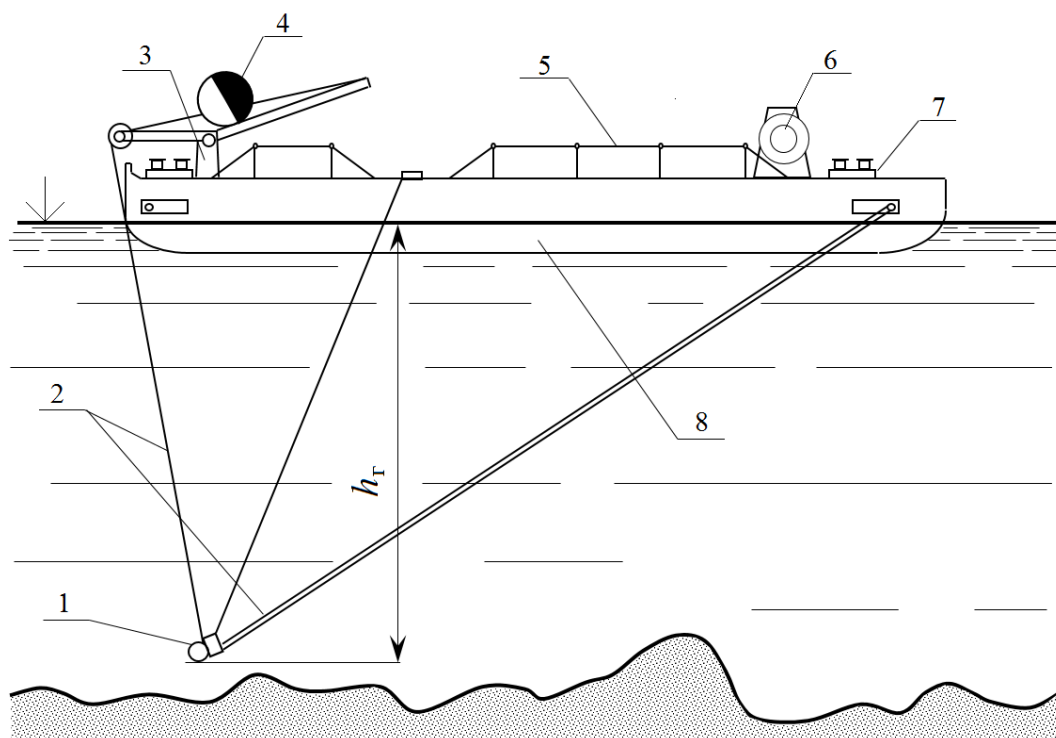


Рис. 2.4. Жесткий понтонный трал:
 1 — тралящая труба; 2 — тросы, удерживающие тралящую часть;
 3 — рычаги, поворачивающиеся при задевании трала за препятствие;
 4 — сигнальный буй; 5 — леерное ограждение;
 6 — лебедка; 7 — буксирные кнехты; 8 — понтон

Руслоочищение — это удаление из русла реки (со дна — дноочищение и с берегов — берегоочищение) различных предметов — карчей, топляков, камней, якорей, затонувших судов, представляющих опасность для судоходства.

На реках применяются преимущественно два типа дноочистительных снарядов (карчекранов) — самоходный и несамоходный. Основное рабочее устройство снаряда — кран грузоподъемностью 5–20 т, оборудованный грейфером для извлечения подводных препятствий (рис. 2.5).

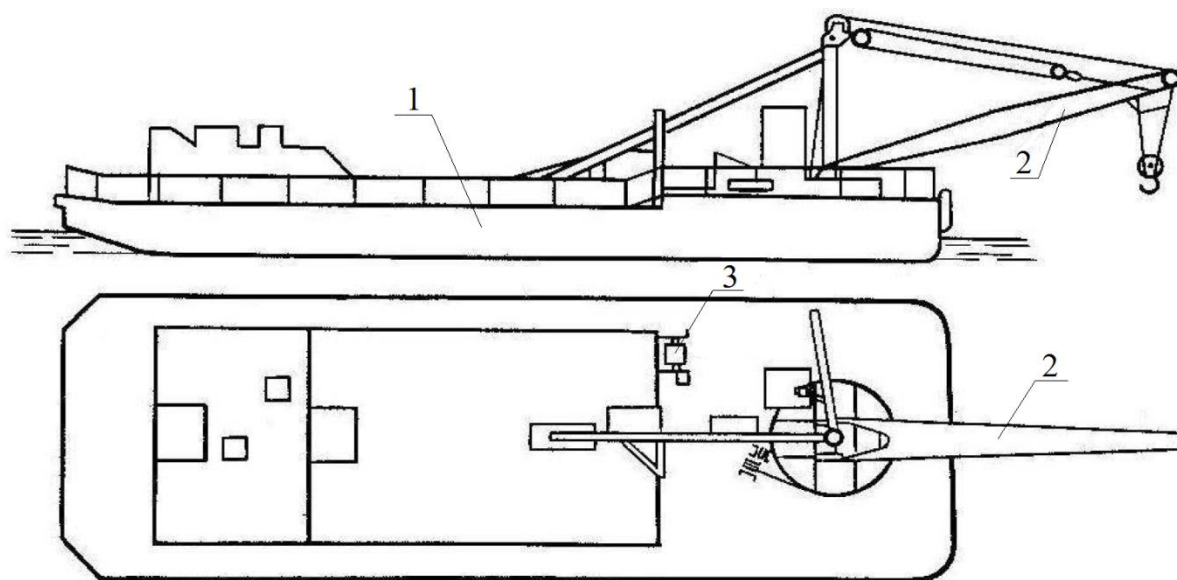


Рис. 2. Несамоходный дноочистительный снаряд:
1 — корпус судна; 2 — стрела; 3 — лебедка

Берегоочистительные работы, как правило, выполняются в межнавигационный период путевыми работниками и заключаются в уборке упавших в воду деревьев и камней и в рубке деревьев, которые в результате подмыва берега могут оказаться в реке.

Землечерпание — это работа по углублению затрудненных для судоходства участков путем разработки судоходных прорезей в русле реки землечерпательными снарядами (земснарядами) (рис. 2.6).

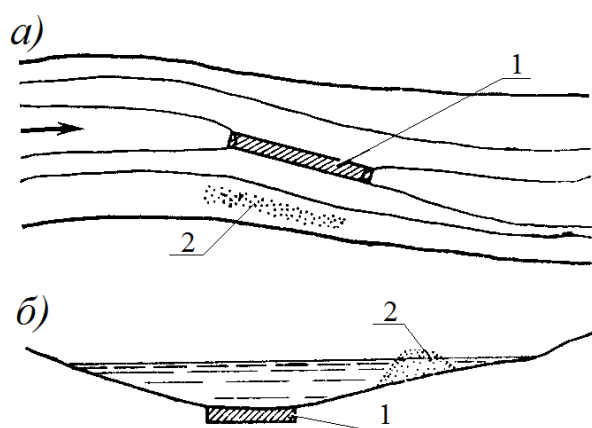


Рис. 2.6. Русло реки
при землечерпании:

a — план; *б* — поперечный профиль;
1 — землечерпательная прорезь;
2 — отвал извлеченного грунта

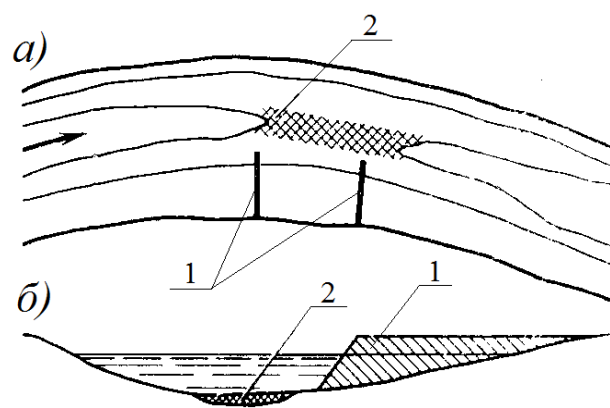


Рис. 2.7. Русло реки
при выправлении:

a — план; *б* — поперечный профиль;
1 — выправительное сооружение;
2 — зона размыва

Скалоуборочные работы состоят из дробления скалы, подъема и удаления раздробленных камней и проводятся с целью углубления и расширения существующих судовых ходов или создания новых судоходных трасс.

Выправление — это строительство в русле реки сооружений, под влиянием которых энергия речного потока используется для размыва мелких мест русла, перемещения наносов и их отложения в более глубоких местах — плесовых лощинах (рис. 2.7). Эти же сооружения служат и для *берегоукрепления*, т. е. для предохранения берегов рек от размывов.

В зависимости от назначения выправительные сооружения должны обеспечивать:

- перемещение за пределы судового хода транзитных наносов, поступающих на улучшаемый участок реки;
- углубление дна реки в границах судового хода за счет увеличения скорости и изменения направления течения;

– отложение наносов во вредных затонных емкостях перекатов и в несудоходных протоках, неблагоприятно влияющих на состояние судового хода;

– защиту берегов от размыва;

– предотвращение нежелательных русловых переформирований.

Выправительные сооружения делятся на сооружения долговременного и кратковременного (для улучшения судоходных условий в течение одной навигации) действия.

Различают две системы выправления рек — сплошную (по всей длине реки) и выборочную (на наиболее затруднительных участках).

К выправительным сооружениям относят: полузапруды, запруды и струенаправляющие дамбы.

Полузапруда (рис. 2.8) представляет собой примыкающее к берегу сооружение, которое перекрывает часть поперечного сечения русла на затруднительном участке. Она перераспределяет расход воды по ширине русла, увеличивает скорость течения по судовому ходу, приводит к размыву дна переката и увеличению глубины.

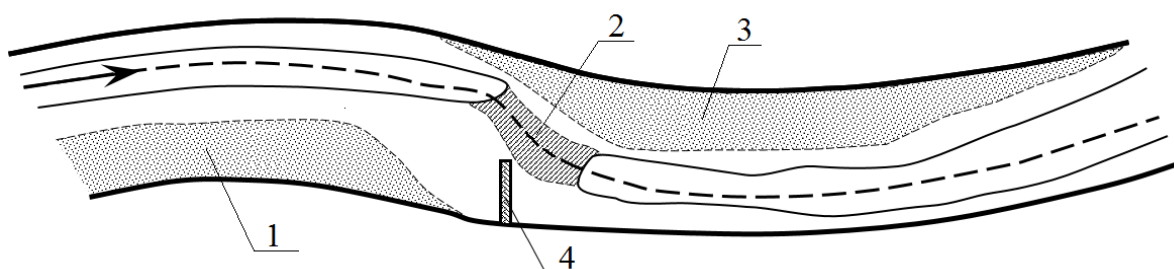


Рис. 2.8. Полузапруда на перекате:
1, 3 — верхний и нижний побочни;
2 — зона размыва дна; 4 — полузапруда

Запруда (рис. 2.9) представляет собой сооружение, которое перекрывает несудоходный рукав. Поток воды распределяется в пользу судоходного рукава, увеличивая тем самым скорость течения, под воздействием которой происходит размыв дна и углубление переката.

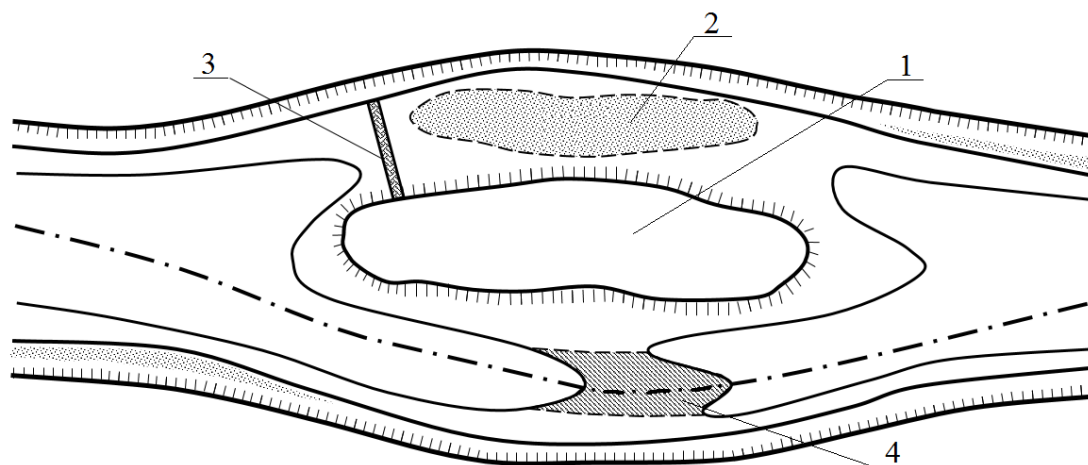


Рис. 2.9. Запруда:

- 1 — остров; 2 — зона отложения наносов в несудоходном рукаве;
3 — запруда; 4 — зона размыва дна в судоходном рукаве

Струенаправляющая дамба (рис. 2.10) — продольное сооружение, предназначенное для направления течения в сторону судового хода или плавного сопряжения сливающихся потоков. Она ликвидирует свальные течения и предотвращает отложения наносов на судовом ходу.

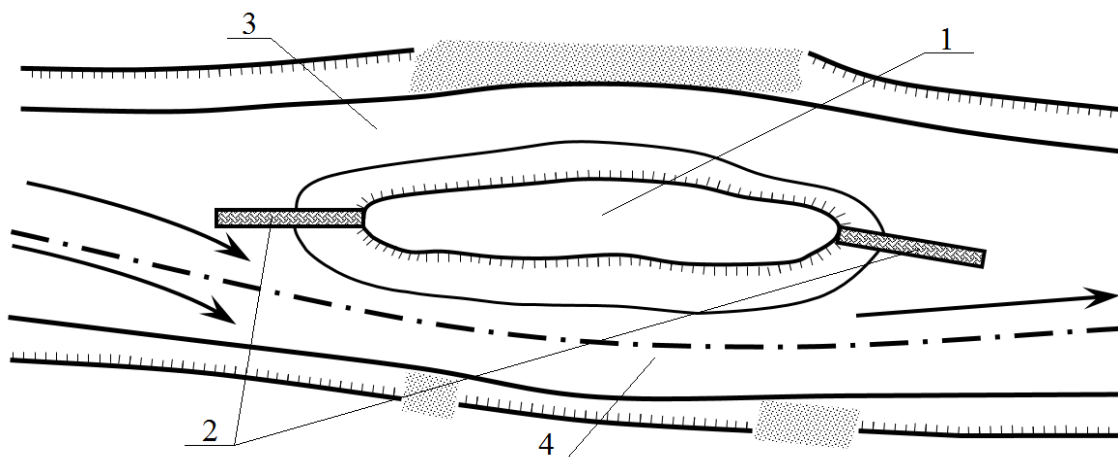


Рис. 2.10. Продольные струенаправляющие дамбы:

- 1 — остров; 2 — дамбы; 3 — несудоходный рукав;
4 — судоходный рукав

Землечерпательные, выправительные и скалоуборочные работы относят к *дноуглублению*.

По назначению различают работы, направленные на коренное улучшение судоходных условий на определенном участке реки, и эксплуатационные работы по поддержанию существующего судового хода.

Систематически проводимые дноуглубительные работы позволяют обеспечить рост гарантированных глубин на свободных реках. Очевидно, что этот рост не может продолжаться неограниченно. За теоретический предел увеличения глубин обычно принимается средняя глубина плесовых лощин при проектном уровне воды. Практически допускается увеличивать глубины лишь до тех пор, пока снижение уровня не превзойдет некоторой малой величины, например, средней ошибки промеров глубин (около 0,1 м). Соответствующая транзитная глубина плеса получила название *гидравлически допустимой*.

Судоходная обстановка представляет собой систему навигационных знаков (береговых и плавучих) для обозначения на местности положения судового хода и отдельных препятствий, опасных для судоходства. Она предназначена для обеспечения на водных путях безопасного и беспрепятственного плавания судов, судовых и плотовых составов и, следовательно, является неотъемлемой частью мероприятий комплекса технической эксплуатации воднотранспортных систем.

Выход судна за пределы судового хода может повлечь аварийную ситуацию, поэтому важнейшей задачей судоходной обстановки является информирование судоводителей о расположении судового хода и, соответственно, обеспечивая движение судна в его границах.

Знаки судоходной обстановки бывают *береговыми* (рис. 2.11, а) и *плавучими* (рис. 2.11, б). Они указывают направление, границы и габариты судового хода, границы акваторий портов, пристаней и рейдов, места свальных течений, начало и конец однопутных участков и возможность движения по ним в том или ином направлении, судоходные пролеты мостов, подводные и надводные переходы и места, где суда должны подавать сигналы. Специальными знаками судоход-

ной обстановки регулируется движение судов, судовых и плотовых составов через судопропускные сооружения.

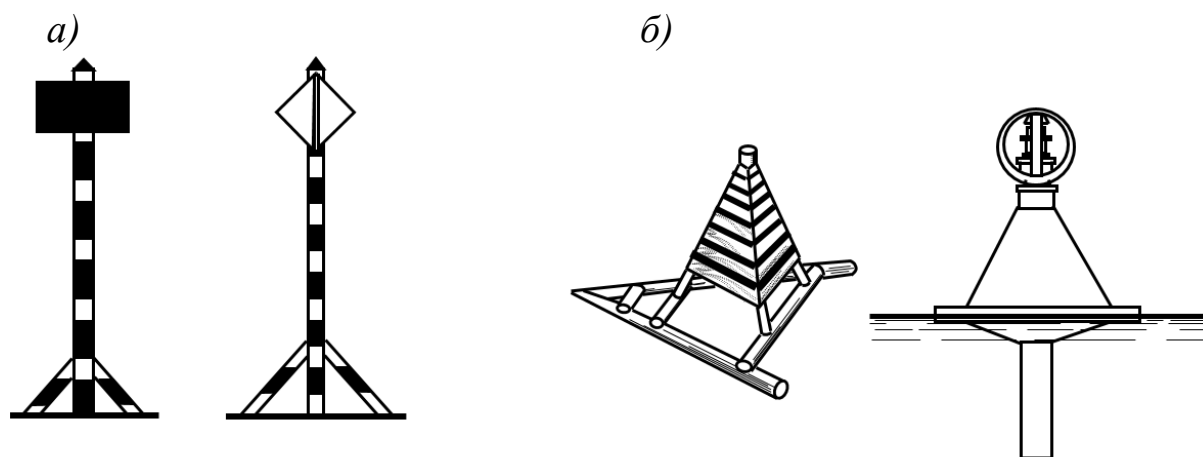


Рис. 2.11. Знаки судоходной обстановки на внутренних водных путях:
а — береговые знаки (перевальный, ходовой);
б — плавучие знаки (бакен, буй)

На водных путях с достаточно интенсивным судоходством для того, чтобы было возможно круглосуточное движение судов применяют освещаемые обстановочные знаки. На путях, где густота движения судов не оправдывает содержания освещаемой обстановки, знаки не освещаются и судоходство осуществляется лишь в светлое время суток. На тех путях, где судоходство не является интенсивным, но при этом требуется круглосуточное движение судов, применяется светоотражающая обстановка, обнаруживаемая с помощью судовых прожекторов.

На внутренних водных путях применяются следующие основные системы расстановки плавучих знаков: *латеральная* (ограждаются кромки судового хода) и *кардинальная* (препятствия ограждаются относительно стран света). Плавучие знаки каждой из указанных систем имеют свои отличительные признаки.

Форма, размеры, окраска и конструкции знаков судоходной обстановки, характеристики навигационных огней, а также технические требования на изготовление этих знаков и светосигнального оборудо-

вания определяются государственными стандартами, ведомственными нормами и типовыми проектами.

Наиболее распространенными береговыми обстановочными знаками являются створы. *Навигационный створ* представляет собой систему двух или нескольких знаков, с помощью которой судоводитель должен своевременно обнаруживать отклонение судна из зоны, безопасной для плавания — *створной зоны*. Существуют линейные, щелевые и кромочные створы.

Перевальные знаки указывают лишь примерное направление судового хода и поэтому применяются при большой ширине и небольшой длине участка судового хода. В отличие от створных знаков перевальные имеют, как правило, два щита, которые устанавливаются перпендикулярно двум направлениям судового хода.

В качестве плавучих знаков на внутренних водных путях применяют бакены, буи и вехи.

Бакены применяются только при латеральной системе, когда ограждаются правая и левая кромки судового хода. Состоит бакен из деревянного плотика и укрепленной на нем фигуры. В настоящее время вместо бакенов, как правило, используются *буи*. Буи по сравнению с бакенами имеют большую строительную стоимость, но являются более надежными при эксплуатации. Буй представляет собой плавучий объект, закрепленный ко дну якорем и обладающий высокой остойчивостью. В верхней части буя размещается отсек, в котором размещается навигационный фонарь с аккумулятором для его питания и устройством, устанавливающим режим его горения (постоянный, проблесковый, частопроблесковый).

