Основной фонд
библиотеки Наркомзема
631.8
К20
343

НАУЧНО-МЕЛИОРАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ

Проф. Б. Н. Кандиба

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕК

НАРКОМЗЕМ СССР,
Центральная Научно-Техническая Библиотека
Инв. № 8238 м

Госкомторг
БИБЛИОТЕКА
„ОТЛЕС"

ИЗДАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНО-МЕЛИОРАЦИОННОГО ИНСТИТУТА

ЛЕНИНГРАД
1927

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Со времени издания печатного курса „Внутренние водяные сообщения" профессора Ф. Г. Зброжека, посвятившего значительную часть своего труда вопросам, относящимся к техническим мерам улучшения естественно судоходного состояния рек, в русской литературе до настоящего времени не появлялось такого нового труда, который по полноте рассмотрения техники регулирования рек и по характеру помещенных материалов мог бы служить систематичным пособием как для изучения этой специальности инженерного искусства, так и в качестве руководства при производстве регуляционных работ. За прошедшее с той поры время наша специальная литература по водному строительству обогатилась многими выдающимися научными трудами русских инженеров по различным теоретическим и практическим вопросам улучшения рек, но труды эти посвящались преимущественно только некоторым отдельным вопросам, выдвигавшимся производством на наших реках выправительных и землечерпательных работ, не задаваясь целью изложить в труде столь полные сведения о регулировании рек, чтобы труд мог служить общим руководством для изучения этого сложного дела.

Между тем, ныне ощущается большая надобность в таком труде. Книга Ф. Г. Зброжека была написана им в начале девятидесятых годов минувшего века и рассматривала вопросы улучшения рек только в отношении судоходных условий. В течение последовавшего времени в деле регулирования судоходных рек достигались существенные усовершенствования, вносились в него новые принципы и значительно видоизменились сами задачи регулирования судоходных рек. Во многом эти изменения были вызваны усовершенствованием дноуглубительных снарядов, которое способствовало широкому применению механического землечерпания как в составе регуляционных работ, так и в качестве самостоятельного способа поддержания нужной для судоходства глубины на перекатах больших рек. Необходимо, кроме того, отметить, что при современных условиях не представляется возможным при изучении способов регулирования рек ограничиваться рассмотрением только таких работ, которые преследуют цель улучшения реки в судоходном отношении, не ознакомившись вместе с тем, хотя бы в общих чертах, с методами регулирования и для иных надобностей. В деле регулирования рек заинтересовано водное хозяйство во всем его целом. Разнообразные задачи водного хозяйства пред'являют работам по регулированию реки многие требования, которые приходится согласовать при производстве всяких сколько нибудь крупных регуляционных работ.

В частности, например, развитие строительства гидроэлектрических станций для использования энергии текущей воды вызывает во многих случаях необходимость регулирования не только русла реки, но и стока воды в ней; работы, преследующие цели мелиорации земель, тоже нередко связаны с работами по регулированию стока воды и русла рек или иных естественных водных потоков; в горных местностях улучшение реки часто бывает связано с необходимостью регулировать впадающие в нее горные потоки; и т. п.

В настоящем труде нами сделана попытка изложить основы применяющихся методов регулирования рек, с описанием главнейших типов регуляционных сооружений и, отчасти, способов производства работ, в таком виде, чтобы этот труд мог быть использован в качестве пособия для инженеров и техников при проектировании и выполнении регуляционных работ, и для студентов, изучающих соответствующие предметы в высших технических учебных заведениях.

Для составления этого труда использованы многие источники русской и иностранной литературы, указанные в помещенном в конце книги перечне литературных источников. Из этих же источников заимствована значительная часть из числа рисунков, помещенных в тексте книги.

Первоначально нами предполагалось изложить сведения о регуляционных работах в сжатом виде для помещения их в составляемом нами курсе сооружения внутренних водных путей. Расширению задач труда и появлению его в печати оказано нам большое содействие со стороны Государственного Научно-Мелиорационного Института, пошедшего навстречу нашему желанию и принявшего на себя все заботы и денежные расходы по изданию настоящего труда, за что приносим Институту нашу глубокую благодарность.

Б. Кандиба.

ВВЕДЕНИЕ.

Каждая река, каков бы ни был естественный ее вид, исполняет свою природную задачу. Река собирает и уносит из орошаемого ею района все те избытки вод атмосферных осадков, которые образуются на поверхности земли или в почве после израсходования некоторой их части на испарение, на увлажнение почвы, на питание растений и проч. Одновременно реки исполняют огромную работу по перенесению твердых частиц грунта, являющихся продуктами разрушения и смыва поверхностных слоев земли, которые постепенно передвигаются в русле реки вниз по течению для наращивания низменных мест или для выноса их в море. Преследуя какие-либо свои цели, человек не может приостановить выполнение упомянутых природных задач реки или устранить в целом происходящие при этом явления. Его работы могут заключаться только в некоторых воздействиях на речные явления, чтобы извлечь из них наибольшую пользу для каких-либо возникающих целей или чтобы уменьшить вредное их действие.

Свойства рек непостоянны. Для разных рек они имеют часто существенные особенности. В каждой реке явления не одинаковы как по длине реки, так и для каждого ее места в разное время. Количество текущей воды меняется в зависимости от условий питания в разное время года в десятки и сотни раз. Вместе с тем меняются высота уровня воды, ширина реки и ее глубины. При сильных прибылях воды река выходит в некоторых местах из берегов и затопляет обширные площади, причем такие явления происходят периодически или случайно; в некоторых случаях они приносят пользу, в других случаях вред, а иногда влекут за собою тяжелые бедствия. Устойчивость русла тоже не одинакова для разных рек или для разных участков данной реки. В зависимости от степени своей устойчивости, от характера течения и от других обстоятельств, русло реки меняет свою форму, иногда и свое расположение в плане. Берега реки в некоторых местах подмываются и обрушиваются, отнимая ценные угодия, в других местах они наращиваются наносами. Дно русла неровно и по ширине и по длине реки, глубокие места чередуются с мелкими; мели деформируются, степень их устойчивости, характер и периодичность их деформаций различны в зависимости от разных свойств реки.

Непостоянство речных явлений побуждает принимать технические меры воздействия на реку для той или иной цели. Пред'являемые при этом

требования к реке также разнообразны, как разнообразны и сами преследуемые цели. Требования эти иногда могут совпадать, иногда могут быть независимы друг от друга, а в некоторых случаях они являются совершенно противоположными. Например, для рыболовства представляется выгодным, чтобы река оставалась в первобытном состоянии, так как такое состояние реки дает для рыбы наиболее благоприятные условия жизни. Судоходство, напротив, обыкновенно не удовлетворяется естественными качествами реки: при низких уровнях воды судоходству нужны бо́льшие глубины на фарватере; его затрудняют и большие скорости течения и крутые извилины реки. При высокой воде река дает судоходству больший простор и по ширине и по глубине; поэтому судоходство нуждается главным образом в улучшении русла низких вод (для чего производится углубление дна механическими снарядами, воздействие на русло помощью разного рода дамб, устраиваются берегоукрепительные сооружения и проч.). Между тем, прибрежные селения, сельское хозяйство и земледелие более заинтересованы условиями прохода высоких вод, так как при высоких под'емах уровня воды в реке они страдают от заболачивания местностей и от наводнений; для устранения вредных явлений требуется в таких случаях или ограждение местностей валами, или принятие иных мер, направленных к искусственному понижению уровня высоких вод в реке. Напротив, в других случаях и для судоходства, и для орошения земель, и для использования гидравлической энергии требуются меры, направленные к искусственному под'ему уровня воды в реке, для чего загражда́ют реку плотиной, которая производит подпор воды на вышележащем участке реки. Города, заводы, фабрики и другие промышленные предприятия нередко нуждаются в реке не только в качестве источника для водоснабжения, но и для отвода отработавших и загрязненных вод; между тем здравоохранение требует содержания реки в возможно полной чистоте.

Приведенные примеры показывают, что предпринимая те или иные работы в реке с целью улучшения ее для какой-либо определенной потребности, возникающей в данное время, необходимо всякий раз тщательно взвесить, насколько принятая мера может отразиться в иных отношениях и не создает ли она препятствий для удовлетворения других потребностей. Из числа разного рода применяющихся на реках сооружений и работ можно указать только немногие в качестве таких, которые сохраняют свое полезное значение для всех вышеупоминавшихся целей. К ним относится, например, регулирование стока воды по реке, заключающееся в том, что искусственным способом замедляется сток в реку вод при сильной их прибыли от таяния снегов или выпадающих ливней с тем, чтобы задержанную воду давать в реку в засушливое время. Для судоходства такая мера полезна потому, что позволяет увеличивать глубину реки в периоды времени, когда река страдает недостатком воды. Для предохранения от наводнений означенная мера полезна как средство понижения уровня высоких вод в реке весною и при сильных дождях. При использовании речной воды для искусственного орошения земель, для водоснабжения городов, для гидравлических силовых установок и т. п. смягчение количественной разницы вод, протекающих по реке в разное время года, позволяет более выгодно использовать

речную воду для упомянутых целей. Общеполезное значение имеют тоже речные берегоукрепительные работы для защиты берегов от размыва и обрушения. Польза таких работ не исчерпывается сохранением прибрежных земель; защита берегов от размыва уменьшает образование в русле реки наносов, движение и складывание коих вызывает многие явления, с которыми приходится бороться при улучшении реки для какой бы то ни было цели.

Вообще, разнообразие речных явлений и сложная связь, в которой они находятся друг с другом, требуют большой осмотрительности при установлении технических мер с целью устранить или ослабить какое-либо вредное в данном случае явление. Недостаточно изучить само это явление, нужно стремиться выяснить причины его, так как только тогда можно рассчитывать на сохранность полезных результатов предпринимаемых работ, когда последние соображены с бытом реки и с причинами данного явления.

Поэтому и сами работы должны быть направлены к воздействию на причины вредных аномалий речного быта, т. е. к упорядочению реки, и при таком своем назначении они могут быть названы работами по *регулированию реки.*

Общая задача регулирования рек, как видно из вышеизложенного, сводится к достижению такого состояния данной реки, чтобы ее высокие воды приносили возможно меньший вред, а меженние воды — возможно большую пользу. Однако, полнота осуществления такой общей задачи требуется в разных случая неодинаковая.

В некоторых случаях требуются регуляционные работы только для меженнего состояния реки, в других, напротив, необходимы работы для воздействия на реку лишь при ее высоких водах. Так как в том и другом случаях состав необходимых сооружений и характер работ имеют во многом существенные отличия, то разделяют понятия: *регулирование меженнего русла* и *регулирование русла высоких вод,* причем иногда требуется выполнить на данной реке то и другое, в полном, конечно, согласовании между собою.

Если требуется воздействовать на количественную неравномерность воды, текущей в данном месте реки в разное время, задерживая прибыль воды и отдавая ее реке в маловодное время, то необходимые для сего сооружения и работы об'единяются названием *регулирование стока речных вод.*

Состав и характер регуляционных работ видоизменяется также в зависимости от особых свойств реки и местности, где она протекает, от целей, для которых требуются регуляционные работы, и проч. Этими обстоятельствами устанавливаются такие понятия, как: регулирование судоходных рек, регулирование сплавных рек, регулирование озерных или морских устьев реки, регулирование горных рек и горных потоков, регулирование реки в мелиорационном, в санитарном и других отношениях.

Необходимость регуляционных работ не отпадает и в тех случаях, когда для какой-либо надобности возводятся в реке сооружения, коренным образом изменяющие естественный ее быт. Мы разумеем так называемую *канализацию реки,* когда река загораждается одной или многими расставленными друг от друга плотинами, преграждающими течение и образующими

подпор уровня воды в каждом участке, на которые разделена плотинами река. Такие сооружения возводятся, например, для приведения реки в судоходное состояние (шлюзование реки), для использования силы падения воды, для питания оросительных, водопроводных, судоходных и других каналов. При таком состоянии реки работы регуляционного характера заключаются, например, в укреплении берегов, углублении дна, смягчении крутых извилин реки, регулировании стока вод, предохранении берегов от затопления и проч.

Ознакомлению с методами регулирования рек, преимущественно судоходных, и с применяющимися для сего сооружениями и работами, а также со способами производства регуляционных работ и посвящен настоящий труд.

Инв. № 10985

ГЛАВА I.

СВОЙСТВА РЕЧНОГО ПОТОКА.

§ 1. Общие замечания.

Естественный быт реки слагается из происходящих в ней многообразных явлений. Явления эти имеют частью общий для рек характер, частью свои особенности, присущие данной реке. Они зависят как от многочисленных внешних факторов — климатических, топографических, геологических и пр., так и от особых свойств самого речного потока. За редкими исключениями во всех реках происходит не только перемещение масс воды, которое мы видим и называем течением реки, но и передвижение, подобное течению, твердых частиц по дну реки и в ее воде. Оба эти течения находятся постоянно в зависимости друг от друга и, действуя на реку, вызывают многие в ней явления, характеризующие быт реки.

Регулируя реку приходится считаться со всеми этими явлениями. Между тем законы, управляющие столь сложными явлениями на реках, мало известны. Трудность их распознания и обобщения еще более усугубляется разнообразием местных условий, в которых находится каждая река или ее отдельные участки. Поэтому в деле регулирования рек более, чем в других отраслях гидротехники, приходится обосновываться, главным образом, на результатах непосредственного изучения свойств каждой данной реки. Если при этом изучении удается выяснить режим реки, т. е. известную, свойственную данной реке и отдельным ее участкам закономерность в соотношении происходящих на ней явлений, то таковые результаты изучения реки дают наиболее полезную основу для правильного разрешения задач, встречающихся при регулировании данной реки.

Об'яснения природы общих речных явлений, применяющиеся методы их изучения, а также способы производства гидрологических наблюдений и измерений излагаются в специальных курсах гидрологии и гидрометрии. В настоящем труде означенные вопросы рассмотрены лишь в том отношении какое они имеют к технике регулирования рек.

§ 2. Состояние реки в зависимости от условий ее питания.

Река питается водами атмосферных осадков, оставшихся в том или ином виде на поверхности земли (дождевые потоки, снежный покров, болота и озера, горные ледники и пр.), или проникших в землю, где они движутся в виде

грунтовых вод и, найдя себе выход вновь на поверхность земли, образуют ключи и таким образом присоединяются к водам, стекающим в реку по поверхности земли. Вся местность, с которой воды атмосферных осадков могут естественно стекать в данную реку по склонам долин как самой реки, так и ее притоков и всех разветвлений последних, называется *бассейном реки*. Возвышенности, разделяющие бассейны рек, называются *водоразделами*. Каждый приток реки, а также и прочие реки, текущие в пределах бассейна главной реки и входящие в систему разветвлений ее притоков, имеют свои бассейны, общая совокупность которых и составляет площадь всего бассейна главной реки. Воды, протекающие в каком-нибудь определенном месте реки, собираются только из той части общей площади бассейна, с которой они стекают в реку на вышележащем от этого места протяжении реки. Таким образом, означенная часть площади является бассейном реки для данного ее места.

Величина бассейна в известной степени характеризует величину реки в отношении ее длины и многоводности. Большие реки, текущие на значительном протяжении и принимающие в себя в качестве притоков крупные реки, обладают обширными площадями бассейнов и несут большие массы воды [1]). Некоторые реки, берущие свое начало из крупных озер, могут и при сравнительно короткой длине обладать тоже большой многоводностью, если озеро с впадающими в него реками имеет обширный собирательный бассейн, (например, р. Нева). Но, кроме величины бассейна, количество воды, несомой рекою, зависит и от интенсивности атмосферных осадков в местности, занимаемой бассейном. Нужно, однако, иметь в виду, что бассейн реки отдает ей не все то количество воды, которое он получает из атмосферных осадков, так как значительная их часть теряется на испарение, на поглощение почвой, на питание растений и пр. Наконец, и самый сток воды в реку как по поверхности земли, так и в ее недрах происходит неодинаково при разных местных условиях. Все эти обстоятельства, зависящие от разнообразных климатических, топографических, почвенных и других условий, влияют на питание реки и отдельных ее участков в количественном отношении, а также на неравномерность питания в разное время года. В общем, замечается, что чем выше над уровнем моря расположена местность, служа-

---

[1]) Характеристикой величины бассейна некоторых значительных рек СССР могут служить следующие данные:

	Длина реки.	Площадь бассейна.
Река Амур.....	до 4.000 *км.*	1.900.000 *кв. км.*
„ Волга	„ 3.606 „	1.463.000 „ „
„ Днепр.....	„ 2.155 „	519.000 „ „
„ Аму-Дарья..	„ 2.325 „	481.000 „ „
„ Дон.....	„ 2.111 „	430.000 „ „
„ Сев. Двина.	„ 715 „	363.000 „ „
„ Нева	„ 74 „	281.000 „ „
„ Кура	„ 1.327 „	155.000 „ „
„ Южный Буг	„ 837 „	64.370 „ „
„ Кубань	„ 901 „	60.000 „ „
„ Терек	„ 555 „	54.400 „ „
„ Рион	„ 298 „	13.320 „ „

ицая питательным бассейном для того или иного участка реки, тем более частые и более сильные атмосферные осадки получает этот бассейн. Чем форма последнего более сжатая, более приближающаяся к форме крута, чем круче склоны поверхности в этом бассейне, чем более плотна и водонепроницаема поверхность земли и чем беднее ее растительность, — тем бо́льшая часть атмосферных осадков стекает в реку и тем скорее происходит их сток.

Поэтому условия питания реки характеризуются не только величиной площади ее бассейна, величиною атмосферных осадков и распределением их по времени, но и так называемым *коэффициентом стока* (или *гидрологическим коэффициентом*). Коэффициентом стока называется численное отношение об'ема воды, протекающей в данном месте реки за определенный более или менее значительный период времени, к общему об'ему вод атмосферных осадков, выпавших в течение того же периода времени в бассейне всей вышележащей от этого места части реки. Чем за более долгий период времени определен коэффициент стока, как некоторая средняя его величина, тем

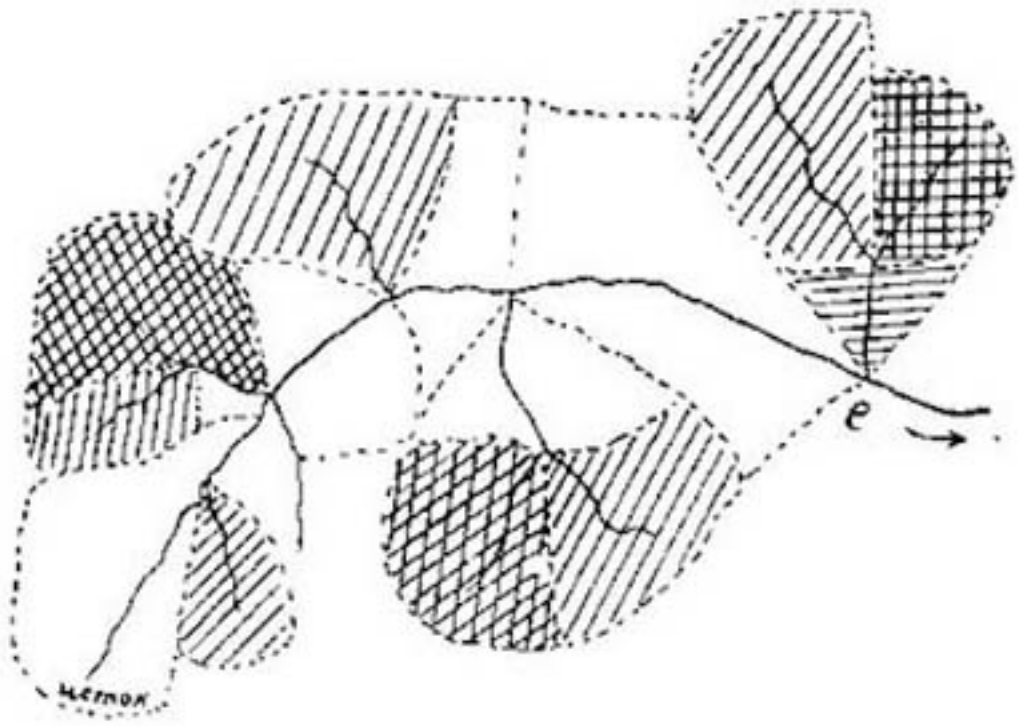


Рис. 1. Карта осадков в бассейне реки.

меньшее значение приобретают случайные обстоятельства, влиявшие на питание реки, а коэффициент стока тем правильнее характеризует условия питания реки. Величина коэффициента стока исчисляется на основании результатов наблюдений за осадками на метеорологических станциях и по измерениям количества воды, протекающей в данном месте — так называемого *расхода* воды.

Пользуясь картой распределения осадков за данный год, на которой нанесены составные части площади бассейна реки с обозначением высоты слоя атмосферных осадков, выпавших на каждом участке в течение этого года (Рис. 1), можно исчислить среднюю для всего бассейна высоту слоя осадков. Если f_1, f_2, f_3 и т. д. — величины частных площадей бассейна, питающих реку до пункта e, а H_1, H_2, H_3, и т. д.—высоты слоя осадков в соответственных площадях, то средняя высота годового слоя осадков для данного бассейна

$$H_{ср.} = \frac{f_1 H_1 + f_2 H_2 + f_3 H_3 + \ldots}{f_1 + f_2 + f_3 + \ldots\ldots\ldots} = \frac{\Sigma fH}{F}$$

Под наименованием *расход* воды в реке разумеется об'емное количество воды, протекающее в одну секунду в данном месте реки. Расход воды можно выразить произведением площади поперечного сечения водяного потока на среднюю, для всего сечения, его скорость. Если измеренные величины секундного расхода Θ_1, Θ_2, Θ_3 и т. д. можно принять, как постоянные для определенных промежутков времени t_1, t_2, t_3 и т. д., из которых составляется все годовое время (выражая время в числе секунд), то средняя за год величина секундного расхода составит:

$$\Theta_{cp.} = \frac{\Theta_1 t_1 + \Theta_2 t_2 + \Theta_3 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots} = \frac{\Sigma \Theta . t}{T},$$

а средняя за год величина коэффициента стока определится для данного года из выражения

$$y_{cp.} = \frac{\Theta_{cp.} T}{H_{cp.} F} \qquad (1)$$

Если площадь бассейна выражена в квадратных километрах, высота слоя осадков в метрах, а расход воды в кубических метрах, то

$$y_{cp.} = \frac{\Theta_{cp.} \times 365 \times 24 \times 60 \times 60}{H_{cp.} \times F \times 1000^2} = 31{,}54 \frac{\Theta_{cp.}}{H_{cp.} F} \qquad (2)$$

Подобным же образом можно исчислить коэффициент стока и для какого-либо отдельного периода года, а также средний за многие годы коэффициент стока — годовой, или для определенного периода года.

Пользуясь теми же данными мы можем найти какая часть высоты годового слоя осадков стекает в реку. Обозначая ее через h, а остальную часть, идущую на разные потери, через Z, имеем $H = h + Z$, причем $h = \frac{\Theta_{cp.} T}{F}$, а $\Theta_{cp.} = \frac{F . h}{T}$. Подставляя в выражение (1), получаем:

$$y_{cp.} = \frac{h}{H},$$

где H есть полная средняя высота слоя атмосферных осадков, а h — средняя высота слоя осадков, стекающих в реку.

Коэффициент стока неодинаков для разных рек и для разных мест одной и той же реки. Он, например, меньше для сухого летнего времени сравнительно с весенним временем. Реки, бассейн которых расположен на невысоких равнинах, имеют средний коэффициент стока значительно меньший, чем горные реки. Водопроницаемые почвы, распашка земель, растительность уменьшают коэффициент стока. Климатические условия также влияют на коэффициент стока. В местностях, где годовая высота слоя атмосферных осадков больше, реки имеют обыкновенно бо́льший коэффициент стока. Средняя годовая величина коэффициента стока для рек более значительных и текущих в равнинных или холмистых местностях, в большинстве случаев находится в пределах от 0,20 до 0,50 [1]). Для рек, текущих в высоких горах, этот коэффициент чаще всего находится в пределах от 0,50 до 0,80. Для некоторых рек имеются величины коэффициентов стока, определенные

[1]) Смотр. выноску [2]) на следующей странице.

на основании специального изучения реки и ее бассейна [1]). Но у нас таких рек сравнительно немного, так как для сего требуются многочисленные систематические наблюдения и измерения в течение долгого времени. Между тем в деле регулирования рек часто требуется знать хотя бы приблизительную величину коэффициента стока, как среднего годового, так и при разном состоянии реки. Зная коэффициенты стока реки и имея обработанные метеорологические наблюдения над осадками в районе бассейна, а также карту бассейна с линиями равных высот, можно, пользуясь вышеприведенными формулами, исчислить некоторые величины, нужные для соображения разных вопросов регулирования русла реки, регулирования расхода воды и т. п. Например, если μ_2 — средний годовой коэффициент стока реки, H_2 — средняя высота годового слоя осадков в бассейне, то средний за год расход воды в данном месте:

$$Q_2 = \frac{\mu_2 H_2 F}{31,54}$$

где F — площадь бассейна всей вышележащей части реки; общее количество воды, протекающее за год в этом месте, $W = \mu_2 H_2 F$. Таким же образом можно вычислить величины среднего расхода воды для отдельных периодов года. В особенности важное для регулирования рек значение имеют сведения о возможных наибольших и наименьших расходах воды.

Ввиду сего некоторыми исследователями предложены эмпирические формулы для исчисления как среднего коэффициента стока, так и коэффи-

---

[1]) Для р. Днепра у г. Киева, по исследованиям Опокова, средняя величина коэффициента стока за период времени 1877 — 1905 гг. исчисляется в 0,243, при чем для отдельных годов она колеблется в пределах от 0,129 до 0,412. Для Днестра, по Фритшу,—0,35. Для рек Германии коэффициент стока составляет по Мелендорфу в среднем 0,474, колеблясь для разных рек в пределах от 0,281 до 0,716. Для средне-европейских рек, по Келлеру, средние годовые коэффициенты выражаются: для восточной группы рек — 0,28, для западной — 0,35 и для приальпийских — 0,52. Разные исследователи определяли средний годовой коэффициент стока: для р. Сены у Парижа — от 0,28 до 0,33; для Дуная у Вены — 0,56, для р. По — 0,66; для Миссисипи — 0,24; для Инда — 0,43; для Ганга — 0,39. Примером, как низко может падать величина коэффициента стока, может служить р. Нил у Каира, где по Вилькоксу, коэффициент стока составляет только 0,033, так как огромное количество воды, получаемой в верховьях реки, испаряется на дальнейшем ее протяжении при прохождении через знойные пустыни.

[2]) Зависимость величины коэффициента стока от различных топографических условий местности, характеризуется следующими данными, по Келлеру, о средне-европейских реках. В бассейнах рек, расположенных в равнинных местностях, коэффициента стока определился для 18 различных рек или частей реки от $\mu = 19,5$ до $\mu = 40,4$, (в среднем — 31,3); в гористых местностях для 28 рек от $\mu = 20,1$ до $\mu = 68,3$ (в среднем — 40,1); в горных альпийских для 8 рек от $\mu = 58,5$ до $\mu = 72,5$ (в среднем — 65,4).

Зависимость величины коэффициента стока от интенсивности атмосферных осадков, а именно от высоты слоя осадков в течение года, характеризуется, по Келлеру, в следующем виде:

Высота годового слоя осадков в *мм.*	625	750	875	1000	1250	1500	1750
Очень большой из возможных коэффициентов стока . .	0,44	0,53	0,60	0,65	0,72	0,77	0,80
Очень малый из возможных коэффициентов стока	0,15	0,27	0,36	0,42	0,52	0,58	0,62

циента стока в периоде наиболее интенсивного или наиболее слабого питания реки, учитывая при этом разные типичные условия речных бассейнов [1]). Формулами этими приходится, однако, пользоваться с большой осторожностью, так как они составлены, пользуясь обыкновенно данными, относящимися к группе нескольких рек какой-либо отдельной страны.