Плавучие вехи применяют в качестве самостоятельного обстановочного знака на водных путях с неосвещаемой обстановкой. Кроме того, их ставят в качестве контрольного знака у бакенов и буюв, на случай их утраты или смещения. В верхней части вехи, в зависимости от кромки судового хода, на которой они стоят, располагается топографическая фигура.

Помимо геометрических особенностей формы как береговых, так и плавучих знаков, а также их цветового оформления, для участков с освещаемой навигационной обстановкой для каждого знака характерен свой цвет огня и режим его горения. Именно по этим характеристикам судоводитель отличает тот или иной знак в ночное время суток.

Знаки судоходной обстановки на водных путях расставляют согласно утвержденной схеме для непрерывного указания направления судового хода и его границ — на тех участках, где подводные препятствия расположены вблизи кромок хода.

На рис. 2.12 показан пример расстановки навигационных знаков на характерном участке реки. Буи 4–6, 8–10 ограждают кромки судового хода на перекатах, а правая кромка судового хода между перекатами обозначена буюм 7. Буй 6 является также разделительным, указывая судовой ход к местной пристани в левобережной протоке в начале участка, огражденный буями 1 и 2. Свальный буй 3, расположенный на левой кромке, служит для предупреждения судоводителей о свальном течении в правобережную протоку.

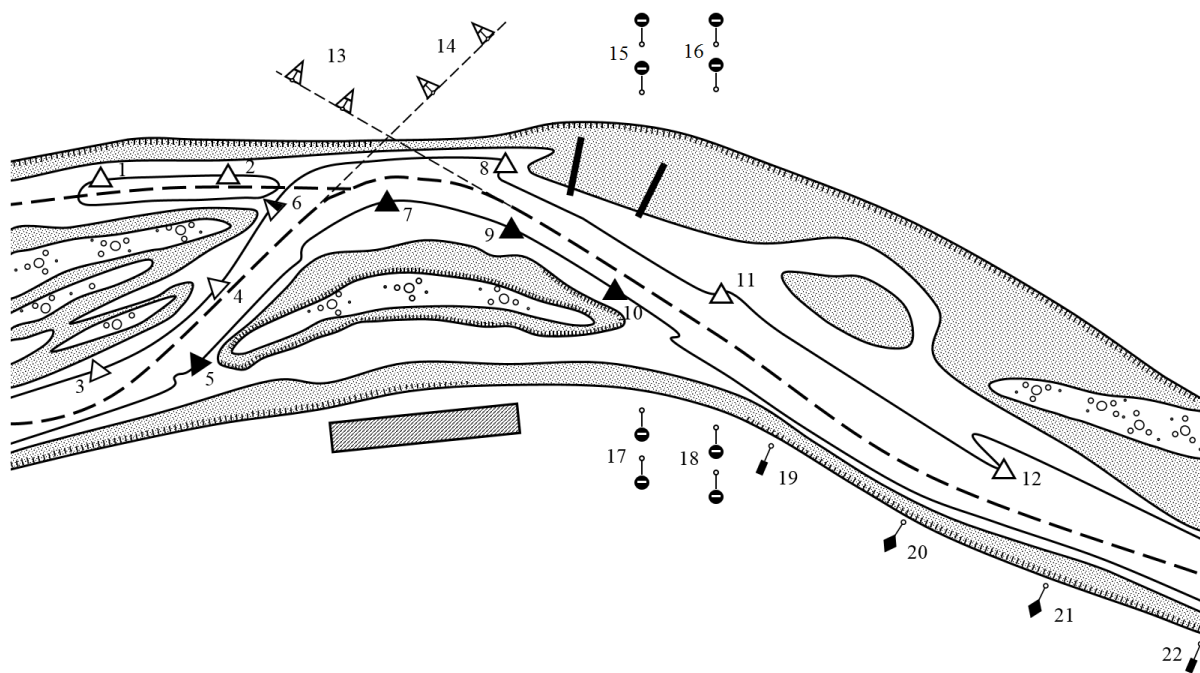


Рис. 2.12. Расстановка навигационных знаков на участке реки

Направление судового хода на перекатах указывается створами 13 и 14. На ходовом берегу за перекатами установлены перевальные знаки 19 и 22 и ходовые знаки 20 и 21. Ввиду того, что ширина судового хода не позволяет ограничиться только знаками на ходовом правом берегу, левая кромка судового хода обозначена белыми бакенами 11 и 12. Для указания границ зоны подводного перехода установлены знаки 15 – 18 «Якоря не бросать».

Кроме производства различных видов путевых работ на внутренних водных путях, коренное улучшение судоходных условий может быть достигнуто в результате регулирования стока рек.

Регулирование стока заключается в изменении режима уровней воды путем строительства плотин на реках и создания водохранилищ для сбора паводковых вод, которые затем расходуются в период межени.

2.2. СУДОХОДНЫЕ ПРОРЕЗИ И ОТВАЛЫ ГРУНТА

2.2.1. Требования к судоходным прорезям и значение отвалов грунта

При разработке земснарядом судоходной прорези через гребень переката, глубины на котором недостаточны для прохода речных судов и составов, создается подводный канал заданных габаритов. После разработки прорези с заглублением в речное дно на величину h_c глубина на прорези h_r будет равна гарантированной (рис. 2.13), т. е.

$$h_r = h_1 + h_c - \delta z,$$

где h_1 — глубина на перекате до разработки прорези; δz — понижение уровня воды в реке, вызванное разработкой прорези.

На многих перекатах дноуглубительные прорези постепенно деформируются. Если в половодье следующей после производства работ весны прорезь частично заносится, то ее приходится восстанавливать новым углублением. При более интенсивном поступлении

наносов с вышележащих участков приходится проводить ремонтные работы, т. е. повторно углублять пережат в одном и том же году.

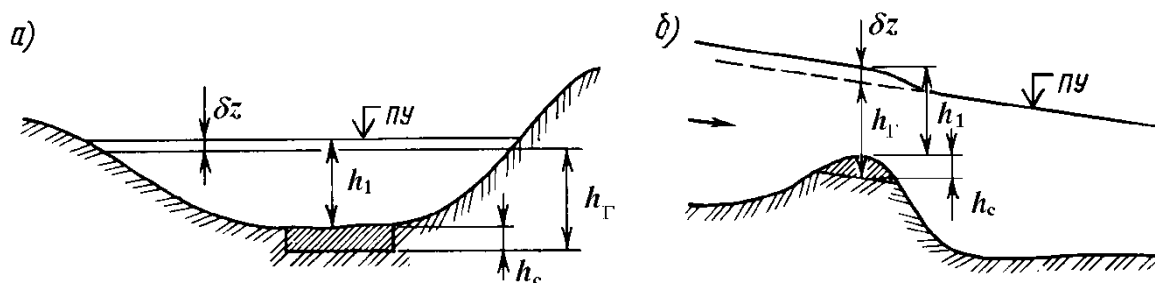


Рис. 2.13. Участок реки при землечерпании:
а — поперечный профиль; *б* — продольный профиль

По назначению судоходные прорезы бывают транзитные и вне-транзитные. Транзитные прорезы, в свою очередь, делятся на два вида: прорезы по коренному улучшению судоходных условий — *капитальные* и *эксплуатационные* (восстановительные и ремонтные). Эксплуатационные прорезы выполняются на существующем судовом ходу, капитальные служат для его переноса на новое место.

В результате разработки прорезей должно обеспечиваться систематическое улучшение судоходных условий. Для этого необходимо на затруднительном участке наметить принципиальную схему размещения прорезей, фиксирующую положение судового хода, и производить работы не вызывая нежелательных переформирований на соседних участках.

В зависимости от нужд судоходства, имеющихся технических средств для производства работ и местных особенностей русловых процессов улучшение судоходных условий осуществляется по-разному на каждом затруднительном участке. Однако существуют следующие основные требования к судоходным прорезям и отвалам грунта.

1. Прорези должны иметь габариты (глубину, ширину и радиус закругления) не ниже минимальных гарантированных и являться удобными и безопасными для прохода судов и плотов.

2. Прорези должны быть устойчивыми от последующей заносимости, т. е. повторные работы на них должны быть наименьшими. Это может быть достигнуто, например, при совпадении направления прорези с преобладающим направлением потока.

3. Прорези должны иметь наименьший возможный объем работ (минимально возможную длину) и соответственно минимальную стоимость и сроки работ.

4. Входы в прорези и выходы из них должны быть достаточно удобны для судоходства.

5. В пределах прорезей не должны образовываться резкие изменения глубин и скоростей воды как по длине, так и по ширине судового хода.

6. Прорези, трассируемые между крутыми изгибами русла, должны иметь прямолинейные участки, обеспечивающие сопряжение радиусов верхнего и нижнего поворотов русла при различных уровнях воды.

7. При проектировании прорезей необходимо обеспечивать наилучшую видимость на участках реки.

Практика дноуглубительных работ на перекатах показывает, что выбору места расположения отвалов грунта следует придавать не меньшее значение, чем выбору трассы прорези. Отвал грунта во всех случаях должен использоваться как временное или постоянное русло-регулирующее сооружение, активно воздействующее на речной поток в желательном направлении, т. е. создавать условия, обеспечивающие повышение устойчивости прорези и русла реки в целом.

Выбор места отвала грунта главным образом определяется следующими факторами: типом русла и переката, расположением прорези, геологическими условиями и способом транспортирования грунта

от земснаряда. Основные требования к размещению отвалов сводятся к следующему.

1. Извлекаемый из прорези грунт должен быть использован как для защиты выполненной судоходной прорези от заносимости, так и для постепенного придания руслу плавно-криволинейного очертания. Это достигается посредством повышения побочней, заполнения затонских и боковых емкостей, перекрытия побочневых протоков и второстепенных несудоходных рукавов.

2. Независимо от способа транспортирования грунта отвал не должен создавать затруднений для движения судовых составов через пережат.

3. Извлеченный грунт не должен попадать обратно в прорезь. Как правило, его следует укладывать в виде сплошного и распластанного вала, примыкающего к берегу или подводным русловым образованиям — побочням, косам и осередкам.

4. Отвал не должен излишне стеснять основное русло, так как это может привести к значительному увеличению скоростей течения в прорези, что затруднит судоходство, вызовет интенсивный размыв русла и перемещение наносов на нижележащий участок.

5. При разработке прорези следует отдавать предпочтение таким рабочим уровням воды, которые позволяют придавать отвалам грунта высоты, соответствующие высоте устойчивых побочней, вдоль которых обычно поддерживаются удобные судовые ходы.

6. Отвалы из глинистых и каменистых грунтов необходимо максимально использовать для строительства тяжелых выправительных сооружений или же размещать отвалы на таких участках, где в перспективе не будет проходить судовой ход.

При принятой схеме размещения прорези и отвала грунта стоимость дноуглубительных работ должна быть наименьшей, а гидравлический эффект от их комплекса — наибольший. Землечерпательные работы должны производиться с учетом обеспечения сохранности окружающей среды (см. раздел 3).

2.2.2. Трассирование судоходных эксплуатационных прорезей

Основным материалом, определяющим положение трассы эксплуатационной прорези, является план свежей (5 суток) русловой съемки, по которому можно судить о деформациях, произведенных текущим паводком, и о состоянии переката на данный момент. Применительно к эксплуатационным прорезям пользуются термином трассирование, так как проверять устойчивость такой прорези расчетом не требуется.

Для трассирования прорезей и выбора мест отвала грунта на наиболее распространенных типах перекатов практика дноуглубления выработала определенные рекомендации.

Пережат-перевал. Такой пережат характеризуется плавным переходом линии наибольших глубин от одного берега к другому, не заходящими друг за друга плесовыми лощинами и одинаково развитыми побочными. Прорезь на пережете-перевале трассируется по линии наибольших глубин. Отвалы в русле с побочным типом руслового процесса обычно располагают на верхнем побочне (рис. 2.14). Если ежегодные отвалы грунта позволили замедлить сползание верхнего побочня, прорези придается более пологое направление (на рис. 2.14 штриховая линия).

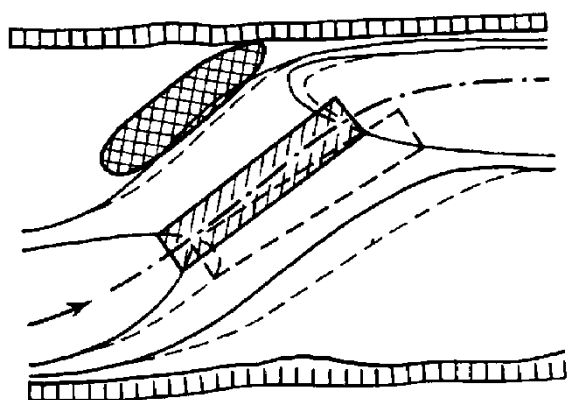


Рис. 2.14. Прорезь и отвал на пережете-перевале

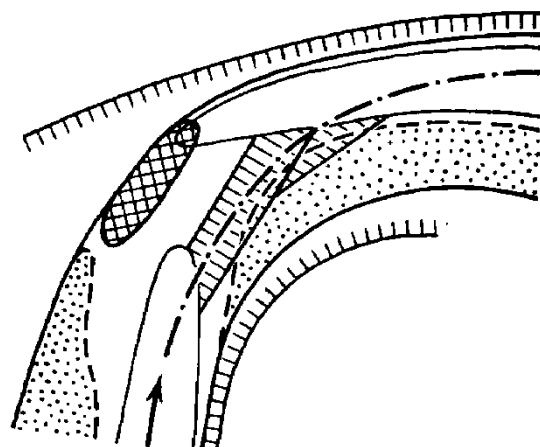


Рис. 2.15. Прорезь и отвал на крутом пережете русла

Пережат на повороте русла. Основные затруднения в данном случае состоят не столько в недостаточных глубинах на корыте переката, сколько в малом радиусе кривизны линии наибольших глубин. Чтобы увеличить радиус кривизны, прорезь приходится располагать вблизи выпуклого берега (рис. 2.15) и, кроме того, производить подрезку примыкающего к этому берегу нижнего побочня переката.

Пережат с затонской частью. Косое расположение вала переката с затонской частью усложняет течение воды и является причиной ряда затруднений для судоходства (рис. 2.16). При меженных уровнях, когда вал переката работает как косой, затопленный водослив, между верхней плесовой ложиной и затонской частью образуется поперечный перепад уровней воды. Под действием этого перепада течение на валу переката приобретает веерообразный характер. При повышении уровней эти эффекты слабеют и при больших наполнениях русла поток движется почти параллельно берегам.

Поэтому весенний судовой ход проходит по пологому направлению, пересекая вал переката вблизи нижнего побочня. В середине спада по этому же направлению делается прорезь (см. рис. 2.16, прорезь I). При дальнейшем понижении уровня воды удельные расходы в прорези падают и прорезь начинает заноситься. Одновременно обнаруживаются следующие трудности для судоходства: составы (особенно плотовые), подходящие к перекату сверху, испытывают действие свального течения; толкаемые составы, движущиеся снизу, встречают сильное течение, идущее из затонской части. Положение может стать настолько тяжелым, что для межени приходится трассировать новый судовой ход, пересекающий перекатный вал по крутому направлению вблизи верхнего побочня. Выполненная здесь прорезь (см. рис. 2.16, прорезь II) поддерживается течением и обычно не требует ремонтных работ до конца навигации. Затруднением для судоходства является малый радиус при выходе из прорези в затонскую часть. В следующее весеннее половодье эта прорезь полностью за-

кладывается песками, ползущими с побочня, и весь цикл изменений повторяется снова.

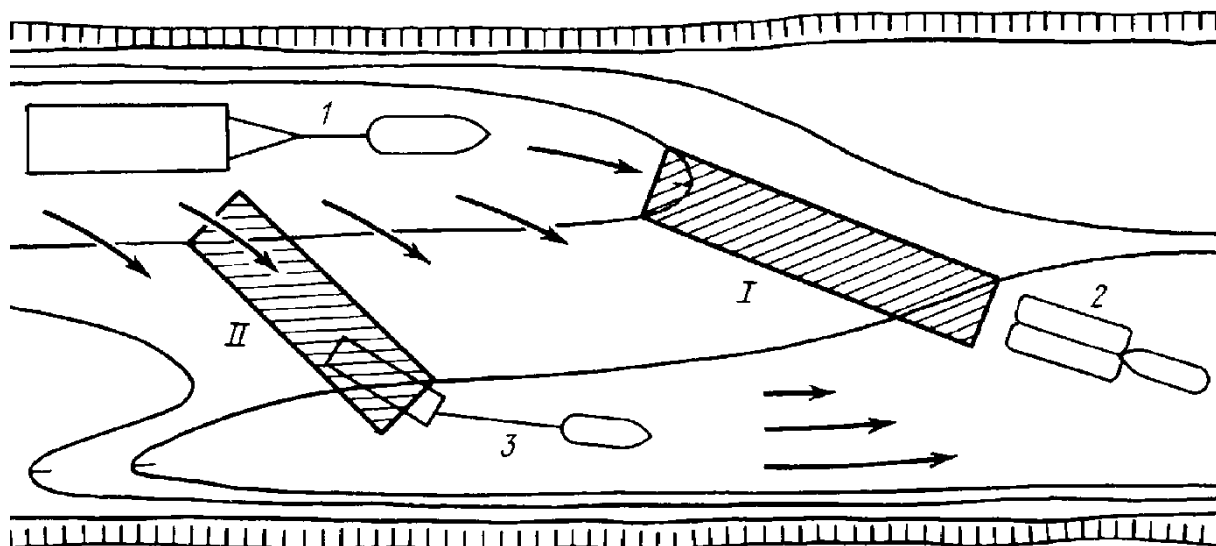


Рис. 2.16. Весенняя (I) и меженная (II) прорези на перекате с затонской частью:
1 — плотовый состав; 2 — толкаемый состав;
3 — буксируемый состав

Сложный перекат. Выполняемые на сложных перекатах прорези (рис. 2.17) обычно представляют собой сочетание прорезей на перекатах с затонской частью и перекатах-перевалах, и поэтому при их трассировании следует применять рассмотренные выше рекомендации. Кроме того необходимо учитывать близость отдельных перекатных валов друг от друга и малую емкость разделяющих плесовых лощин.

Перекат-россыпь. Опыт ведения землечерпательных работ на таких перекатах показывает, что целесообразно разрабатывать на них криволинейные судоходные прорези с искусственно оформленными побочнями, что может быть осуществлено с помощью отвалов грунта (рис. 2.18).

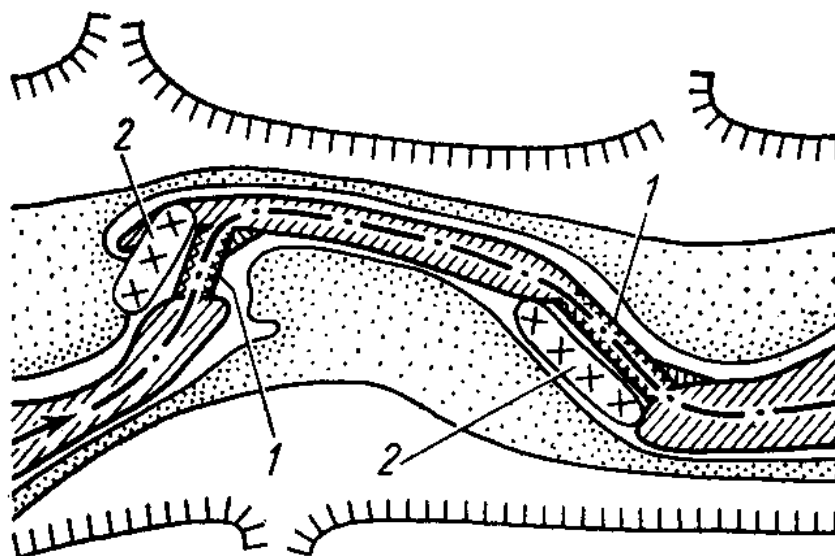


Рис. 2.17. Размещение прорезей и отвалов грунта на сложных перекатах:
1 — прорезь; 2 — отвал грунта

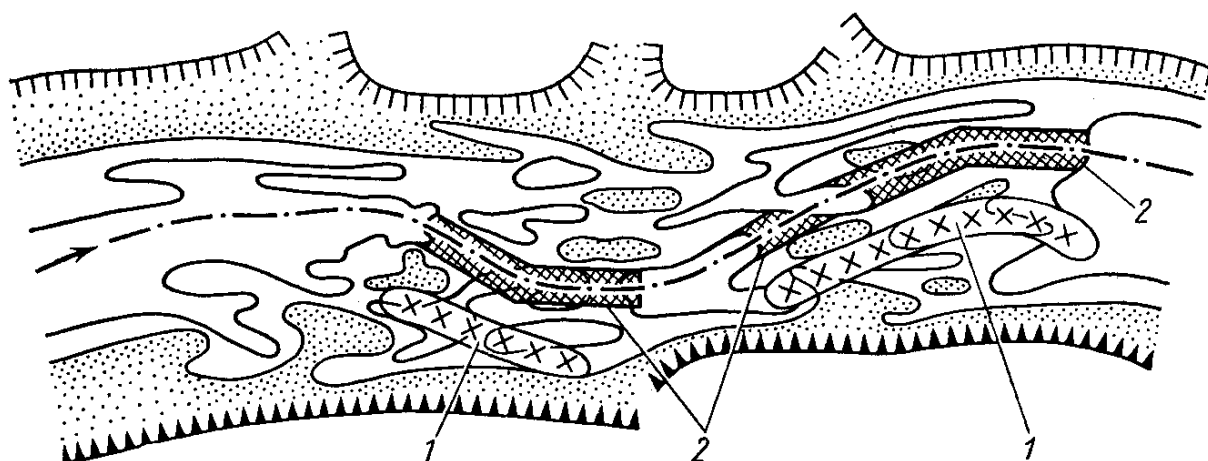


Рис. 2.18. Закрепление отвалами грунта криволинейной прорези на перекате-россыпи:
1 — отвал грунта; 2 — криволинейная прорезь

Пережат у приверха острова. Пережаты у приверха острова редко бывают затруднительными. При обтекании потоком приверха острова скорости течения возрастают и в непосредственной близости к острову развиваются явления размыва. Но по условиям судоходства трассировать прорезь у островного берега нельзя, так как при заходе в такую прорезь сверху составы могут попасть под действие течения,

идущего в несудоходный рукав. Поэтому прорези на таких участках трассируются под материковым берегом, а отвал располагают между прорезью и этим берегом (рис. 2.19).