В силу вышеотмеченных обстоятельств, влияющих на питание реки, количество воды, текущей в реке, бывает не одинаково не только в разных местах реки, но и в одном и том же месте в разное время. Более постоянным и равномерным источником для питания реки служат грунтовые воды, а также воды озер и болот, расположенных в бассейне реки; в бездождное время они и составляют те запасы, благодаря которым не прекращается течение воды в реке. Менее равномерно питание рек тою частью атмосферных осадков, которая поступает в реку непосредственным стоком по поверхности земли, причем в некоторые периоды года или при известных обстоятельствах прибыль таких вод в реку может быть весьма велика.

Состояние реки, когда она питается главным образом грунтовыми водами и запасами воды в озерах и болотах, а также небольшим количеством атмосферных осадков от обыкновенных дождей, называется *меженним состоянием (меженью)*. Если количество текущей в реке воды значительно увеличивается на некоторое время вследствие каких-либо случайных или периодически повторяющихся причин, например, вследствие таяния снегов, вследствие сильных дождей (особенно, если река течет в гористой или холмистой местности), вследствие таяния горных ледников и т. п., то такое состояние реки называется *паводком*. Нужно различать два основных типа паводков — весенние паводки, обусловливаемые главным образом таянием снегов, и паводки, происходящие вследствие выпадения ливней в верхней водосборной части бассейна (на кавказских и среднеазиатских реках такие паводки называются *селью*). *Половодием* называют у нас состояние реки, когда она весною после таяния снега несет наибольшее в году количество воды.

§ 3. Уровень воды.

Под названием уровень воды (его называют также *горизонт воды*) понимается положение, по высоте, поверхности воды в данном месте реки и в данный момент времени. Изменение количества воды, текущей в реке, отражается на высоте поверхности воды. В меженнее время при малом расходе воды уровень ее занимает низкое положение, при прибыли воды уровень повышается, при убыли — понижается. Для определения в данном месте реки положений уровня воды в разное время они должны быть измеряемы от какой-либо постоянной в сем месте точки, принимаемой за нуль. Колебания уровня воды не одинаковы в разных местах по длине реки. Они зависят не только от изменения количества текущей воды, но и от самого русла, так как неодинаковость русла в разных по длине реки ме-

---

[1]) Например, K. Iszkowski: „Formeln zur Ermittlung der Nidrigst, — Normal –und Höchst Wassermengen auf grund Charakteristischer Merkmale des Flussgebietes" (Zeitschr des Öster.-Ing.-und.-Arch. Vereines—1886).

стах, в виде сколько-нибудь резких его расширений, сужений, местных повышений дна и проч., влияет на положение уровня воды и на величину его колебаний. Поэтому для изучения колебаний уровня воды в реке необходимо производить измерения его высоты одновременно в разных пунктах реки по ее длине, положение которых должно быть соображено не только с местами, где сосредоточивается значительная прибыль воды в реку или ее убыль (устья притоков или больших балок, примыкание отводных каналов и т. п.), но и с видом русла реки. Для этой цели учреждаются так называемые *водомерные посты*, оборудованные соответствующими приборами.

Водомерные посты бывают постоянные и временные, так как, в зависимости от цели наблюдений за уровнем воды, требуется производить его измерения в некоторых местах реки постоянно, а в других только в течение определенного периода времени. Положение нуля каждого водомерного поста, закрепленное нивеллировкой от постоянного репера, устанавливается при учреждении поста, а нули всех водомерных постов связываются общей нивеллировкой. Обыкновенно нуль водомерного поста соответствует одному из низких положений уровня воды в реке, но по самой условности установления нулей водомерных постов взаимное положение нулей постов не выражает какого-либо мгновенного положения уровня по всей длине реки. Более простыми и чаще других применяющимися приборами для измерения высоты уровня воды служат закрепленные или съемные *водомерные рейки*, разделенные на деления соответственно принятой точности измерений. На русских реках точность измерений водомерными рейками принималась до настоящего времени, обыкновенно, до одной сотой сажени, соответственно чему водомерные рейки разделялись на сотые доли сажени; ныне начинают у нас переходить к метрическим мерам для определения высоты уровня воды в реке. На реках немецких, французских и многих других государств измерения положения уровня воды с'издавна ведутся в метрических мерах, причем деления рейки обыкновенно наносятся через 2 сантиметра. В Англии и Америке уровень воды на реках измеряется чаще в футах и дюймах. Измерения должны производиться в таких местах, где уровень воды соответствовал бы действительному положению уровня воды в реке, но вместе с тем водомерный пост должен быть так расположен, чтобы он был защищен от повреждений при ледоходе, при волнении, при движении судов и плотов и т. п. Водомерный пост должен быть так расположен, чтобы наблюдение по рейке было всегда доступно и удобно. Измерения должны производиться на всех постах ежедневно и одновременно в определенные часы. В России однообразная система наблюдений на постоянных речных водомерных постах установлена с 1876 года, согласно которой наблюдения производятся в определенные часы: на постах I разряда по три раза в день, а на постах II разряда по одному разу в день.

В некоторых случаях, в особенности при очень быстрых изменениях уровня воды во время паводков, требуется непрерывное измерение колебаний уровня. Для этого служат особые автоматические приборы так называемые *лимнографы*, снабженные часовым механизмом, которые автоматически вычерчивают на бумаге кривую колебаний уровня воды в реке.

Правильно организованные и долгое время производящиеся наблюдения за состоянием уровня воды в реке дают возможность установить положение некоторых уровней поверхности воды, имеющих важное значение как при пользовании рекою, так и для изучения ее режима. К таким уровням относятся:

Низкий горизонт (н. г.) — Средний из всех наблюденных самых низких в течение каждого года уровней.

Высокий горизонт (в. г.) — то же по отношению высоких уровней.

Средний горизонт (с. г.) — Средняя арифметическая величина всех наблюденных высот уровня воды.

Самый низкий горизонт (с. н. г.) — Положение, ниже которого уровень воды не опускался за все время наблюдений.

Самый высокий горизонт (с. в. г.) — тоже предельный по отношению высоких уровней.

Два последних горизонта являются пределами, между которыми колебался уровень воды со времени начала производства организованных наблюдений. Однако, в некоторых случаях можно получить достаточно верные сведения о бывшем ранее сего периода положении горизонта еще более низком или более высоком, например, по данным других наблюдений, по показаниям старожилов, по некоторым признакам на берегах или сооружениях и т. п. Такие положения уровня обозначаются на чертежах и графиках тоже буквами с. н. г. и с. в. г., но с добавлением цифры года, к которому они относятся.

По разным вопросам, встречающимся при регулировании рек, часто приходится обращаться к данным, полученным от наблюдений на водомерных постах, и делать из них выводы, характеризующие в том или ином виде режим реки в отношении колебания уровня воды. В особенности это важно для установления упомянутых крайних и средних положений уровня, а также высоты уровней, при которых происходит замерзание реки и ледоход. Обработка результатов наблюдений необходима для суждения о длительности периодов состояния реки при низких или высоких водах, об относительной частоте повторяемости тех или иных уровней воды, о длительности затопления берегов до той или иной высоты от принятой за нуль отметки и т. п. Для удобства пользования с этой целью данными водомерных наблюдений последние представляют в виде таблиц и графиков.

Пусть, например, имеются записи высоты уровня воды от нуля водомерного поста за каждый день данного года. По этим записям можно составить график, представляющий кривую колебания уровня в течение всего года (рис. 2). Горизонтальная ось графика, общая длина которой принимается за годовой период времени, принимается за время, и деления ее соответствуют времени производства наблюдений (месяцы и дни); в каждом делении откладываются по вертикали в принятом масштабе измеренные высоты уровня по отношению к горизонту, принятому за нуль (обыкновенно к нулю водомерного поста) и изображенному на графике горизонтальной прямой линией. Линия, соединяющая вершины отложенных высот уровня, выражает последовательные изменения уровня воды в данном месте реки

в течение всего данного года. Если на одном графике нанести кривые годовых колебаний высоты уровня за несколько лет, а также вычисленные для каждого дня в году средние за все годы высоты уровня и построить таким же способом кривую средних высот уровня, то такой график даст наглядное представление о режиме реки, в данном ее месте, по отношению колебаний уровня воды. Если река замерзает, то на том же графике отмечается условными знаками время, когда в каждом году река была покрыта льдом и когда происходил осенний и весенний ледоход; благодаря этому, можно по графику видеть, например, при какой наибольшей и наименьшей высоте уровня происходит ледоход. Понятие *частота повторяемости* какого-либо данного горизонта воды в реке (уровня воды, читаемого по водомерной рейке) выражает, насколько часто был на этой высоте уровень воды в течение определенного периода времени (один год или несколько лет). Повторяемость

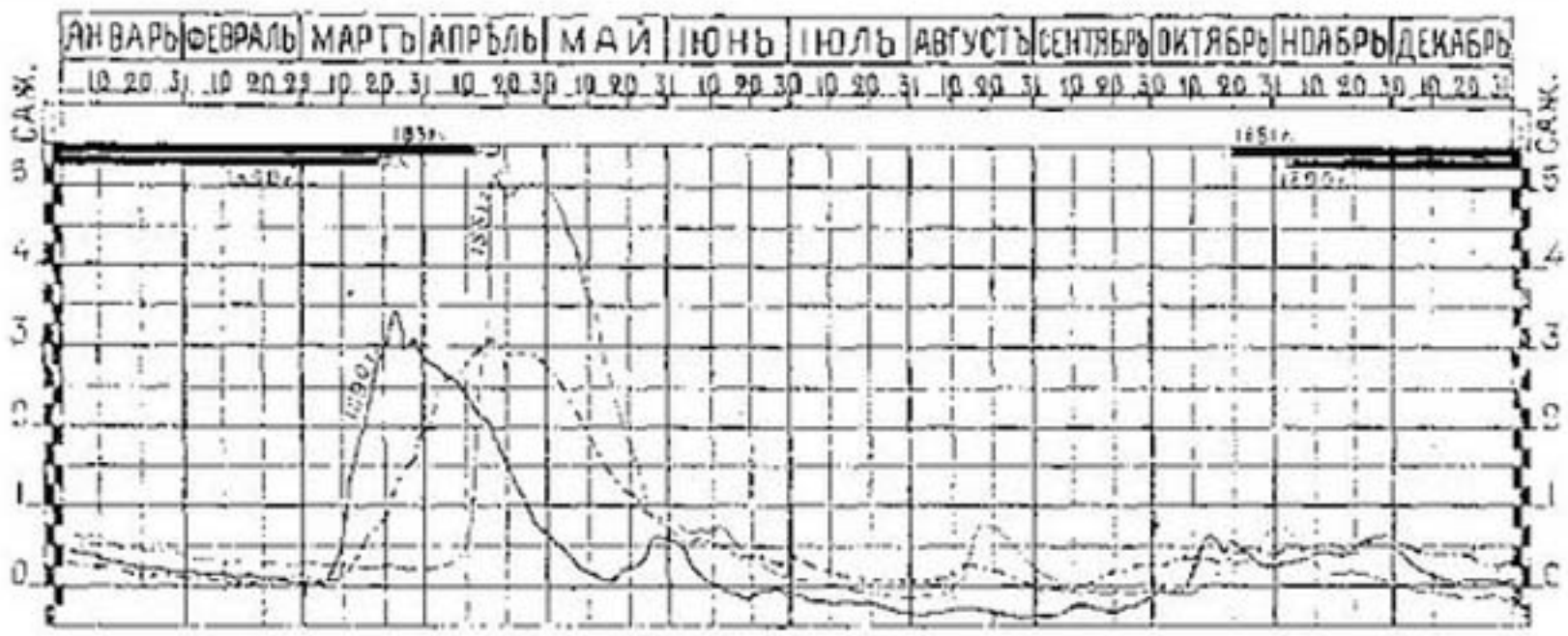


Рис. 2. График годовых колебаний уровня воды.

может быть выражена или в числе дней, или в процентном отношении ко всему периоду времени. Например, если из числа 365 дней в году на данной высоте находился уровень воды в реке 19 раз (19 дней), то повторяемость этого горизонта выражается числом 19 или процентом 5,2% ($\frac{19}{365} \times 100$).

Средняя повторяемость горизонта в пределах амплитуды колебаний горизонта или какой-либо части амплитуды есть среднее арифметическое число из чисел частоты повторяемости каждого горизонта в означенных пределах.

Длительностью покрытия (затопления) какого-либо данного горизонта называется все то время в течение определенного периода времени (одного года или нескольких лет), когда уровень воды находился на этом горизонте и выше его; длительность покрытия горизонта выражается либо в числе дней, либо в процентном отношении ко всему рассматриваемому периоду времени. *Средней длительностью* (для всей амплитуды колебаний или для какой-либо ее части) называется средне-арифметическая величина из длительности покрытия каждого горизонта в пределах амплитуды (или данной ее части). Тот горизонт, длительность покрытия которого составляет половину (50%) всего времени рассматриваемого периода, можно назвать *обыкновенным горизонтом* (О. Г.).

Для получения величины частоты повторяемости и длительности покрытия (затопления) горизонтов всего удобнее пользоваться построением

графиков на основании сгруппированных в табличную форму данных из наблюдений на водомерном посту. Пусть, например, для какого-либо одного года результаты, определенные из записей положения уровня воды за каждый день этого года, сведены в ниже показанную таблицу, причем в столбце 2-м таблицы обозначено сколько раз (дней) бывал горизонт в пределах частей высоты (по водомерной рейке), указанных в столбце 1-м. Пусть, кроме того, известны положения самого высокого и самого низкого уровней воды за больший период времени.

1	2 | 3		4 | 5		6
Для высоты горизонтов: от — до в метрах.	Повторяемость.		Длительность затопления (покрытия).		Предельные и средние величины.
	В числе дней.	В % % от всего времени года.	В числе дней.	В % % от всего времени года.	
4,90 до 4,81	1	0.3	0	0,0	Наивысший горизонт данного года.....4,87 м
4.80 — 4.71	0	0;0	1	0,3	
4.70 — 4.61	0	0.0	1	0,3	Наинизший горизонт данного года.:.... ....1,17 "
4,60 — 4.51	2	0.5	1	0,3	
4.50 — 4,41	0	0.0	3	0,8	Амплитуда колеб. ....3,7 "
4,40 — 4,31	2	0,5	3	0,8	Средина амплитуды...3,02 "
4,30 — 4,21	3	0,8	5	1,4	Средний горизонт ....2,53 "
4,20 — 4,11	2	0,5	8	2.2	Обыкновенный гориз. 2,71 "
4,10 — 4,01	2	0,5	10	2,7	
4.00 — 3,91	2	0,5	12	3,3	Средняя повторяемость $\frac{365}{38}$ =
3.90 — 3,81	4	1,1	14	3,8	
3,80 — 3.71	7	1,9	18	4,9	=9.6 дней или $\frac{100}{38}$ =2.6%.
3,70 — 3.61	5	1,4	25	6,8	
3.60 — 3,51	12	3,3	30	8,2	Средняя длительность затопления $\frac{5402-365}{39}$ =130 дней или $\frac{1480-100}{39}$ = 36%.
3,50 — 3,41	13	3.6	42	11,5	
3,40 — 3,31	11	3,0	55	15,1	
3;30 — 3,21	19	5,2	66	18,1	
3,20 — 3,11	20	5,5	85	23,3	
3,10 — 3.01	16	4,4	105	28,8	
3,00 — 2,91	25	6,8	121	33,2	С. В. Г. .....6,67 м
2,90 — 2,81	22	6,0	146	40,0	С. Н. Г. .....0,43 "
2,80 — 2,71	17	4,7	168	46,0	
2,70 — 2,61	13	3,6	185	50,7	
2,60 — 2,51	7	1,9	198	54,2	
2,50 — 2,41	1	0,3	205	56,1	
2,40 — 2,31	7	1,9	206	56,4	
2.30 — 2,21	5	1,4	213	58,4	
2,20 — 2,11	4	1,1	218	59,8	
2,10 — 2.01	5	1,4	222	60,8	
2,00 — 1,91	14	3,8	227	62,2	
1,90 — 1,81	16	4,4	241	66,0	
1,80 — 1,71	26	7,1	257	70,4	
1,70 — 1,61	20	5,5	283	77,6	
1.60 — 1,51	12	3,3	303	83,0	
1,50 — 1,41	18	4,9	315	86,3	
1,40 — 1,31	17	4,7	333	91,2	
1,30 — 1,21	12	3,3	350	95,9	
1,20 — 1,11	3	0,8	362	99,2	
1,10 — ниже	0	0.0	365	100,0	
	365	100,0	5402	1480,0	

Приведенные в таблице данные и результаты вычислений могут быть наглядно изображены графически.

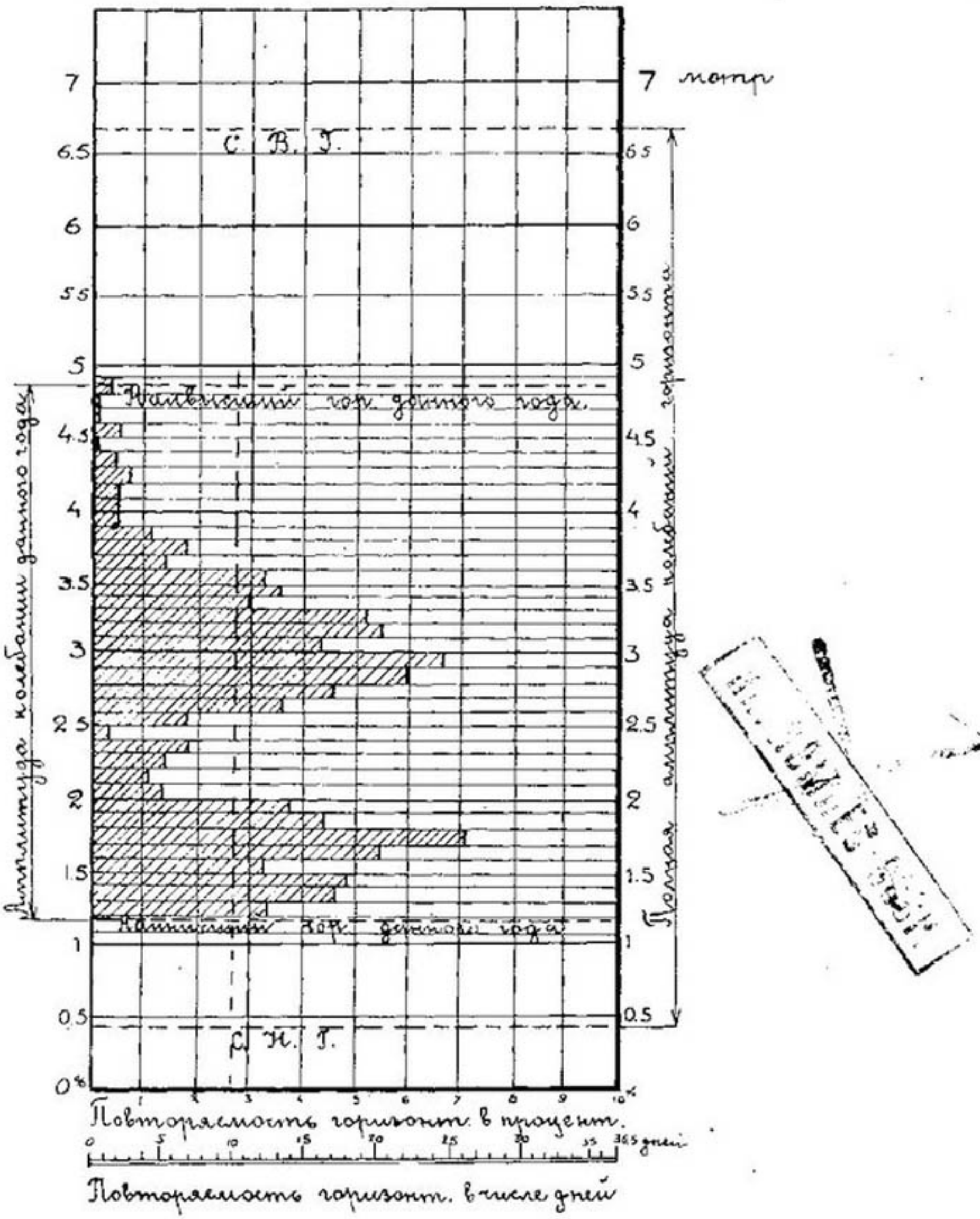


Рис. 3. График частоты повторяемости горизонтов.

Рис. № 3 представляет график частоты повторяемости горизонтов. На оси ординат нанесены высоты горизонтов, а на оси абсцисс — повторяемость в процентах или в соответственных числах дней. Ломанная линия.

ГОСУДАРСТВЕННАЯ БИБЛИОТЕКА ГЕОГРАФО
ГОСУДАРСТВЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА СССР

ограничивающая заштрихованную площадь, наглядно изображает относительную повторяемость горизонтов для разных высот. Вертикальная пунктирная линия показывает среднюю за год повторяемость, причем последняя прочитывается по шкале, вычерченной внизу графика. Ее величина равна частному от деления заштрихованной площади на величину амплитуды колебаний, выраженной в дециметрах.

На графике № 4 вычерчена кривая длительности затопления (покрытия) горизонтов. Ось ординат принята за высоты горизонтов, а ось абсцисс за величины длительности затопления. Кривая строится следующим образом. Начиная с наивысшего в данном году горизонта, повторяемость коего, согласно данных в графе 2-ой таблицы, равна одному дню, для каждого последующего горизонта (при точности измерения высоты до одного дециметра) прибавляется сумма повторяемостей всех вышележащих горизонтов и, таким образом, для наинизшего горизонта длительность покрытия составит 365 дней или 100%. По графику можно для любого горизонта сразу прочесть длительность его покрытия и, обратно, по заданной длительности покрытия можно найти горизонт, который обладает этой длительностью. Для этого из точки пересечения кривой с линией, проведенной параллельно оси абсцисс на высоте данного горизонта, нужно опустить перпендикуляр до пересечения с осью абсцисс и линией масштаба дней, причем на пересечениях с этими линиями прочитывается величина повторяемости в процентах и в числе дней. Обратным действием находится горизонт, имеющий заданную длительность. Обыкновенный горизонт определяется точкой пересечения кривой длительности покрытия с ординатой, проходящей через точку абсцисс, соответствующую 50% (на чертеже эта точка обведена кружком). Если требуется узнать величину частоты повторяемости не отдельного горизонта, а какой-либо зоны горизонтов, например, зоны $h_1 - h_2$, то величина ее повторяемости P_{1-2} определяется отрезком обсциссы $t_2 - t_1$, находящимся между двумя ординатами, проведенными через точки кривой, соответствующие высоте h_1 и h_2. Относительная величина повторяемости горизонтов в какой-либо зоне высоты характеризуется степенью пологости соответствующего этой зоне отрезка кривой. Чем этот отрезок более пологий, тем повторяемость горизонтов этой зоны больше. Например, горизонты в зоне от 3,0 до 3,5 *м.* имеют бо́льшую величину повторяемости, чем в зоне от 3,5 до 4,0 *м.*

Показанные на чертеже пунктиром две параллельные оси абсцисс линии, проведенные на концах амплитуды колебаний, т. е. наивысший и наинизший горизонты данного года, образуют на графике прямоугольник *ACDB*, высота которого H = амплитуде колебаний в данном году, а основание T = времени всего года. Если обозначить

t_c — среднюю длительность (в процентах или в числе дней),

h_c — среднюю высоту горизонта, считаемую от наинизшего горизонта,

F — отсекаемую кривой длительности часть площади прямоугольника, находящуюся в левой нижней стороне, то

$$F = Th_c = H.\ t_c\ ,\ \text{откуда}\ \frac{T}{t_c} = \frac{H}{h_c}\ \text{или}\ \frac{t_c}{h_c} = \frac{T}{H}$$

Отсюда следует, что вертикальная линия, проведенная от точки абсциссы, соответствующей средней длительности, и горизонтальная линия,

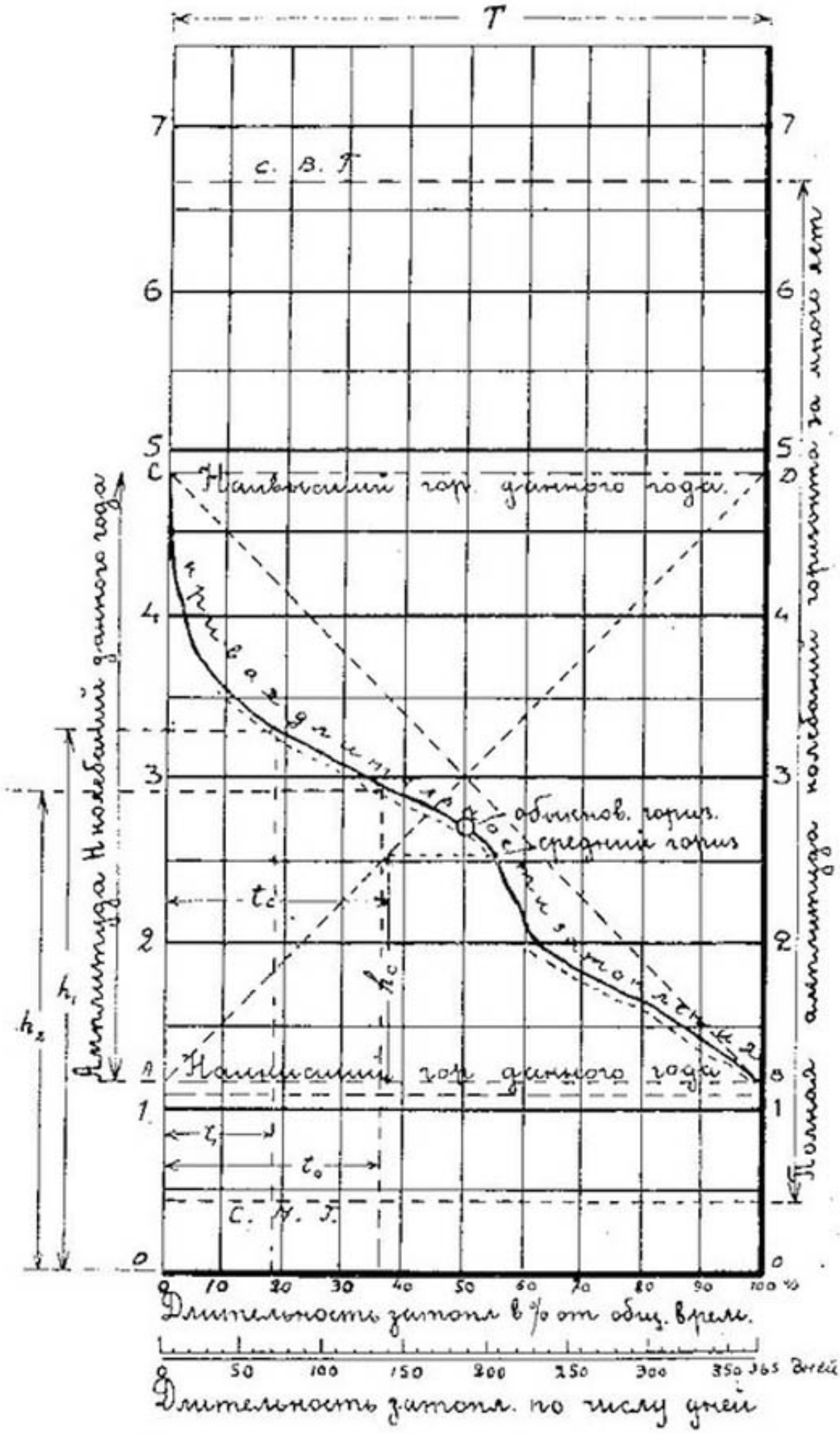


Рис. 4. График длительности покрытия (затопления) горизонтов.

проведенная на высоте среднего горизонта, пересекаются между собою на диагонали прямоугольника AD, что упрощает, как видно из чертежа, нахо-

жденне величины средней длительности, если уже известно положение среднего горизонта.

Располагая результатами регулярных наблюдений на водомерном посту за многие годы, можно построить подобный же график для всего многолетнего периода времени. Сделать это можно двумя способами: или принять длину оси абсцисс соответственно всему этому периоду, или же исчислить ранее для каждого дня в году среднеарифметическую (за все годы) высоту уровня и построить годовой график по этим средним величинам. Тот или иной метод построения избирается в зависимости от цели, для которой приходится пользоваться графиком, так как второй метод дает более наглядное, чем первый, представление о режиме колебаний горизонта, но в графике, построенном по второму методу, не заключаются крайние действительно бывшие величины, с которыми в некоторых случаях приходится считаться.