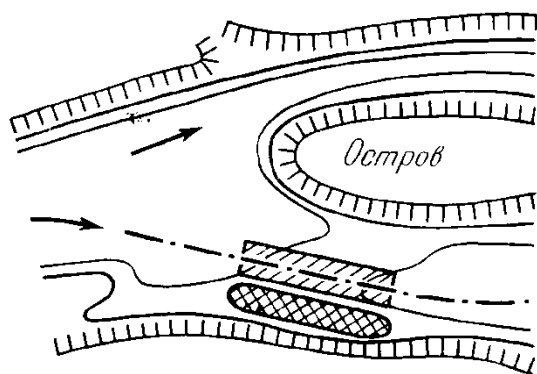


Рис. 2.19. Прорезь у приверха острова

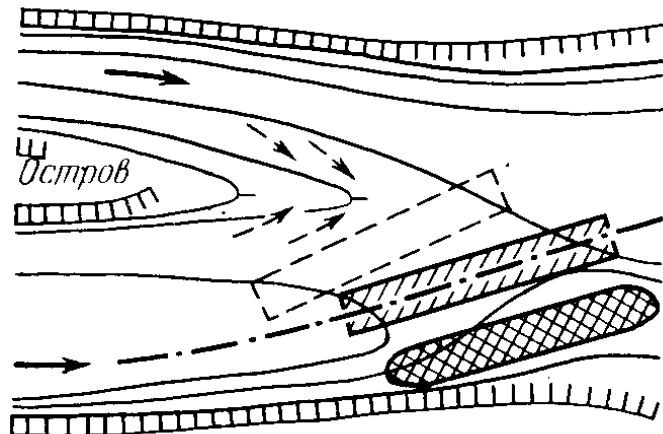


Рис. 2.20. Варианты прорези под ухвостьем острова

Пережат у ухвостья острова. За ухвостьем острова свободная поверхность потока понижена, и донные струи, выходящие из рукавов, направлены в сторону этой ложбины. Поэтому вся часть русла, расположенная за ухвостьем, является областью движения наносов. Это создает большие трудности в поддержании здесь трассы судового хода. Чтобы ослабить заносимость прорези, стремятся трассировать ее по возможности полого, ближе к материковому берегу (рис. 2.20). Прорези крутого положения (штриховая линия на рис. 2.20) могут быть устойчивы лишь при малых расходах воды в несудоходном рукаве.

2.2.3. Проектирование прорезей по коренному улучшению судоходных условий

Для коренного улучшения судоходных условий на перекатах применяются капитальные прорези, создающие благоприятное направление руслового процесса. Такие прорези разрабатывают в следующих целях: у ведущих берегов при отторжении от них побочной — для создания нового судового хода (рис. 2.21); в несудоходных

развивающихся рукавах — для переноса в них судового хода; в пойменных извилинах — для их спрямления (рис. 2.22); на участках со скальным дном — при их углублении; на существующих судовых ходах — для их значительного углубления и расширения. Капитальные прорезы также разрабатывают при неустойчивых судовых ходах, на которых трудно поддержать гарантированные глубины эксплуатационным дноуглублением; при неудобных ходах с малыми радиусами кривизны, свальными течениями и каменными грядами, мешающими судоходству.

Проект капитальной прорези имеет следующие основные части: анализ русловых процессов на перекате; анализ условий судоходства; выбор трассы капитальной прорези; гидравлические расчеты; подсчеты объемов работ; организация дноуглубительных работ.

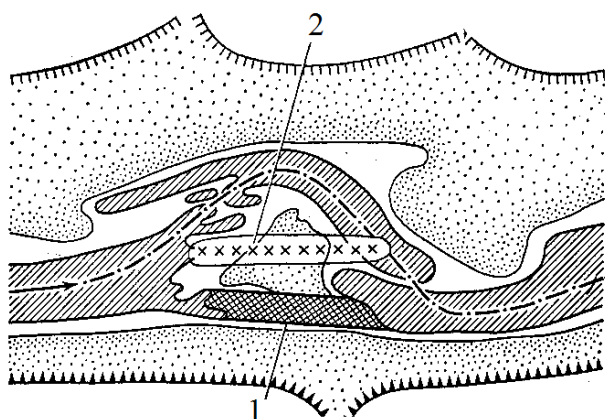


Рис. 2.21. Прорезь по отторжению центрального побочня на сложном перекате:
1 — прорезь; 2 — отвал грунта

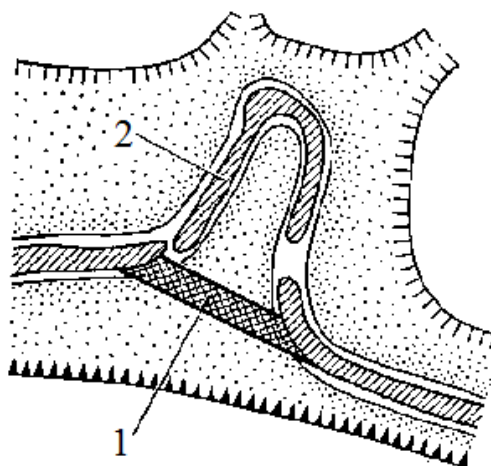


Рис. 2.22. Спрявление излучины в русле реки:
1 — прорезь; 2 — излучина

В состав исходных данных входят: планы переката за многолетний период; последняя русловая съемка переката; сведения о глубинах судового хода на перекате за последние 5–10 лет; сведения об объемах дноуглубительных работ за то же время; сведения об авариях транспортного флота на перекате; кривая расходов воды по ближайшему гидрологическому посту; материалы русловых исследований

переката (продольные профили свободной поверхности, планы траекторий поплавков, расходы воды, расходы наносов, пробы донных отложений).

Работа над проектом начинается с анализа планового материала за многолетний период. Это дает возможность выявить общую тенденцию руслового процесса на перекате, установить характер и размеры деформаций. Материалы русловых исследований помогают понять причинную обусловленность процессов, развивающихся на перекате, т. е. связать деформации русла с кинематикой потока, с интенсивностью транспорта наносов, составом донных грунтов.

Выводы, полученные при анализе руслового процесса и условий судоходства, служат основой для выбора трассы капитальной прорези. Так же, как и при трассировании эксплуатационных прорезей, в первую очередь заботятся о создании наилучших условий для движения судов и, кроме того, об устойчивости запроектированной прорези. Устойчивость прорези проверяется расчетом ее деформации и сопоставляется с устойчивостью бытового состояния переката. Невысокая точность расчетов и невозможность предвидеть на значительный срок колебания уровней в реке вынуждают ограничиваться определением лишь начальных деформаций прорези (т. е. деформации, непосредственно следующей за разработкой прорези). Расчеты ведутся применительно к уровню и расходу воды при производстве работ.

После подсчета объемов землечерпательных работ выбирают дноуглубительный снаряд и составляют календарный график разработки.

2.2.4. Оценка устойчивости капитальной прорези

Для того чтобы составить прогноз деформации прорези, надо знать распределение скоростей течения всего потока. Построить поле скоростей с учетом запроектированных прорези и отвала можно либо путем расчета, либо с помощью гидравлического или аэродинамического моделирования. Рассмотрим расчетные методы построения

плановой (двумерной) картины течения, составленной векторами средних скоростей на вертикалях. Движение потока в расчетах принимаем установившимся.

Плановой линией тока является линия горизонтальной плоскости, направление касательной к которой во всех ее точках совпадает с направлением вектора средней скорости на вертикалях. Линии, ортогональные к плановым линиям тока, представляют собой горизонтальные проекции живых сечений. Эти линии называются *криволинейными поперечниками*. Совокупность плановых линий тока и криволинейных поперечников называется *планом течения*. Для простых случаев, при плавно изменяющемся характере движения воды, силами инерции можно пренебречь, а криволинейные поперечники заменить прямыми. Основанный на этом метод расчета получил название *метода плоских сечений*. Более сложные задачи с не плавно изменяющимся движением могут быть решены другими способами (метод фрагментов; решение полных уравнений планового движения). Остановимся подробнее на методе плоских сечений, который применим для построения планов течений на относительно простых перекатах, расположенных на прямолинейных или слабоизогнутых участках русел. Все расчеты выполняются при рабочем уровне дноуглубительных работ $\downarrow H_{\text{раб}}$, которому соответствует расход воды Q , определяемый по кривой расхода для соответствующего гидрологического поста. Глубина разработки прорези $h_{\text{пр}}$ от проектного уровня с учетом переуглубления равна $h_{\text{пр}} = h_{\text{г}} + h_{\text{пер}}$, где $h_{\text{пер}}$ – величина технического переуглубления.

Приближенный способ построения плана течения, предложенный М. А. Великановым, основан на использовании формулы Шези.

Исходная зависимость для определения элементарного расхода (на 1 п.м. ширины) на вертикалях записывается в следующем виде:

$$q = \zeta h^{5/3}, \quad (2.1)$$

где $\zeta = \sqrt{I}/n$ — постоянная величина для данного поперечного профиля; I — продольный уклон свободной поверхности; n — коэффициент шероховатости русла; h — глубина потока на вертикали.

Полный расход Q , проходящий через поперечное сечение шириной B , выражается интегралом

$$Q = \zeta \int_0^B h^{5/3} dB \approx \zeta \sum_0^B h^{5/3} \Delta B. \quad (2.2)$$

Величины ζ определяется как отношение заданного расхода к величине вычисленного интеграла

$$\zeta = \frac{Q}{\sum_0^B h^{5/3} \Delta B}. \quad (2.3)$$

Последовательность построения плана течений по способу плоских сечений следующая.

1. Намечают на плане участка реки в характерных местах русла 5–7 расчетных поперечных сечений. Обычно назначают по одному поперечнику в верхней и нижней плесовой ложинах и несколько поперечников в пределах проектируемой прорези. Поперечники следует ориентировать, сообразуясь с рельефом дна так, чтобы они были ортогональны к предполагаемому направлению течения (рис. 2.23).

2. Вычерчивают поперечные профили русла во всех сечениях до рабочего уровня дноуглубления $\downarrow H_{\text{раб}}$ (рис. 2.24).

3. В каждом поперечном профиле на характерных вертикалях вычисляют значения $h^{5/3}$. Подсчитывают средние значения $(h^{5/3})_{\text{ср}}$ в отсеках между смежными вертикалями и вычисляют для каждого из них произведения $\Delta B (h^{5/3})_{\text{ср}}$, где ΔB — ширина отсека (расстояние между смежными вертикалями).

4. Последовательно суммируют значения вычисленных произведений $\Delta B(h^{5/3})_{\text{ср}}$, и таким образом вычисляют интеграл

$$\int_0^B h^{5/3} dB \approx \sum_0^B \Delta B(h^{5/3})_{\text{ср}} \text{ для всего поперечного сечения шириной } B.$$

5. Подсчитывают по формуле (2.3) значение коэффициента ζ для данного поперечного сечения при известном полном расходе Q .

6. Вычисляют ординаты интегральной кривой распределения расхода воды по ширине русла путем умножения результатов последовательного суммирования значений $\Delta B(h^{5/3})_{\text{ср}}$ на величину коэффициента ζ , при этом в конце поперечного сечения должен получиться полный расход воды $Q = \zeta \sum_0^B \Delta B(h^{5/3})_{\text{ср}}$. По данным этого пункта строится интегральная кривая распределения расхода воды в поперечном сечении русла.

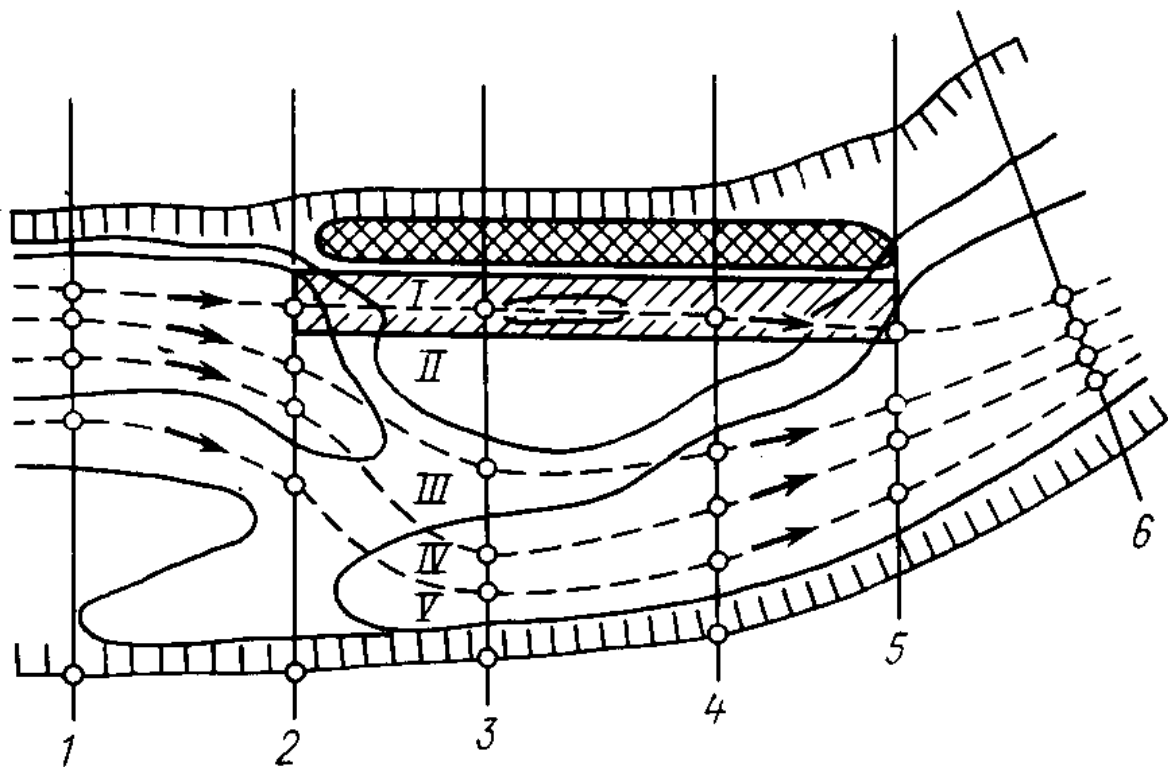


Рис. 2.23. Построение плана течения для проектного состояния переката: 1 – 6 — расчетные поперечные сечения; I – V — номера плановых струй

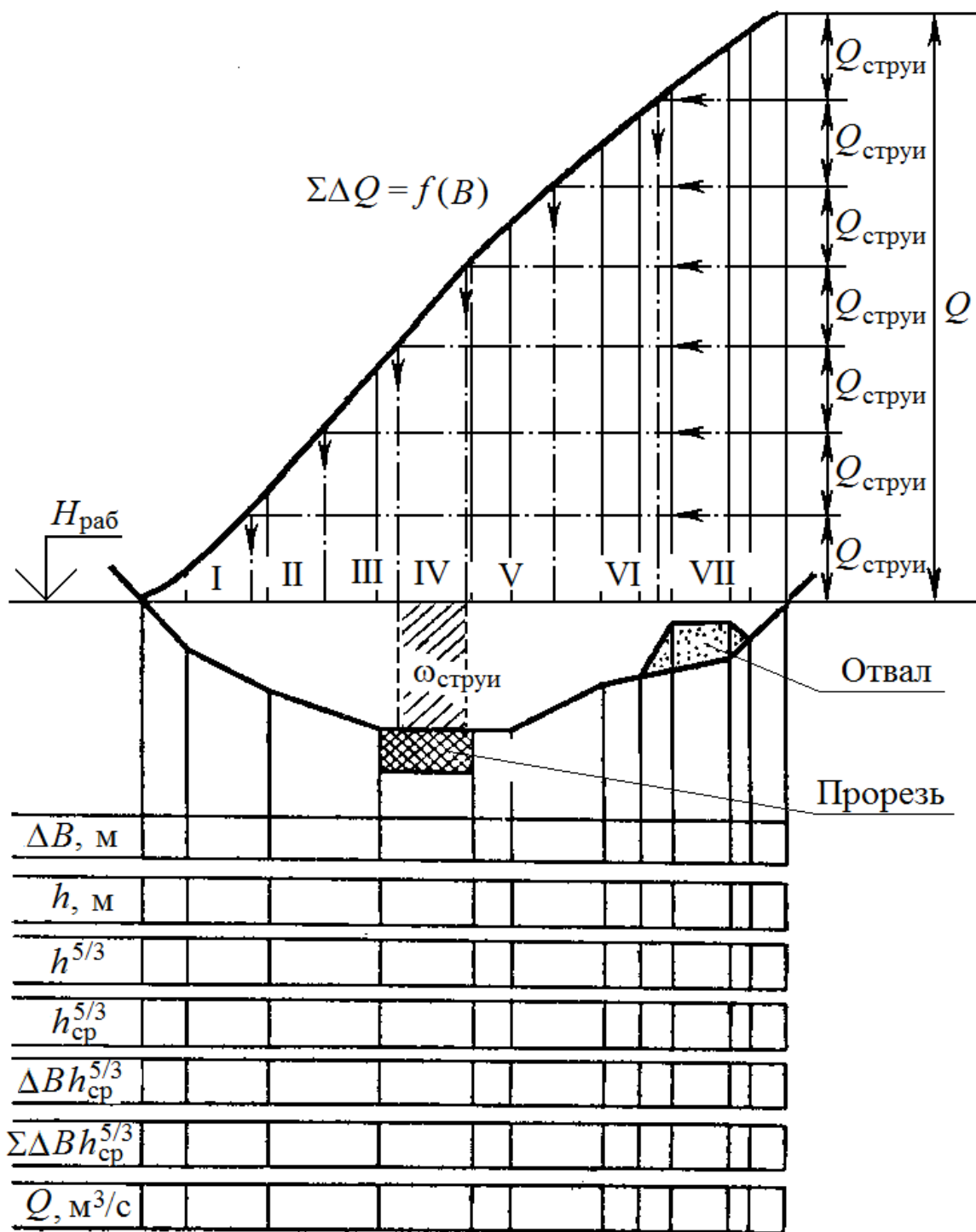


Рис. 2.24. Расчет распределения расхода по ширине сечения:
I – VII — номера плановых струй

7. Конечную ординату интегральной кривой, представляющую собой полный расход Q , делят на равные части по числу N намеченных струй $Q_{\text{струи}} = Q/N$.

8. Точки раздела ординаты сносят горизонтально на интегральную кривую, а с последней — вертикально (штрих-пунктирные линии на рис. 2.24) на линию уровня воды, определяя таким образом границы струй с равным расходом $Q_{\text{струи}}$.

9. Перенося точки, соответствующие границам струй, на план участка и проводя через них плавные линии, получают план течений, который дает возможность установить направление течения и определить значения средних скоростей потока для каждой расчетной струи (см. рис. 2.23).

Сначала строится план течений для бытового состояния русла, который позволяет сделать окончательный выбор направления прорези. Если окажется, что линии тока (границы струй) образуют углы с осью прорези более 10° , расположение прорези корректируют, сближая ее направление с направлением течения. После этого переходят к построению плана течений для проектного состояния русла (т. е. с учетом прорези и отвала). Для этого заново рассчитывают распределение расхода по ширине только тех поперечников, которые пересекают прорезь и отвал.