Обычные колебания уровня воды в реке носят характер известной *периодичности*. Периодичность зависит, главным образом, от условий питания реки и от тех обстоятельств, которые влияют на интенсивность питания. На некоторых реках наблюдается периодичность колебаний уровня воды даже в течение каждых суток; это происходит, например, на горных речках по причине таяния под солнечными лучами горных льдов и снегов, вследствие чего днем, после полудня, бывает прибыль воды в верховьях таких речек. Для рек более значительных приобретают особое значение колебания уровня воды в годичный период времени. Такие колебания зависят более всего от атмосферных осадков и от условий, влияющих на коэффициент стока. В местностях с теплым климатом, где или вовсе не бывает снега и льда, или где выпадающий снег не сохраняется сколько-нибудь продолжительное время, колебания уровня находятся в более непосредственном отношении ко времени и силе атмосферных осадков. При холодных и умеренных климатах с продолжительным периодом зимы, особенно в равнинных местностях, весеннее таяние снега имеет наибольшее влияние на периодические изменения уровня воды в реке: высокие уровни половодия бывают весною, низкие (меженние) уровни наступают летом, продолжаясь на осеннее время и зиму и изредка прерываясь непродолжительными, сравнительно менее высокими под'емами уровня при паводках. В теплых климатах период высоких вод в реке наступает в период продолжительных дождей. Периодичные колебания уровня воды, находясь в зависимости от климатических и топографических условий местностей, по которым протекает река и ее притоки, на некоторых реках иногда значительно отличаются по времени для разных по длине реки ее участков [1]).

---

[1]) Например, на Рейне период половодия наступает в верхней части реки летом, в июле, и по мере приближения к устью период высоких вод становится все более ранним, так что в нижней части реки высокие воды приходятся на январь месяц. Об'ясняется это следующими обстоятельствами. В горах Швейцарии, где Рейн берет свое начало, прибыль воды зимою бывает наименьшая, так как местность зимою и до поздней весны покрыта снегом. Таяние снега начинается во второй половине весны, наибольший сток воды происходит в июне и июле, когда и поднимается до высших пределов уровень воды в реке. В средней и нижней части реки, с ее притоками, наибольшее питание происходит от зимних дождей; влияние летних паводков верховья реки ослабляется по мере приближения к устью, а потому и период половодия начинается все ранее и ранее.

При сильной прибыли воды в реку, наступающей внезапно и продолжающейся сравнительно недолгое время, происходят явления, которые, как выше упомянуто, называются *паводком*. Чаще всего паводки бывают на реках, текущих с гор, причем причиной паводка обыкновенно являются сильные дожди, выпадающие в бассейне реки. Причинами паводков тоже являются снежные обвалы со склонов гор в реку, где они быстро тают, сильные попуски воды из водохранилищ, прорывы плотин, подпирающих воду в реке, и другие подобные случаи. При дождевых паводках скорость их наступления и их продолжительность не постоянны не только на разных реках и в разных местах одной реки, но и в данном месте реки, так как образование паводка и его движение по реке могут находиться при весьма различных условиях. На это влияют сила и длительность дождей, относительное расположение и величина районов, где они выпадают (см. рис. 1),

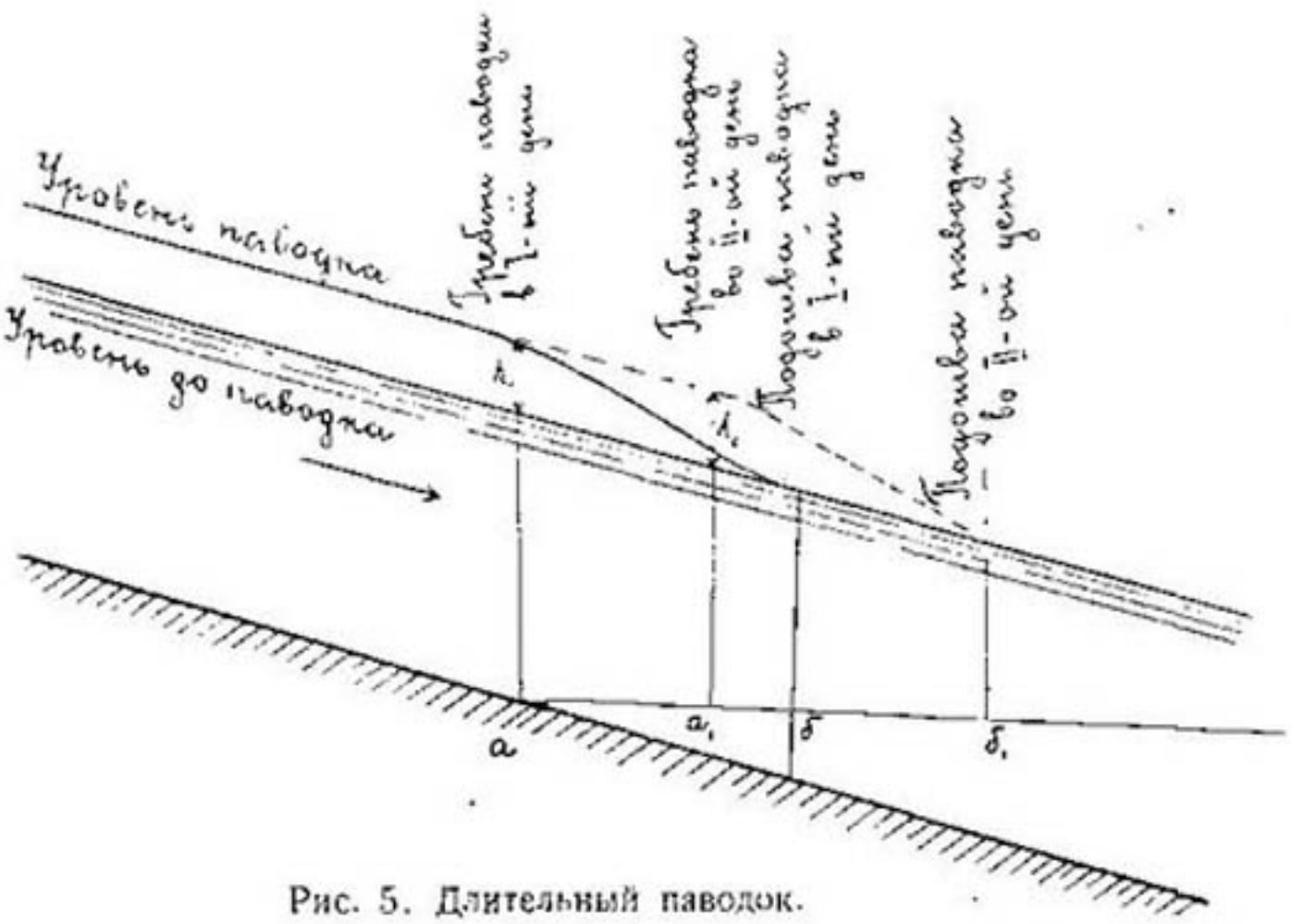


Рис. 5. Длительный паводок.

величина коэффициента стока и проч. При прочих равных условиях наибольший паводок в данном месте реки может наступить в том случае, если к этому месту подойдут одновременно наибольшие паводки со всех вышележащих притоков реки. Такой случай является, однако, исключительно редким. В различных районах бассейна реки дожди выпадают не с одинаковой силой и не всегда одновременно; сток воды в разные притоки происходит не с одинаковой быстротой в зависимости от топографических и почвенных условий их бассейнов; длина пути для подхода к данному месту реки паводковых вод притоков не одинакова, как не одинаковы и скорости течения в разных притоках. Неравномерность подхода к данному месту реки паводков притоков ослабляет совокупное их действие на величину паводка в сем месте.

По характеру происходящих явлений следует различать паводки длительные от паводков коротких. Если сильная прибыль воды продолжительна и более или менее одинакова, то под'ем воды происходит на большом протя-

жении реки. Внезапно наступившие прибылые воды движутся по реке, образуя перед собою крутой уклон поверхности воды (рис. 5). В зависимости от скорости течения, начавшийся в данном месте реки под'ем уровня достигает в более или менее скором времени своего максимума, который засим и остается на все время прибыли воды в реку, после чего начинает спадать до прежнего уровня. Если же сильная прибыль воды непродолжительна, то движение паводка по реке вызывает на поверхности воды явление, подобное движению длинной волны (рис. 6). Гребень волны движется вниз по течению с большей или меньшей скоростью, в зависимости от силы паводка и скорости течения реки. Обыкновенно, с передней от гребня стороны волна паводка имеет более крутой уклон поверхности и значительно меньшую

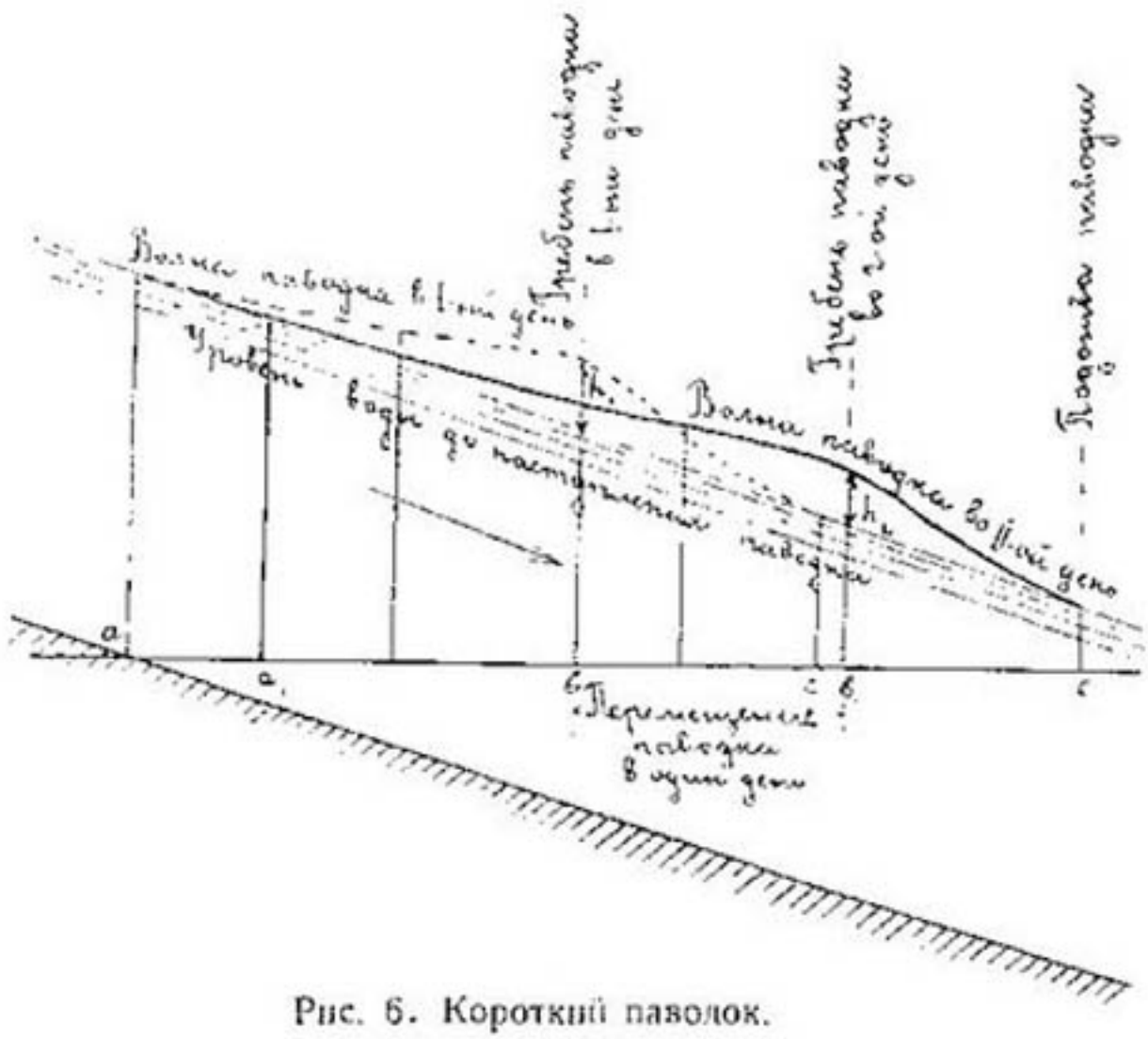


Рис. 6. Короткий паволок.

длину bc, чем позади гребня ab (хвост паводка). Линия очертания волны паводка в продольной профили может быть плавною, но может образовываться на ней и несколько гребней, не одинаковых между собою по высоте и форме. По мере удаления от мест прибыли воды паводок, обыкновенно, постепенно смягчается: скорость передвижения хвоста паводка aa_1 становится все менее и менее скорости передвижения передней подошвы паводка cc_1, высота гребня постепенно уменьшается, так что высота гребня паводка h_2 во второй день становится меньшей, чем была в первый день h_1; вода паводка как бы постепенно расплывается по длине реки. Чрезвычайная сложность условий образования и движения паводков ставит большие трудности к тому, чтобы подчинить происходящие при паводках явления каким-либо теоретическим выводам. Там, где паводки приобретают большое значение для пользования рекою или для тех или иных технических мер по ее улучшению, приходится в каждом данном случае изучать паводки на месте, чтобы подметить, насколько возможно, их характерный режим.

§ 4. Продольный профиль поверхности воды.

Несомые рекою массы воды, стекая с местностей,высоко расположенных внутри страны, постепенно и непрерывно опускаются на своем пути до уровня моря, куда впадает река. В зависимости от высоты истока реки, от расстояния его от моря и от свойств грунтов, где прокладывает река свое русло, это постепенное опускание воды происходит не с одинаковой крутизной. Чем выше над уровнем моря расположены истоки реки, тем больше общая высота падения воды; чем короче река, тем на меньшую длину распределяется эта общая высота падения и тем, следовательно, круче среднее относительное падение речной воды. Но, встречая на своем пути грунты не одинакового качества, не одинаково подвергающиеся размыву и представляющие не одинаковое сопротивление движению воды, река течет не с одинаковыми уклонами в разных местах своего протяжения. Поэтому поверхность воды по направлению течения реки представляет более или менее плавную кривую линию с большей или меньшей крутизной в разных частях протяжения реки.

Продольный профиль поверхности воды определяется нивеллировкой, причем абсолютные отметки высот поверхности воды относят к одной принятой за нуль горизонтальной плоскости, именно к ординару уровня моря или иной плоскости, высота коей над уровнем моря известна. Разность отметок поверхности воды в начале и в конце данного участка реки при мгновенном положении определенного уровня воды называется *общим* или *абсолютным падением* реки на этом участке реки и при этом положении уровня. Отношение величины падения к длине участка называется *средним относительным падением* или *средним уклоном* для данного участка реки при данном положении уровня воды в реке.

Уклоны реки принято обозначать буквой J, величину же их выражают либо в виде дроби, например, $J = \frac{1}{2500} = 0{,}0004$, либо в процентах, т. е. для того же примера $J = 0{,}04\,\%$. Часто предпочитают выражать уклон реки в виде абсолютной величины падения в сантиметрах на один километр длины, т. е. в данном примере $J = 40$ *см/клм*.

Величина продольного уклона поверхности воды не одинакова не только на различных реках, но и на одной реке в разных местах по ее длине . Уклон не остается постоянным при изменениях высоты уровня воды в реке. Наиболее крутые уклоны свойственны горным речкам, которые в некоторых местах приобретают даже вид водопадов с вертикальным падением воды. В предгорных и холмистых местностях уклоны смягчаются, а в низменных равнинах уклоны столь пологи, что иногда едва ощутимы, выражаясь в стотысячных и миллионных долях. Так как большие реки часто берут свое начало в горах и, проходя последовательно через понижающиеся местности, спускаются к морю по низким равнинам, то верхняя часть такой реки обыкновенно отличается крутыми и сильно меняющимися уклонами; в средней части уклоны более постоянны и пологи, а низовые участки рек имеют едва заметные уклоны. Реки, не имеющие горных областей, а вытекающие с плоских возвышенностей, имеют в своих верховьях уклоны, хотя

и более значительные, чем средние уклоны на остальном протяжении, но все же не столь крутые, как на горных реках. Тем не менее и на таких реках иногда встречаются в отдельных местах, например, на порогах, довольно крутые уклоны.

Топографические и геологические условия местностей, по которым течет река, влияют на общий вид продольного профиля реки в его целом. В горной части, где река прокладывает свое ложе по ущельям, долинам, террасам гор, ее продольный профиль представляет сильно ступенчатый вид с резкими переломами линии профиля. Вступая в равнинные местности с более мягкими породами грунта, продольный профиль становится более плавным. Однако, на этом протяжении река, в отношении общего вида своего продольного профиля, обыкновенно разделяется на участки значительной длины, из которых каждый характеризуется более или менее однородными величинами уклонов. Находясь в зависимости всего более от рельефа местности и от свойств грунта, средняя величина уклонов заметно меняется при переходе из одного участка реки в другой, если упомянутые условия на смежных участках отличны между собою. Поэтому поверхность воды в продольном профиле реки состоит из ряда главных переломов (рис. 7). Переход от одного участка к другому происходит или более резко (точка *Д*), или постепенно на более или менее значительном протяжении (*ВС*). На каждом таком участке реки линия продольного профиля поверхности воды также имеет не одинаковые для разных мест уклоны, в особенности при низких уровнях воды в реке. Эти частные уклоны тоже не остаются постоянными; их величина меняется в зависимости как от высоты уровня воды в реке, так и от тех постоянных деформаций, которым подвержено речное русло. Места главных переломов продольного профиля реки служат как бы опорными точками, ставящими некоторые пределы таких деформаций русла и изменений частных уклонов. Следует заметить, что постоянная сила, приводящая воду реки в движение, обусловливается продольным уклоном реки. Под влиянием постоянной силы вода текла бы с возрастающей скоростью, если бы она не испытывала сопротивлений своему движению. Этими сопротивлениями являются, главным образом, сопротивления ложа реки, которые зависят как от свойств грунта, так и от скорости течения, с увеличением которой увеличивается сопротивление, оказываемое ложем реки. Течение становится равномерным, когда движущая сила уравновешивается силой сопротивлений. Исходя из этого, можно было бы заключить, что определенным качеством грунта соответствовал бы определенный поверхностный уклон реки. Но обстоятельства речного течения более сложны. Под влиянием текущей воды происходит размыв русла и отложение наносов, благодаря чему русло деформируется, оказывая тем самым не одинаковое влияние на уклоны поверхности воды. Размывающая сила реки меняется с изменением не только величины скоростей течения, но и массы текущей воды, а следовательно и высоты уровня воды в реке. Сужения и расширения русла тоже влияют на поверхностные уклоны, так как сжатие потока, подобно тому как и местное возвышение дна, вызывает подпор поверхности воды на вышележащем участке, а расширение русла оказывает обрат-

ное влияние. Притоки реки, вносящие в реку новые массы воды и влекущие в реку наносы твердых частиц, тоже оказывают влияние на поверхностные уклоны реки. Выносы из притоков твердых частиц грунта образуют в реке наносные отложения, которые, постепенно расширяясь от устья притока, образуют в реке возвышения дна, обыкновенно в виде сплющенных конусов, иногда достигающих противоположного берега реки. Такие возвышения дна тоже вызывают подпор текущей в реке воды и, следовательно, влияют на ее поверхностные уклоны. В некоторых случаях место слияния реки с крупным ее притоком, несущим большие наносы, является даже одним из тех главных переломов продольного профиля реки, о которых сказано выше. Движение паводков тоже не может не отражаться на величинах поверхностных уклонов реки. Как выше было об'яснено, паводок движется в виде

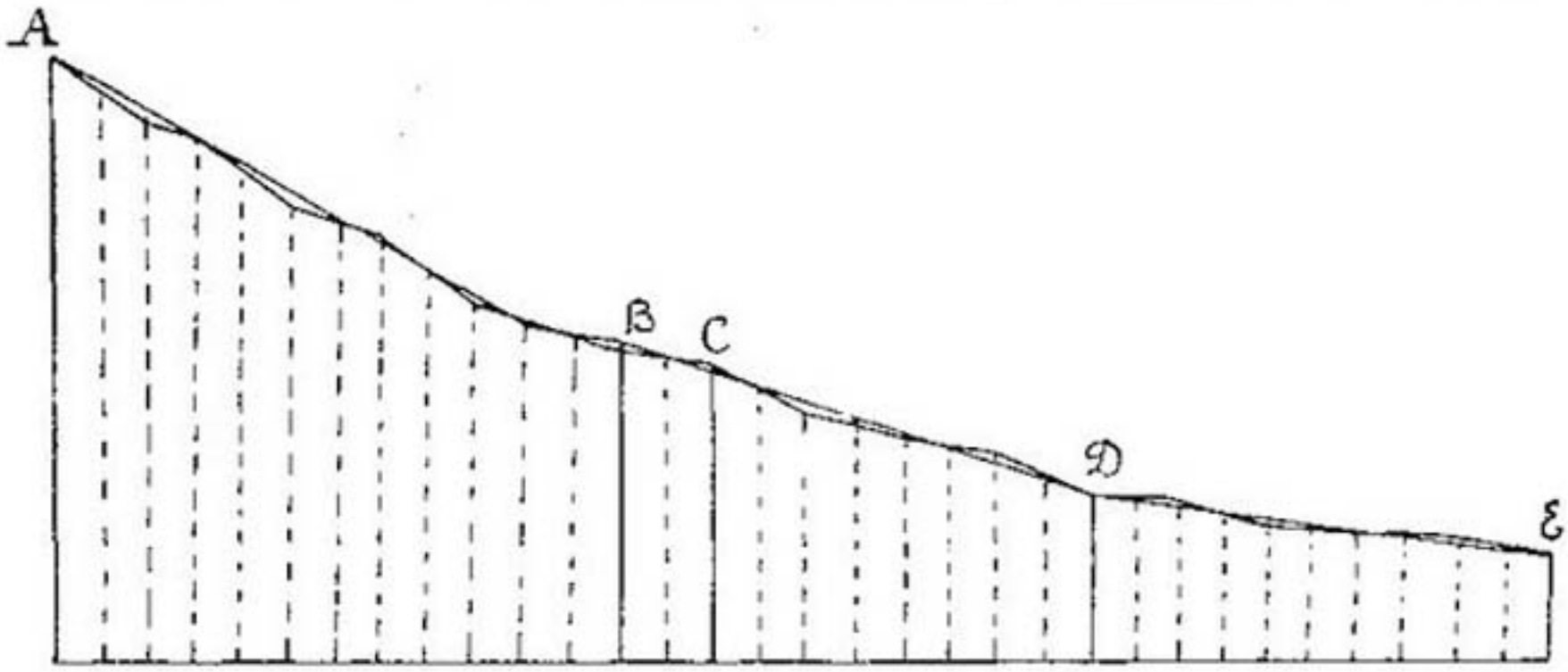


Рис. 7. Продольный профиль поверхности воды реки.

волны (рис. 6); под'ем воды происходит обыкновенно быстрее, чем спад, а потому поверхностные уклоны при наступлении круче, чем при его прохождении.

Обращаясь к положению поверхности воды в поперечном профиле реки, следует заметить, что при правильном русле и спокойном течении уклоны в этом направлении вообще незначительны. В извилинах реки поверхность воды около вогнутого берега несколько приподнимается, напротив, у выпуклого берега она несколько понижается, почему образуется небольшой поперечный уклон от вогнутого берега к выпуклому. Однако, в крутых извилинах и при быстром течении воды поперечные уклоны иногда достигают большой величины. Но особенно велики и неправильны поперечные поверхностные уклоны в порожистых частях реки, а также на сложных перекатах и вообще в местах, где форма речного русла весьма неправильна.

§ 5. Скорости течения и расход воды в реке.

В деле регулирования рек скорости течения реки при тех или иных условиях имеют вообще большое значение. От величины скорости течения зависят во многом деформации русла; судоходство или иные виды пользова-

пня рекою ставят известные пределы для допускаемой скорости течения; измеренные величины скоростей течения служат для исчисления расхода воды в реке и проч.

В каждый данный момент величина скорости течения не одинакова для разных точек *живого сечения* реки. Как известно, под наименованием живого сечения разумеется площадь, занятая водою в поперечном сечении реки. Если, например, изображенная на рисунке 8-м фигура изображает собою сечение реки в некотором ее месте вертикальной плоскостью, нормальной к общему направлению течения реки в сем месте, то живым сечением будет площадь *ABE*, ограниченная сверху поверхностью воды, а снизу и с боков дном реки. Граничащая эту площадь линия дна *ACDEFB* называется *смоченным периметром* живого сечения реки, а отношение величины площади живого сечения к величине смоченного периметра называется *гидравлическим радиусом* живого сечения реки. Отношение же величины площади живого сечения к ширине реки называется *средней глубиной* реки в данном ее живом сечении.

В дальнейшем изложении приняты для упомянутых элементов следующие обозначения:

F — площадь живого сечения.
B — ширина реки.
P — смоченный периметр.
R — гидравлический радиус.
t — средняя глубина реки.

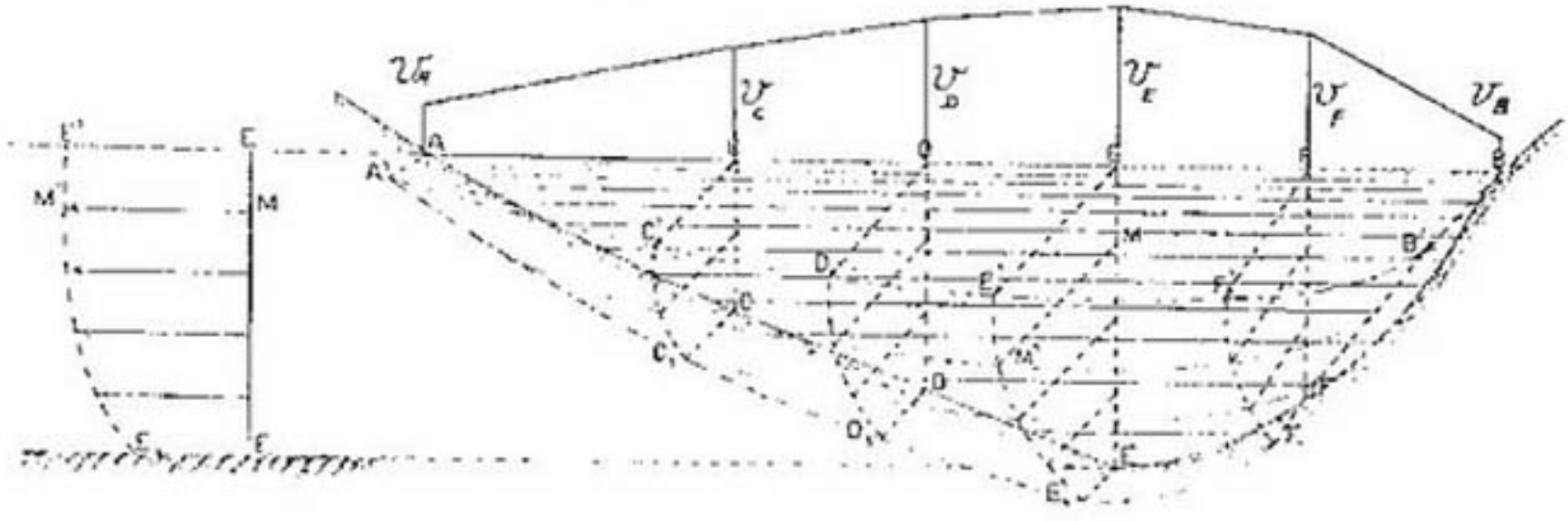
Следовательно, между означенными элементами имеются следующие соотношения:

$$\frac{F}{P} = R$$

$$\frac{F}{B} = t$$

Действительная скорость течения воды в данной точке живого сечения выражается длиной пути, совершаемого в одну секунду элементарной частицей воды при прохождении ею этой точки. Если направление действительной скорости течения в данной точке нормально к плоскости живого сечения, то измеренная величина действительной скорости и будет скоростью перемещения воды в данной точке нормально к живому сечению реки; это перемещение можно изобразить перпендикуляром соответствующей длины, восстановленным в данной точке к плоскости означенного сечения. Если же направление действительной скорости течения наклонено к плоскости живого сечения, то величина скорости перемещения воды нормально к живому сечению будет равна проекции действительной скорости на вышеупомянутый перпендикуляр. В дальнейшем под скоростью течения будем подразумевать перемещение воды по направлению к нормальному живому сечению.

Как упомянуто выше, скорости течения в данном месте реки не одинаковы в разных, по ширине и глубине, точках живого сечения. Скорости течения в любой точке живого сечения могут быть непосредственно измерены помощью употребляющихся для сего специальных инструментов (гидрометрические вертушки и гидрометрические трубки разных систем). Вообразим, что плоскость живого сечения реки в каком-либо данном месте ее, изображенная на рисунке 8-м, пересечена рядом перпендикулярных к ней вертикальных и горизонтальных плоскостей и что измеренные в точках пересечения сих плоскостей величины скоростей течения отложены на перпендикулярах AA^1, CC^1, MM^1, EE^1 и проч. Если число таких точек велико, то линии (в пределе кривые), соединяющие вершины перпендикуляров в верти-



8—c.

8—a.

8—b.

Рис. 8. Живое сечение и скорости течения.

кальных и горизонтальных плоскостях, выразят изменения величин скоростей течения в соответствующих плоскостях. Результаты изучения скоростей течения на реках показывают, что скорости течения уменьшаются по мере приближения к берегам и к дну реки, причем изменения величин скоростей выражаются кривыми, близкими к параболе, как это показано на чертеже.

Изображение скоростей течения, приведенное на рисунке 8-м, дает наглядное пояснение, что разумеется под названиями *расход воды в реке* и *кривые равных скоростей течения (изотахи)*. Если вообразить, что через вершины всех перпендикуляров проведена обертывающая поверхность, то об'ем тела, заключенного между этой поверхностью и плоскостью живого сечения, представит тот об'ем воды, который протекает в одну секунду через живое сечение: этот об'ем и называется расходом воды в реке. Если далее

вообразить, что упомянутая обертывающая поверхность рассечена рядом вертикальных плоскостей, параллельных плоскостей живого сечения и расположенных на равном расстоянии одна от другой, то от таковых пересечений получается ряд кривых линий, проекции которых на плоскость живого сечения выразят кривые равных скоростей — изотахи.

В реках изотахи обыкновенно не имеют вида вполне правильных концентрических линий. На рисунке 9-м изображены, в качестве примера, изотахи, определенные на одной из наших рек [1]). Ни одна из этих изотах, даже та, которая представляет кривую скоростей течения, равных 0,45 саж., т. е. наибольших при принятой, в данном примере, градации скоростей через 0,05 саж. в секунду, не представляет замкнутой кривой, а все они заканчиваются у линии поверхности воды. Это обстоятельство указывает, что при

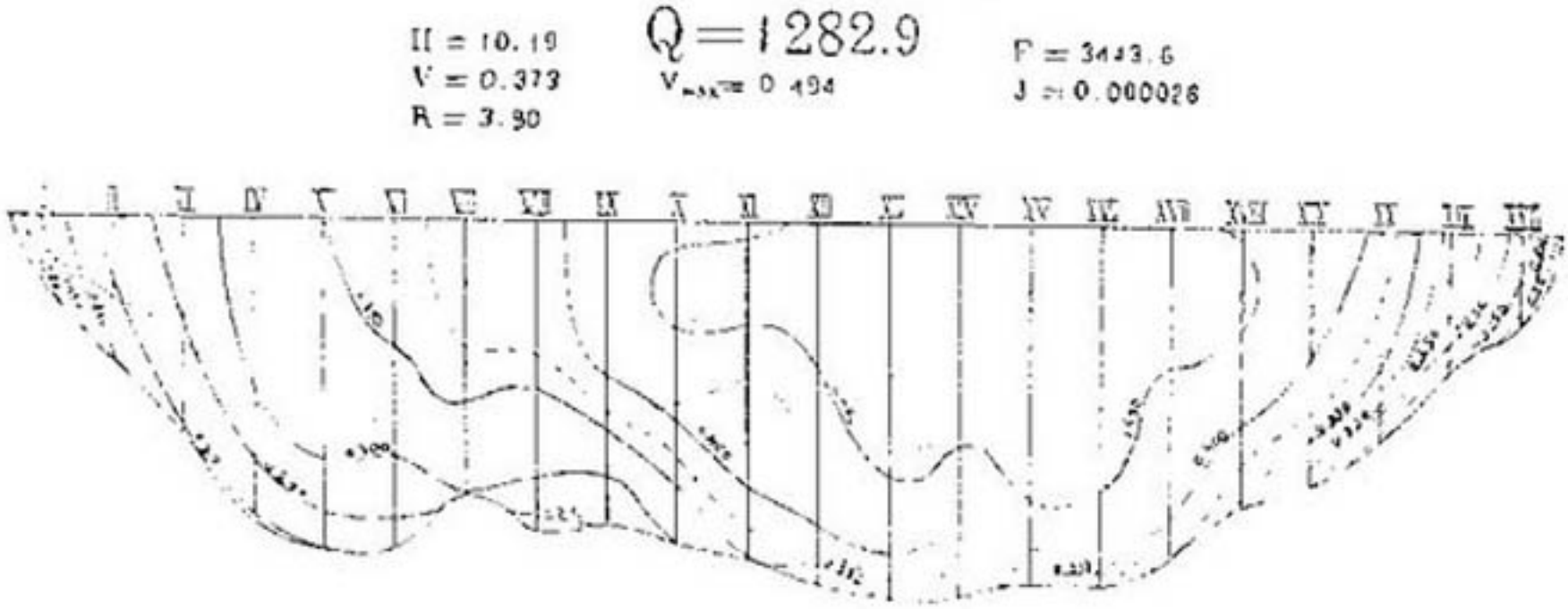


Рис. 9. Линии равных скоростей.

состоянии реки, соответствующем времени, когда производились измерения скоростей, по коим вычерчены изотахи, наибольшая скорость течения (0,494 саж.) не достигала величины 0,50 саж. в секунду, а место ее положения находилось либо не глубоко от поверхности воды, либо на самой поверхности, что обычно для всех вообще широких рек. На рисунке 8-м точка M^1 вышеупомянутой обертывающей поверхности, наиболее удаленная от плоскости живого сечения, соответствует месту наибольшей скорости течения в данном живом сечении реки. Линия, соединяющая последовательно такие точки каждого смежного живого сечения, выразит линию расположения в реке наибольших скоростей и называется *динамической осью* речного потока. Динамическая ось реки представляет кривую линию. В вертикальном направлении отклонения этой линии незначительны, так как наибольшая скорость течения располагается, как выше сказано, на поверхности воды или вблизи от нее. В горизонтальном направлении динамическая ось представляет большие извилины. В извилинах реки она приближается к вогнутым берегам, удаляясь от выпуклых. На отклонения динамической оси от общего направления течения реки имеют также влияние местные препятствия течению: отмели, сужения и расширения реки, искусственные соору-

[1]) Река Волга у гор. Самары. Показанные на чертеже цифры выражены по измерениям в саженях.

жения и проч. В расположении динамической оси заметно вообще стремление ее к местам наибольших глубин дна. Поэтому понятие о так у нас называемом *стрежне* реки часто относят одинаково как к линии наибольших глубин дна реки, так и к динамической оси. Расположение динамической оси, а также расположение и вид кривых равных скоростей обыкновенно меняется при разных положениях уровня воды в реке.

Возвращаясь к распределению скоростей течения в живом сечении реки, следует отметить, что как при изучении реки, так и для практических целей часто приходится знать следующие скорости:

$V_0\ (max)$ и $V_0\ (min)$ — Наибольшая и наименьшая скорости течения на поверхности воды (поверхностные скорости).

$V_s\ (max)$ и $V_s\ (min)$ — Наибольшая и наименьшая скорости течения у дна реки (придонные скорости).

$V_n\ (max)$ и $V_n\ (min)$ — Наибольшая и наименьшая скорости течения в данной (n-ой) вертикали.

$V\ (max)$ и $V\ (min)$ — Наибольшая и наименьшая скорости течения для всего живого сечения реки.

Кроме этих скоростей, величины которых имеют фактическое значение, устанавливается понятие о некоторых средних величинах скоростей течения для определенной линии на плоскости живого сечения или для всего живого сечения. К ним относятся следующие:

V_0 — средняя скорость течения на поверхности воды.

V_s — средняя скорость течения на дне реки.

V_n — средняя скорость течения на данной (n-ой) вертикали.

V — средняя скорость течения для всего живого сечения реки.

Все эти средние скорости исчисляются по величинам измеренных скоростей течения в отдельных точках живого сечения.

Если, например, измерены скорости течения во многих равно удаленных друг от друга точках на поверхности воды, то при ширине реки B и расстоянии ΔB между точками измерений скоростей, величина средней поверхностной скорости V_0 может быть определена приблизительно из выражения $V_0 = \frac{\Sigma V_0 . \Delta B}{B}$, где под знаком ΣV_0 разумется сумма всех скоростей, измеренных в отдельных точках на поверхности воды. Таким же образом определяется средняя скорость на n-ой вертикали.

$$V_n = \frac{\Sigma V_n . \Delta l_n}{l_n}$$

средняя скорость по дну

$$V_s = \frac{\Sigma V_s . \Delta P_s}{P}$$

Часто пользуются следующим способом вычисления средних величин скоростей течения. Для определения средней скорости на данной вертикали $E - E_1$ (рис. 8-с) измеренные скорости течения в разных на глубине точках этой вертикали откладывают на перпендикулярах EE^1, MM^1 и т. д. Соединивши концы перпендикуляров, получаем фигуру — $EE^1 E_1^1 E_1$; делением площади этой фигуры на величину глубины вертикали EE_1 получается вели-

чина средней скорости течения на данной вертикали. Для определения средней скорости на поверхности воды делается подобное же построение (рис. 8-б), где длина перпендикуляторов AA^1, CC^1 и т. д. выражает измеренные величины поверхностных скоростей течения в точках A, C, D и т. д.; делением площади фигуры ABB^1A^1 на ширину реки AB получается средняя поверхностная скорость.

Всего чаще требуется знать среднюю скорость для всего живого сечения реки или, как ее обыкновенно называют, *среднюю скорость течения реки* в данном ее месте при данном положении уровня воды. Если известна величина расхода воды в реке Θ и площадь живого сечения F, то средняя скорость $V = \frac{\Theta}{F}$.

По измеренным величинам скорости течения в разных по высоте и глубине точках живого сечения величина средней скорости течения исчисляется способом, подобным выше указанному. А именно: исчисливши величины средних скоростей для каждой вертикали, строят фигуру, показанную на рисунке 8-а, над линией AB поверхности воды. На этом чертеже перпендикуляры V_a, V_c, V_d, и т. д. выражают величины исчисленных средних скоростей для каждой вертикали. Делением площади фигуры на величину линии AB получается величина средней скорости для всего живого сечения [1]).

Описание способов производства непосредственных измерений скоростей течения, а также описание разных служащих для сей цели инструментов и приборов приводится в курсах или специальных сочинениях по гидрометрии. Там же можно найти описание упрощенных приборов и приемов для непосредственного измерения приблизительной величины скоростей течения (поплавки, гидрометрические шесты и проч.). Нужно, однако, заметить, что непосредственное измерение (приборами и инструментами) скоростей течения в многочисленных точках живого сечения реки представляет трудную работу, требующую продолжительного времени. К тому же следует добавить, что в некоторых случаях результаты сих измерений все же не будут служить точным выражением величины скорости течения в разных точках живого сечения реки при данном положении высоты уровня воды, если в период времени, затраченного на производство измерения, упомянутый уровень менял свое положение, причем, конечно, несколько изменялись и величины скоростей течения в каждой точке живого сечения реки. В некоторых же случаях задача непосредственного измерения скоростей течения во многих точках для исчисления средних величин становится слишком трудной, почти не выполнимой. Так, например, при высоком уровне воды в весеннее половодие, когда течение реки разбросано по разливам, не всегда

---

[1]) Величина средней скорости течения для всего живого сечения реки может быть тоже исчислена как средне-арифметическая величина из всех измеренных скоростей в разных точках сего сечения, для чего необходимо, чтобы точки эти были взяты по возможности на равных друг от друга расстояниях как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, т. е., чтобы каждая измеренная скорость выражала как бы среднюю скорость равновеликих площадей, из которых слагается вся площадь живого сечения реки. Чем больше взято таких точек для измерения скоростей, тем точнее будет определена величина средней скорости.

возможно даже выбрать сколько-нибудь правильное направление площади живого сечения реки; при сильных паводках уровень воды меняется весьма быстро, заметно прибывая или падая в течение каждого часа и меньшего времени, а при таких условиях измерение скоростей течения чрезвычайно трудно приурочить к определенному положению высоты уровня воды в реке.

Поэтому на практике при разрешении разных вопросов, относящихся к регулированию реки, когда встречается надобность знать величину средней скорости течения, часто приходится по необходимости прибегать к определению величины средней скорости течения теоретически по формулам гидравлики, выведенным для вполне правильного и симетричного русла в предположении однообразного уклона поверхности воды и русла и вполне установившегося равномерного и параллелоструйного течения воды. При таких предположениях выражение для определения средней скорости течения приобретает следующий вид:

$$V = C\sqrt{RJ},$$

где R обозначает величину гидравлического радиуса живого сечения потока, J — численную величину уклона поверхности воды, а C — коэффициент, величина которого не остается постоянной величиной при разных условиях течения. По многочисленным опытным исследованиям, величина коэффициента C зависит главным образом от рода поверхности русла, от гидравлического радиуса и, в некоторой степени, от уклона. Многими исследователями этого вопроса предложены для определения этого коэффициента разные выражения, основанные как на теоретических соображениях, так и на результатах произведенных многочисленных опытов. Наиболее часто применяют формулы [1]):

[1]) 1) Значения коэффициентов α и β (при измерениях в метрах) для поверхностей:
1) очень гладких (цементная штукатурка, строганное дерево и т. п.) ..... $\alpha=0{,}00015$; $\beta=0{,}0000045$
2) гладких (тесаный камень, кирпичная кладка, доски и т. п.) ..... $\alpha=0{,}00019$; $\beta=0{,}0000133$
3) менее ровных (бутовая кладка) ..... $\alpha=0{,}00024$; $\beta=0{,}0000600$
4) земляных ..... $\alpha=0{,}00028$; $\beta=0{,}0003500$

2) Значение коэффициента γ (при измерениях в метрах) для поверхностей:
1) очень гладких (цементная штукатурка, строганное дерево и т. п.) ..... $\gamma=0{,}06$
2) гладких (тесаный камень, кирпичная кладка, доски и т. п.) ..... $\gamma=0{,}16$
3) бутовой кладки (гладкой) ..... $\gamma=0{,}46$
4) для поверхностей различного рода: очень правильных земляных в плотном грунте; чисто вымощенные; грубая бутовая кладка ..... $\gamma=0{,}85$
5) для каналов с земляным руслом при обыкновенных условиях ..... $\gamma=1{,}30$
6) для каналов с земляным руслом, представляющим особо сильные сопротивления ..... $\gamma=1{,}75$

3) Значения коэффициента n для поверхностей:
1) очень гладких (цементная штукатурка, строганное дерево и т. п.) ... $n=0{,}010$
2) гладких (тесаный камень, кирпичная кладка) ..... $n=0{,}013$
3) бутовой кладки обыкновенной ..... $n=0{,}017$
4) бутовой кладки грубой ..... $n=0{,}020$
5) земляных ..... $n=0{,}025$
6) гравелистых или несколько покрытых водорослями ..... $n=0{,}030$
7) гравелистых неровных и плохо содержимых ..... $n=0{,}035$
8) поверхностей очень неровных ..... $n=0{,}040$

Дарси-Базена: $$C = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \frac{\beta}{R}}}$$

Базена: $$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$$

Гангилье и Куттера: $$C = \frac{23 + \frac{0{,}00155}{J} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0{,}00155}{J}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}}$$

В применении на практике регулирования рек наиболее удобной является формула Базена. Для упрощения расчетов, когда при разных случаях приходится или определять среднюю скорость течения по данным величинам гидравлического радиуса (а в формуле Гангилье и Куттера также и величине уклона), или обратно подбирать величины последних по заданной средней скорости, обыкновенно пользуются специально для этой цели составленными таблицами и графиками.

При обыкновенных условиях регулирования естественных рек, широко развитых в ширину по сравнению с глубиною, с земляным (песчаным, глинистым) руслом, можно пользоваться для определения приблизительной величины средней скорости формулой, предложенной Германеком, выведенной им на основании результатов многочисленных измерений. По этой формуле средняя скорость течения в реке определяется только по известным величинам средней глубины живого сечения t, выраженной в метрах, и поверхностного уклона J, выраженного десятичной дробью, а именно [1]):

Для

1) $t \leqq 1{,}5$ *metr.* ..... $V = 30{,}7\ \sqrt{t}\ .\ \sqrt{t\,J.}$ *metr./sec.*
2) $1{,}5 < t \leqq 6^{m}$ ..... $V = 34{,}0\ \sqrt{t}\ .\ \sqrt{t\,J.}$ $m/s.$
3) $t > 6$ ^{m} ..... $V = (50{,}2 + 0{,}5\ t)\ \sqrt{t\,J.}$ $m/s.$

[1]) В нижеследующих таблицах приведены численные величины коэффициента C, вычисленные по формуле Германека:

1) Для $t \leqq 1{,}5^{m}$. $(c = 30{,}7\ \sqrt{t})$

$t =$	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23
$c =$	9,7	10,2	10,6	11,1	11,5	11,9	12,3	12,7	13,0	13,4	13,7	14,1	14,4	14,7
$t =$	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37
$c =$	15,0	15,4	15,7	16,0	16,3	16,5	16,8	17,1	17,4	17,6	17,9	18,2	18,4	18,7
$t =$	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,55
$c =$	18,9	19,2	19,4	19,7	19,9	20,1	20,4	20,6	20,8	21,1	21,3	21,5	21,7	22,8
$t =$	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
$c =$	23,8	24,8	25,7	26,6	27,5	28,3	29,1	29,9	30,7	32,2	33,6	35,0	36,3	37,6

Встречается также надобность определять величину средней скорости течения или скорости около дна для данной вертикали, располагая сравнительно немногими уже известными величинами скоростей в некоторых точках на той же вертикали. Точного общего закона, по которому изменяются скорости течения в вертикальных и горизонтальных плоскостях, т. е. по глубине и ширине реки, еще не установлено. Поэтому для упомянутой цели пользуются построением кривых, вид которых многими исследователями этого вопроса определялся экспериментально, исходя из теоретических соображений и пользуясь результатами произведенных измерений.

Как выше было упомянуто, кривые изменения скоростей течения напоминают параболу. Некоторые исследователи (Дюпюн, Боало, Гумпфрейс и Аббот) принимали, что изменение скоростей течения по глубине на данной вертикали происходит по параболе с горизонтальной осью, расположенной на месте максимальной скорости, следовательно на поверхности воды или несколько ниже ее. Поэтому, исходя из уравнения параболы $y^2 = px$ имеем для двух точек вертикали, из коих одна на глубине t_z с известной скоростью V_z (например, на глубине соответствующей максимальной скорости V_{max}), а другая на бо́льшей глубине t_x с искомой скоростью V_x, следующее соотношение:

$$[t_x - t_z]^2 = p\ [V_z - V_x],$$

откуда

$$V_x = V_z - \frac{1}{p}\ [t_x - t_z]^2$$

или

$$V_x = V_{max} - \frac{1}{p}\ [t_x - t_z]^2.$$

Гаген принимал кривую изменения скоростей по вертикали за параболу с вертикальной осью, полагая, что вершина параболы находится на уровне дна, причем считал, что максимальная скорость V_{max} находится на поверхности воды, а минимальная V_{min} — на дне. При этом

$$[V_x - V_s]^2 = p\ [t - t_x],$$

откуда

$$V_x = V_s + V\overline{p}\ [\sqrt{t - t_x}].$$

где t полная глубина воды до дна, а V_s — скорость на дне.

Последующие исследования на реках Эльбе и Рейне указали, что лучшие результаты дает применение формулы логарифмической линии с вертикальной осью, вида $V = a + b\ lgn\ x$.

2) Для t = от 1,5 до 6.0 *м*. ($c = 31\sqrt[6]{t}$).

t =	1.50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,0	2,20	2,40	2,60	2,80
c =	37,6	38,2	38,8	39,4	39,9	40,4	41,4	42,3	43,2	44,0
t =	3,0	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
c =	44,8	45,5	46,2	46,8	47,5	48,1	49,5	50,8	52,1	53,2

Для определения, с грубым приближением, величины скоростей максимальной, средней и по дну можно пользоваться соотношениями между этими скоростями, установленными некоторыми исследователями по опытным данным.

Энгельс дает следующее соотношение для скоростей средней и на поверхности воды по одной и той же вертикали:

$$V_n = \frac{6}{7} V_o,$$

где V_n — средняя скорость по вертикали, а V_o — поверхностная скорость на той же вертикали, причем средняя скорость для всей глубины t вертикали равна действительной скорости на той же вертикали на глубине 0,6 t. Энгельс полагает, что означенное соотношение обладает точностью до 10%.

По Вагнеру соотношение между величинами скоростей средней и максимальной, для всего живого сечения, может быть определено выражением $V = \alpha V_{max}$, где коэффициент α находится в пределах от 0,67 до 0,78, возрастая с величиной реки, а для данного места реки — при повышении уровня воды.

Зброжек, исходя из опытов Базена, полагает возможным применять для больших речных потоков малой глубины (сравнительно с шириной) следующие выражения приблизительной зависимости скоростей в плоскости динамической оси (при измерениях в метрах): средняя скорость $V = V_{max} - 14\sqrt{RJ}$, а скорость по дну $V_s = V - 10\sqrt{RJ}$, полагая, что в таких реках R = средней глубине t, а наибольшая скорость находится на поверхности воды.

Что касается абсолютных величин средних скоростей течения на реках, то можно считать, что скорости, меньшие 0,5 метр., характеризуют слабое течение, скорости 0,5 — 1,5 метр. — умеренное, а 1,5 — 3 метр. — быстрое течение. В порогах, горных участках реки и т. п. скорости течения достигают 4-х, 6-ти, иногда и более метров.

Ранее упоминалось, что, говоря о скоростях течения в разных точках живого сечения, мы предполагаем, что направление их нормально к этой плоскости, другими словами, что течение параллелоструйно, но что действительное направление струй потока в некоторых местах отклоняется, а потому мы принимаем не действительную в этих местах скорость перемещения частиц воды, а ее проекцию на нормаль к плоскости живого сечения. Произведенные наблюдения показывают, что в некоторых местах реки направления струй речного потока являются как бы сходящимися или, напротив, расходящимися, причем отклонения их от нормали наблюдались иногда до 50 и 70 градусов в горизонтальной плоскости и до 25 градусов в вертикальной плоскости. Изучение главнейших направлений струй потока на поверхности реки может производиться помощью поплавков, наблюдая за их движением и нанося на план реки путь свободного перемещения каждого поплавка. Для изучения же направления струй течения в разных по глубине и ширине точках живого сечения пользуются специальными приборами.

§ 6. Определение величины расхода воды и зависимость между его величиной и положением уровня воды в реке.

Расход воды в реке, как произведение численных величин площади живого сечения и средней скорости течения, может быть исчислен, если известны величина площади живого сечения и величина средней скорости течения. Для маленьких речек и ручьев, в особенности горных, для которых не представляется возможным с достаточной точностью определить ни площади живого сечения, ни среднюю скорость течения, расход воды определяется по непосредственному измерению об'ема воды, протекающей в известное время. С этой целью всю притекающую по ручью воду направляют соответствующими устройствами в мерительный деревянный или железный сосуд, об'ем которого известен. Замечая время, пошедшее на наполнение сосуда, можно исчислить величину расхода воды в ручье.

При более значительной речке, для определения ее расхода устраивают временное заграждение с водосливом, чтобы определять величину расхода воды по формулам истечения воды через водослив.

Имеются примеры применения химического метода измерения расходов воды, сущность которого заключается в следующем. В речной поток вводится раствор какого-либо вещества, например хлористого натрия, а затем ниже по течению берется проба воды, в которой одним из методов анализа определяется содержание введенного вещества. Если q — расход в единицу времени раствора, вводимого в поток, C — крепость или степень концентрации раствора, c — степень концентрации введенного раствора в исследуемой пробе, а v — искомый расход воды в реке, то существует зависимость $q : v = c : C$, откуда:

$$v = \frac{q \cdot C}{c}.$$

Если площадь живого сечения реки известна, но не имеется возможности произвести непосредственные измерения скоростей течения для исчисления по ним средней скорости течения, то для определения величины средней скорости течения пользуются выше приведенной формулой равномерного течения воды в открытом русле $V = c\sqrt{RI}$. Если же по каким-либо причинам не представляется возможным установить ни величину живого сечения, ни точную величину поверхностного уклона, то остается только возможность приблизительного исчисления среднего расхода воды в реке по площади ее бассейна, по количеству выпадающих атмосферных осадков и по коэффициенту стока, величина которого принимается по аналогии с другими реками, находящимися в соответствующих условиях местности.

Наиболее верным и чаще всего применяемым способом определения расхода воды для сколько-нибудь значительной реки является ранее указанный способ, а именно непосредственное измерение живого сечения реки и скоростей течения в достаточном числе точек этого сечения для исчисления величины средней скорости течения.

Если расход воды исчисляется этим последним способом, то для точного определения расхода необходимо избирать такое место реки, где можно

верно определить направление живого сечения, которое должно быть перпендикулярно к направлению течения, и где течение совершается правильно в общей массе, без больших разниц в величинах скоростей течения. Поэтому следует, по возможности, выбирать такие участки реки, где она течет в одном русле без разделения на рукава, где она прямолинейна или, по крайней мере, не имеет крутых извилин, где в поперечном профиле русло представляет плавные очертания и т. п. При высоких уровнях воды в реке, для точности определения расхода, следует избирать такие участки, где не происходит широких разливов, т. е., где весеннее русло заключено в достаточно высоких, крутых и правильных берегах.

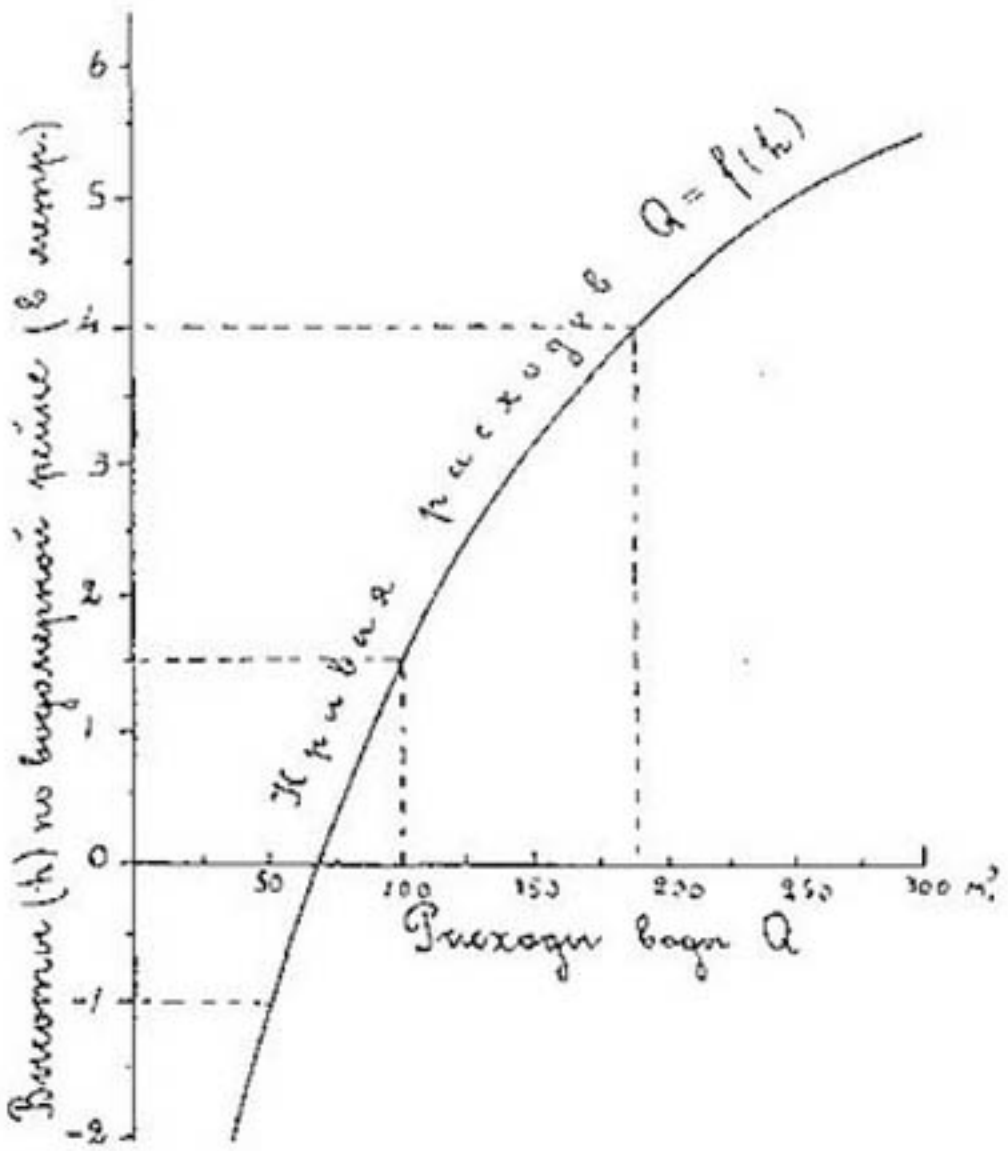


Рис. 10. Кривая зависимости расхода воды от высоты уровня.