Капитальная прорезь обычно оказывается расположенной в границах одной-двух плановых струй. Предварительное качественное заключение об устойчивости прорези можно составить на основе данных о распределении скоростей по длинам струй. Для этого во всех расчетных сечениях определяют гидравлические элементы потока: площадь струи $\omega_{\text{струи}}$ (см. рис. 2.23), ширину струи $b_{\text{струи}}$, среднюю глубину $h_{\text{ср}} = \omega_{\text{струи}} / b_{\text{струи}}$, среднюю скорость в сечении струи $V_{\text{ср}} = Q_{\text{струи}} / \omega_{\text{струи}}$, значения неразмывающей $V_{\text{нр}}$ по формуле (1.8) и размывающей скоростей $V_{\text{р}}$ по формуле (1.10).

По результатам расчетов строят совмещенные графики изменения скоростей по длине струи $V_{\text{ср}} = V_{\text{ср}}(l)$, $V_{\text{нр}} = V_{\text{нр}}(l)$, $V_{\text{р}} = V_{\text{р}}(l)$ (рис. 2.25). Если значения скоростей струи всюду больше значений неразмывающей скорости, т. е. $V_{\text{ср}} > V_{\text{нр}}$, это значит, что по всей длине струи происходит перемещение наносов. Тогда на участках, где скорость течения нарастает ($\partial V_{\text{ср}}/\partial l > 0$), должен происходить размыв дна, а на участках, вдоль которых скорость падает ($\partial V_{\text{ср}}/\partial l < 0$) должен идти намыв. На участках, где скорость не изменяется, дно должно оставаться стабильным. Интенсивность деформаций будет тем больше, чем больше превышение скорости течения над неразмывающей и чем больше абсолютные значения производной $\partial V_{\text{ср}}/\partial l$. Если на отдельных участках струи или по всей ее длине скорость течения меньше неразмывающей, т. е. $V_{\text{ср}} < V_{\text{нр}}$, размыв дна невозможен. Однако здесь могут откладываться наносы, поступающие с вышележащего участка реки во взвешенном состоянии. Поэтому, получив в зоне расположения прорези скорость меньше неразмывающей, следует рассматривать этот результат как свидетельство неустойчивости прорези.

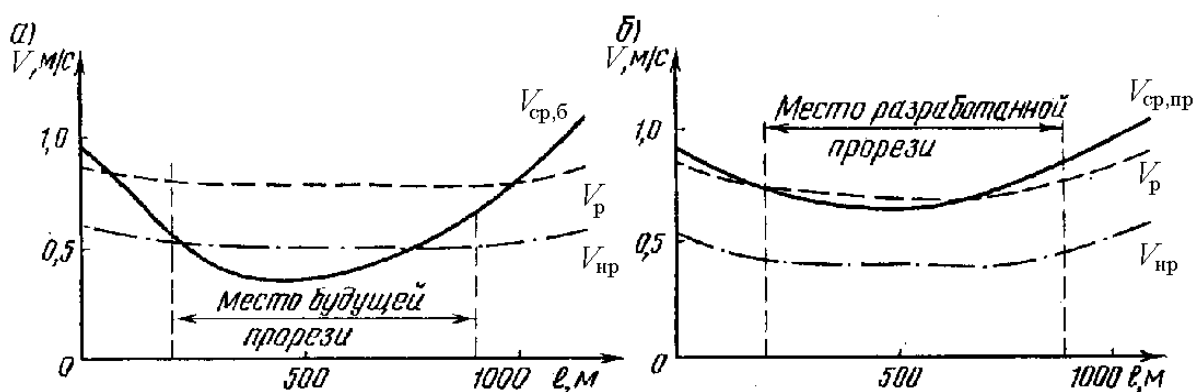


Рис. 2.25. Графики изменения по длине струи средних $V_{\text{ср}}$,
 неразмывающих $V_{\text{нр}}$ и размывающих $V_{\text{р}}$ скоростей:
 а — для бытового состояния; б — после разработки прорези

Расчет деформаций дна для проектного состояния делается на основе баланса наносов, путем применения уравнения деформации (1.35). Уравнение деформации для расчетных струй используется в следующем виде

$$\frac{1}{(1-\varepsilon)} \frac{\Delta Q_s}{\Delta l} + (b_{\text{струи}})_{\text{ср}} \frac{\Delta z_{\text{д}}}{\Delta t} = 0, \quad (2.4)$$

где ΔQ_s — приращение расхода влекомых наносов; $(b_{\text{струи}})_{\text{ср}}$ — средняя на участке ширина струи; Δl — длина расчетного участка по оси струи; Δt — расчетный интервал времени; ε — коэффициент пористости грунта; $\Delta z_{\text{д}}$ — приращения отметок дна.

Последовательность расчетов по уравнению (2.4) следующая.

1. Вычисляют значения расхода влекомых наносов в расчетных сечениях струй используя формулы (1.19) и (1.20)

$$Q_s = q_s b_{\text{струи}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.5)$$

2. Подсчитывается приращение расхода влекомых наносов

$$\Delta Q_s = Q_{s,i} - Q_{s,i-1}, \quad (2.6)$$

где i — номер граничного сечения.

3. Вычисляется начальная скорость деформации. При этом начальная скорость повышения или понижения высоты дна в пределах каждого расчетного участка находят по формуле

$$\xi_{\text{нач}} = \left(\frac{\Delta z_{\text{д}}}{\Delta t} \right)_{\text{нач}} = \frac{86400}{(1-\varepsilon)} \frac{\Delta Q_s}{\Delta l (b_{\text{струи}})_{\text{ср}}}, \text{ м/сут}, \quad (2.7)$$

где $(b_{\text{струи}})_{\text{ср}} = (b_{\text{струи}j} + b_{\text{струи}j-1})/2$.

Величина $\xi_{\text{нач}}$ получает тот же знак, что и величина ΔQ_s . Если сечения пронумерованы сверху вниз, то положительным величинам $\xi_{\text{нач}}$ и ΔQ_s отвечают деформации намыва, а отрицательным величинам $\xi_{\text{нач}}$ и ΔQ_s — деформации размыва.

4. Подсчитываются деформации дна за период времени Δt (обычно 5–10 суток) по соотношению

$$\Delta z_{\text{д}} = \xi_{\text{нач}} \Delta t, \text{ м.} \quad (2.8)$$

В виду малой точности формул (1.19, 1.20), получаемые в результате расчетов приращения высоты дна имеют ориентировочный характер, однако сравнение их значений на двух участках струи дает вполне достоверное представление о соотношении интенсивности деформаций на этих участках

По результатам расчетов строят графики изменения начальной деформации по длине струй $\xi_{\text{нач}} = \xi_{\text{нач}}(l)$ до и после разработки прорези, которые располагают под графиками изменения скоростей (рис. 2.26).

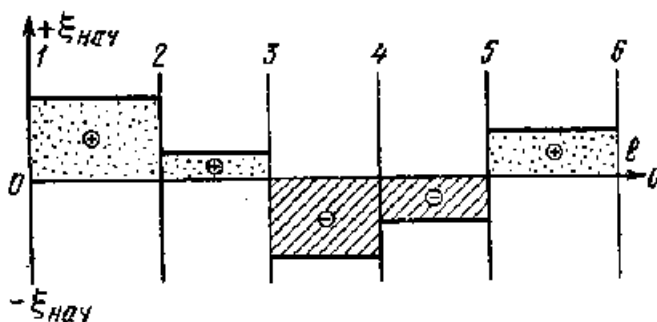


Рис. 2.26. График изменения начальных деформаций по длине прорези

Полученные данные позволяют сделать окончательный вывод об устойчивости прорези. Положительным считается результат, при котором в прорези скорости течения больше неразмывающей, в ней преобладают деформации размыва, а деформации намыва происходят с незначительной скоростью. В таких случаях прорезь считается устойчивой.

При отрицательном результате, т. е. при преобладании в пределах прорези деформаций намыва, необходимо предусмотреть создание запаса на возможную заносимость, разрабатывая прорезь не до проектного дна, а несколько ниже, в соответствии с интенсивностью деформаций.

2.3. ПРОИЗВОДСТВО ЗЕМЛЕЧЕРПАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

2.3.1. Типы земснарядов

Процесс дноуглубления (землечерпания) можно подразделить на три операции:

- отделение извлекаемого грунта от дна;
- подъем отделенного грунта на некоторую высоту над уровнем воды;
- транспортирование грунта к месту свалки.

Дноуглубительные снаряды по степени выполнения этих операций делятся на снаряды с неполным циклом, выполняющими только первую операцию, и снаряды с полным циклом дноуглубительного процесса (все три или первые две операции).

Кроме того, земснаряды классифицируются по следующим основным признакам:

- по способу отделения грунта от дна и его подъему над уровнем воды;
- по способу транспортирования грунта от снаряда к месту свалки;
- по средствам перемещения снаряда при грунтозаборе;
- по способу перемещения снаряда с одного участка работ на другой;
- по производительности;
- по роду энергетической установки;
- по району выполнения дноуглубительных работ.

Грунт отделяется от дна водоема тремя способами: механическим — у всех черпаковых снарядов; механическо-гидравлическим — у землесосов, оборудованных механическими разрыхлителями грунта, и гидравлическим — у землесосов не имеющих механических разрыхлителей. Из-под воды грунт поднимается черпаками у черпаковых снарядов и гидравлическим способом — у землесосов.

Землесосы всасывают пульпу (смесь грунта с водой) грунтовым насосом через опущенную в воду трубу (сосун), конец которой с грунтозаборным устройством погружен несколько ниже поверхности дна (рис. 2.27). Глубина погружения наконечника грунтозаборного устройства регулируется рамоподъемной лебедкой.

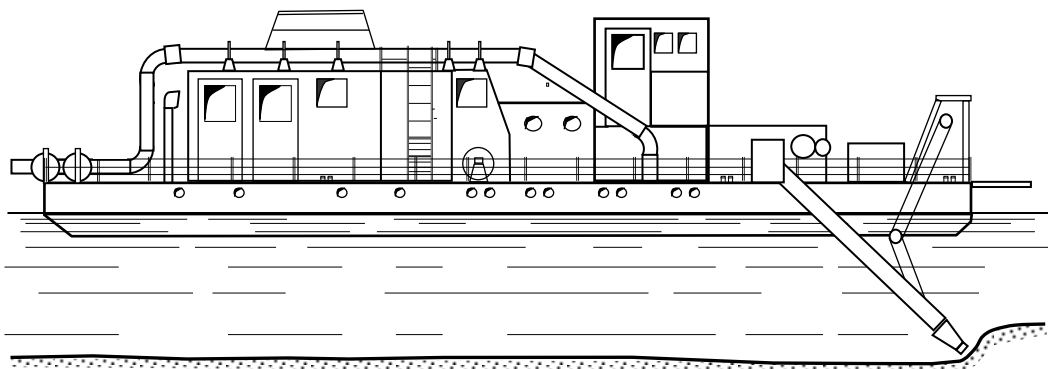


Рис. 2.27. Схема землесосного снаряда

Снаряды с механическим способом отделения и подъема грунта бывают *многочерпаковыми*, оборудованными бесконечной черпаковой цепью (рис. 2.28), и *одночерпаковыми*, работающими одним черпаком. На внутренних водных путях применяются одночерпаковые снаряды двух типов — *штанговые* и *грейферные*. У штангового земснаряда рабочее устройство — экскаваторная прямая лопата (рис. 2.29), у грейферного — стрела с грейферным ковшом (рис. 2.30).

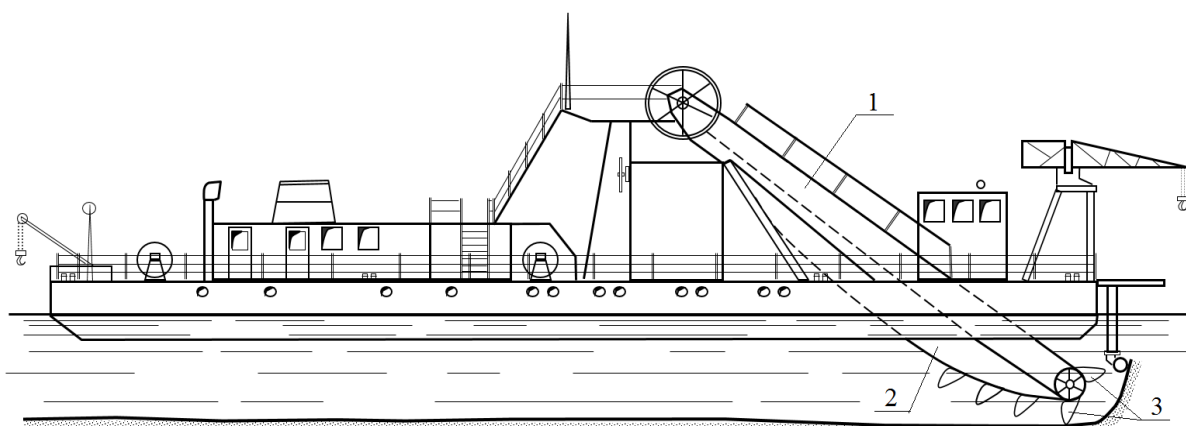


Рис. 2.28. Схема многочерпакового земснаряда:
1 — черпаковая рама; 2 — черпаковая цепь; 3 — черпаки

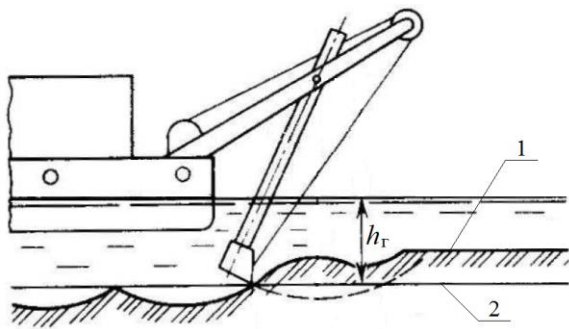


Рис. 2.29. Штанговый снаряд:
1 — естественное дно;
2 — проектное дно

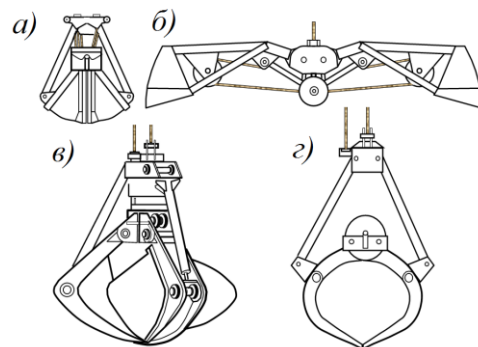


Рис. 2.30. Грейферы:
а — четырехканатный; б — двух-
челюстной; в — трехчелюстной;
г — многолопастный

По способу транспортирования извлекаемого грунта от снаряда к месту свалки дноуглубительные снаряды разделяются на рефулерные, трюмные, шаландовые, рефулерно-шаландовые, длиннолотковые (лонгкулуарные) и транспортерные.

От *рефулерных снарядов* грунт транспортируется по плавучему грунтопроводу на подводную свалку, реже по плавучему и береговому грунтопроводам на береговую свалку. Пульпа по всасывающей трубе попадает в грунтовой насос, затем в напорный грунтопровод, находящийся в корпусе землесоса, а с напорным грунтопроводом соединен плавучий грунтопровод (рефулер), предназначенный для перемещения (рефулерования) грунта на место укладки.

Трюмные снаряды сами транспортируют грунт на свалку в грунтовой трюме. Грунт разгружается на месте свалки через специальные отверстия в днище трюма (на подводную свалку) или собственной грунтонасосной установкой (на подводную или береговую свалку).

Шаландовые снаряды погружают извлекаемый грунт в грунтоотвозные шаланды, которые своим ходом или на буксире перевозят его к месту свалки. Шаланда представляет собой металлическую баржу, в средней части которой расположен грунтовой ящик, днище которого имеет открывающиеся створки.

Рефулерно-шаландовые снаряды могут транспортировать грунт от снаряда рефулерным и шаландовым способами.

Длиннолотковые (лонгкулуарные) снаряды имеют длинный наклонный лоток, по которому грунт подается на свалку. Для улучшения перемещения грунта в лоток подается вода.

Транспортерные снаряды для перемещения грунта на свалку имеют подвешенные или плавучие транспортеры.

По средствам перемещения при грунтозаборе земснаряды подразделяются на якорные, свайно-якорные и снаряды, перемещаемые своей гребной установкой.

Якорные снаряды перемещаются по прорези при помощи оперативных лебедок и тросов, прикрепленных к рабочим якорям, уложенным на дно или закрепленным на берегах.

У свайно-якорных земснарядов для перемещений по прорези, кроме рабочих якорей, имеются специальные свайные аппараты.

По способу перемещения с одного участка землечерпательных работ на другой снаряды делятся на самоходные и несамоходные, последние перемещаются буксирными судами.

По производительности — на снаряды малой, средней и большой производительности. Под *производительностью земснаряда* понимается количество естественно залегающего грунта, извлекаемого в единицу времени. Различают проектную, техническую, расчетную и фактическую производительность.

По роду энергетической установки, приводящей в действие главные механизмы, земснаряды разделяются на дизельные, дизель-электрические, дизель-гидравлические, газотурбинные и электрические.

По району выполнения дноуглубительных работ снаряды разделяются на две группы: морского и речного типа. Морские земснаряды отличаются от речных конструкцией корпуса и лучшей остойчивостью, позволяющей производить работы и переходы между портами в условиях волнения и ветра. Речные земснаряды, в свою очередь, по

классу Речного Регистра подразделяются на морские, озерные и речные.

В технической литературе и служебных документах для снарядов применяют сокращенные условные обозначения. На первом месте ставят буквы, характеризуют снаряд по способу разработки грунта: М — многочерпаковый земснаряд, ШТ — штанговый, Г —грейферный, З — землесос без разрыхлителя, ЗМ — землесос с механическим разрыхлителем, ЗГ — землесос с гидравлическим разрыхлителем. Буквы на втором месте обозначают способ транспортировки грунта: Ш — шаландовый, Р — рефулерный, Л — лотковый, Т — трюмный. На третьем месте ставят буквы, определяющие тип главного двигателя: Д — дизельный. Последними ставят буквы, обозначающую систему привода рабочих устройств: Э — электрифицированные, Г — гидроприводные. В обозначениях самоходных земснарядов в конце добавляют букву С. У снарядов, работающих на внутренних водных путях кроме того указывается класс Регистра: О — озерные, Р — речные. После буквенных обозначений указывают техническую производительность снаряда в м³/ч.

Пример расшифровки буквенных обозначений: ЗГДЭС-О-2500 — землесос с гидравлическим разрыхлителем, дизельный электрифицированный, самоходный, озерного класса, производительностью 2500 м³/ч.

При выборе земснаряда по типу и производительности следует учитывать:

- технико-экономические показатели;
- грунтовые условия;
- условия транспортирования грунта;
- требуемую (заданную) продолжительность выполнения работы;
- габариты земснаряда.

Существуют следующие рекомендации по выбору земснарядов.

Шаландовые земснаряды следует применять для работы на песчаных грунтах в случаях: расположения отвала грунта далеко от места работы; когда нельзя загромождать судовой ход плавучим грунтопроводом; при большой засоренности грунта; на водоемах, где по условиям волнения не могут работать землесосы.

Рефулерные земснаряды целесообразно использовать в случае перемещения грунта на небольшие расстояния или когда его надо подать на берег или уложить в выправительное сооружение.

Лотковые земснаряды и землесосы с гидромониторным выбросом пульпы через конические насадки можно эффективно использовать на малых реках и каналах. Землесосы с выбросом пульпы через насадки применяют также на водоемах со значительным волнением, где нельзя использовать рефулеры.

Одночерпаковые штанговые земснаряды применяют для разработки тяжелых плотных глинистых грунтов и уборки скальных пород после разрыхления последних другими средствами, а также разработки мергелей, для захвата которых требуется режущее усилие до 30000 Н/м.

Грейферные снаряды целесообразно использовать для удаления наносов у причальных стенок, молов, набережных, а также для разработки галечных и связных грунтов с удельным сопротивлением резанию до 20000 Н/м, засоренных топлой древесиной, и для работы на больших глубинах.

Для участков рек с большим объемом дноуглубительных работ, а также для отдельных внутранзитных объектов земснаряды следует выбирать на основании технико-экономических расчетов, сопоставляя стоимость извлечения грунта разными типами земснарядов, которые могут быть применены на данном объекте. При этом большое значение имеет выбор способа разработки прорези (траншейный или папильонажный).

2.3.2. Перемещение земснарядов по прорези

Для углубления дна водоема на определенной площади земснаряд должен совершать рабочие перемещения в пределах разрабатываемой прорези в продольном и поперечном направлениях, с учетом режима извлечения и удаления грунта. Применяют в основном три способа перемещения снарядов по прорези: продольный, обычно называемый траншейным; поперечный, называемый папильонажным; продольно-поперечный или траншейно-папильонажный. Варианты этих способов определяются конструкцией земснаряда, его оснащением рабочими устройствами, а также характеристиками грунта и другими условиями выполняемой работы.

Траншейным способом работают землесосные снаряды без разрыхлителей и с гидравлическими разрыхлителями. Разрабатывают этим способом песчаные несвязные грунты.

При траншейном способе прорезь по длине предварительно делят на ряд серий, а серии по ширине прорези — на ряд траншей. В пределах каждой серии землесос движется вдоль траншей против течения, последовательно от одной кромки прорези до другой. Длина каждой траншеи равна длине серии (рис. 2.31, а).

Поскольку большинство землесосных снарядов могут извлекать грунт только в процессе одностороннего движения наконечником вперед, то после разработки каждой траншеи требуется спуск снаряда с приподнятым над грунтом наконечником к началу следующей траншеи на нижней по течению границе серии. После разработки всех траншей в пределах одной серии снаряд переходит на следующую серию и начинает ее разработку с первой от кромки траншеи.

На рис. 2.31, а сплошными линиями показаны рабочие перемещения землесосного снаряда вдоль траншеи, пунктирными — направления холостых переходов с разработанной траншеи на очередную, подлежащую углублению; арабскими цифрами показана последовательность положений земснаряда при разработке прорези.

Спуск снаряда с серии на серию показан на рисунке штрихпунктирной линией.

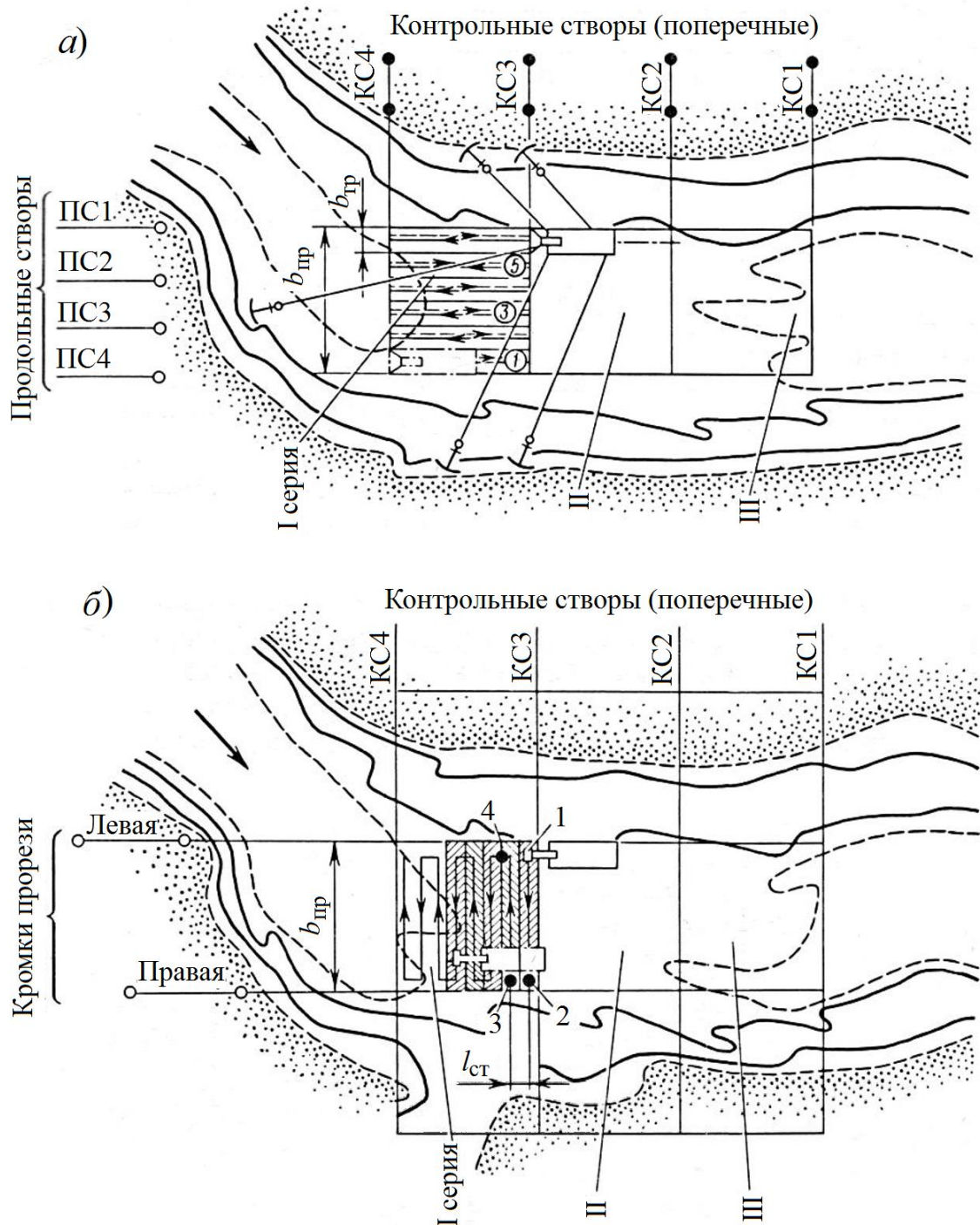


Рис. 2.31. Схемы рабочих перемещений земснаряда:

а — траншейный способ; б — папильонажный способ; $b_{пр}$ — ширина прореза; $b_{тр}$ — ширина траншеи; 1, 2 и т.д. — очередность положений земснаряда при разработке прореза

Папильонажным способом работают многочерпаковые и одночерпаковые штанговые земснаряды, землесосные снаряды с механическим разрыхлителем и со специальным папильонажным всасывающим наконечником. При работе папильонированием диаметральной плоскость снаряда может быть параллельна оси прорези или наклонена к ней под углом. По этому признаку различают четыре способа папильонирования: параллельный, багермейстерский, веерный и крестовый.

Параллельным папильонированием по всей ширине прорези работают при наличии глубин на бровках прорези больше осадки земснаряда, легких грунтов и небольшой толщины снимаемого слоя. При параллельном способе снаряд, пройдя от одной кромки прорези до другой, снимает полосу грунта шириной 0,5–2,0 м по длине прорези после этого подтягивается вперед по становому тросу (рис. 2.31, б). Затем снаряд движется поперек прорези в обратном направлении, и описанный процесс повторяется. Рабочий ход (папильонирование) осуществляют папильонажными лебедками поочередно вправо и влево. Перемещение вдоль прорези (подачу вперед) с разработанной полосы на новую осуществляют с помощью становой лебедки или свайного устройства.

При *багермейстерском папильонировании* диаметральной плоскость снаряда при его перемещении поперек прорези все время наклонена к оси прорези под одним и тем же острым углом. Дойдя до кромки прорези, снаряд сначала занимает положение, параллельное кромке, а затем, не прекращая работы, делает подачу вперед и начинает двигаться к противоположной кромке, принимая наклон в сторону движения (рис. 2.32).

Багермейстерский папильонаж осуществим при разработке сравнительно широких прорезей, когда соблюдается неравенство

$$b_{\text{п}} > 2L_{\text{с}} \sin \beta, \quad (2.9)$$

где $b_{\text{п}}$ — ширина прорези; $L_{\text{с}}$ — длина снаряда вместе с выступающей из корпуса черпаковой рамой или всасывающей трубой; β — угол между направлением прорези и осью земснаряда во время папильонирования.

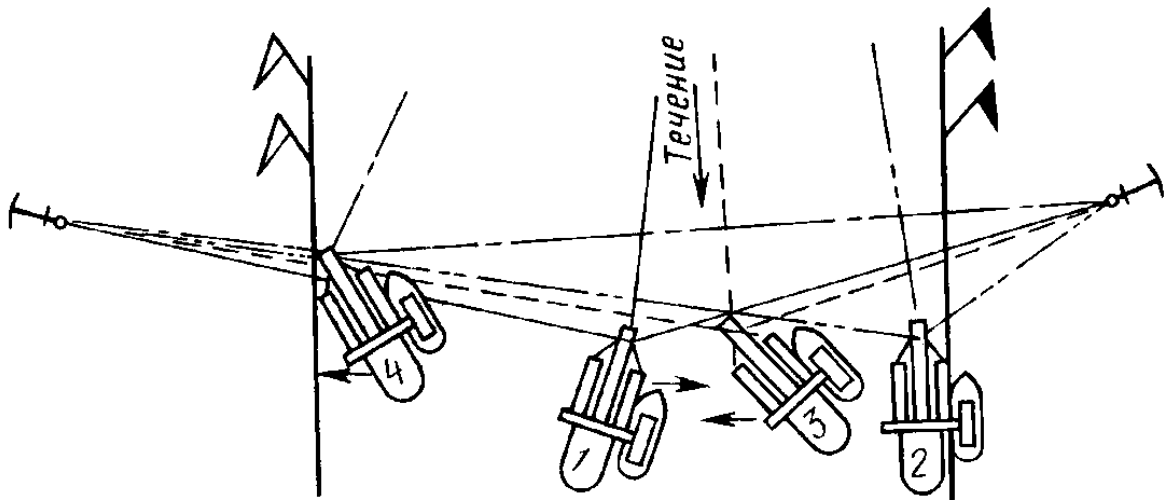


Рис. 2.32. Схема рабочих перемещений земснаряда при багермейстерском папильонаже:

1 – 4 — очередность положения земснаряда

Багермейстерский способ по сравнению с параллельным имеет некоторые преимущества: применим при разработке мелких бровок; улучшает условия резания грунта режущей кромкой черпака, так как в этом случае уменьшается смятие грунта боковой поверхностью черпака; уменьшает давление грунта на черпаковую цепь, предотвращая ее сход с нижнего барабана.

На прорезях шириной $b_{\text{п}} = 2L_{\text{с}} \sin \beta$ и с мелкими бровками применяется *верный способ папильонирования* (рис. 2.33). Корма снаряда при таком способе остается почти на месте, а нос перемещается от одной кромки прорези к другой.

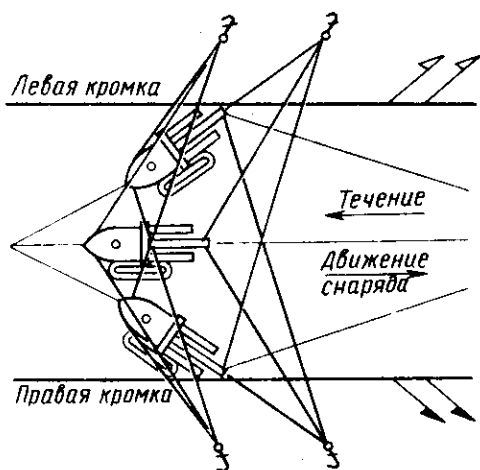


Рис. 2.33. Верный папильонаж

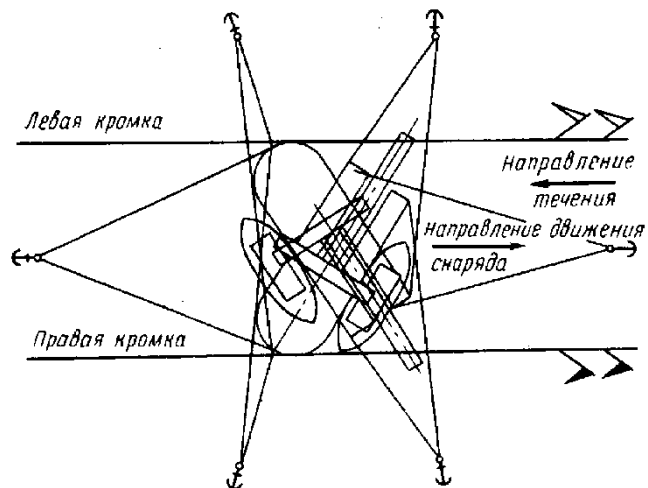


Рис. 2.34. Крестовый папильонаж

При еще более узких прорезях с мелкими бровками работают так называемым *крестовым папильонированием* на части прорези или по всей ее ширине. Нос и корма снаряда при этом все время перемещаются в противоположные стороны, и когда нос подходит к левой бровке, то корма будет у правой, и наоборот (рис. 2.34). Минимальная ширина прорези, которая может быть разработана в этом случае, определяется по зависимости $b_{\Pi} = L_c \sin \beta$.

3. ПРИРОДООХРАННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПУТЕВЫХ РАБОТ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При землечерпательных и выправительных работах грунт, извлекаемый со дна водоема, не забирается безвозвратно из русла, а лишь перемещается из границ судоходной трассы за ее пределы. Поэтому воздействие путевых работ на гидрологический режим и русловые процессы водоемов менее вредны, чем при добыче в руслах рек нерудных строительных материалов.

Землечерпательные прорези нередко играют даже положительную экологическую роль, особенно при загрязнении речной воды

промышленными, бытовыми и сельскохозяйственными стоками. Кроме того в зимний период мелководные перекаты в естественном состоянии могут промерзнуть до дна, их живое сечение при этом забивается плавающим льдом и шугой. Создание же искусственной прорези обеспечивает в данном случае водообмен между плесовыми лощинами и ликвидирует возможность замора рыбы. Полезны землечерпание и выправление рек и в межень, так как позволяет ликвидировать слабый водообмен на плесах, приводящий к скапливанию вредных веществ и загрязнению донных грунтов.

Чем меньше река и чем больше освоен ее бассейн в хозяйственном отношении, т. е. чем больше антропогенная нагрузка на реку, тем больше положительный эффект землечерпания.

Однако под влиянием землечерпательных работ меняется плановая компоновка и форма русловых образований, общая направленность русловых процессов, что отражается на деятельности прибрежных промышленных и гражданских объектов и состоянии среды гидробионтов. Кроме того при выполнении данных работ происходит загрязнение водоемов по следующим причинам:

- при использовании земснарядов в водоем попадают хозяйственно-бытовые и подсланевые воды, топливо, смазочные материалы;

- в процессе забора грунта со дна реки и при сбросе его в отвал происходит локальное взмучивание воды с временным повышением концентрации наносов.

При землечерпании нельзя допускать утечки смазочных материалов через сальниковые уплотнения механизмов, погружаемых в воду в процессе работы. Земснаряды, как и все суда речного флота, оборудуют устройствами и системами для сбора хозяйственно-бытовых и подсланевых вод, а также твердых отходов. Воды, загрязненные нефтепродуктами и другими токсичными веществами, сдают на специальные суда и станции.

При углублении акваторий портов, ведущих обработку нефтеналивных судов, и при извлечении грунта непосредственно в районе сброса плохо очищенных промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод повторное загрязнение воды нефтепродуктами и другими химическими веществами, ранее захороненными в донных отложениях, вполне возможно. Этот фактор необходимо учитывать.

Кроме этого необходимо отметить, что извлечение со дна больших объемов грунта приводит к углублению и спрямлению русел рек, уменьшению их разветвленности, что, соответственно, является причиной:

- понижения уровней воды в межень при тех же расходах;
- изменения обеспеченности уровней;
- перераспределению уклонов свободной поверхности потока на участках большей протяженности.

Наименьший ущерб подводной фауне наносят землечерпательные работы, выполняемые при высоких уровнях воды в половодье. В осеннюю низкую межень работы лучше сократить, так как разрушенный слой расположения биологических ресурсов долго не будет восстановлен.

Исходным документом для разработки плановой компоновки прорезей, отвалов грунта и выправительных сооружений, а также мероприятий обеспечивающих выполнение требований водопользователей в проекте землечерпательных работ служит перечень местоположения водозаборных устройств и выбросов сточных вод, зон нерестилищ, мест массового нагула и зимовальных ям рыбы.

3.2. Понижение уровня воды при производстве землечерпательных работ

Наиболее существенное понижение уровня воды наблюдается в случае землечерпания с целью достижения глубин близких к гидравлическому пределу (см. п. 2.1) на реках с галечным и каменистым грунтом.

При разработке землечерпательных прорезей, извлеченный на судоходной трассе грунт обычно остается в русле реки, так как складирование на берегу возможно крайне редко. Отвал грунта ограничивает посадку уровня воды, лишь частично, так как часть грунта в процессе грунтозабора и отвала в воду уносится потоком и отлагается в русле на пространстве, большем, чем то с которого он был забран. Поэтому основным способом создания компенсирующего подпора воды является возведение выправительного сооружения.

На основе опыта работ по увеличению судоходных глубин можно дать следующие рекомендации по предупреждению понижения уровней воды:

1. При гидроэнергетическом строительстве, оказывающем наибольшее антропогенное влияние на гидрологический режим и русловые процессы рек, землечерпательные и выправительные работы в нижних бьефах после ввода ГЭС в эксплуатацию необходимо планировать, используя прогноз последствий строительства.

2. Увеличивать гарантированные глубины на свободных реках допустимо лишь до тех пор, пока снижение уровня воды на опорном гидрологическом посту не превзойдет допустимого значения. Если выполнение перевозок народнохозяйственных грузов все же требует увеличения глубины сверх гидравлически допустимой, следует на основании расчетов возможного изменения кривой свободной поверхности, предусматривать мероприятия, компенсирующие посадку уровней, и экономически оценивать целесообразность выполнения таких работ.

3. Землечерпательные работы, проводимые для достижения габаритных размеров судового хода, близких к предельным, следует осуществлять по проектам, где должны быть указаны возможные изменения гидрологического режима и русловых процессов рек, которые могут осложнить работу причалов портов, судопропускных и водозаборных гидротехнических сооружений.

4. В проекты землечерпательных работ необходимо включать предложения по предотвращению возможной посадки уровней воды, в том числе и возведение специальных регуляционных сооружений.

5. При прогнозировании изменений гидрологического режима и русловых процессов рек в результате интенсивного землечерпания нельзя не учитывать особенности гидравлического режима реки, а также состав аллювия. Подход к разработке русел из песчаных или из галечно-гравелистых грунтов должен быть различным. При землечерпании на реках с глубинами, близкими к предельным, следует учитывать различие гидравлического сопротивления в руслах с подвижным и относительно неподвижным дном в межень. Так, на р. Лене с каменистым и галечным руслом важна зернистая шероховатость, а на реках с песчаным дном (Туре, Надыме и др.) шероховатость имеет второстепенное значение, а главное влияние оказывают донные гряды.

Прогноз изменений уровня режима, устойчивости судовых ходов и условий эксплуатации гидротехнических и водозаборных сооружений разрабатывают на основе математического и физического моделирования русловых процессов при различных вариантах размещения землечерпательных прорезей и выправительных сооружений.

6. Поскольку при интенсивном землечерпании изменяется естественная связь уровней с расходами воды и наносов и, следовательно, нарушаются однородность гидрологических рядов и сравнимость показаний опорных гидрологических постов за годы до и после углубления русла, многолетние гидрологические ряды использовать невозможно. Поэтому необходимо вести систематические наблюдения на ближайших гидрологических постах за уровнями воды, особенно в меженный период. При этом должна проводиться ежегодная корректировка отметок проектного и других расчетных уровней, а также отметок реперов над проектным уровнем на всем участке, где проводится землечерпание.

Гарантированные габаритные размеры судового хода на реках следует относить в таких случаях к уровню соответствующему проектному расходу воды с определенной обеспеченностью. Значение проектного расхода рекомендуется определять по положению проектного уровня, на котором не сказалось влияние землечерпания.

7. Целесообразно повысить роль выправительных сооружений в мероприятиях по увеличению пропускной способности водных путей, поскольку без них невозможно достичь существенного прироста глубин, не понижая меженных уровней воды. При этом полезно перейти к возведению на судоходных реках выправительных сооружений преимущественно весеннего регулирования с тем, чтобы таким образом добиться необходимого размыва дна переката при высоких и средних уровнях воды, компенсируя этим уменьшение глубины вследствие понижения уровня с наступлением межени. В некоторых случаях может оказаться эффективным переход от выборочного выправления реки к сплошному.

8. Разрабатывать перекаты лучше раз в навигацию без переуглубления по всей прорези, а отвалы грунта стремиться использовать для профилирования русла реки.

3.3. ВЛИЯНИЕ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЗЕМЛЕЧЕРПАНИИ НА РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Правила плановой компоновки землечерпательных прорезей и выправительных сооружений с учетом предупреждения нежелательных русловых деформаций, которые могут негативно сказаться на условиях обитания рыбы и кормовых угодьях, сводятся к следующему:

1. Во всех случаях трассирования землечерпательных прорезей отвалы грунта устраивают только в виде сплошных сооружений без разрывов.

2. Не рекомендуется перекрывать отвалами входы в старицы, затоны, заливы и т. п., а также укладывать грунт в местах понижения бровок пойменных берегов, где поток в половодье выходит на пойму.

3. Отметки гребней отвалов не должны превышать высоты пойменных берегов или островов, к которым они примыкают.

4. При разработке прорезей на равнинных реках в песчаных грунтах нельзя укладывать отвалы мелких и особенно иловатых песков на выходы гравийно-галечных и каменистых грунтов, служащих нерестилищами осетровых рыб.