С увеличением количества воды, несомой рекою, повышается уровень воды в реке. Таким образом, существует для каждой реки некоторая зависимость между величиной расхода воды и высотой уровня. Определение такой зависимости весьма важно и полезно тем более, что исчисление расхода воды по непосредственным измерениям скоростей течения затруднительно и требует много времени, а между тем при регулировании рек часто встречается надобность знать величину расхода воды при любом из положений уровня воды.

Зависимость между величиной расхода и высотой стояния уровня воды в реке может быть выражена графически и в виде формулы.

Если для данного места реки, где имеется водомерный пост, определено достаточное число величин расхода воды, исчисленных по измерениям скоростей при разных уровнях воды, то по этим величинам можно построить плавную линию, выражающую приблизительно зависимость между высотами

уровня и расходами воды в реке для данного ее места. Такую линию называют *кривой расхода*. На рис. 10-м изображен такой график. Чтобы выразить ту же зависимость в виде формулы, нужно подыскать уравнение упомянутой кривой расхода, приняв за переменные величины расход и высоту уровня воды

Зависимость между расходами и высотами воды не одинакова как для разных рек, так и для каждой реки в разных местах ее протяжения. Поэтому не представляется возможным выразить эту зависимость какой-либо одной общей для всей реки формулой. Изучая зависимость для каждого данного места реки отдельно, изыскивают наиболее подходящий тип эмпирической формулы и определяют численные для нее коэффициенты, пользуясь уже известными для некоторых горизонтов величинами расхода воды. Более

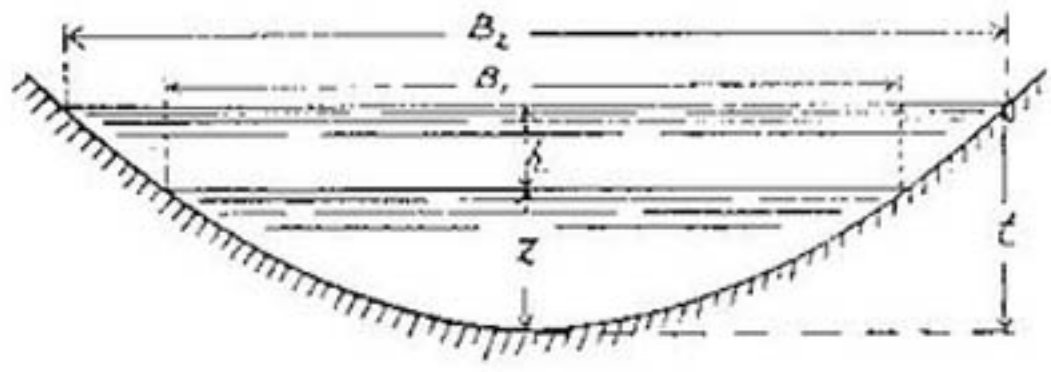


Рис. 11. Параболическое русло.

подходящими типами формул зависимости между расходом Θ и высотою h поверхности воды над нулем водомерной рейки или глубиною воды t (в наиболее пониженной точке русла), бывают обыкновенно следующие:

$$\Theta = a + bh + ch^2,$$

$$\Theta = \delta\ (z + h)^n$$

$$\text{или } \Theta = A\ t^n,$$

где показатель n обыкновенно колеблется для разных рек и разных мест реки от $^{2}/_{3}$ до $^{3}/_{2}$.

Имея уже известные величины расхода $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ и пр. для соответствующих высот горизонта воды по водомерной рейке h_1, h_2, h_3 и пр., получаем ряд уравнений:

$$\Theta_1 = a + bh_1 + c\ h_1^{\,2}$$

$$\Theta_2 = a + bh_2 + c\ h_2^{\,2}$$

$$\Theta_3 = a + bh_3 + c\ h_3^{\,2}$$

$$\text{и т. д.}$$

по которым можно определить численные величины постоянных коэффициентов a, b и c. Вышеприведенные типы формул находят себе об'ясненне в следующих теоретических соображениях. Исходя из известного выражения для средней скорости течения $V = C\ \sqrt{RJ}$ и допуская, что для данного места реки уклон J и коэффициент C мало изменяются при разных высотах уровня воды, имеем для расхода $\Theta = F\ .\ V$ следующие выражения при *параболической форме* русла, глубина которого равна t.

По свойствам параболы $B = \alpha \sqrt{t}$ и $F = \frac{2}{3} Bt = \frac{2}{3} \alpha t^{\frac{3}{2}}$. Гидравлический радиус R может быть заменен средней глубиной, которая при параболической форме русла равна $^2/_3\ t$. Поэтому $V = C\sqrt{RJ} = C\sqrt{J}\sqrt{^2/_3 t}$, а следовательно расход $\Theta = {}^2/_3\ \alpha\ c\ \sqrt{J}\ \sqrt{^2/_3}\ t^2$. Называя произведение постоянных величин $^2/_3\ \alpha\ c\ \sqrt{J}\ \sqrt{^2/_3}$ через A, имеем для параболического русла $\Theta = At^2$. Так как высота уровня отсчитывается от нуля водомерной рейки, то, полагая, что вершина параболы дна находится ниже нуля водомерной рейки на постоянную величину Z, можем принять, что $t = Z + h$. Поэтому $\Theta = A(z + h)^2 = Az^2 + 2zh + Bh^2 = a + bh + ch^2$.

По аналогичным выкладкам расход вод при прямоугольном русле $\Theta = Bt^2$, а при треугольной форме $\Theta = Dt^5$.

Нужно заметить, что не всегда удается выразить зависимость между расходом воды и высотою уровня одним для всей амплитуды колебаний горизонта уравнением, а приходится иногда заменять его двумя и даже тремя уравнениями, из коих каждое пригодно только для определенной зоны в общей высоте амплитуды колебаний горизонта воды. Такое обстоятельство встречается главным образом в тех случаях, когда русло реки таково, что живое сечение в некоторых местах по высоте резко изменяет свою форму и величину (рис. 12), например, при переходе от меженнего русла к руслу высоких вод, имеющему поймённые места [1]).

На реках замерзающих применение вышеуказанных формул зависимости между расходом и высотою уровня воды требует особой осторожности, так как зимний расход воды в реке может существенно разниться от расхода в летнее время при одинаковой высоте уровня воды. Ледяной покров, образование в массе текущей воды ледяных игл и сала, донный лед и другие явления в зимнее время могут существенно влиять на уменьшение скоростей течения, а, следовательно, и величины расхода воды. При образо-

---

[1]) Для р. *Днепра*, ниже города Екатеринослава, по данным измерений 1912/1917 гг. Лоцманско-Каменской гидрометрической станции, расход воды в зависимости от высоты горизонта воды, считая от нуля Лоцманско-Каменской водомерной рейки, выражается в куб. саж.) следующими тремя формулами:

1) для горизонтов H от $-0{,}58$ саж. до $+0{,}50$ саж.

$$Q = 32{,}17\ (1{,}661 + H)^{3{,}09};$$

2) для горизонтов H от $+0{,}50$ до $+2{,}20$ саж.

$$Q = 187{,}19\ (0{,}901 + H)^{1{,}805};$$

3) для горизонтов H от $+2{,}20$ саж. до $+2{,}87$ саж.

$$Q = 67{,}39\ (1{,}70 + H)^{2{,}26};$$

На р. *Волхове* около порогов, для времени, свободного от ледяного покрова, по данным позднейших исследований:

$$Q = 15{,}77 + 73{,}9\ h + 66{,}56\ h^2 \text{ (в саженях)},$$

где h возвышение уровня воды над отметкой $+7{,}0$ саж. над уровнем Балтийского моря.

ванип ледяного покрова и подводных ледяных зажоров происходит подпор поверхности воды, что может вводить в заблуждение относительно нормального, для данной величины расхода воды, положения уровня. Как показали подробные исследования, произведенные в недавнее время на некоторых русских реках, расхождение величин расхода воды, измеренных в зимнее время, от величин расхода, измеренных в летнее время при тех же высотах уровня воды, достигало иногда весьма большой величины. При одинаковой высоте уровня воды в реке зимний расход оказывался иногда и несколько раз меньше летнего. Ввиду таких обстоятельств, не поддающихся сколько-нибудь точному учету, применение формул зависимости между величиной расхода и высотой уровня воды, составленных на основании измерений при состоянии реки, свободном от льда, может давать совершенно неверные результаты для зимних расходов. Поэтому для определения зимних расходов воды в реке необходимо производить специальные измерения скоростей

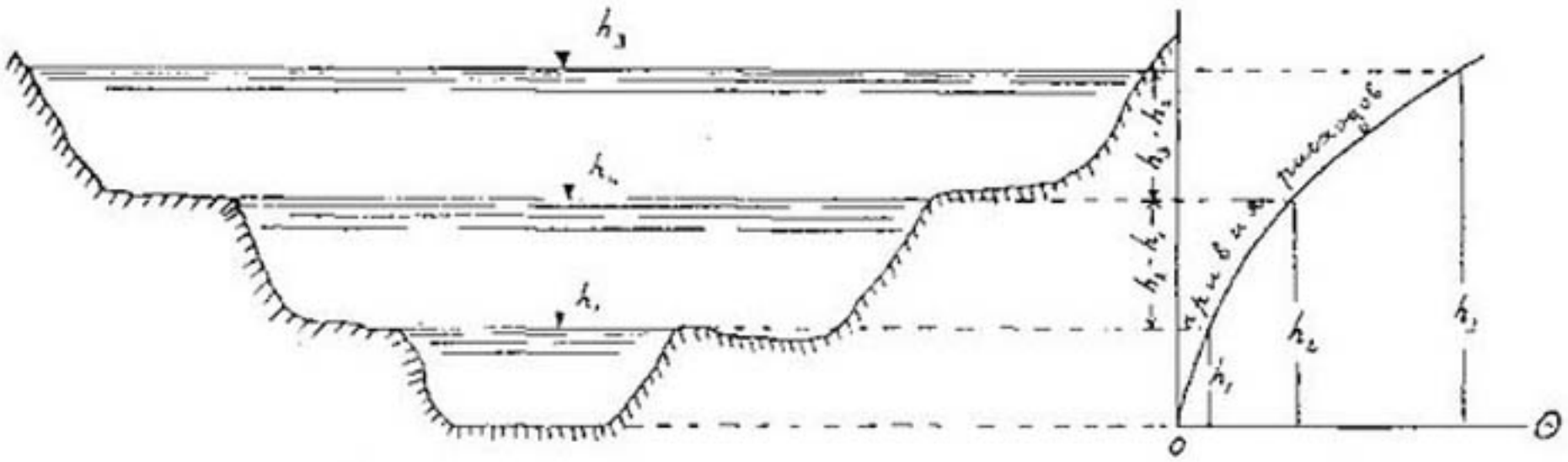


Рис. 12. Кривая расхода воды при многоярусном русле.

течения и живого сечения реки в зимнее время. Вопрос же о том, насколько точно можно установить зависимость между расходами и положением уровня воды для периодов года, когда река покрывается ледяным покровом, остается пока недостаточно выясненным. Для выяснения возможных величин расхода воды в зимнее время необходимо производить возможно большое число

Для р. *Свири* около истока по данным позднейших исследований:

$$1)\ Q = 338 - 15h + 875h^2 \text{ (в саженях)},$$
$$2)\ Q = 416{,}9\ (0{,}64 + H)^{1{,}94} \text{ (в саженях)},$$

где формула 1-я более пригодна для низких горизонтов, а формула 2-я—для высоких горизонтов. В обоих формулах h и H есть возвышение горизонтов воды над условным нулем, который взят на отметке + 19,00 саж. от уровня Балтийского моря.

Для р. *Гароны* около Лангонского моста (по Фаргу) при горизонтах до + 7,5 м.:

$$1)\ Q = 86{,}5 + 120{,}18h + 41{,}698\ h^2 \text{ (в метрах)}.$$

При высоких же уровнях (свыше + 7,5 *м.*) более подходящей оказалась формула:

$$Q = ch^{1{,}5}.$$

Для р. *Рейна* у Кельна по исправленной формуле Гарляхера:

$$Q = 104{,}11\ (h + 2{,}0)^{1{,}852} \text{ (в метрах)}.$$

Для р. *Эльбы* у Артленбурга, по Тауберту:

$$Q = 105{,}4\ (h + 1{,}45)^{1{,}666} \text{ (в метрах)}.$$

его измерений при разных уровнях воды и при различных явлениях, происходящих во время замерзания, ледостава и вскрытия реки. Нанося на график точки, соответствующие измеренным расходам, можно провести кривые, обертывающие сверху и снизу группу этих точек, причем такие кривые дают понятие о возможных наибольших и наименьших величинах зимнего расхода для различных высот уровня воды.

Для регулирования рек вообще и, в частности, для регулирования речного стока вод приобретает большое значение изучение режима реки в отношении ее расходов воды. Необходимо бывает знать и пределы возможных изменений величины расхода, т. е. максимальную и минимальную его вели-

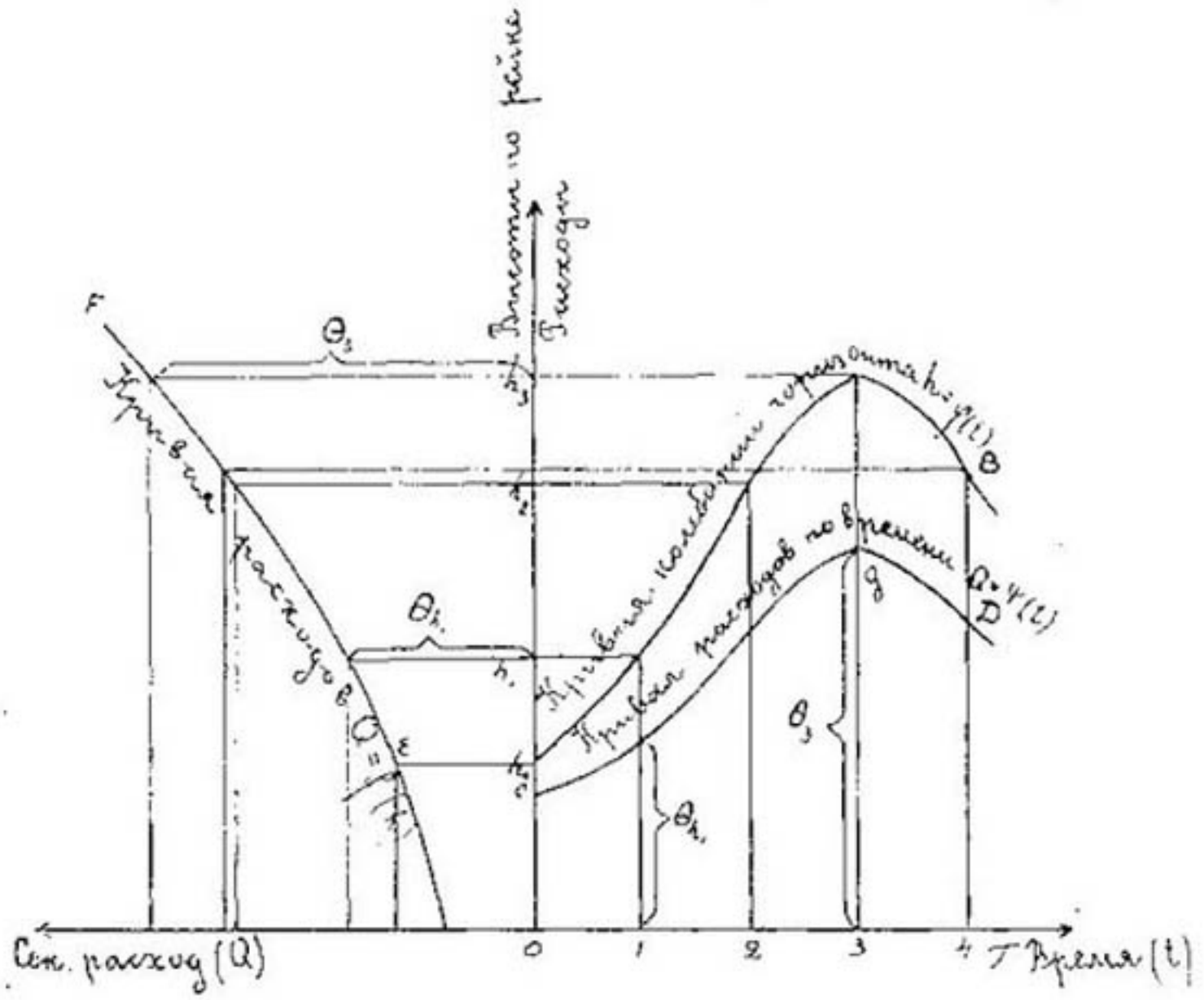


Рис. 13. Совмещенный график колебаний уровня и расхода воды.

чины, и средние величины секундного расхода воды для разных периодов года, и частоту повторяемости тех или иных величин расхода и относительную длительность в течение годового или иного периода времени, когда река несет расход воды той или иной определенной величины. Встречается необходимость знать также и общее количество воды, которое протекает в данном месте реки в течение определенного периода времени.

Ввиду сего, на основании произведенных непосредственных измерений расходов воды или исчислений по формулам зависимости расхода и уровня воды, составляются специальные таблицы и графики расходов воды, подобно тому, как выше об'яснено в отношении колебаний уровня воды. Сопоставление же таких данных об изменениях расходов воды с данными о колебаниях уровня воды приобретает весьма полезное значение, облегчая работу при разрешении разных задач, встречающихся в деле регулирования рек.

Располагая данными регулярных наблюдений над горизонтом воды по водомерной рейке и пользуясь формулой зависимости между расходом и высотою уровня воды для данного места реки, можно вычертить кривые расходов воды и сопоставить их с кривой колебаний уровня воды, как это показано на рис. 13-ом. В прямоугольных координатах вертикальная ось служит для нанесения в определенном, произвольно выбранном, масштабе высот уровня по водомерной рейке. На горизонтальной оси вправо от начала координат наносится в определенном, тоже произвольно выбранном, масштабе $\frac{1}{m}$ время для рассматриваемого периода времени T. По этим координатам строится ранее описанным способом кривая AB колебаний горизонта воды в течение упомянутого периода времени. С левой стороны строится кривая EF зависимости величины расхода от высоты уровня воды, пользуясь нанесенными на вертикальной оси высотами по водомерной рейке и принимая левую часть горизонтальной оси (от нуля) для величин секундного расхода в каком-нибудь масштабе $\frac{1}{n}$. Имея эти две кривые, легко построить кривую CD, выражающую изменение величин секундного расхода воды по времени в течение того же периода T. Для построения этой кривой, величина секундного расхода, бываемого в какой-либо данный момент, откладывается против точки, соответствующей сему моменту, вверх в том же масштабе $\frac{1}{n}$, в котором построена кривая EF, как это показано на чертеже. По графику можно определить общее количество воды, протекшее за весь рассматриваемый период времени T, или за какой-либо промежуток времени в этом периоде, так как количество протекшей воды выражается на графике площадью, заключенной между кривой CD и горизонтальной осью. Предположим, например, что каждое деление на горизонтальной оси, нанесенное через 1 *см.* друг от друга, соответствует суткам ($24 \times 60 \times 60 = 86.400$ сек.), т. е. что масштаб $\frac{1}{m} = \frac{1}{86.400}$, а масштаб величин секундного расхода принят $\frac{1}{n} = \frac{1}{10}$ (1 *см* = 10 *куб. метр., сек.*). Если желаем знать количество воды, протекшее, например, в течение первых трех суток, то измерив планиметром площадь $OCg3$, равную Ω, получаем искомое количество воды:

$$W = \Omega . n . m = \Omega \times 86.400 : 10.$$

На рисунке 14-ом изображен график длительности расходов воды. Кривая длительности расходов воды строится способом, вполне аналогичным вышеизложенному способу построения кривой длительности покрытия той или иной высоты по водомерной рейке (см. рис. 4). Для удобства построения на графике построена также кривая зависимости расходов от высоты уровня воды. На том же графике сопоставлена и кривая длительности покрытия.

На рисунке 15-ом показан график колебаний величины секундного расхода воды для данного места реки в течение годового периода времени (годовая кривая секундного расхода). На оси абсцисс $O — O$, в произвольно принятом масштабе, откладывается время, считаемое по числу дней. На ординатах, соответствующих каждому дню, откладывается, тоже в произвольно принятом масштабе, величина секундного расхода воды, соответствующая положению горизонта воды в этот день. Концы ординат соединяются плавной кривой линией. Для определения соответствующей положению горизонта воды величины секундного расхода пользуются формулой или графиком зависимости между расходами и положениями уровня воды в реке. Чтобы

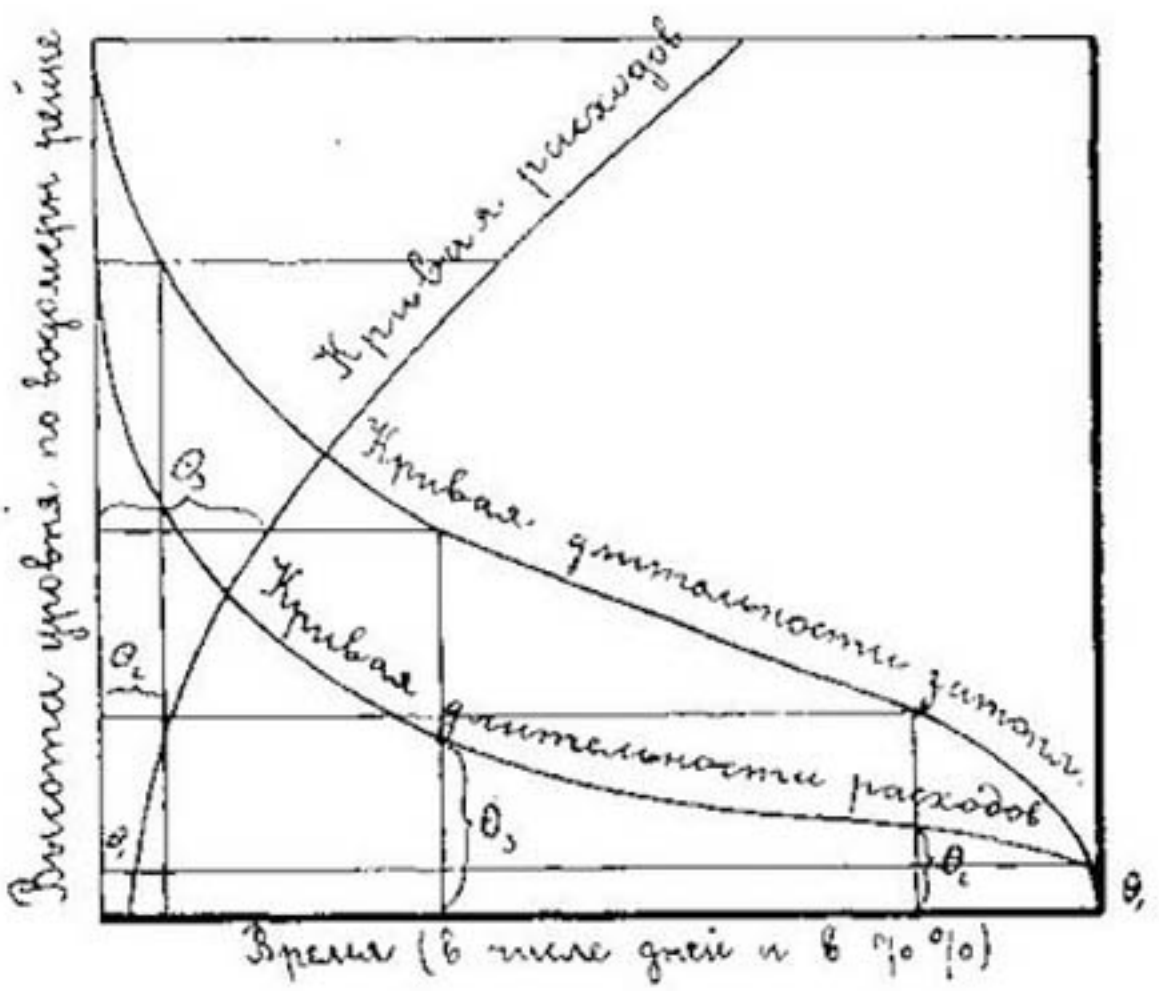


Рис. 14. График длительности расходов воды.

по такому графику определить количество воды, протекшей в течение какого-либо периода года, достаточно измерить планиметром или исчислить иным приближенным способом площадь фигуры, заключающейся между кривой, осью абсцисс и двумя ординатами, граничащими начало и конец рассматриваемого периода времени. Полученную величину площади нужно помножить на числовые величины масштабов, как это указано выше, при об'яснении графика, показанного на рисунке 13-ом. Чтобы по тому же графику определить величину среднего за весь год секундного расхода, достаточно на прямой $O—O$ построить прямоугольник $OMNO$, равновеликий площади $OABCEO$, причем высота прямоугольника OM даст искомую величину среднего за год секундного расхода.

Если на горизонтальной оси нанесено время, считаемое не днями, а месяцами или иными периодами, то по графику колебаний уровня воды предварительно определяют среднюю высоту уровня воды за каждый месяц, причем откладываемая величина секундного расхода исчисляется для этого среднего за месяц положения уровня, а измеренные величины площадей помно-

жаются на число секунд, заключающихся в одном месяце, а не в одних сутках, как выше указано.

При разрешении многих задач, относящихся к регулированию стока воды по реке, большие удобства представляет пользование, так называемой, интегральной (суммарной) кривой расхода воды. На рисунке 16-ом показана сущность такого графика, относящегося к годовому периоду времени. Нужно заметить, что при манипулировании с гидрологическими данными представляется вообще более удобным рассматривать годовой период не календарный, а считая его с начала весны одного года и до начала весны следующего года, или же с конца осени одного года до конца осени следующего года. Интегральная кривая строится следующим образом. На оси абсцисс откладывается время так же, как на только что об'ясненном графике расходов. На ординатах же откладывается в произвольно принятом масштабе

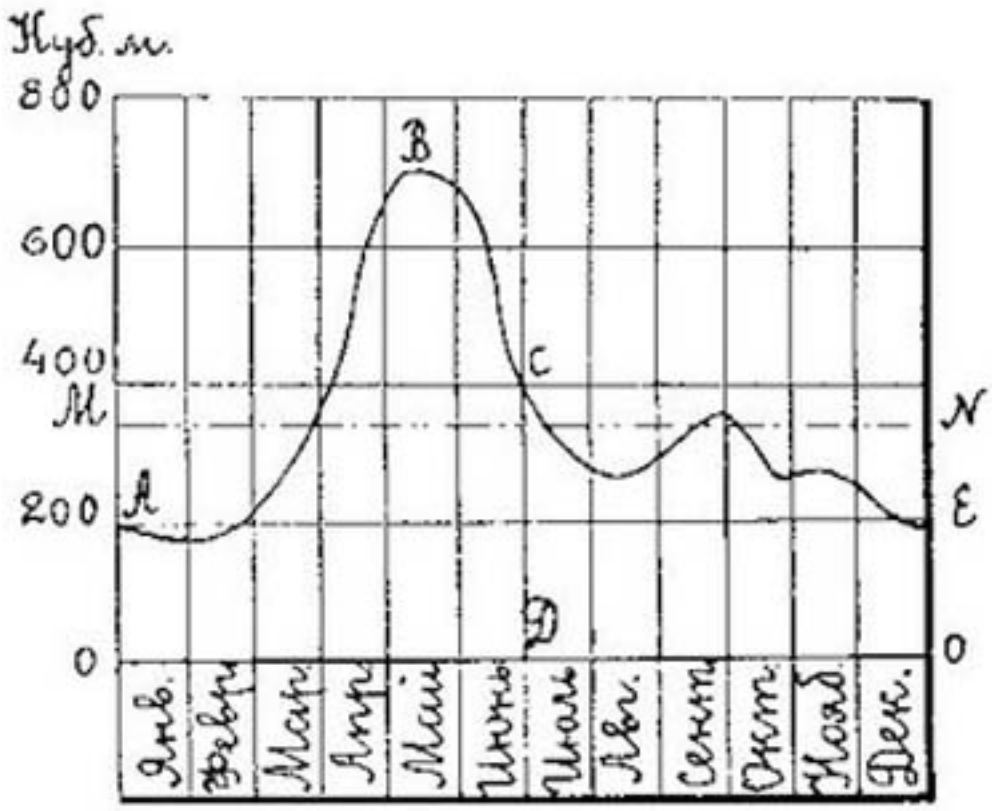


Рис. 15. График расхода воды в течение годового периода времени.

весь об'ем воды, протекающий в реке от момента, с которого начато построение графика, до момента, которому соответствует данная ордината. Так, например, на ординате KI отложено количество кубических метров воды, протекшее за все время с 1 апреля по 1 сентября, на ординате AB — количество кубических метров воды, протекшее за весь год. Чтобы найти по этому графику количество воды, протекшее за какой-либо промежуточный в году период времени, достаточно взять по масштабу разность высот ординат, граничащих конец и начало сего периода. Если бы все количество воды, проведшее по реке в течение целого года, текло равномерно, т. е. с одинаковой величиной секундного расхода, то кривая линия обратилась бы в прямую OB. Величина среднего за год секундного расхода $\Theta = \frac{AB}{OA} = tg\alpha$. Чтобы найти те моменты в году, когда вода текла с этим средним (за год) секундным расходом, достаточно провести параллельные с прямой OB касательные к выпуклостям кривой линии, причем точки касания a и c укажут искомые моменты. В те периоды времени, для которых касательные к кривой соста-

вят с осью абсцисс углы бо́льшие угла α секундный расход был более среднего. Если бы для обеспечения в течение всего года секундного расхода воды, не меньшего, например, среднего за год расхода, можно было располагать запасным водохранилищем, из которого выпускать в реку дополнительные количества воды, когда естественный секундный расход менее среднего, то по графику легко определить нужный об'ем водохранилища. Действительно, об'ем воды ab равен тому об'ему, который пришлось бы израсходовать из водохранилища в течение промежутка времени, соответствующего

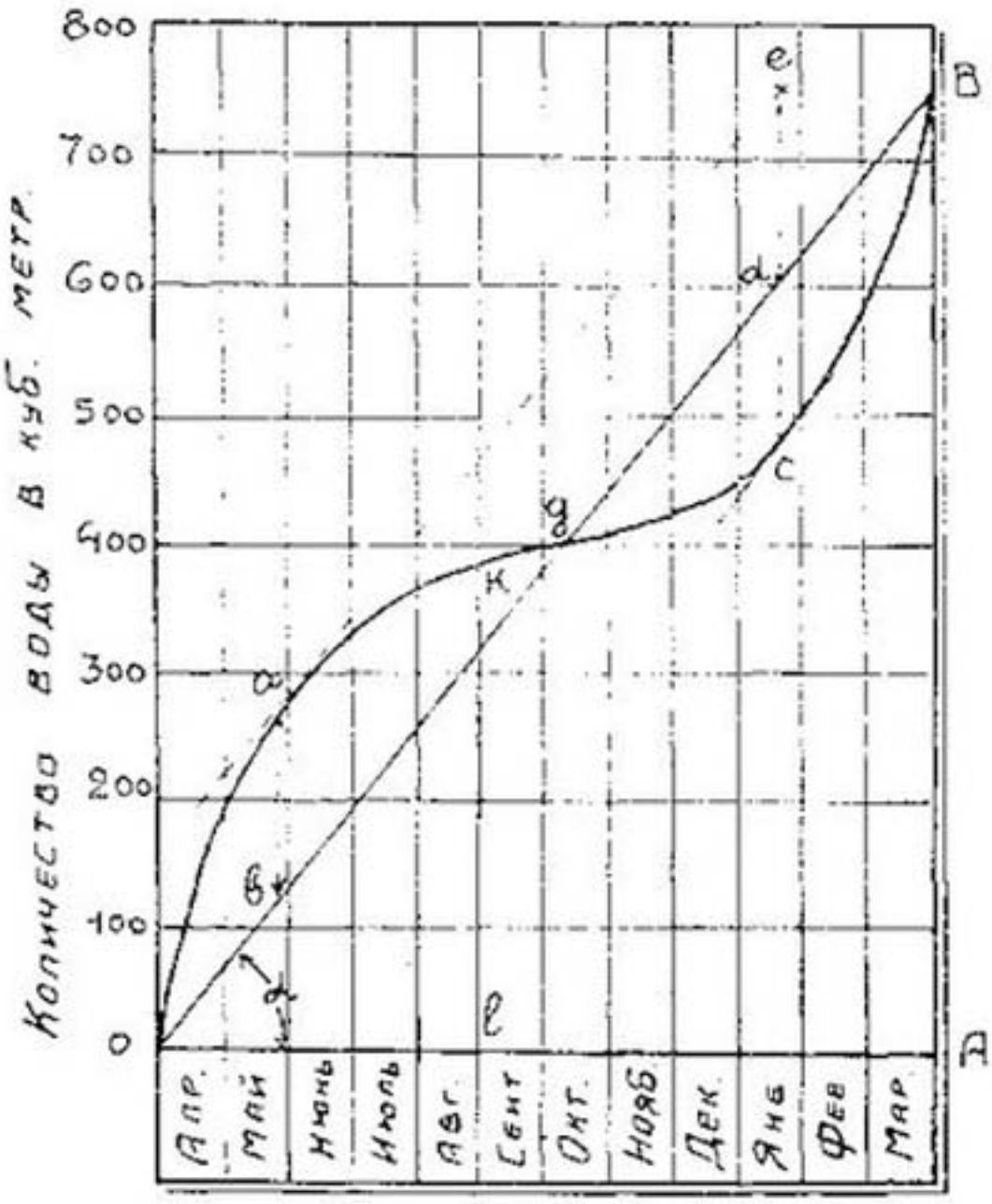


Рис. 16. Интегральная кривая расхода.

проекции (на ось абсцисс) кривой ag; об'ем же воды cd понадобился бы на дополнительное питание реки из водохранилища в течение времени, соответствующего проекции кривой gc. Общий нужный об'ем водохранилищ составил бы об'ем $ce = ab + dc$.

Интегральная кривая обыкновенно составляется для периода времени, обнимающего несколько лет, чтобы учесть значение не одинаковых условий питания реки в разные годы. При длинном периоде времени, для удобства расположения графика обе оси ординат наклоняют на бумаге так, чтобы график вытянулся более в длину, а не по высоте бумаги, например, наклоняют обе оси на 45° и соответственно разграфливают сетку графика.

Что касается *абсолютных величин секундного расхода*, то таковые весьма различны для разных рек. На небольших речках иногда меженние

секундные расходы воды выражаются лишь в нескольких кубических метрах и даже долях кубического метра, между тем как на больших реках расход воды в меженное время составляет сотни и даже тысячи кубических метров в одну секунду. Например, секундный расход воды на р. Волге, ниже впадения в нее р. Камы, составляет в межень около 2.800 *куб. метр.*, а весною при половодии превышает 40.000 *куб. метр.* Расход воды на Днепре около города Екатеринослава составляет при средне-низком горизонте около 680 *куб. метр.*, — увеличиваясь весною иногда до 21.000 *куб. метр.* и уменьшаясь при самом низком горизонте до 180 *куб. метр.* в секунду.

По длине реки, в направлении течения, расход воды вообще возрастает, резко увеличиваясь в местах слияния с крупными притоками, и достигает своего максимума около устья. Однако, на некоторых реках наблюдаются и такие явления, что с какого-либо места протяжения реки секундный расход воды в дальнейшем не увеличивается, а, напротив, постепенно по длине реки уменьшается вследствие сильного испарения воды, просачивания в почву или разбора воды каналами для искусственного орошения земель; некоторые же реки и вовсе теряются в песках. Такие явления наблюдаются на некоторых наших реках в Туркестане. При особо благоприятных условиях для проникновения речной воды в почву, например при мощных гравелистых слоях дна русла горных рек, впитывание бывает настолько сильно, что река на некотором протяжении совершенно обнажает свое русло и видимого течения не происходит, а засим далее, по мере уменьшения такого слоя наносного грунта, река вновь восстанавливает видимое течение.

Изменения величины секундного расхода по времени года или при случайных паводках весьма различны для разных рек или участков одной и той же реки. Завися от условий питания, эти изменения особенно резко проявляются на горных реках. На реках, текущих в равнинных местностях на значительных протяжениях, отношение меженнего расхода к расходу при половодии выражается обыкновенно от 1/10 до 1/50. В горных реках это отношение понижается до 1/200 и даже до 1/300, а многие горные ручьи, обладающие в обыкновенное время почти неощутимым расходом воды, обращаются после ливней в горах в многоводные бурные потоки.

§ 7. Замерзание рек и движение льда.

Покрытие реки льдом на зимнее время и движение льда принадлежит к числу явлений, имеющих существенное значение для судоходства, для всякого рода возводимых в реке сооружений и даже для самого русла реки в смысле влияния, какое на него может оказывать лед. Состояние реки, когда она находится под неподвижным ледяным покровом, называется *ледоставом;* состояние реки, когда происходит движение льда по реке перед ее замерзанием или при освобождении от ледяного покрова, называется *ледоходом* (осенним или весенним). Период года, когда река свободна от льда, называется *навигационным* периодом.

В зависимости от климатических условий и других обстоятельств, время, в течение которого река покрыта льдом, бывает неодинаково в раз-

ные годы и для разных рек, а на больших реках не одинаково для различных участков.

В южной полосе Европейской части СССР реки покрываются льдом на 2 — 4 месяца, в средней на 4 — 5 месяцев, а в северной на 6 и более месяцев.

На крайнем севере СССР реки покрываются льдом на бо́льшую часть года. Так, например, р. Печора, р. Лена и др. северные реки в своих устьях освобождаются от льда лишь в июне месяце, а в сентябре снова замерзают.

Под одной и той же широтой реки вскрываются ранее на западе, чем на востоке СССР.

Малые реки замерзают и вскрываются ранее, чем большие.

Толщина ледяного покрова бывает весьма различна. В среднем она колеблется от 0,3 до 0,6 *метр.* на реках южной полосы СССР, до 1 — 1,5 *метр.* в северной полосе. Но в разные зимы и при разных условиях лед достигает не одинаковой толщины. Это обстоятельство зависит не только от силы и продолжительности морозов, но и от многих других причин. При равных прочих условиях толщина снежного на льду покрова, как обладающего меньшей теплопроводной способностью, оказывает заметное влияние: при отсутствии снега толщина льда достигает большей величины; чем больше снегу на льду, тем труднее нарастание последнего в глубину. В местах реки, где скорости течения большие, толщина образующегося льда меньше. Иногда в местах слабых скоростей и малой глубины на северных небольших реках происходит промерзание воды до самого дна, причем поток прорабатывает себе под льдом более глубокий ход и какой-либо части своей ширины, вынося размытый грунт и складывая его в русле, чем нередко засоряется фарватер. В местах больших скоростей, как, например, на порожистых участках реки, иногда образуются непокрытые льдом площади, так называемые *полыньи* более или менее значительной величины.

Условия замерзания рек весьма отличны от условий замерзания стоячей воды, например, прудов или небольших озер, на которых не может происходить значительного волнения. Река замерзает позднее. Причины заключаются в том, что при низкой температуре воздуха охлаждение верхних слоев стоячей воды до температуры замерзания происходит скорее. В реке, как показали наблюдения, температура воды по всей глубине потока почти одинакова, так как частицы воды в текущей воде постоянно перемешиваются; поэтому для охлаждения воды на поверхности требуется гораздо больше времени действия морозного воздуха.

Замерзанию реки предшествуют длительные морозы. Оно начинается с образования у берегов припаянных к ним тонких льдин. Течением воды льдинки отрываются от берегов и сносятся к стрежню. При продолжающемся морозе число их быстро возрастает, поверхность воды покрывается массой таких движущихся льдинок; образуется так называемый «шорох» или «сало». В дальнейшем льдинки срастаются между собою и нагромождаются одна на другую, пока движущийся таким образом по всей ширине реки лед не остановится, образовавши сплошную ледяную кору, которая в дальнейшем нарастает по своей толщине.

На некоторых реках перед образованием ледостава наблюдаются явления образования так называемого *донного льда*. При низкой температуре воздуха на еще непокрытой льдом поверхности воды, обыкновенно в ясные солнечные дни, внезапно выплывают снизу вверх крупные неправильной формы глыбы рыхлого с большими порами льда зеленовато-желтого цвета, который быстро обращается в белоснежный цвет, вследствие вытекания воды из пор той части льда, которая возвышается над поверхностью воды. Исследования показали, что донный лед образуется главным образом на скалистом или вообще твердом грунте дна или же на неподвижных камнях и других предметах. Образование донного льда происходит весьма быстро, причем губчатый лед облепляет подводные предметы большими массами. Всплывание донного льда в больших количествах служит нередко началом ледостава, причем первоначальный ледяной покров образуется от смерзания между собою, а засим и отвердения в плотную массу таких ледяных глыб.

Образование донного льда в местах реки, уже покрытых ледяным покровом, не происходит. Но нередко в период образования и всплытия донного льда его так много, что текущая вода на всю глубину заполнена рыхлым мягким льдом, обращаясь как бы в жидкую кашу. В таком виде вода течет далее под льдом и в местах реки с уже образовавшимся ледяным покровом.

При низком стоянии уровня воды в реке ледостав образуется скорее и с более равномерной толщиной покрова, чем при высоком уровне. Процесс образования ледостава на каком-либо участке реки часто сопровождается быстрым под'емом воды как на месте образовавшегося покрова, так и на некотором протяжении вышележащей части реки. Ниже места образовавшегося ледостава уровень воды, напротив, несколько понижается. Под'ем уровня воды достигает иногда 0,40 и даже до 1 *метр*. Одновременно значительно увеличиваются и поверхностные уклоны воды. По мере окончания образования ледостава на значительном протяжении реки упомянутые явления постепенно прекращаются.

Явления эти об'ясняются следующими причинами. Вступая в участок, покрытый льдом, вода встречает большее сопротивление течению, так как на поверхности своей она вместо воздуха имеет лед. Поэтому для пропуска такого же расхода воды требуется бóльшая площадь живого сечения, которая и увеличивается за счет под'ема уровня воды. Необходимость иметь соответствующий напор воды вызывает под'ем уровня воды и на вышележащем свободном от льда участке реки. Поэтому высота падения реки, а следовательно и уклон поверхности воды увеличиваются.

В период ледостава толщина ледяного покрова постепенно увеличивается. Однако, часто наблюдается, что у берегов толщина льда значительно меньше, чем в остальной части ширины реки: иногда вдоль берега образуются даже полыньи более или менее длинные и широкие. Происходит это от разницы температур речной воды и грунта берега, от не перестающего выхода в реку ключей из грунта около берега и по другим причинам. Для увеличения толщины льда около берега, что, например, бывает нужным для прокладки зимнего пути через реку, прибегают к поливке воды на лед в морозные дни с целью нарастить толщину льда сверху.

Вскрытие реки от льда наступает обыкновенно только весною, когда под влиянием теплоты ледяной покров ослабнет. Чем плотнее образовался лед зимою, тем позднее наступает вскрытие реки.

При слабом льде и продолжительном временном повышении температуры воздуха бывает иногда вскрытие реки на более или менее длинных ее участках и зимою, после чего она вновь замерзает до весны. Такие явления, впрочем, наблюдаются только в более южных местностях. Вскрытию реки обыкновенно предшествуют сплошные подвижки (сдвиги) ледяного покрова участками значительного протяжения, до 10 и даже 20 *км*. От сдвига образуется на верхнем конце полынья, иногда небольшая, иногда же в несколько километров длины. Сдвиг ледяного покрова вызывает перераспределение продольных поверхностных уклонов воды. Так как и таяние снега на берегах и вскрытие притоков начинаются ранее, то вскрытию реки предшествует более или менее значительный под'ем уровня воды в реке.

Когда ледяной покров станет настолько слабым, или если изменения уклонов на коротких протяжениях станут настолько велики, что образуется в ледяной коре внезапно много трещин и она разделится на куски, то начинается общее беспорядочное их движение — *ледоход*. Встречая препятствия своему движению, льдины нагромождаются одна на другую. Разламывая ледяную кору нижележащих участков ледоход распространяется вниз по течению на все большее и большее протяжение. Во время ледохода уровень воды в реке обыкновенно быстро поднимается и достигает значительной высоты. На низких берегах и островах образуются нагромождения льдин, которые остаются там до полного своего растаивания. Распространение ледохода вниз по течению реки с одновременным подходом льдин сверху реки не вызывает, однако, такого обстоятельства, чтобы нагромождения льдин и другие явления при ледоходе все более и более усиливались с течением времени и по мере распространения ледохода вниз по реке. Напротив, вследствие уменьшающихся по длине реки поверхностных уклонов, более спокойного течения и увеличивающейся ширины реки, обыкновенно явления ледохода смягчаются в ниже расположенных частях реки. А если и происходят чрезвычайные местные нагромождения льда при так называемых ледяных зажорах, то причины образования их иные, о чем будет сказано ниже. На больших реках, текущих с севера на юг, вскрытие от льда происходит в низовьях ранее, чем в средней части реки и в ее верховьях.

Явления, происходящие как при ледоставе, так и при ледоходе, во многих случаях очень опасны для находящихся в реке судов и для всякого рода сооружений; для устранения вредных последствий необходимо принимать соответственные предохранительные меры.

В зимнее время колебания уровня воды хотя и менее значительны, чем в прочее время, но все же происходят. Весною сильный под'ем воды наступает часто еще до вскрытия реки. Если части сооружения крепко смерзались с ледяной корой, то при под'еме последней свайные опоры могут оказаться приподнятыми или вытащенными из дна, выступающие части повреждаются или обламываются и т. п. Судно, смерзшееся с ледяным покровом

реки, испытывая снаружи большие давления от расширения льда, может получить повреждения и течь. Во избежание сего необходимо в течение зимы окалывать лед вокруг сооружения и судна по периметру хотя бы на небольшую ширину.

При образовании из донного льда шороха, заполняющего реку на большую глубину, расход воды в реке, как выше уже сказано, бывает гораздо меньше величины расхода при том же положении уровня в свободное от льда время. Но, кроме того, быстрое обмерзание донным льдом подводных частей сооружения влечет за собою иногда опасные последствия или большие затруднения. Так, например, обмерзание приемных для воды отверстий труб пароходных механизмов или турбинных приемников на гидроэлектрических станциях, приемных труб на водопроводных станциях и т. п. прекращает всасывание воды. Для устранения таких закупорок возможно применение согревающего действия пара или электрического тока, так как, согласно опытов, требуется весьма малое увеличение температуры для отделения прилипших глыб донного льда. Наконец, донный лед может служить причиной образования в реке зажоров со всеми опасными от них последствиями.

Ледоход как весенний, так и осенний представляет особо большие опасности и для судоходства и для всякого рода речных сооружений.

Быстрое движение тонких, но острых льдин при осеннем ледоходе представляет опасность в том отношении, что таким льдом быстро истираются поверхности деревянных частей, как, например, свай, деревянных обшивок судов и сооружений и т. п. В качестве мер для предохранения от таких истираний применяют обшивку железными листами, набивку широкошляпных гвоздей и проч. Весенний ледоход большими толстыми и крепкими льдинами способен разрушать сооружения в местах реки, где лед течением и ветром особенно сильно напирает и нагромождается. Судно, стоящее в таком месте, где оно не защищено от ледохода, может быть раздавлено, срезано пополам и вообще погублено. Поэтому еще до наступления осеннего ледохода необходимо отводить все суда в зимовочные гавани или иные места, естественно защищенные от ледохода, где они и остаются на всю зиму до минования весеннего ледохода. Постоянные сооружения, например мостовые опоры, постоянные пристани и т. п., снабжаются ледорезными частями или отдельно от них стоящими ледорезами, принимающими на себя удары льдин, разламывающие льдины и направляющие их в сторону. Полезно до вскрытия льда сделать выше сооружения проруби в ледяном покрове для разделения его на мелкие части. Но самым главным условием для предохранения сооружений от ледохода является правильное расположение сооружений, придание достаточных отверстий для пропуска ледохода, причем нередко встречается надобность и в общем регулировании реки на некотором протяжении помощью выправительных сооружений.

Ледяные зажоры или, как их иногда называют, *заторы* составляют особо грозные явления на реках. Если по каким-либо причинам лед встречает местное препятствие своему движению во время ледохода, то ледяные массы скопляются, останавливаются и, загромождая в данном месте всю

ширину реки, преграждают путь для свободного прохода льдин. Подходящие льдины, под влиянием скорости своего движения и напора сзади идущих льдин, взгромождаются одна на другую, причем ледяная масса постепенно увеличивается в глубину реки и над ее поверхностью. В результате все живое сечение реки до ее дна может оказаться забитым льдом, который к тому же смерзается. Образовавшаяся таким образом ледяная плотина во всю ширину реки, занимающая иногда несколько километров по длине реки, преграждает течение воды и вызывает подпор ее в вышележащем участке реки, иногда значительный (до 2 — 4 и более метр.), при чем происходит наводнение прибрежных местностей. Если зажор образовался на участке реки, имеющем высокие и крутые берега, состоящие из твердых пород, то увеличение подпора продолжается до тех пор, пока силой давления воды и огромными скоростями течения, пробивающегося в порах ледяного заграждения и по верху его, начнутся прорывы плотины. В таком случае вода вместе с льдинами устремляется вниз по течению и может производить разрушительное действие на пути своего движения. Если на месте образовавшегося зажора берега не высоки, а грунт дна и берегов реки мягкий, то вода, поднявшись на известную высоту, размывает дно реки и, обходя зажор по прилегающим прибрежным местам, размывает там для себя глубокие и широкие протоки, вынося размытый грунт и складывая его в русле реки.

Зажоры могут происходит как от свойств русла, так и от причин случайного характера. Все те условия речного русла, которые вызывают затруднения для ледохода и скопления льда, могут в более неблагоприятных случаях служить причиной образования зажора. Таковы, например, крутые извилины реки, засорения русла обвалами берегов, отмели, местные с'ужения реки, пороги и т. п. Образованию зажоров благоприятствуют условия вскрытия северных рек, текущих с юга на север, на которых вода глубоко промерзает, иногда до самого дна. Ледяные зажоры могут являться как последствия неудачного расположения возводимых в реке искусственных сооружений; недостаточная ширина пролетов между мостовыми опорами, выдвинутые далеко в реку дамбы и всякие другие не соображенные с силой и условиями ледохода сооружения, вызывая скопление льда, могут стать причиной образования более или менее значительных зажоров. Мерой устранения образования зажоров от неблагоприятных естественных условий речного русла и течения служит регулирование реки и устранение препятствий для свободного движения льда. В случаях же образования зажора меры, которые применяются для устранения или смягчения опасных его последствий, носят паллиативный характер и сравнительно редко достигают своей цели. С этою целью иногда производят в начале образования зажора взрывы ледяной массы динамитом или другими взрывчатыми составами; полезных результатов иногда достигает работа крепких пароходов, которые снизу образующегося зажора врезываются на ходу в ледяную массу, отделяя тем самым ее куски для постепенной разломки зажора; конечно, такая работа возможна при сравнительно еще небольшом подпоре воды, иначе она становится опасной для самих пароходов.

ГЛАВА II.

РУСЛО РЕКИ И ЕГО ДЕФОРМАЦИИ.

§ 8. Общие понятия о речном русле.

Речная вода, прокладывая свой путь по самым пониженным местам долины (ее тальвегу), занимает при обыкновенном состоянии сравнительно небольшую часть долины, являющуюся постоянным ложем текущей воды, которое мы называем *руслом* реки. Если русло заключено между высокими и крутыми берегами, то при наступлении паводков и половодия живое сечение реки по мере под'ема уровня воды увеличивается более или менее равномерно без резких изменений общей формы своего очертания. В равнинной местности чаще, однако, бывает, что один или оба берега настолько невысоки, что при под'еме воды она выходит из берегов, резко увеличивая ширину реки. При этом в некоторых местах вода затопляет низкие прибрежные местности на большие пространства, образуя так называемые *разливы*. Условия течения реки в том и другом случае во многом отличны. Поэтому, для таких участков реки следует различать два понятия о русле: *русло меженних вод* (меженнее русло) и *русло высоких вод*. Различие между ними весьма существенно. Первое составляет только часть второго. Оно всегда находится под водою, текущая вода действует на него непрерывно, а потому меженнее русло подвергается постоянно более или менее сильным изменениям. При высоких водах течение сосредоточивается главным образом тоже над меженним руслом; на разливах скорости течения малы, а в некоторых местах образуются площади стоячей воды (*поймы*). После спада воды в местах разливов земля обнажается и заростает травой; временное затопление не препятствует росту здесь кустарников и даже деревьев; всякая же растительность способствует укреплению почвы в отношении ее сопротивляемости размывам. Поэтому высокие воды тоже оказывают наибольшее влияние на меженнее русло, а в местах разливов происходят менее значительные размывы и наносы.

Меженнее русло реки состоит, обыкновенно, из наносных отложений более или менее значительной толщины. Воды атмосферных осадков, стекая по склонам гор, долин и оврагов, уносят в реку продукты разрушения горных пород и другие твердые частицы грунта с поверхности земли. Вода, текущая в реке, встречает на своем пути грунты неодинакового качества, в боль-

шей или меньшей степени подверженные размыву. Под действием силы текущей воды происходит размыв русла и берегов в тех местах, где грунт не может сопротивляться действующему на него течению. Размывая грунт и перенося продукты размыва, река складывает их в других местах своего русла, где условия течения тому благоприятствуют. Притоки реки тоже несут в нее свои наносы, которые отлагаются в русле реки.

Крупность частиц грунта, из которых состоят наносные отложения русла реки, не одинакова в разных местах по ее длине. В верховьях реки, вытекающей с гор, в реку сносятся более или менее крупные куски разрушенных твердых пород в виде камней, гальки и гравия; из них и состоит здесь ложе реки на довольно значительную глубину. Находясь в русле реки, эти частицы под действием быстрого течения приходят в движение. Крупные камни истираются друг о друга, раздробляются, сглаживают свою поверхность и постепенно перемещаются вниз по течению. Передвигая такие частицы и на пути измельчая их, а также обогащаясь более мелкими продуктами размыва в средней части своего течения и выносами из притоков тоже измельченных частиц, река приносит в свои низовья только мельчайшие частицы, где образуются мелкопесчаные, а также илистые наносные отложения. Из таких же легко размываемых грунтов состоят здесь и нижние слои дна реки, образовавшиеся из древних наносных отложений.