Кроме того правила проектирования прорезей и отвалов грунта следует устанавливать по типам неблагоприятных с точки зрения судоходства участков.

На перекатах перевального типа предпочтительной схемой расположения прорезей является их трассирование по корыту переката с укладкой отвала на верхнем побочне в виде продольного сооружения (рис. 3.1). Если это затруднительно, то можно допустить расположение отвалов в виде полузапруд на верхнем или нижнем побочне или открытых воздействию волн подводных частях тех же побочней. На высоких песках, как правило, бентоса немного, поэтому отвалы грунта на побочнях не приносят вреда кормовой базе для рыбы.

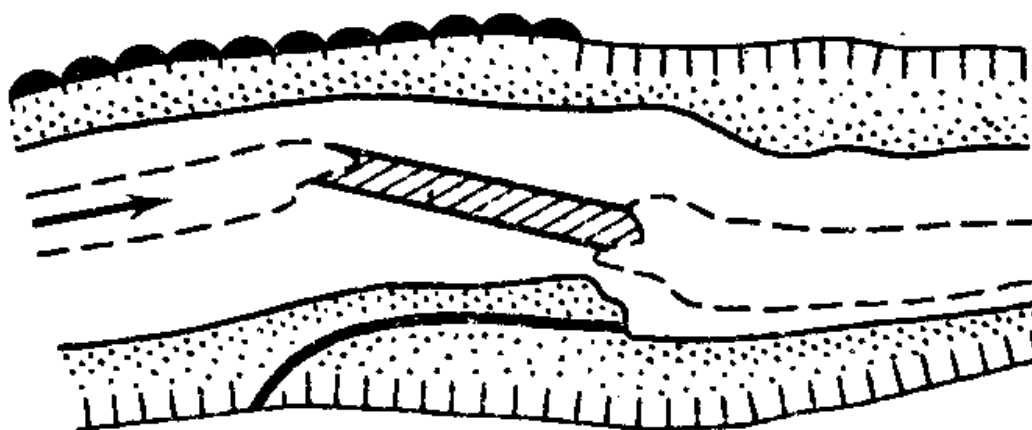


Рис. 3.1. Схема расположения отвала грунта на верхнем побочне в виде продольного сооружения

На сложных перекатах предпочтение следует отдавать таким схемам расположения отвалов, при которых осуществляется двустороннее или одностороннее стеснение русла продольными сооружениями (рис. 3.2). Отвалы в виде полузапруд надо использовать ограниченно.

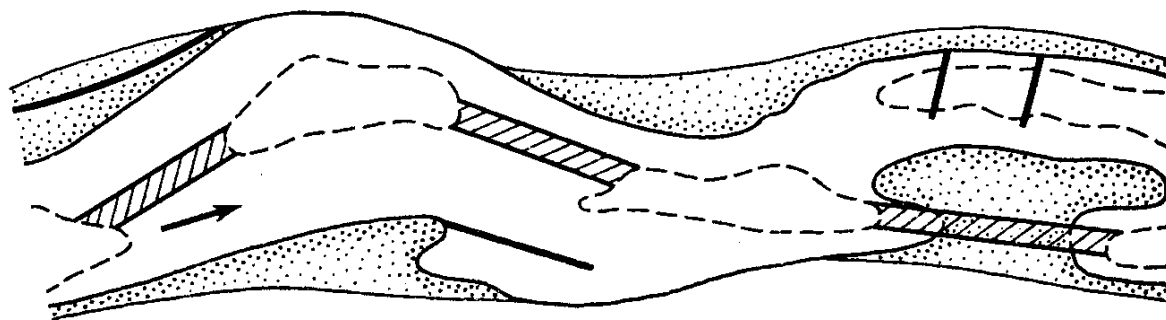


Рис. 3.2. Схема расположения отвала грунта на сложном перекате для стеснения русла продольными сооружениями

Отвалы грунта на перекатах с затонской частью нижней плесовой лоцины проектируют в виде продольных сооружений, сопряженных в верхней корневой части с берегом или островами. Отметку гребня отвала определяют расчетом из условий предупреждения свальных течений, затрудняющих проводку речных судов, и образования резких искривлений динамической оси потока под ухвостьем разделительной косы в межень (рис. 3.3). Полного перекрытия или ликвидации затонских частей плесовых лоцин следует избегать, поскольку в них имеются весьма благоприятные условия для развития рыбной молоди.

При расположении судового хода вдоль ведущего берега противоположный низкий берег полезно закреплять отвалами грунта в виде продольных или поперечных сооружений. Отметки верха сооружений должны превышать гребни низких побочней и способствовать уменьшению заносимости участка реки вдоль ведущего берега. Отвалы грунта у низкого берега уничтожают местные ямы и борозды, под-

ходы к которым обсыхают в межень, вследствие чего они становятся ловушками для рыб. Увеличение размеров побочней у низких берегов уменьшает волновое воздействие на них, что благоприятно сказывается на условиях развития бентоса и рыбной молоди. При этом следует только избегать закрытия отвалом выхода воды на пойму.

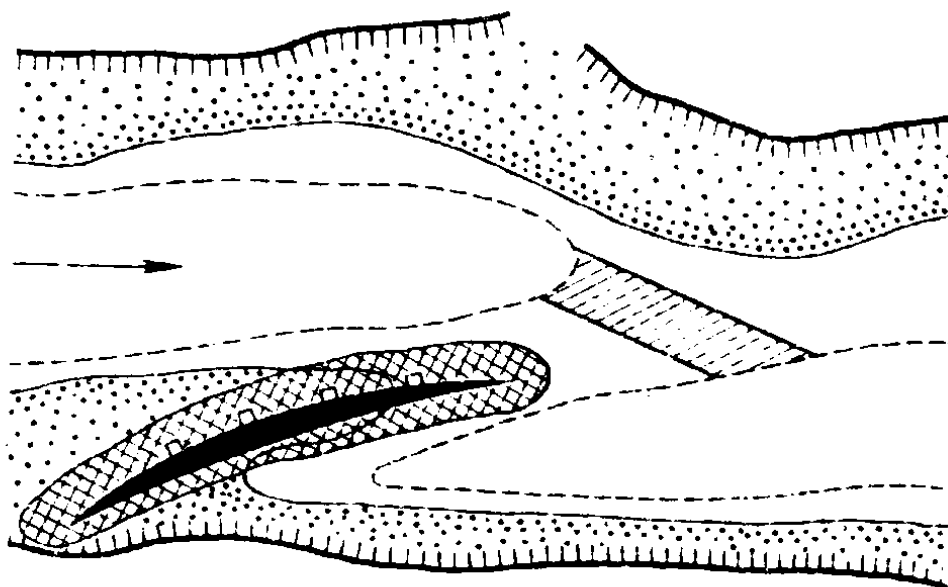


Рис. 3.3. Схема расположения землечерпательной прорези и отвала грунта на перекате с затонской частью нижней плесовой лощины

Перекаты-россыпи не только неудобны для судоходства, но и бесперспективны из-за неустойчивости русловых форм как площади для нагула рыб. На перекатах этого типа целесообразно разрабатывать уширенные прорези с значительным переуглублением, чтобы не только направить поток по выбранной судоходной трассе, но и иметь резерв грунта для повышения побочней и засыпки многочисленных боковых подводных лощин, вызывающих ненужное рассредоточение потока в межень. Кроме того, эти боковые лощины, разделенные довольно высокими и неустойчивыми песчаными отмелями, служат «ловушками» для рыбы при низких уровнях воды. Таким образом, на

перекатах-россыпях отвалы грунта рекомендуется использовать как средство формирования побочней.

Рационально разрабатывать землечерпательные прорези на перекатах-россыпях сквозными траншеями снизу вверх с переуглублением в нижней части. В этом случае поток сосредоточивается по трассе прорези, происходит размыв неразработанных верхних участков ее и сокращение общего объема разработки. При углублении прорези сериями сверху вниз остается подводная преграда, которая продолжает способствовать рассредоточению потока и сохранению невыгодных для судоходства русловых форм россыпи. Небольшая экономия рабочего времени при работе сериями сверху вниз не оправдывается потерями из-за менее благоприятного воздействия на русловые процессы.

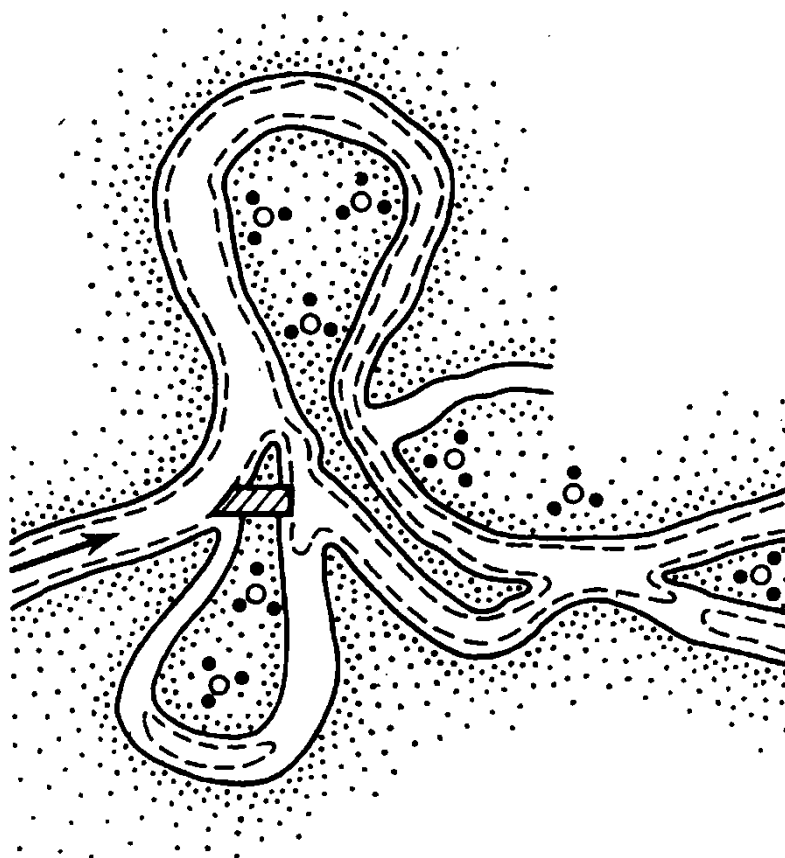


Рис. 3.4. Схема спрямления русла реки

При проектировании спрямлений русла реки (рис. 3.4) перекрытие извилин глухими запрудами не рекомендуется. В отторгнутых спрямлением извилинах лучше поставить сквозные кольматирующие сооружения, способствующие отложению взвешенных органических веществ, что улучшает кормовые условия для рыбы.

3.4. ПОВЫШЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ ПРИ ЗЕМЛЕЧЕРПАТЕЛЬНЫХ РАБОТАХ

При углублении перекатов земснарядами и возведении выправительных сооружений происходит кратковременное резкое увеличение концентрации наносов в определенных зонах водоемов. Это явление наиболее интенсивно при транспортировании пульпы по плавучим грунтопроводам и отвале ее в воду, сбросе грунта по лоткам и конвейерам, при разгрузке шаланд. В меньшей степени повышается концентрация наносов в потоке в процессе грунтозабора. Однако повышенная концентрация взвешенных минеральных частиц не сохраняется постоянно. Частицы выпадают в осадок ниже района работ и отлагаются на дне водоема.

В подавляющем большинстве случаев местное временное повышение концентрации взвешенных частиц в речном потоке не только безвредно, но и приносит пользу, если не влияет на качество воды, забираемой для водоснабжения, и не заносит песком нерестилища, места массового нагула и зимовальные ямы рыбного стада. Мутность воды при землечерпании повышается с увеличением концентрации в воде взвешенных глинистых частиц, к которым легче и быстрее прилипают нефтепродукты и токсичные металлы из сточных вод. Затем эти загрязненные частицы выпадают в осадок. Последующий слой мелких фракций присыпает загрязненные осадки, что препятствует биологической активности последних. На глинистых частицах образуются колонии бактерий, которые становятся продуктами питания для растений и животных. Подводные выемки, образовавшиеся в результате землечерпания, служат убежищем для рыб.

Последствия временного повышения мутности в реке в процессе землечерпания незначительны по сравнению с естественной (фоновой) для данного участка реки мутностью, ежегодно наблюдающейся в половодье и при размывах русла в межень.

В результате комплексных исследований по проблеме повышения мутности воды при землечерпании В. В. Дегтяревым и В. М. Ботвинковым разработана методика по оценке повышения мутности при землечерпательных работах, проводимых для обеспечения транзитного судоходства на реках, и учету ее влияния на качество воды и экологию гидробионтов (гидробионты — организмы, обитающие в водной среде).

За теоретическую основу расчетов взято полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии, на базе которого получены расчетные зависимости для определения планового положения зоны повышенной концентрации взвешенных частиц грунта и величины заносимости дна водоема в границах этой зоны. Авторами методики на основе вычислений по многочисленным вариантам возможных ситуаций были получены расчетные графики, по которым можно:

- определить плановое положение зоны повышенной мутности при устройстве отвала грунта и намыве сооружения;
- вычислить толщину слоя отложения наносов;
- подобрать землесосные снаряды по производительности, обеспечивающей нормативную чистоту воды в зоне рыбохозяйственных объектов или водозаборных сооружений, расположенных ниже места выполнения землечерпательных работ.

При разработке указаний было принято, что определяющим границы зоны повышенной мутности фактором является диаметр частиц d_5 , мельче которого будет только 5% частиц от общей массы грунта. Более крупные частицы будут откладываться в пределах установленной зоны повышенной мутности. В принципе за минимальный расчетный диаметр можно принять и любой другой, больший или

меньший, размер которого согласован с контролирующими землечерпательные работы организациями.

3.4.1. Методика расчета границы зоны повышенной мутности

По существующим правилам предельно допустимая концентрация (ПДК) взвешенных частиц грунта при работе земснарядов не должна увеличиваться:

- более чем на 0,25 мг/л при использовании водоема для хозяйственно-питьевого водоснабжения и для воспроизводства ценных пород рыб;

- более чем на 0,75 мг/л при использовании водоема для воспроизводства рядовых пород рыб, а также для купания, занятий спортом и отдыха населения и на участках водоемов в границах населенных пунктов.

Для определения положения границы зоны повышенной мутности необходимы следующие исходные данные:

- план участка реки, на котором нанесены контуры запроектированных землечерпательных прорезей, отвалов грунта и намываемых выправительных сооружений (на плане должны быть показаны границы водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение, водозаборные сооружения для питьевой воды и места массового отдыха населения — пляжи);

- техническая характеристика землесосного снаряда и его производительность;

- габаритные размеры сбрасывающего устройства;

- натурные или расчетные данные о поле скоростей течения в зоне землечерпательной прорези и отвала грунта;

- кривая гранулометрического состава грунта;

- коэффициент уноса грунта при намыве отвала в воду.

В процессе транспортирования грунта в воду большая часть его остается непосредственно в отвале, но немалая часть уносится потоком вниз по течению. Коэффициент уноса дает количественную оценку со-

отношения унесенного потоком грунта и извлеченного объема. Определяют коэффициент уноса как функцию от гранулометрического состава грунта, от скорости течения в месте сброса извлеченного грунта в воду, от степени стеснения русла намываемым отвалом и плановой компоновки последнего по отношению к направлению течения потока. Руководящим документом для определения коэффициента уноса является Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации выправительных сооружений из грунта. Для упрощения определения коэффициента уноса в этом руководстве приведена номограмма (рис. 3.5).

Определение границы зоны ПДК в соответствии с принятой во Временных указаниях методикой сводится к следующему:

1. Район реки, где проектируется отвал грунта, разбивают на расчетные участки длиной ΔL_i , начиная со створа 0 – 0, проведенного через начальную точку сброса грунта в отвал, вниз по течению, до створа проходящего по верхней границы рыбохозяйственной зоны $k - k$ (рис. 3.6).

Расчет по участкам ведется из-за того, что в речном потоке от намеченного сечения к сечению могут существенно изменяться глубина, скорости течения, плановая конфигурация русла. По плану участка реки определяют длину i -го участка ΔL_i и среднюю глубину h_i . Из натурных данных или при их отсутствии расчетом устанавливают среднюю скорость течения V_i на каждом участке.

2. По минимальному расчетному диаметру по рис. 3.7 находят гидравлическую крупность песка w_0 .

3. Определяют значения:

k_w — коэффициента гидравлической крупности грунта по линии 1, отображающей функцию $k_w = f(w_0)$ (рис. 3.8);

k_v — коэффициента скорости потока V по графику $k_v = f(V)$ (рис. 3.9);

k_h — коэффициента глубины потока h по графику $k_h = f(h)$ (рис. 3.10).

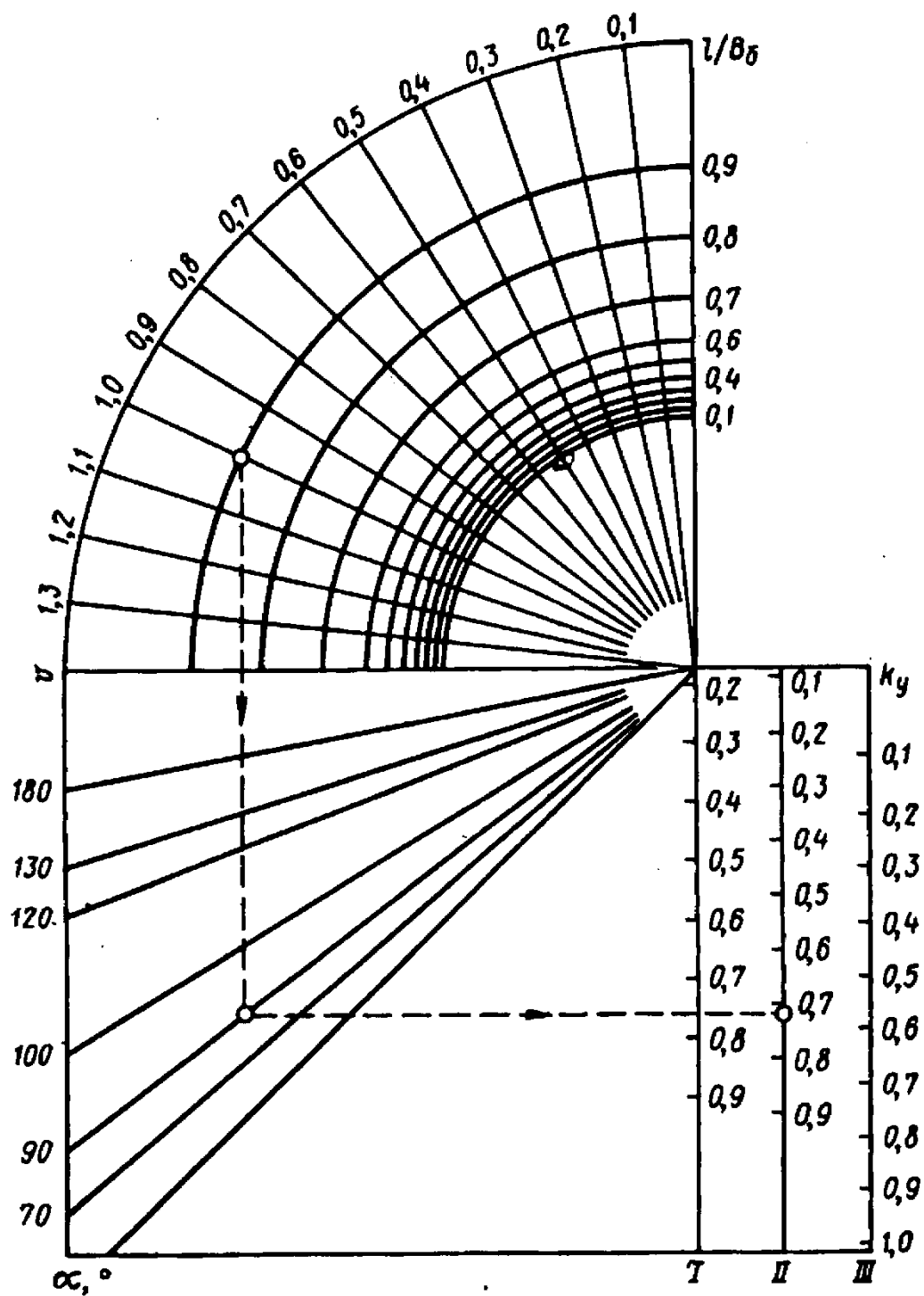


Рис. 3.5. Номограмма для определения коэффициента уноса грунта течением при намыве отвала в воду:

V — скорость течения, м/с; l/B_0 — отношение длины отвала к бытовой ширине русла; α — угол между осью отвала и направлением течения, град; k_y — коэффициент уноса для мелкого (I), среднего (II) и крупного (III) песка

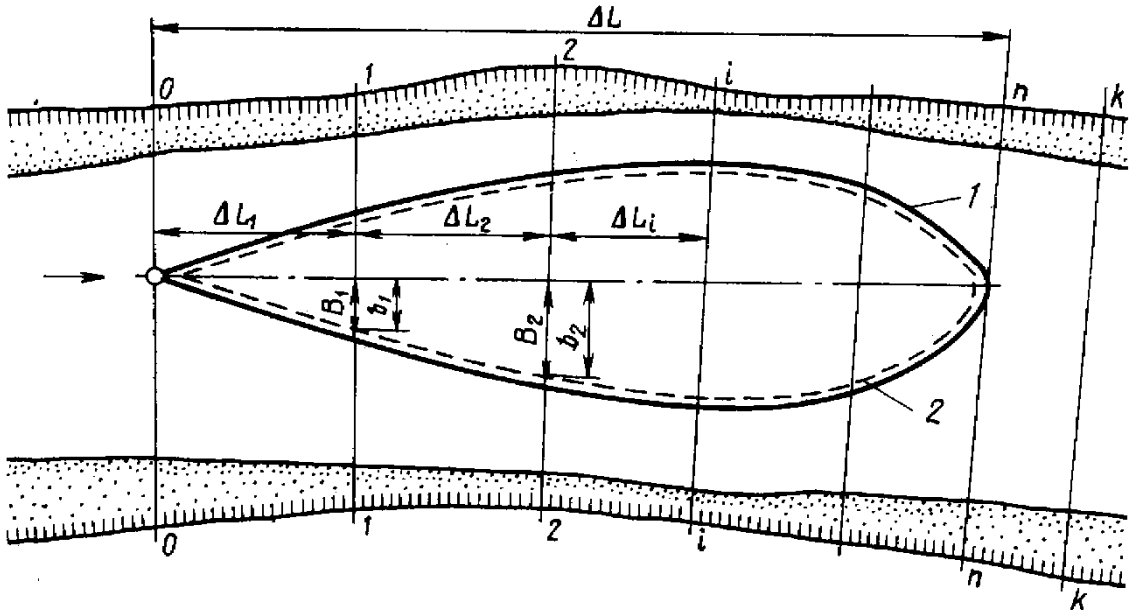


Рис. 3.6. Схема расчета границы зоны ПДК (показана сплошной линией)

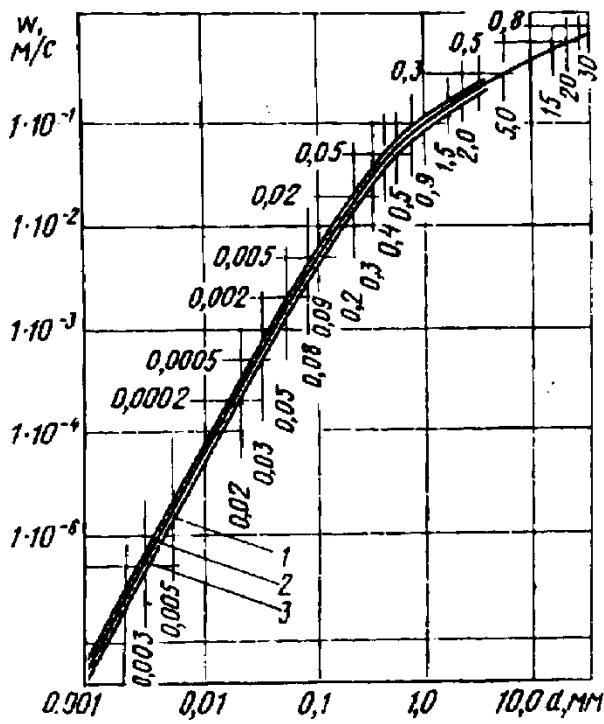


Рис. 3.7. Номограмма для определения гидравлической крупности частиц грунта w_0 в зависимости от диаметра частиц и температуры воды t в водоеме:
 1 — при $t = +10^\circ \text{C}$; 2 — при $t = +15^\circ \text{C}$;
 3 — при $t = +20^\circ \text{C}$

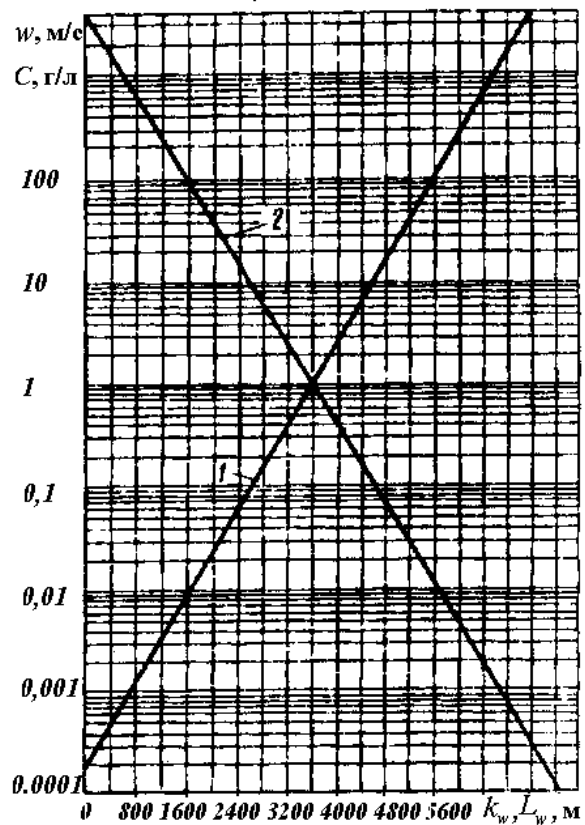


Рис. 3.8. Графики
 $k_w = f(w_0)$, $L_w = f(C)$

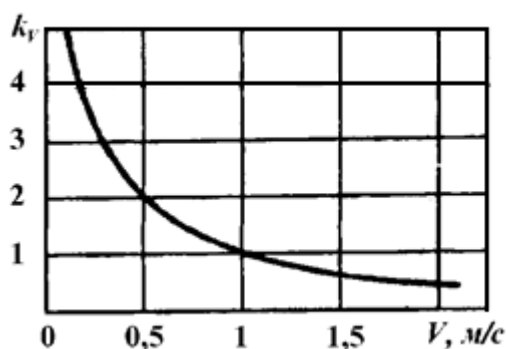


Рис. 3.9. График $k_v = f(V)$

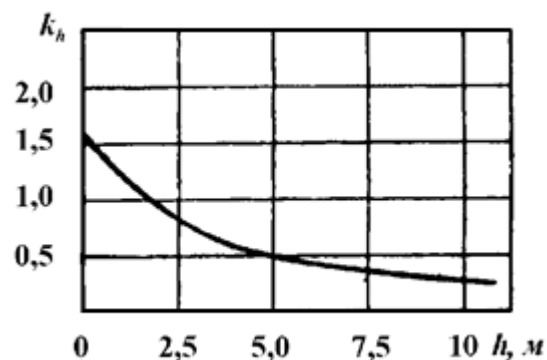


Рис. 3.10. График $k_h = f(h)$

4. Устанавливают концентрацию наносов в створе 0–0 сброса пульпы

$$C_0 = \frac{k_y Q_T k_1 \rho_{гр} g}{3600 B_H h_i V_i}, \quad (3.1)$$

где k_y — коэффициент уноса грунта; Q_T — техническая производительность землесосного снаряда, м³/ч; k_1 — коэффициент минимального расчетного диаметра частиц грунта, который при d_5 равен 0,05, при d_{10} равен 0,1, при d_3 равен 0,03 и т. д.; $\rho_{гр}$ — плотность грунта, кг/м³; B_H — ширина взмученного потока в створе рефулирования, равная утроенной ширине сбросного устройства $B_{сбр}$, м ($B_H = 3B_{сбр}$).

5. По значению концентрации наносов в створе выброса C_0 по линии 2 графика $L_w = f(C)$ (см. рис. 3.8) находят условную координату оси струи L_{w_0} створа сброса пульпы 0–0.

6. Вычисляют условную длину i -го расчетного участка:

$$\Delta L_{w_i} = \Delta L_i k_{V_i} k_{t_i} k_w. \quad (3.2)$$

7. Находят условную координату L_{w_i} нижней границы i -го расчетного участка (створ 1):

$$L_{w_i} = L_{w_{i-1}} + \Delta L_{w_i} \quad (3.3)$$

и по графику (см. рис. 3.8) определяют значение C_i — массовой концентрации твердых примесей на оси струи в i -м створе.

Расчеты выполняют вплоть до n -го створа, где массовая концентрация твердых примесей на оси струи C_n будет равна ПДК. Длину последнего расчетного участка, нижний створ которого должен совпасть с дальней границей (см. рис. 3.6) зоны с мутностью, большей ПДК, находят подбором.

8. Если дальняя граница зоны с мутностью, большей ПДК, окажется в районе площади, имеющей рыбохозяйственное значение, то определяют границы этой зоны по ширине. Сначала по графику $L_w = f(C)$ находят условную координату $L_{w_{\text{ПДК}=0,25}}$ точки, в которой мутность равна предельно допустимой (ПДК = 0,25 мг/л). Затем рассчитывают условную длину всей зоны повышенной мутности $\Delta L_w = L_{w_{\text{ПДК}=0,25}} - L_{w_0}$ и определяют относительную координату каждого створа $L_{\text{отн}_i} = (L_{w_i} - L_{w_0}) / \Delta L_w$, по которой по графику $B_{\text{отн}} = f(L_{\text{отн}})$ (рис. 3.11) находят относительную полуширину $B_{\text{отн}_i}$ зоны повышенной мутности. Действительная полуширина

$$B_i = B_{\text{отн}_i} \Delta L_w / k_{V_i} k_{t_i} k_w. \quad (3.4)$$

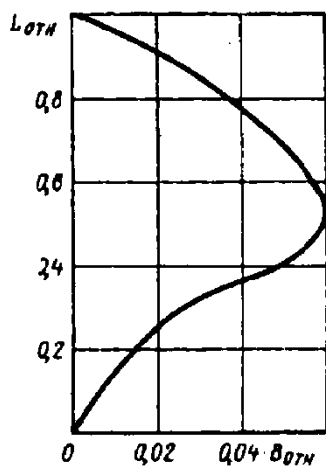


Рис. 3.11. График $B_{\text{отн}} = f(L_{\text{отн}})$

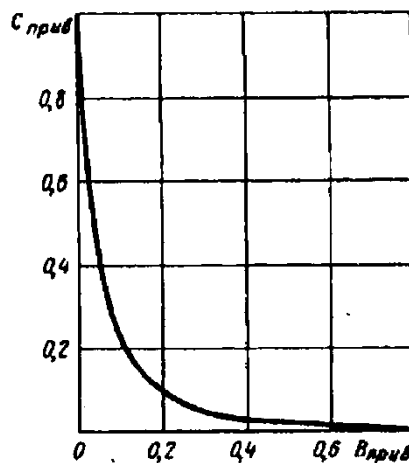


Рис. 3.12. График $B_{\text{прив}} = f(C_{\text{прив}})$

Если значение ПДК отличается от 0,25 мг/л, уточняют значение полуширины b_i зоны повышенной мутности 2 (см. рис. 3.6). При этом находят приведенную концентрацию взвешенных частиц в каждом

створе $C_{\text{прив}_i} = \text{ПДК}/C_i$, по которой по графику $V_{\text{прив}} = f(C_{\text{прив}})$ (рис. 3.12) определяют приведенную полуширину зоны $V_{\text{прив}_i}$. Действительная полуширина $b_i = V_{\text{прив}_i} B_i$.

3.4.2. Методика расчета толщины слоя отложения аллювия на дне реки

Иногда кроме определения границы зоны повышенной мутности необходимо вычислить толщину слоя отложения аллювия на дне реки $h_{\text{н}_i}$, образующегося из-за повышения концентрации частичек грунта в речной воде. Решают эту задачу поэтапно для отдельных фракций грунта, определяемых по кривой гранулометрического состава (см. рис. 3.13). Например, частицы грунта мельче d_i , но крупнее d_{i+1} , будут отлагаться слоем толщиной

$$h_{\text{н}_i} = k k_y Q_{\text{т}} t / S_i, \quad (3.5)$$

где k — массовая доля фракции грунта с диаметром частиц от d_i до d_{i+1} в общем объеме грунта, %; k_y — коэффициент уноса грунта потоком; $Q_{\text{т}}$ — техническая производительность землесосного снаряда, м³/ч; t — время работы снаряда, ч; S_i — площадь отложения наносов, м².

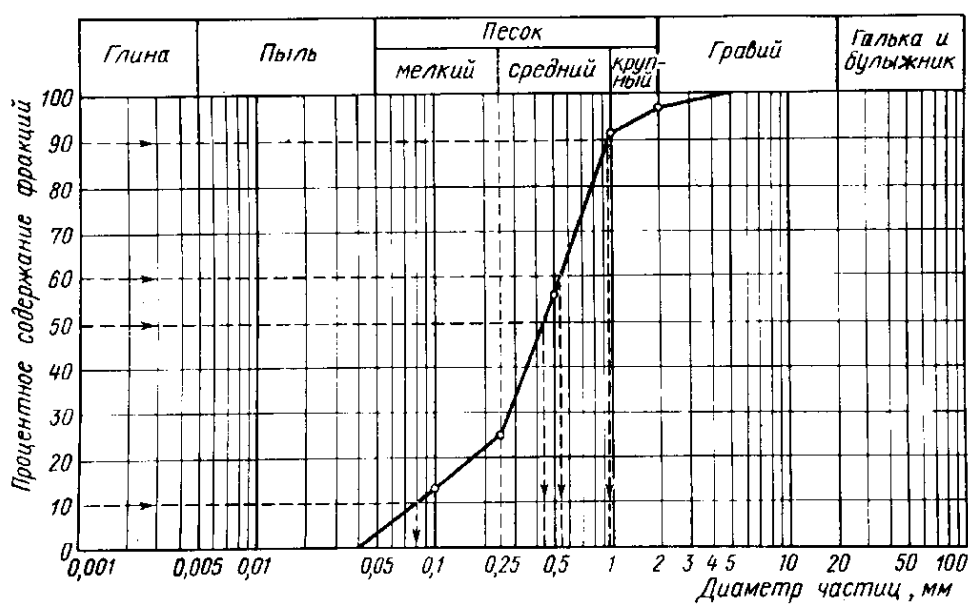


Рис. 3.13. Кривая гранулометрического состава грунта

Интегральное значение слоя отложения наносов определяют суммированием отдельных толщин отложения фракций грунта, которые выпадают на данную площадь.

Если в результате расчетов обнаружено, что в границах зоны повышенной мутности оказались площади, имеющие рыбохозяйственное значение, питьевые водозаборы или пляжи, то необходимо предусмотреть мероприятия по сокращению размеров зоны. Одним из мероприятий может служить подбор землесосного снаряда по допустимой производительности. Для этого рассчитывают допустимую производительность землесосного снаряда, при которой зона повышенной мутности не будет распространяться на объекты с особо строгими водоохранными требованиями. Критерием в таком расчете будет заданное расстояние от места сброса пульпы до рыбохозяйственного объекта или водозабора $L'_д$. Расчет выполняют в такой последовательности.

Выбирают значение производительности землесосного снаряда $Q'_т < Q_т$ (значение технической производительности снаряда $Q_т$ берут из предыдущего расчета), выполняют расчеты и устанавливают расстояние от места сброса до границы зоны ПДК в направлении рыбохозяйственного объекта или водозаборного устройства $L_{д1}$. Если площадь этой зоны по расчету будет находиться вне пределов зоны ПДК, то выбирают производительность землесосного снаряда во втором приближении: $Q'_т < Q''_т < Q_т$, а при условии, что объект находится в зоне ПДК, принимают $Q''_т < Q'_т$. По новому значению производительности повторяют расчет планового положения зоны повышенной мутности во втором приближении. Число приближений должно быть не менее трех, чтобы можно было графически определить допустимую производительность снаряда.

По расчетным значениям величин Q_T и L_D строят график $Q_T = f(L_D)$, по которому и определяют допустимую производительность землесосного снаряда Q'_D (исходя из значения минимального расстояния до объекта L'_D) (рис. 3.14).

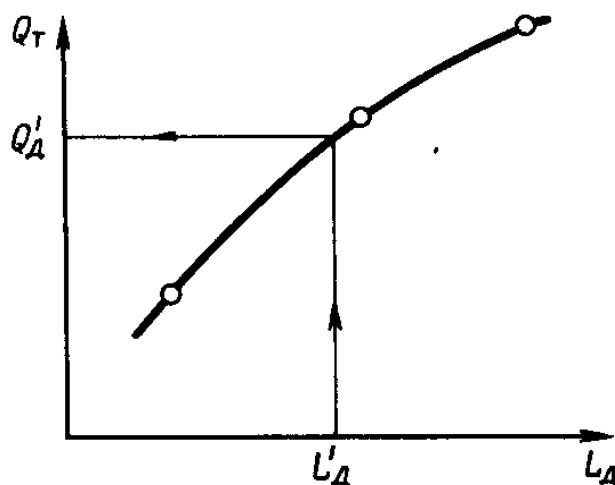


Рис. 3.14. График $Q_T = f(L_D)$

В ориентировочных расчетах допустимая производительность снаряда

$$Q_D \leq \frac{3600 BhV}{k_y k_1 \rho_{гр} g} C_{ПДК}. \quad (3.6)$$

Для разработки землечерпательной прорези планируют серийный землесосный снаряд, техническая производительность которого равна или несколько меньше допустимой. В крайнем случае придется разрабатывать прорези по технологическому режиму с производительностью земснаряда ниже возможной.

Изложенные методики оценки временного местного повышения мутности потока в процессе землечерпания пригодны только для транзитных работ на перекатах, где сохраняется естественное загрязнение донного грунта.

3.5. ПОВТОРНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДЫ

3.5.1. Рекомендации по снижению повторного загрязнения при производстве работ

На акваториях портов, в особенности в районах рейдов нефтеналивного флота, в затонах судоремонтных предприятий и на участках рек, расположенных в городах ниже пунктов сброса сточных вод, грунт на дне водоемов может быть сильно загрязнен нефтепродуктами и другими вредными веществами. Это происходит потому, что нефть и нефтепродукты, попавшие в воду, образуют водонефтяную эмульсию. Диспергированные в воде мельчайшие частички нефтепродуктов, имея меньшую, чем вода, плотность, сами по себе осесть на дно не могут. Однако, сталкиваясь с грунтовыми частицами, переносимыми потоком в виде взвешенных наносов, нефть и нефтепродукты адсорбируют, т. е. обволакивают их, и вместе с наносами оседают на дно реки, образуя загрязненный аллювиальный слой поверх естественного грунта речного ложа, обычно не имеющего ни нефтяных, ни каких-либо иных химических загрязнений.

В загрязненном слое аллювия протекают химико-биологические процессы, в результате которых частицы нефти и нефтепродуктов окисляются и разлагаются. В связи с этим в придонных слоях воды снижается содержание кислорода, а тяжелые фракции, оставаясь в донном грунте, делают его токсичным. Рыбе и ее кормовой базе — мелким водным живым существам — причиняется большой вред.

При дноуглубительных работах, когда извлекают загрязненный грунт и перемешивают его, некоторая часть нефтяной пленки, обволакивающей песчинки и частицы ила на дне реки, отрывается от них и вновь становится свободно плавающим нефтяным загрязнением.

Практикой установлено, что после проведения землечерпательных работах на перекатах, удаленных от крупных городов и промышленных предприятий, заметного повторного загрязнения воды в реке

нефтепродуктами и другими вредными химическими веществами почти не наблюдалось.

Загрязненность донного грунта можно определить экспериментально путем взятия проб, их лабораторного анализа и расчетами по следующей формуле. Средневзвешенная загрязненность извлекаемого для исследования грунта (мг/100 г сухого грунта)

$$N_{\text{ср}} = \frac{1}{h_c(N_1h_1 + N_2h_2 + \dots + N_ih_i)}, \quad (3.7)$$

где h_c — толщина снимаемого слоя грунта, м; N_1, N_2, \dots, N_i — загрязненность 1, 2, 3, ..., i -го слоев грунта, мг/100 г сухого грунта; h_1, h_2, \dots, h_i — толщина снимаемых слоев грунта, отличающихся степенью загрязненности, м.

Возможное повторное загрязнение воды нефтью и нефтепродуктами (мг/л)

$$n = N_{\text{ср}}C \cdot 10^{-5}, \quad (3.8)$$

где C — мутность, создаваемая земснарядами при выполнении работ.

Повторное загрязнение не должно быть более ПДК. Как показала практика, наибольшее повторное загрязнение воды создают самоотвозные землесосные снаряды при заполнении трюма грунтом до максимальной грузоподъемности, т. е. «с переливом», когда извлеченный со дна реки и погруженный в трюм грунт интенсивно перемешивается и промывается в связи с последующим поступлением пульпы.