§ 9. Очертание берегов.

Обращаясь к естественным формам речного русла, следует заметить, что разработка речного русла и его постоянные деформации происходят вследствие размыва дна и берегов реки и перемещения продуктов размыва в другие места русла. При этом на общий характер речного русла большое влияние имеют топографические и геологические условия местности, где течет река. В скалистых горных участках реки очертание русла в плане зависит больше всего от рельефа тальвега, в котором оно расположено. Чем тальвег менее разработан, тем неправильнее русло реки. Подчиняясь изгибам тальвега, русло в плане то вытягивается в прямую линию, то круто и часто меняет свои направления, обращая их в зигзагообразный вид. Следуя формам тальвега и встречая преграды течению или, напротив, крутые и отвесные уступы дна, река то разливается в ширину, образуя озера со слабыми поверхностными уклонами воды, то суживается между близко сходящимися скалистыми берегами и обращается в стремнины и водопады. В более же ровных местах, где топографические и почвенные условия позволяют реке свободно разрабатывать свое русло в мягких грунтах, русло приобретает в плане змеевидные очертания с плавными переходами из одной извилины в другую.

Каждая вообще река стремится придать своему руслу извилистое очертание в плане. Извилистость реки есть следствие естественной разработки русла, и потому она не может осуществиться только в тех случаях, когда твердые породы дна и берегов реки не поддаются размывам. Если же берега

и дно реки состоят из грунтов, поддающихся размыву, то всякое обстоятельство, как, например, впадение притока, местное повышение дна, неодинаковые в смысле размыва качества почвы в разных местах дна и т. п., может отклонить течение, направив его к одному из берегов. Встречая берег, сосредоточенное течение может начать размывать берег (*b*) и, отклонясь к другому берегу (*d*), производить на него подобное же действие. Это явление иногда об'ясняют отражением течения (рис. 17). В действительности, происходит не отражение, а отклонение течения под влиянием вогнутого очертания размытого берега и прилежащей к нему вымоины в дне реки; кроме того, происходят перемещения частиц грунта от вогнутого берега к противоположному, где складываются наносы, образуя выпуклость берега, как это пояснено далее. Во всяком случае, в результате получаются вогнутости последовательно то на одном, то на другом берегу. На противоположных вогнутостям местах русла происходит складывание наносов (*a*, *c*, *e*), образующих выпуклости берега. Таким образом, на каждом берегу образовавшиеся вогнутости и выпуклости чередуются друг с другом, сопрягаясь в пологие криволинейные очертания берега, причем русло реки приобретает в плане змеевидную форму. Центробежная сила текущей воды

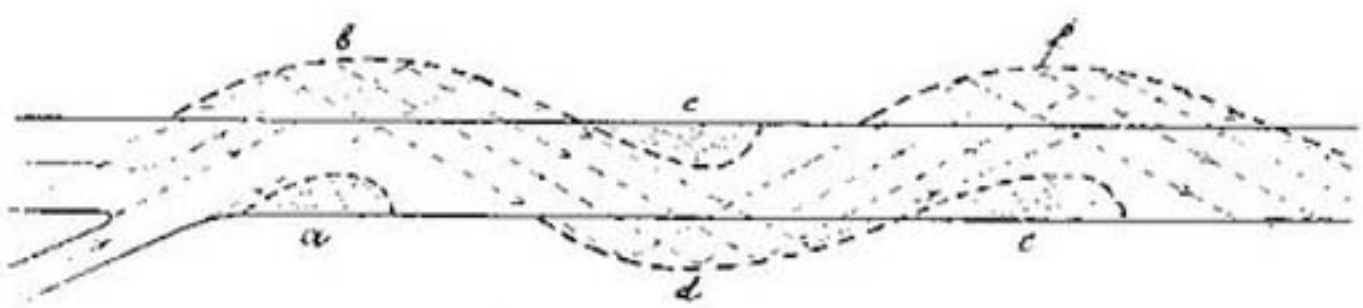


Рис. 17. Извилины реки.

по извилистому руслу способствует дальнейшему размыву вогнутых берегов и развитию извилин русла. Однако, происходить беспредельно такое развитие извилин не может. Развитие извилин задерживают или встечающиеся естественные препятствия, например при достижении извилиной более твердых пород берега, или же то обстоятельство, что по мере развития извилин река увеличивает свою длину, последствием чего является уменьшение уклона реки, а, следовательно, и скорости течения, которая может оказаться недостаточной для дальнейших размывов вогнутых берегов. Поэтому бо́льшая или меньшая извилистость реки в значительной степени зависит от геологических и топографических условий местности. При более твердых грунтах и крутых берегах извилистость реки меньше; между тем как в широких долинах с низменным плоским дном, состоящим из мягких наносов ила и мелкого песка, река, свободно разрабатывая свое русло, приобретает особо сильную извилистость. Замечательным примером в этом отношении могут служить некоторые венгерские реки (Тисса, Драва, Сава и др.), текущие по низкой обширной равнине наносного происхождения: река Тисса в долине, простирающейся по прямому направлению всего на 560 *км.*, развивает извилинами свою длину на 1.180 *км.*, т. е. более чем в два раза.

При разработке извилин наибольшие размывы вогнутого берега происходят не посредине длины вогнутой кривой, а несколько ниже (по течению) середины ее. Поэтому результатом каждого нового размыва берега является как бы передвижение вершины вогнутого берега вниз по течению. Равным образом вершина нарастаемой выпуклости противоположного берега образуется тоже ниже середины выпуклой кривой линии. В результате вершины кривизны того и другого берега постепенно переходят вниз по течению, как показано на рис. 18-ом из положения s в положение s_1, и таким образом происходит как бы продольное перемещение всего русла вниз по течению реки. По прошествии продолжительного периода времени перемещение извилины может произойти на всю длину ее полуволны. Последствием сего явится такое положение русла, что в некоторых местах долины русло отойдет от одной из ее сторон к противоположной стороне, в других

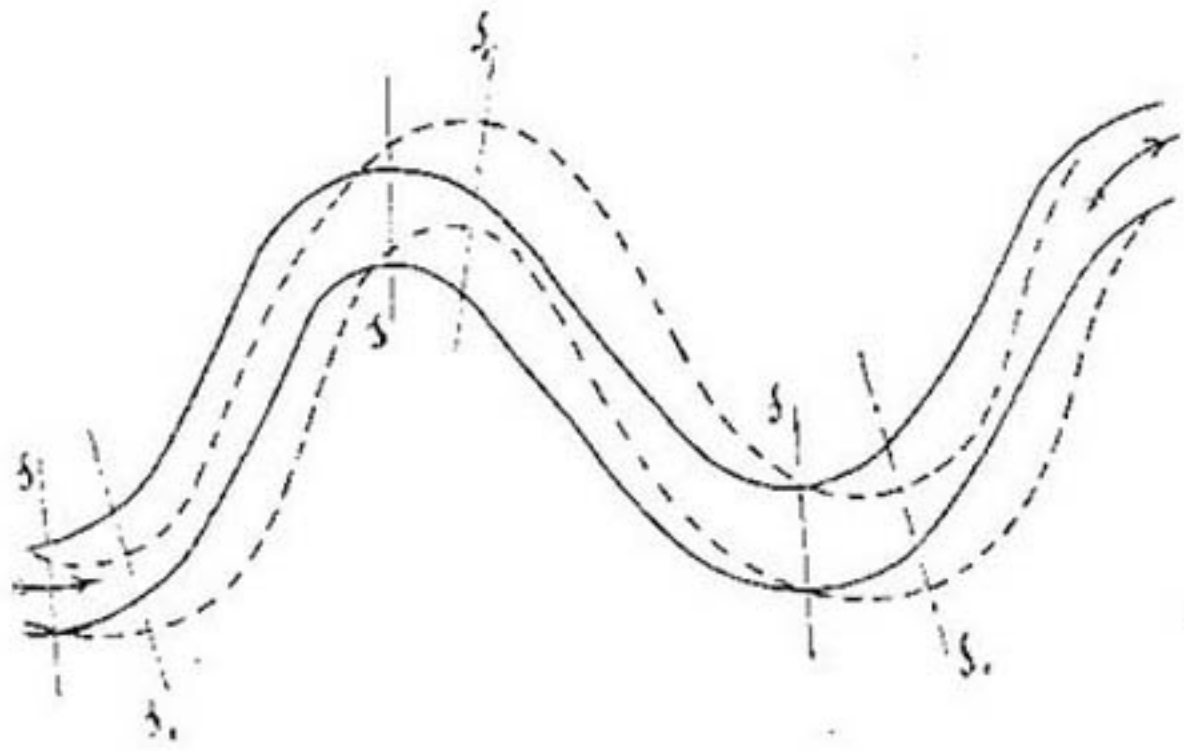


Рис. 18. Продольное перемещение русла.

местах окажется обратное явление. С дальнейшим течением времени может начаться постепенное возвращение русла к прежним его положениям у данных пунктов берегов долины. Для таких перемещений русла требуются очень длинные промежутки времени. Но явления отхода или приближения русла в данном месте долины констатируются нередко даже по отношению больших рек, если, конечно, точные сведения о положениях реки сохранились за долгий период времени.

§ 10. Разделение на рукава.

Если река, достигнувши известной степени извилистости в плане, не может более развивать свои извилины по причине, например, встречи более твердых пород грунта или вследствие искусственного закрепления берегов помощью берегоукрепительных одежд, то меженнее русло может на долгое время сохранить свое расположение в плане. В противном случае, извилины все более и более развиваются до предела, когда уменьшающиеся вместе с увеличением длины русла поверхностные уклоны станут недостаточными для сообщения потоку энергии,

нужной для размыва русла. Однако, и ранее достижения сего предела могут происходить такие явления, благодаря которым меженнее русло получает новые направления. Если, например, река течет в низменной плоской долине, развивая в ней свои извилины (рис. 19), то в период высоких вод

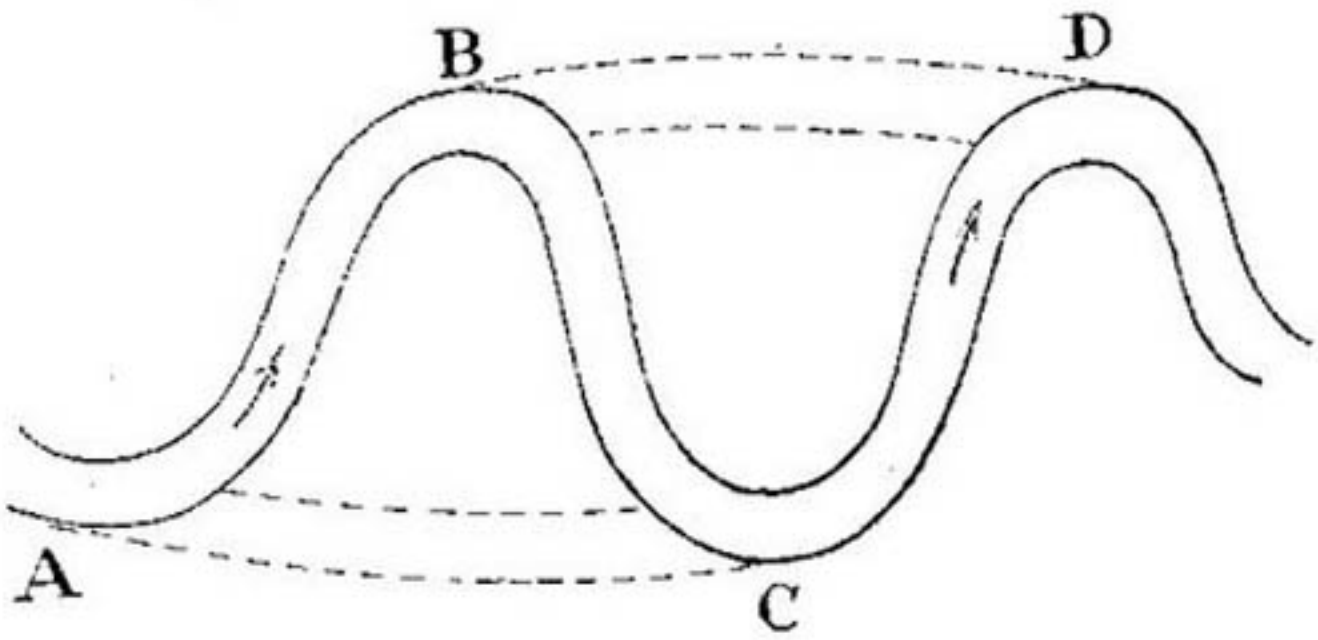


Рис. 19. Разделение на рукава размывом в излучине реки.

течение, стремясь к направлению наименьших сопротивлений и наибольших падений, размоет новое меженнее русло *AC*. Таким образом, произойдет разделение меженнего русла на два *рукава ABC* и *AC*, между которыми образуется остров. Такое же явление может впоследствии произойти и по

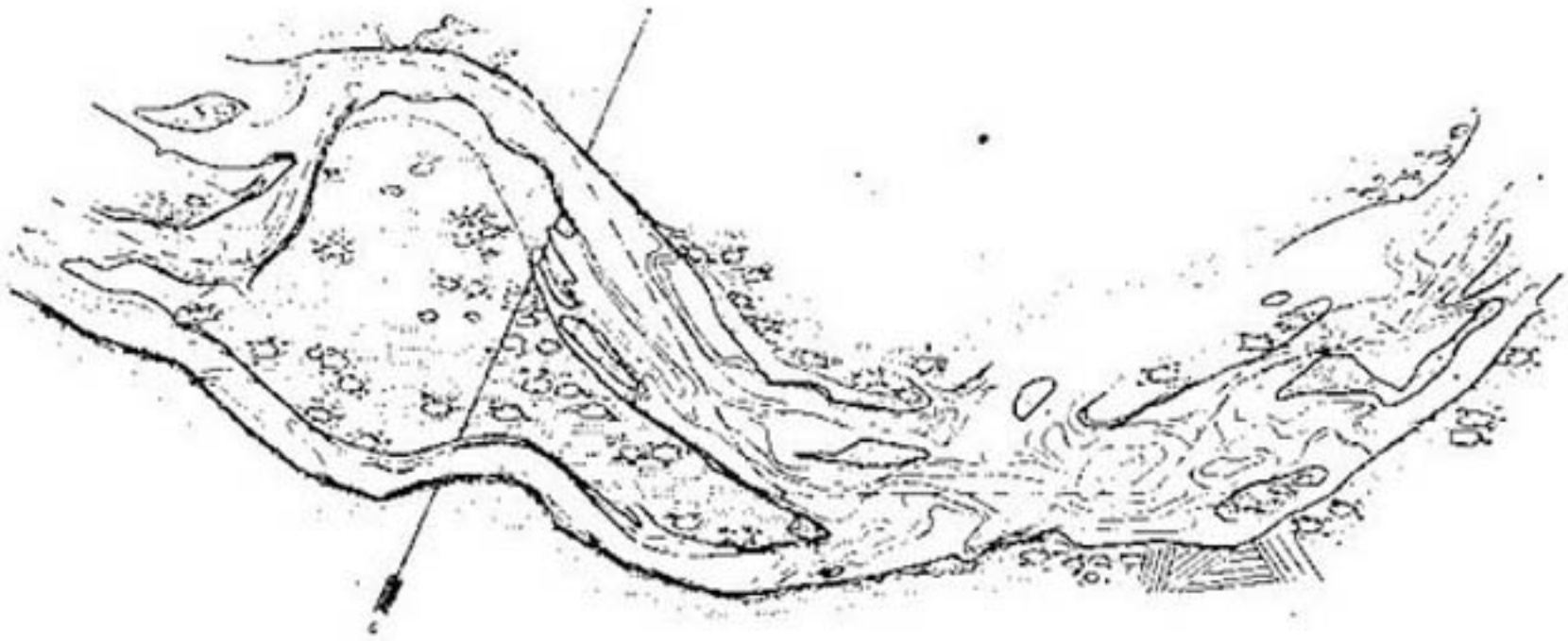


Рис. 20. Участок реки с образовавшимися рукавами.

линии *BD*. Распределяя свой расход воды по нескольким рукавам, река теряет значительную часть своей энергии. Впоследствии может оказаться, что естественно поддерживаться будут только некоторые рукава, а другие станут обмелевать и заболачиваться, образуя так называемые *староречия*, или же ни один из рукавов данного места реки не сохранит качеств устойчивого русла (рис. 20).

На реках или отдельных участках, где река вырабатывала свое русло в более твердых грунтах, тоже встречается разделение реки на рукава.

В этих случаях причиной образования рукавов чаще всего бывает неоднородность грунта в смысле сопротивления его размывающему действию течения. В местах, не поддающихся размыву (рис. 21), образуются выступы дна в виде островов, имеющих более или менее значительные размеры в длину, ширину и высоту, разделяющих русло реки на рукава. Такие рукава мало меняют свои очертания в плане даже в течение очень длитель-

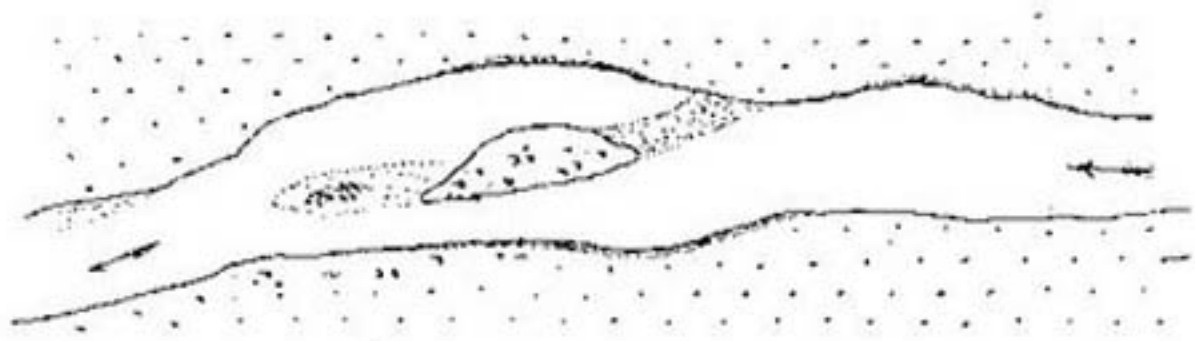


Рис. 21. Образование рукавов при твердых грунтах.

ного периода времени. Но, вследствие ослабления энергии воды, разделившейся на рукава, нередко образуются в концах островов песчаные отмели из откладывающихся наносов, которые удлиняют рукава, влияя и на форму их как в плане, так и поперечных профилях.

§ 11. Зависимость между очертаниями берегов и формой дна русла.

При однородном мягком грунте, позволяющим реке свободно разрабатывать русло, наблюдается некоторая закономерность в отношении очертания берегов и форм дна ее русла. Как вогнутый, так и выпуклый берег имеют каждый неодинаковую крутизну изгиба в пределах извилины реки. Начинаясь с прямолинейного очертания в переходах из одной извилины в другую, берег постепенно увеличивает крутизну своего криволинейного очертания к некоторой точке, лежащей несколько ниже по течению от середины извилины, где кривизна наибольшая, а затем она снова постепенно уменьшается до прямолинейного направления в месте перехода к следующей извилине реки. Таким образом, в пределах каждой извилины радиус кривизны берегов изменяется от бесконечности, в начале ее, до некоторой наименьшей своей величины в упомянутой точке, а засим опять постепенно возрастает до бесконечности в конце извилины.

Переход из одной извилины в другую реже бывает непосредственный. Чаще кривые линии очертания берега сопрягаются между собою помощью короткой прямолинейной вставки. На рисунке 22-ом показано, примерно, очертание берегов извилистого участка реки. Рельеф дна реки, при естественно образовавшемся русле в мягких грунтах, находится в некоторых соотношениях с очертанием русла в плане. Глубины дна неодинаковы как в поперечных, так и в продольных профилях русла. В том и другом направлениях дно представляет более или менее пологие поверхности от мест наибольших глубин к берегам и к местам возвышения дна. Места больших глубин (плесы) находятся в извилинах реки, где они располагаются в виде продолговатых вымоин, *ложбин дна,* около вогнутых берегов, причем

к противоположному выпуклому берегу дно поднимается пологими поверхностями (рис. 23). Поэтому в извилинах реки поперечная профиль русла приближается к треугольной форме. Чем круче извилина, тем обыкновенно глубже ложбина дна и ближе она прижимается к вогнутому берегу. Наибольшая глубина ложбины находится несколько впереди по течению от вер-

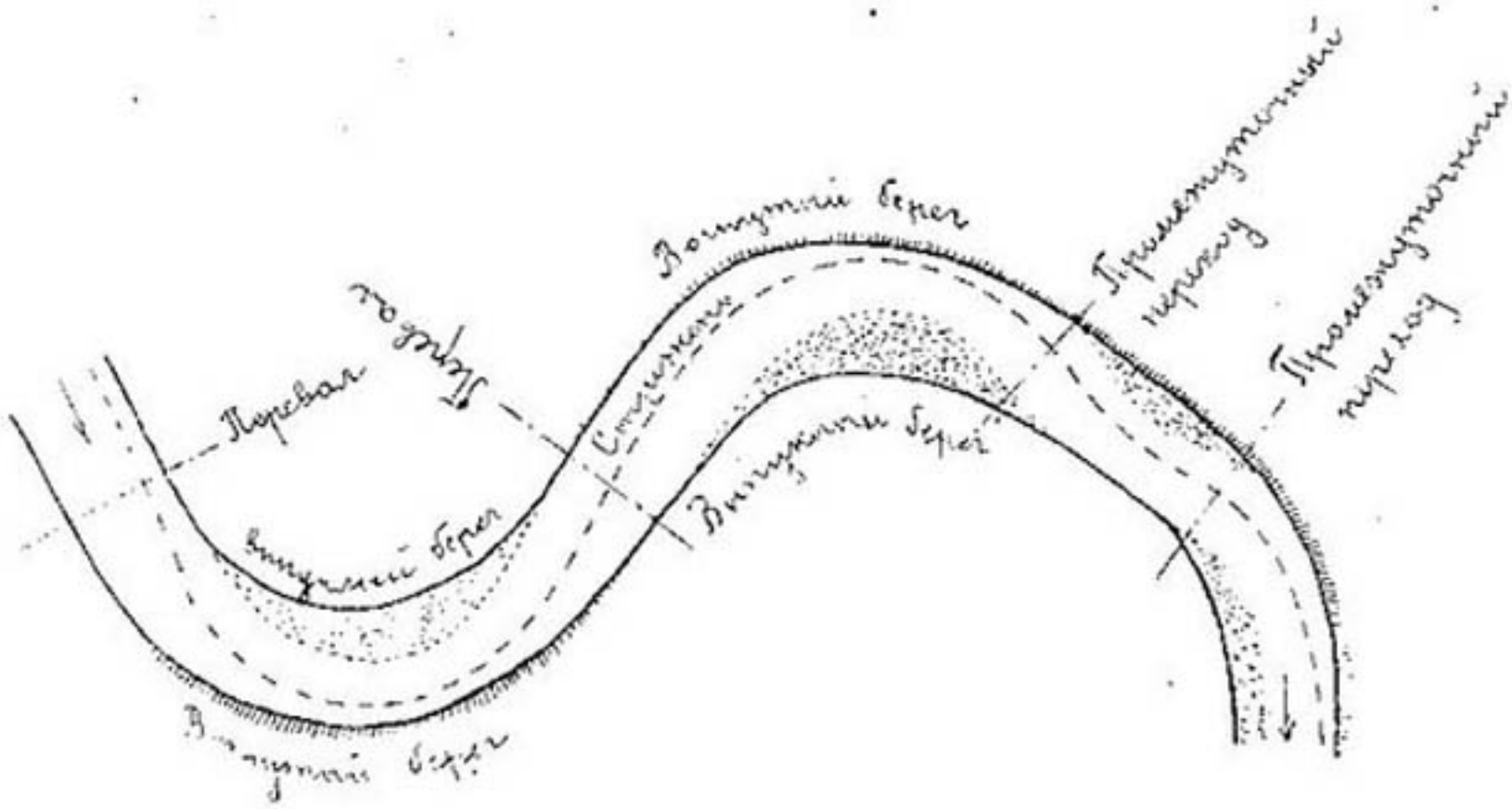


Рис. 22. Плесы и перевалы.

шины кривой вогнутого берега. По наблюдениям Фарга (см. стр. 95-ю) максимальная глубина находится ниже, по течению, вершины кривой вогнутого берега приблизительно на $^1/_5$ средней длины кривой, а наибольший выступ отмели противоположного выпуклого берега находится непосред-

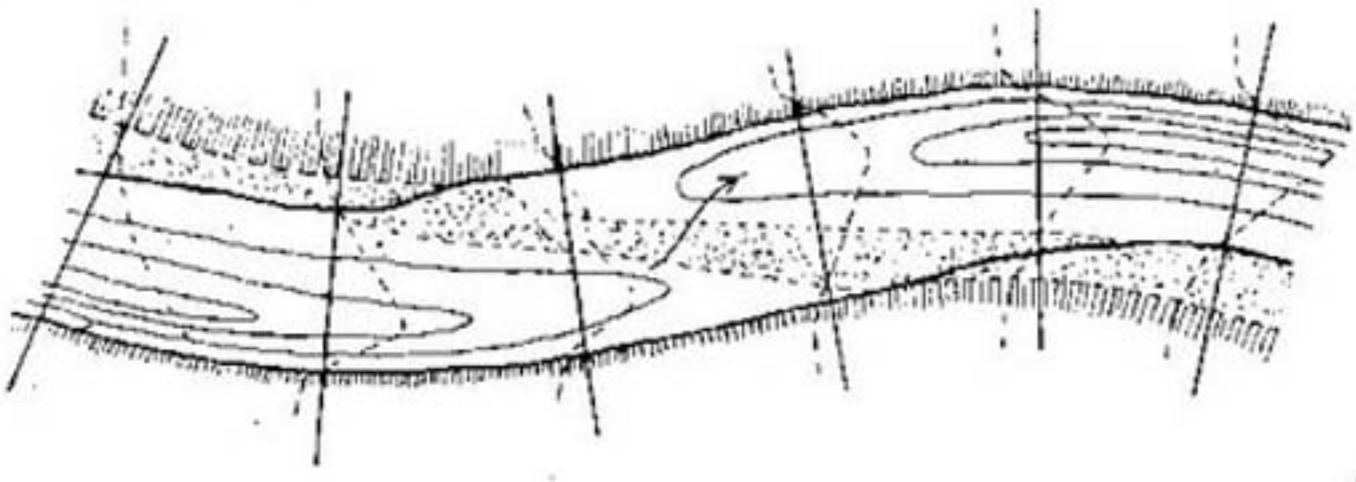


Рис. 23. Ложбины дна в плесах у вогнутых берегов и наносы на перевалах и около выпуклых берегов (на рисунке пунктиром показаны для разных мест реки живые сечения, совмещенные с плоскостью чертежа).

ственно ниже, по течению, вершины выпуклой кривой; глубина у вогнутого берега тем больше, чем больше кривизна в вершине кривой вогнутости. Глубина ложбины дна по мере приближения ее к месту перехода реки из одной извилины в соседнюю уменьшается. Места этих переходов представляют общие повышения дна во всю ширину русла. Линия наибольших глубин, стрежень реки, располагаясь в извилинах по направлению

ложбин вблизи вогнутых берегов, переходит на означенных сопряжениях соседних извилин от одного вогнутого берега к другому. Эти места переходов называются *перевалами*. Если возвышенное дно на перевале состоит из больших наносных легко подвижных отложений, то такие места получают название *перекатов*. На более длинных прямолинейных участках реки, представляющих обыкновенно также возвышение дна, стрежень, пройдя по такой вставке в направлениях, соответствующих сложной здесь конфигурации дна, вновь приближается к вогнутому берегу следующей извилины. Таким образом, в продольном профиле реки, по ее стрежню (рис. 24-b), дно реки представляет изгибающуюся линию соответственно чередующихся мест больших глубин в извилинах и возвышений дна на перевалах и на прямолинейных вставках, причем река является по своей длине как бы разделенной на участки этими местными возвышениями дна. Участки реки между такими возвышениями дна называются *плесами*. Следует заметить, что на судоходных реках наименование плес часто присваивается протяжению реки лишь между такими возвышениями дна или иными местами реки (пороги, заборы, водопады и пр.), которые представляют затруднения для судоходства.