Для того чтобы уменьшить попадание в воду грунта, загрязненного нефтью, используют сгустительные аппараты. Аппарат на самоотвозных землесосных снарядах устанавливают горизонтально над грунтовым трюмом. В сгустительной установке пульпа протекает вращающимся потоком между стенкой корпуса и патрубок-экраном. Частицы грунта, отброшенные центробежной силой к стенке, сползают по ней вниз под действием собственной массы и через отводящий

патрубок транспортируются в трюм. Осветленная пульпа через патрубок-экран по сливной трубе-сифону сбрасывается за борт.

Вторичное загрязнение воды, при извлечении грунтов с большим содержанием нефтепродуктов можно значительно сократить или исключить полностью также следующими способами:

- разработку прорези вести послойно, предварительно определив глубину залегания сильно загрязненных слоев грунта;
- грунт с содержанием нефтепродуктов более допустимого складировать на берег или в непроточные боковые емкости русла, не имеющие рыбохозяйственного значения;
- отвал грунта при рефулировании его землесосными снарядами в воду производить в огражденные емкости, (рис. 3.15), используя для этой цели использовать специальные пластиковые ограждения.

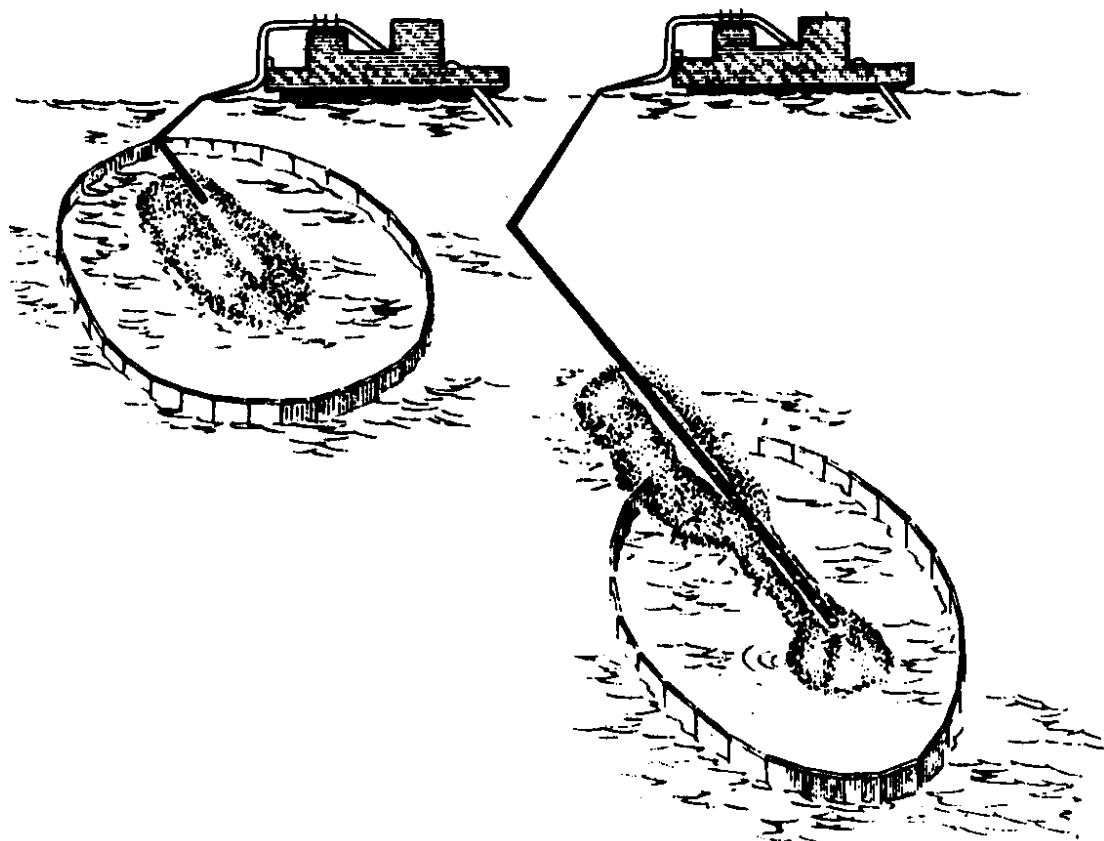


Рис. 3.15. Схема отвала грунта землесосными снарядами в воду в огражденные емкости

3.5.2. Методика оценки размывающего действия судовых движителей

На современном этапе экономического развития, транспортное обслуживание крупных городов России катастрофически ухудшилось, что особенно заметно в их центральных частях. Наряду с существенным уменьшением потребного количества общественного наземного транспорта, глобальными стали такие проблемы, как автомобильные пробки, загрязнение воздуха, недопустимый уровень шума. Частичное устранение указанных негативных явлений и улучшение условий обитания людей в городе может быть достигнуто за счет возрождения экономичного и экологически менее опасного внутреннего водного транспорта.

Для улучшения сложившейся ситуации необходимо расширить сферу использования водных путей городов по следующим направлениям:

- организация подъездных путей к промышленным предприятиям;
- транспортировка отходов в специальных плавучих контейнерах или гибких оболочках;
- размещения на них плавучих объектов сферы обслуживания: гостиниц, кафе, ресторанов, магазинов, предприятий авто сервиса и т. д.;
- организация движения общественного транспорта.

Существующая гидротехническая сеть городов принципиально позволяет возобновить интенсивное судоходство по рекам и каналам их центральной части.

Однако, для организации безопасного движения по внутренним водным путям требуется осуществить комплекс путевых работ, связанных с дноуглублением, руслоочищением, оснащением их судоходной обстановкой.

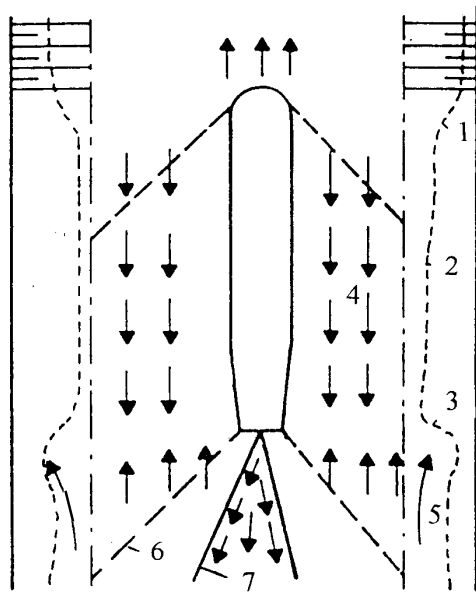
Из результатов экологического мониторинга состояния водотоков Санкт-Петербурга следует, что на дне почти всех городских рек скопилось огромное количество загрязненных осадков, содержащих нефте-

продукты, тяжелые металлы (медь, свинец, ртуть, кадмий, хром), полиароматические углеводороды. Помимо того, что перечисленные элементы фактически привели к исчезновению всей флоры, при контакте с человеком они могут проявлять канцерогенный характер.

Поэтому, при проведении работ по удалению грунта следует учитывать весьма серьезную экологическую опасность, связанную с попаданием в воду токсических веществ ранее находившихся на дне водоемов в виде осадков погребенных слоев ила. Учитывая это, в некоторых случаях придется исключить обычные способы землечерпания. Предполагается, что приемлемым методом будет являться разработка грунта насухо, с предварительным перекрытием участка канала плавучими батопортами и откачкой воды. А учитывая колоссальное количество загрязненных отложений, которые не могут быть удалены в полном объеме в ближайшее время, первостепенной задачей является нормирование режимов движения судов, с обязательным требованием неразмываемости дна и берегов водотоков.

При движении судов по рекам и каналам изменяется положение уровня свободной поверхности воды и кинематика потока. Уровень воды в зоне движущегося судна понижается, образуются волны и так называемый попутный поток. Судовые волны по характеру распространения делятся на расходящиеся и поперечные. При движении судна с малой скоростью заметны только расходящиеся волны, с увеличением скорости появляются поперечные волны, которые из-за своей высоты становятся главными.

Образовавшиеся волны и попутный поток вызывают подъем отложений со дна водоема в толщу воды и разрушение берегов, причем эти явления интенсивнее на мелководье и при проходе судов вблизи берегов. В условиях ограниченного (по глубине и ширине) фарватера и при значительном стеснении живого сечения реки корпусом судна в потоке наблюдается целый ряд характерных связанных между собой и с волнообразованием, гидромеханических явлений (рис. 3.16).



- 1 — одиночная волна (поперечная, фронтальная);
- 2 — понижение уровня воды;
- 3 — поперечные кормовые волны;
- 4 — обратный поток;
- 5 — попутный поток;
- 6 — вторичные волны;
- 7 — турбулентная струя от судового движителя.

Рис. 3.16. Гидромеханические явления, образующиеся при движении судна

Возмущения в потоке нарушают динамическое равновесие системы поток — русло, что приводит к деформациям русла, которые соответствуют размерам и интенсивности возмущений.

Известно, что эрозия донных русловых форм и деформация землечерпательных прорезей, вызванная движением судов по мелководью, в немалой степени зависит от струи судового движителя. В настоящее время вопросы определения начальной скорости винтового потока, распределения скоростей по его длине и результирующего размывающего действия на дно не решены в полном объеме.

Наиболее опасными являются случаи:

- Маневрирование и швартовный режим. Судно движется с малыми скоростями или находится у причала в неподвижном состоянии. Возникновение размыва зависит от естественного течения воды в водотоке и от струи судового движителя.

- Нормальная навигация. Судно движется со скоростями V_S . В данном случае имеются три основных механизма воздействия на ложе: судовая волна; обратный поток; струя судового движителя.

Рассмотрим случай, когда судно перемещается с очень малыми скоростями ($V_S \approx 0$). При таком режиме, который называется швар-

товным, влияние корпуса судна на поток, вызванный работой винта, мало, а размывающее действие движительной струи является наибольшим. Исходную скорость струи можно определять по следующим выражениям:

$$\begin{cases} V_0 = 1,6nD_p \sqrt{K_T} \approx 0,95nD_p \\ D_0 = 0,7D_p \end{cases} \quad (\text{открытый винт}); \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} V_0 = 1,1nD_p \sqrt{K_T} \\ D_0 = 1,0D_p \end{cases} \quad (\text{винт в насадке}). \quad (3.9)$$

где n — частота вращения винта; K_T — коэффициент упора, $K_T = T / \rho n^2 D_p^4$; T — полный упор; D_0 — исходный диаметр винтовой струи; D_p — диаметр винта.

Реальные величины коэффициентов упора K_T будут зависеть от особенностей конструкции винта и насадки, но основным исходным параметром является отношение шага винта к его диаметру P/D_p . При нулевой поступательной скорости типичными являются следующие величины (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Величины коэффициентов упора в зависимости от отношения шага винта к его диаметру

| P/D_p | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| K_T (открытый) | 0,26 | 0,37 | 0,48 | 0,57 | 0,64 |
| K_T (в насадке) | 0,24 | 0,37 | 0,51 | 0,67 | 0,82 |

Подставив типичное значение $K_T = 0,35$ в выражение (3.8) получаем для открытого винта

$$V_0 = 0,95nD_p. \quad (3.10)$$

Для винтов с другими значениями отношения шаг / диаметр или для винтов регулируемого шага соответствующие величины K_T могут быть получены из табл. 3.1.

Для описания полного упора можно воспользоваться следующим выражением

$$T = 296,5\eta_D D_p^2 \left(\frac{P_d}{D_p^2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3.11)$$

где P_d — мощность двигателя судна, кВт; η_D — коэффициент, определяемый по формуле $\eta_D = K_T / K_Q^{2/3}$. Здесь K_Q — коэффициент момента, $K_Q = M / \rho n^2 D_p^5$.

С использованием выражений (3.11) и (3.10) уравнение (3.8) может быть преобразовано к виду

$$V_0 = 0,87\sqrt{\eta_D} \left(\frac{P_d}{D_p^2} \right)^{\frac{1}{3}} = c_0 \left(\frac{P_d}{D_p^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.12)$$

Аналогичным образом может быть получено выражение для винта в насадке

$$V_0 = 0,60\sqrt{\eta_D} \left(\frac{P_d}{D_p^2} \right)^{\frac{1}{3}} = c_0 \left(\frac{P_d}{D_p^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.13)$$

Для получения коэффициентов η_D и c_0 можно воспользоваться данными из табл. 3.2.

Таблица 3.2

Коэффициенты для различных типов движителей

| Тип винта | η_D (средний) | c_0 |
|---|--------------------|-------|
| Винт в насадке в направлении преобладающего упора | 3,65 | 1,15 |
| в противоположном направлении | 1,70 | 0,78 |
| Винт в насадке без преобладающего направления упора | 3,15 | 1,07 |
| Винт без насадки в направлении преобладающего упора | 2,90 | 1,48 |
| Открытый винт с плоскими лопастями | 2,50 | 1,37 |

Для определения диаметра винта, если данные о его размерах отсутствуют, может быть рекомендована следующая приблизительная зависимость от осадки судна

$$D_p \approx 0,7S \quad (3.14)$$

и выражения (3.8) и (3.9) приводится к виду

$$V_0 = 1,26c_0 \left(\frac{P_d}{S^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.15)$$

Анализ работ предыдущих исследований позволяет предложить для использования следующее выражение для максимальных донных скоростей в струе от судового движителя $V_{\text{дон, макс}}$ (рис. 3.17):

$$\frac{V_{\text{дон, макс}}}{V_0} = A \left(\frac{H_p}{D_p} \right)^B, \quad (3.16)$$

где $A = 0,45$, $B = -0,9$ — для судна с центральным винтом с рулем;
 $A = 0,65$, $B = -0,9$ — для судна с центральным винтом без руля;
 $A = 0,60$, $B = -0,4$ — для двухвинтового судна с центральным рулем;
 $A = 0,45$, $B = -0,4$ — для двухвинтового судна без центрального руля.

В итоге получаем:

$$V_{\text{дон, макс}} = c_0 A \left(\frac{H_p}{D_p} \right)^B \left(\frac{P_d}{D_p^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.17)$$

Практически все донные отложения являются мелкозернистыми, и, учитывая, то, что скорости в струе могут быть очень высокими, загрязненные частицы способны легко перемещаться под ее воздействием.

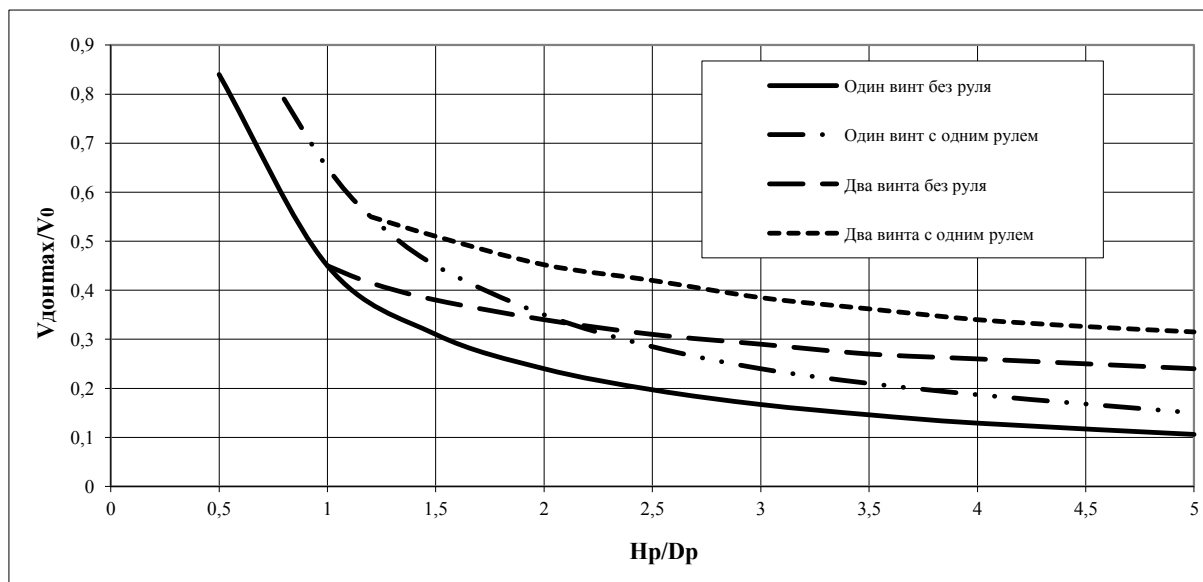


Рис. 3.17. Относительные максимальные донные скорости для различных конструкций движительно-рулевого комплекса

Зная размер частиц, из которых состоит донный грунт, можно сравнивая максимальные придонные скорости течения и допустимые неразмывающие скорости, определить границы участков размыва

$$V_{\text{дон}_{\text{max}}} < V_{\text{дон}_{\text{кр}}}, \quad (3.18)$$

где $V_{\text{дон}_{\text{кр}}} = 4,8\sqrt{d_{50}}$ для наиболее распространенной величины удельного веса донного материала, d_{50} — средний диаметр частиц донного грунта.

Используя формулу (3.18) можно приблизительно оценить размывающий эффект струй от судовых движителей и ограничивать мощность двигателя при необходимости.

Например, для судна с одним винтом без насадки и рулей выражение (3.18) приводится к виду:

$$P_d \leq 3,37 \frac{V_{\text{донкр}}^3 H_p^{2,7}}{D_p^{0,7}}. \quad (3.19)$$

При необходимости такой анализ может быть повторен с другими исходными данными для оценки влияния параметров судна на интенсивность размыва.

Проблема размыва, вызванного работой судовых движителей, обычно рассматривается с точки зрения воздействия на морские ГТС, но опасность вторичного загрязнения акваторий может потребовать разработки новых требований к режимам перемещений судов по водотокам с потенциально опасными грунтами дна. В литературе приводятся данные о размывающих скоростях порядка 5 м/с на глубине 15–20 м при движении скоростных судов, у которых струя направлена под углом 40° от горизонтального.

Если планируется развитие каких-либо маршрутов движения по участкам с донными отложениями, содержащими токсичные компоненты, или там, где донная флора и фауна особенно чувствительна к размыву, представляется важным накладывать ограничения на такие операции, как причаливание или отчаливание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альхименко А. И. Безопасность морских гидротехнических сооружений / А. И. Альхименко, Н. Д. Беляев, Ю. Н. Фомин. — СПб. : Изд-во «Лань», 2003. — 285 с.

2. Беляев Н. Д. Путевые работы на водном транспорте: учеб. пособие. Часть I / Н. Д. Беляев, П. А. Гарибин. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. — 88 с.

3. Бородулин Я. Ф. Дноуглубительный флот и дноуглубительные работы / Я. Ф. Бородулин, Б. Н. Сущенко. — М. : Транспорт, 1973. — 432 с.

4. Гришанин К. В. Водные пути / К. В. Гришанин, В. В. Дегтярев, В. М. Селезнев. — М. : Транспорт, 1986. — 400 с.

5. Гидрология и водные изыскания: учебник для вузов / К. В. Гришанин Ю. И. Сорокин; под общ. ред. К. В. Гришанина. — М. : Транспорт, 1982. — 212 с.

6. Дегтярев В. В. Охрана окружающей среды / В. В. Дегтярев — М. : Транспорт, 1989. — 212 с.

7. Казаков Н. Н. Техническая эксплуатация объектов водного транспорта : учеб.-метод. пособие / Н. Н. Казаков. — Гомель : БелГУТ, 2009. — 208 с.

8. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. учебник для вузов: Ч. 2. Специальные вопросы / Н. М. Константинов; под общ. ред. Н. М. Константинова. — М. : Высш. шк., 1987. — 431 с.

9. Леви И. И. Инженерная гидрология. — М. : Высшая школа, 1968. — 235 с.

10. Михайлов А. В. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа : учеб. для вузов. Ч. 1 : Внутренние водные пути / А. В. Михайлов ; под общ. ред. С. Н. Левачева. — Изд. 2-е, доп. и перераб.— М. : Изд-во АСВ, 2004.— 446 с.

11. Журавлев М. В. Обеспечение судоходных условий на участке реки дноуглублением: Методические указания по выполнению курсового проекта / М. В. Журавлев. - ЛИВТ, Л., 1990. — 62 с.

12. Орлович К. С. Внутренние водные пути и судоходная обстановка / К. С. Орлович, И. Е. Шмерлинг. — М. : Транспорт, 1977. — 216 с.

13. Подкопаев В. А. Водные транспортные пути : учеб. пособие / В. А. Подкопаев. — Гомель : БелГУТ, 2004. — 163 с.

14. Седых А. И. Путевые работы на судоходных реках / А. И. Седых, Ф. М. Чернышов, А. В. Кабанов. — М. : Транспорт, 1978. — 328 с.

15. Беляев Н. Д. Сооружения водного транспорта: учеб. пособие / Н. Д. Беляев, П. А. Гарибин, Н. Н. Загрядская / СПбГТУ, СПб., 1995. — 84 с.