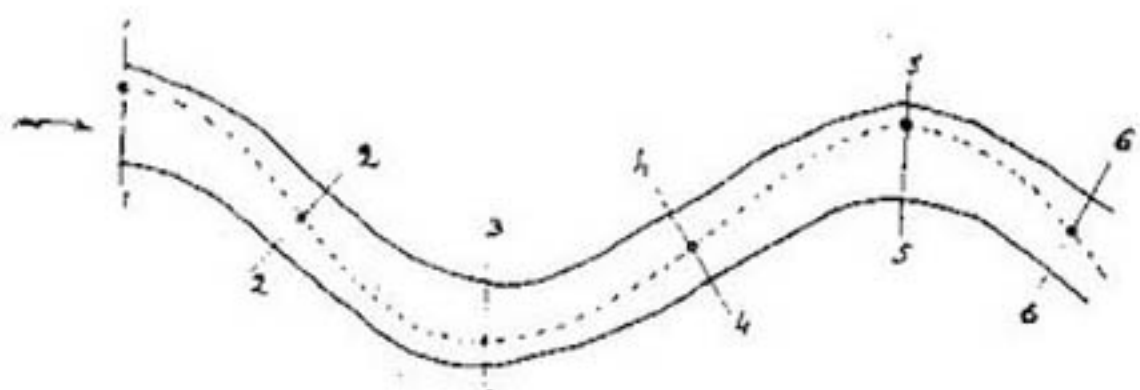


Рис. 24-a. План реки (пунктиром показан стрежень, номера профилей соответствуют рис. 24-b и c).

Продольный профиль поверхности воды находится в соотношении с продольным профилем дна реки (рис. 24-b). При меженнем состоянии реки возвышения дна реагируют на поверхность воды. Последняя принимает как бы ступенчатый вид с более слабыми уклонами на плесах и более крутыми уклонами на перевалах. Чем ниже уровень воды, тем отчетливее проявляется ступенчатая линия поверхности воды. По мере увеличения расхода воды и под'ема уровня, ступенчатый вид профиля поверхности воды несколько сглаживается, причем происходит обратное явление: на перевалах поверхностные уклоны уменьшаются, в плесах, наоборот, поверхностные уклоны становятся более крутыми.

Явления при деформации русла, состоящего из размываемых грунтов и наносных отложений, находятся в связи с теми периодическими изменениями, которые свойственны стоку речной воды. Как далее об'яснено, сила размыва и влечения наносов увеличивается с увеличением глубины и скорости течения, а, следовательно, расхода воды и поверхностного уклона. Поэтому работа реки по размыву русла и по складыванию наносов происходит главным образом в периоды половодия или сильных паводков; в это же время

речная вода наиболее обогащается и теми частицами грунта, которые сносятся в реку с поверхности речной долины.

При высоких водах, когда в плесах поверхностный уклон увеличивается, происходит наиболее энергичный размыв дна у вогнутых берегов плеса. Продукты размыва переносятся к перевалам, где глубина воды и

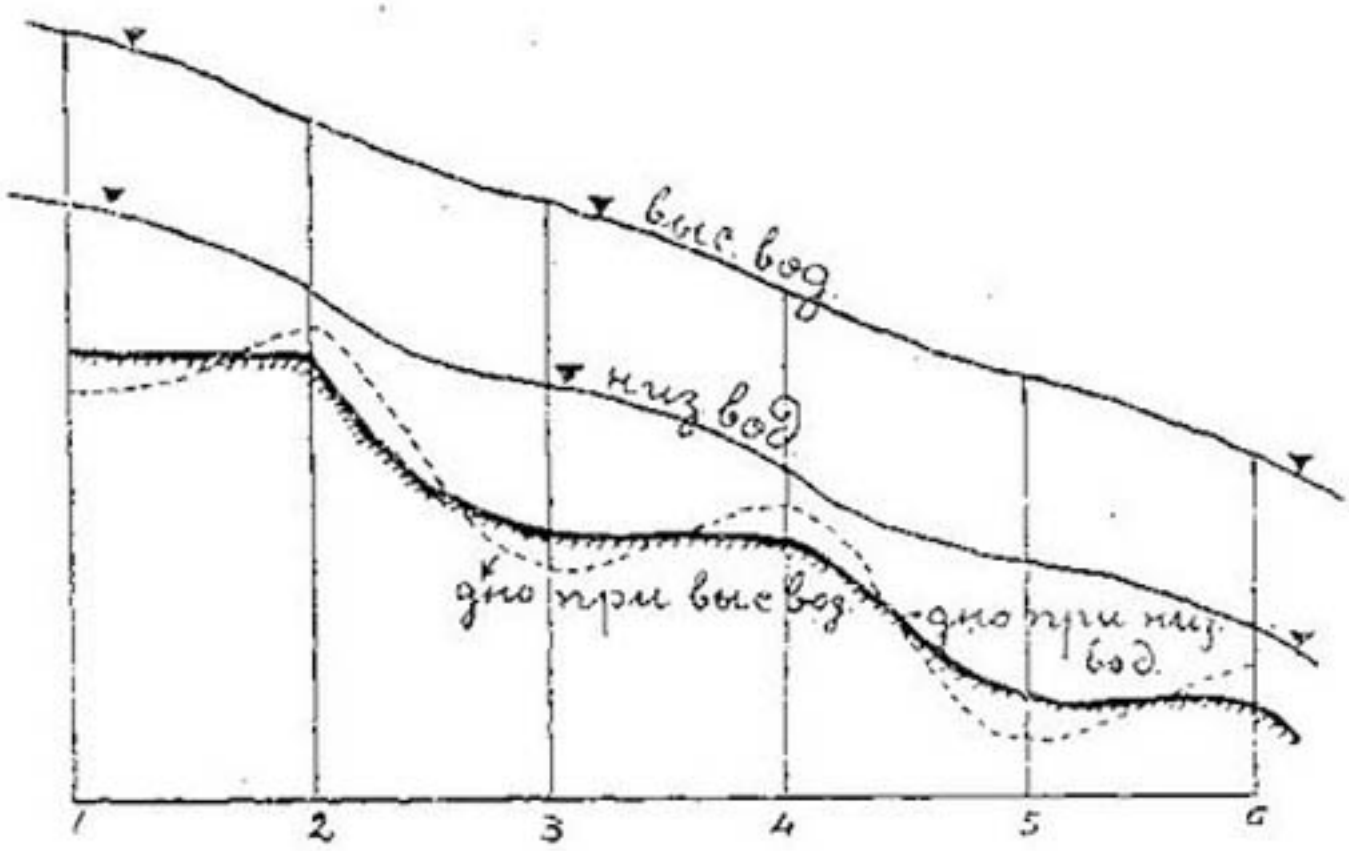


Рис. 24-b. Продольный профиль реки по стрежню.

поверхностные уклоны меньше; здесь наносы складываются при высоких водах. В межень, когда расход воды резко уменьшается, а уровень воды сильно понижается, происходят обратные явления. По мере спада воды

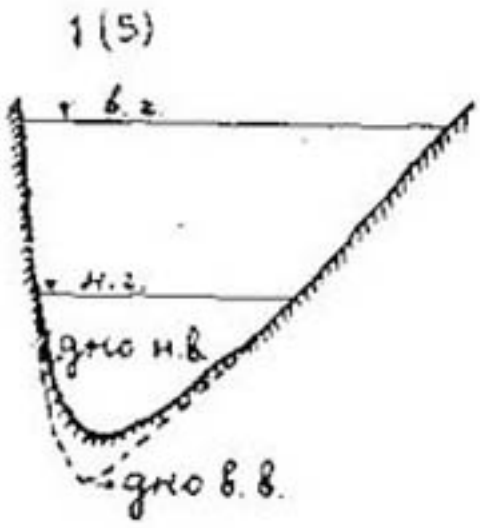


Рис. 24-c.

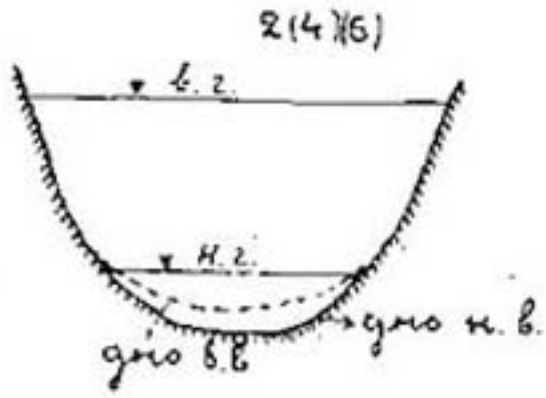


Рис. 24-d.

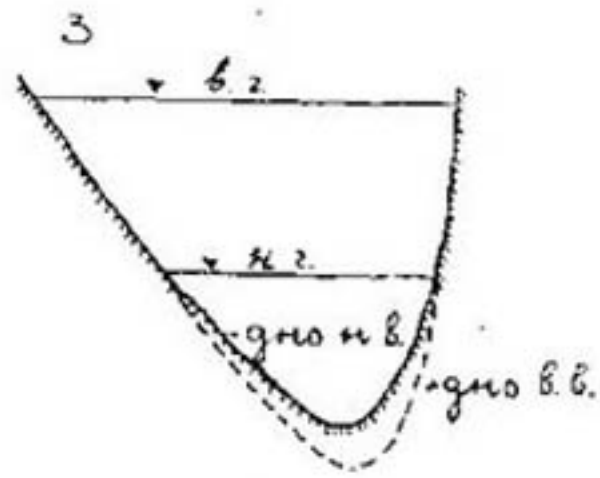


Рис. 24-e.

Поперечные профили в плесах и на перевалах.

возвышенное на перевале дно реки все более и более влияет на площадь живого сечения реки и, образуя как бы подводную плотину, вызывает подпор воды на вышележащем плесе. Вследствие сего уменьшаются в плесе поверхностные уклоны и скорость течения, размывы дна в плесе прекращаются и даже происходит отложение частиц, несомых водою, но так как в меженнее время река несет их сравнительно немного, то и отложение наносов в плесе не оказывает существенного влияния на уменьшение здесь

глубин дна. Вследствие того же подпора поверхностный уклон воды на перевале в меженнее время значительно увеличивается, а скорости течения в этих местах становятся уже настолько большими, что начинается размыв наносов, сложившихся на перевале при высокой воде. Но, так как в этих местах течение воды не сосредоточенное, а разбрасывается, то и размыв отмелей происходит неравномерно, образуя в одних местах промоины, а в других — еще большее наращение наносов.

На рисунке 24-ом показаны изменения в русле, происходящие при половодии или паводках и при меженнем состоянии реки. Рисунок 24-а изображает план участка реки, на коем нанесена линия стрежня и показаны номера поперечных профилей в плесах (№№ 1, 3 и 5) и на перевалах (№№ 2, 4 и 6). Рисунок 24-b изображает продольный профиль реки по стрежню с показанием поверхности воды в период межени (низкий горизонт) и при половодии (высокий горизонт), а также продольный профиль дна по стрежню, причем сплошной линией обозначено дно реки в межень, а пунктиром — при половодии. На рисунках 24-с и 24-е изображено очертание русла в поперечном сечении на плесах, а 24-d — на перевалах, причем также сплошная линия соответствует очертанию русла в межень, а пунктирная — при половодии. Из приведенных чертежей видно, что деформации русла и движение наносов происходят при постоянной смене следующих явлений. В период половодия поверхностные уклоны увеличиваются на плесах и уменьшаются на перевалах; значительные глубины у вогнутых берегов на плесах поддерживаются течением или еще увеличиваются, наносы смываются и переносятся к перевалам, где они складываются, возвышая дно. В меженнее время поверхностные уклоны становятся меньшими на плесах и увеличиваются на перевалах: находящиеся на перевалах наносы несколько размываются, часть наносов продвигается в плесы, где с новым половодием наносы вновь смываются и относятся далее. Продвижение наносов вдоль реки к ее устью происходит как бы этапами, главным образом, в периоды высоких вод.

Образование наносных отложений в русле реки и их передвижение представляется в простейших случаях обыкновенно в следующем виде (рис. 23). Отложения наносов начинаются еще в извилинах реки у выпуклых берегов; от образовавшихся здесь отмелей отделяются в реку песчаные косы, наростающие в длину по косому направлению вниз по течению к противоположному выпуклому берегу следующей извилины на встречу косе, тоже нарастающей от отмели выпуклого берега по косому направлению вверх по течению. Результатом соединения двух таких кос противоположных берегов является как бы широкий песчаный порог (*перемея*), пересекающий русло по косому направлению. Это и есть те места малых глубин, которыми на некоторых реках можно пользоваться для перехода с одного берега на другой, так называемые *броды*, всегда расположенные в реке по косому направлению. В некоторых случаях обе косы, постепенно смываясь в своих верховых (по течению) частях и наращиваясь в низовых, как бы продвигаются далее вниз по течению и, достигая плеса, уменьшают глубину в нем.

Перекаты. Как сказано выше, на некоторых участках реки, где размывы дна и отложения наносов происходят особенно интенсивно, наносы скопляются в больших количествах, сильно поднимая дно и распространяясь во всю ширину реки на значительную длину. Таким местам обыкновенно и присваивают название *переката* (рис. 25). Форма наносов бывает здесь весьма сложная и разнообразная. Иногда образуется на перекате несколько гребней. Под влиянием размывов гребни иногда перемещаются вниз по течению и постепенно смываются, но взамен их появляются с верховой стороны новые нарастания кос и гребней и, таким образом, на некоторых перекатах наблюдается как бы цикл перемещения переката в определенных по длине

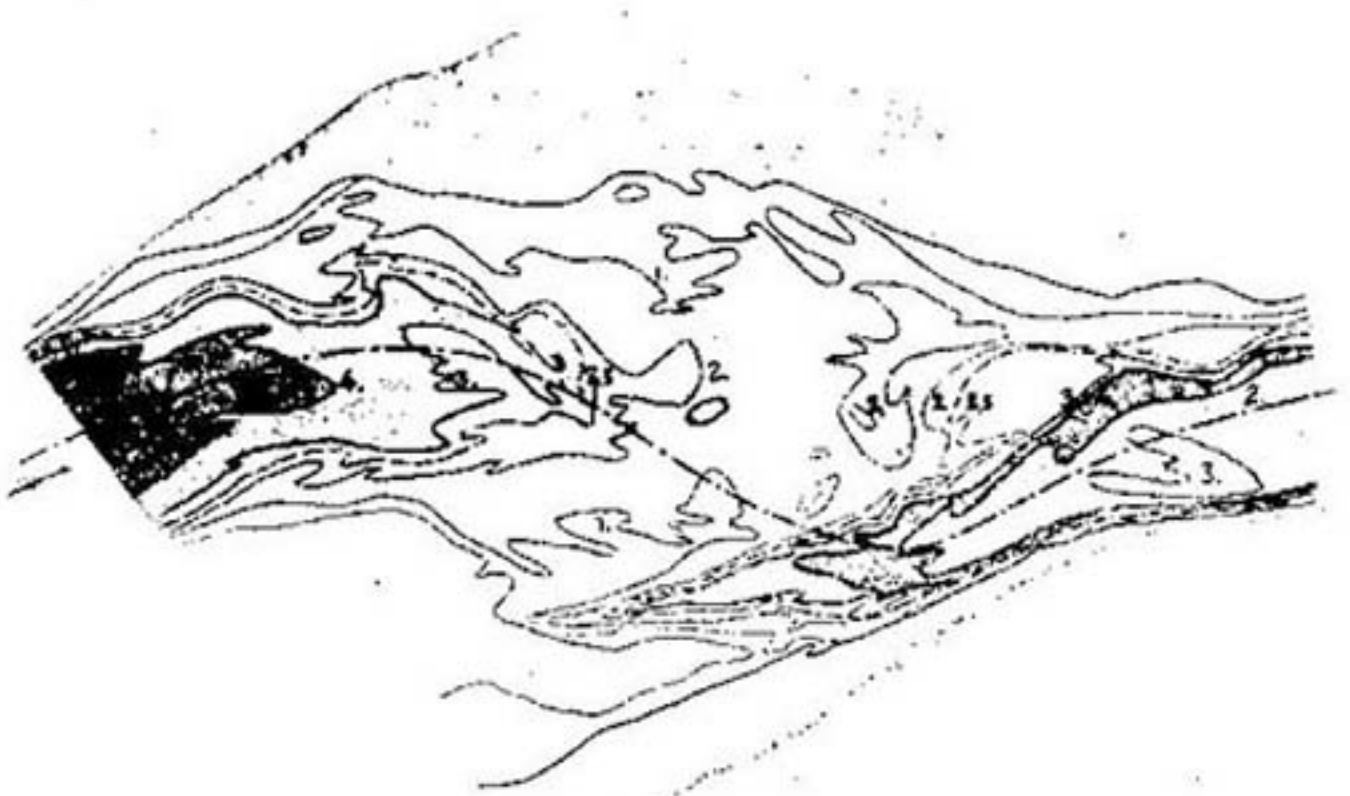


Рис. 25. Рельеф дна на одном из волжских перекатов.

границах, занимающий несколько лет. Образованию больших перекатов способствуют разные аномалии речного русла, в особенности же такие, при которых верхняя часть русла весьма расширяет живое сечение реки при высоких водах. В этих местах скорость течения высоких вод резко уменьшается и наносы складываются здесь особенно энергично. Такими местами являются, например, сильные местные расширения русла, разделения русла на рукава, места слияния реки с большими притоками, где под влиянием выноса из притока наносов, так называемых *высыпок,* меженнее течение прижимается к противоположному берегу и сильно разрабатывает русло в ширину. Местное сильное сближение между собою высоких берегов тоже оказывает влияние на образование перекатов в вышележащем участке реки, так как такое сужение, стесняя проход полых вод, вызывает подпор воды на вышележащем протяжении реки, а, следовательно, уменьшение на нем поверхностного уклона и скоростей течения. Прямизна реки на большом протяжении тоже способствует образованию перекатов.

Вообще деформации русла проявляются не с одинаковой силой как в разных местах реки, так и в одном и том же месте в разные годы. На

некоторых реках большие перекаты располагаются группами, сосредоточиваясь в тех или иных частях реки по ее длине. В некоторые годы отдельные перекаты наращиваются очень сильно, в другие годы, напротив, рельеф переката мало изменяется. С течением времени перекаты и плесы могут продвигаться по течению так же, как продвигаются извилины реки. Однако, все подобные деформации русла совершаются лишь в определенных пределах длины реки между опорными ее местами. Такими опорами являются, например, места, где грунт дна и берегов не поддаются размывам, где сближаются материковые берега речной долины, где впадают крупные притоки и проч.

§ 12. Реки с устойчивым руслом и реки с неустойчивым (подвижным) руслом.

Вышеописанный рельеф дна с большими глубинами на плесах и возвышениями дна на перевалах, в общем сохраняющийся и при периодических деформациях русла, свойствен рекам, в которых по условиям речного течения и по грунтовым качествам ложа реки достигается во время меженнего состояния в известных пределах равновесие между смывающей силой речного течения и сопротивлением русла. Такие реки называют реками *с устойчивым руслом*. Но имеются реки или участки реки, где поверхностные уклоны так велики, а русло состоит из столь подвижных частиц грунта, что как при высокой воде, так и в меженнее время равновесие между означенными силами нарушено по всей площади ложа реки и движение частиц грунта речного русла происходит повсеместно и беспорядочно. Такие реки еще не закончили выработки своего русла до соответствия падений реки свойствам грунтов, в которых она прокладывает свой путь, и этот процесс с постепенным, хотя и очень медленным понижением русла еще продолжается. На такой реке все русло представляет собою сплошное засорение наносами, постоянно размываемое и перемещаемое несоразмерно большою скоростью течения. Река принимает вид блуждающего потока с однообразным уклоном и неопределенною, постоянно меняющеюся на тех или других местах глубиною. В реке подобного рода не может быть ни устойчивых плесов, ни отдельных устойчивых перекатов. Такие реки называют реками *с неустойчивым, или подвижным, руслом* [1]).

В общем, отличительные свойства устойчивого и неустойчивого русла сводятся к следующему. В устойчивом русле нарушение равновесия между силой действия воды на русло и сопротивлением последнего имеет место только в период высоких вод; в неустойчивом русле нарушение равновесия происходит непрерывно. В устойчивом русле река течет на наносном своем ложе, в неустойчивом — на постоянно понижающемся дне. В устойчивом русле перемещения вниз по течению реки испытывают лишь те частицы грунта, которые образуют верхние слои дна русла, причем они переме-

---

[1]) Различие рек в отношении степени устойчивости их русла установлено инженером В. М. Лохтиным в его сочинении „О механизме речного русла".

ищаются только в ограниченный период высоких вод и на короткие протяжения, а в остальное время сохраняют свое место, так что продвижение сих частиц до устья реки требует очень продолжительного времени. Между тем при неустойчивом русле все частицы грунта, способные приходить в движение, перемещаются непрерывно по всему участку, причем, совершая длинный путь и находясь в постоянном движении, частицы эти постепенно размельчаются и истираются.

Неустойчивым может быть русло при разных качествах его наносного грунта: свойствами неустойчивого русла могут обладать как реки с мелкопесчаным руслом, так и реки, дно которых состоит из наносов крупных частиц — гравия, гальки и т. п., если падения в реке и скорости течения так велики, что движение наносов происходит непрерывно.

Одним из ярких примеров реки с неустойчивым руслом является река Висла, в некоторых ее частях. Вообще русло этой реки почти на всем протяжении состоит из чрезвычайно подвижного песка. После каждого паводка конфигурация русла меняется. На некоторых участках мели образуются у берегов, иногда в виде осередков по середине реки, иногда загра-

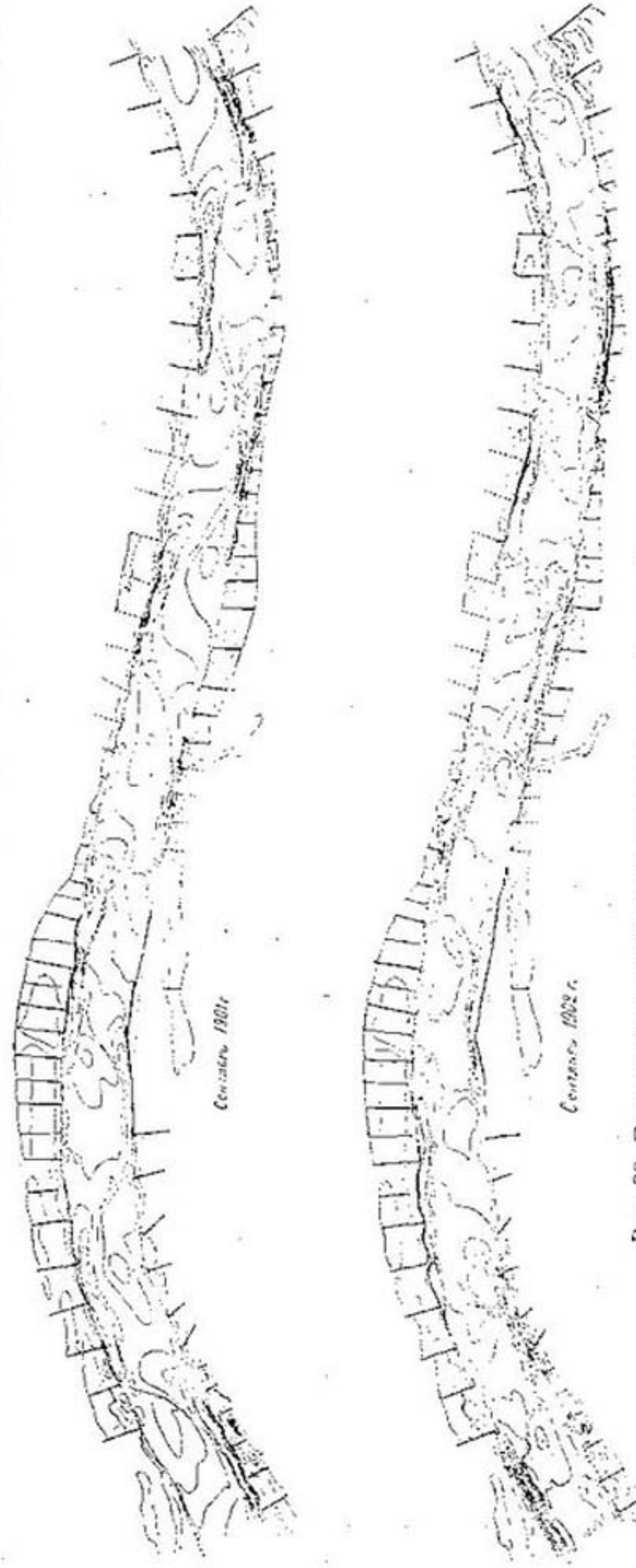


Рис. 26. Перемещения прибрежных наносов и мелей на р. Висле.

ждают русло в виде поперечной гряды. Деформации русла происходят и при меженних уровнях воды, выражаясь обыкновенно передвижением отдельных отмелей, тогда как при высокой воде иногда все русло приходит в движение. При низкой воде течение сосредоточивается узким потоком, образующим глубокие промоины. Рисунок № 26 (*a* и *b*) представляет участок реки Вислы между 140 и 148 *км*. На рисунках *a* и *b* показано расположение прибрежных мелей в сентябре 1901 г. и сентябре 1902 года; в течение одного года каждая мель передвигалась вниз по течению почти на полную свою длину; соответственно перемещается и меженний стрежень реки. Такие же явления на этом участке реки происходили более или менее регулярно и в другие годы. Ложе реки как бы целиком перемещается вниз по течению.

Крайне неустойчивое русло имеют горные участки некоторых рек. Вследствие очень крутых уклонов при каждом паводке приходит в движение все наносное ложе потока, состоящее из крупных частиц горных

Рис. 27. Участок р. Рейна вблизи г. Базеля.

пород. При прозрачной воде можно видеть движение русла. Движение иногда происходит толстым слоем наносного дна, состоящего из крупного гравия и гальки, так что, например, забитые в такой слой сваи нередко сдвигаются при паводке вниз по течению на некоторое расстояние от прежнего своего места. Особый вид принимает русло горной реки, если она не стеснена узким и глубоким тальвегом, а может свободно развиваться широкой полосой, состоящей из мощных слоев гальки и крупного гравия. Видимый поток прокладывает себе путь по многочисленным, переплетенным между собою рукавам и протокам, между которыми образуются невысокие острова, самых разнообразных очертаний (рис. 27). Ни один из рукавов не обладает такою устойчивостью, чтобы мог считаться коренным руслом. При паводках некоторые рукава заносятся, другие разрабатываются или образуются новые рукава. Значительная часть воды течет в толще слоев гальки, а потому иногда трудно определить даже, где собственно русло и где берега его; не может быть, конечно, и речи о сколько-нибудь типичных формах такого русла в его поперечных профилях.

§ 13. Блуждающие мели (косы).

Как выше сказано, на извилистых участках реки наносы перемещаются при высокой воде, пересекая стрежень реки от вогнутости одного берега к нижележащей вогнутости противоположного берега. Только на извилистых участках реки и если берега меженнего их русла естественно прочны или искусственно закреплены, стрежень меженнего русла может постоянно сохранять свое место, причем на его переходах от одной вогнутости к другой меженнее течение углубляет те подводные косы, которыми во время паводков соединяются песчаные отмели выпуклых берегов. На участках же прямолинейных или со слабой кривизной означенная устойчивость стрежня, подобно тому как на реках с подвижным руслом, отсутствует также в тех случаях, когда берега реки закреплены. И на этих участках стрежень извилист, но положение его неустойчиво, так как наносные отмели, между которыми он пролегает, не сохраняют места своего расположения.

Вообще рекам, влекущим наносы, свойственно, что на длинных прямолинейных или слабо изогнутых участках, с недостаточно сжатым меженним живым сечением, образуются подвижные отмели в виде песчаных холмов, обыкновенно выступающие выше уровня меженних вод (рис. 28-а и *b*). Эти отмели располагаются попеременно около правого и левого берега, причем

Рис. 28-а. План.

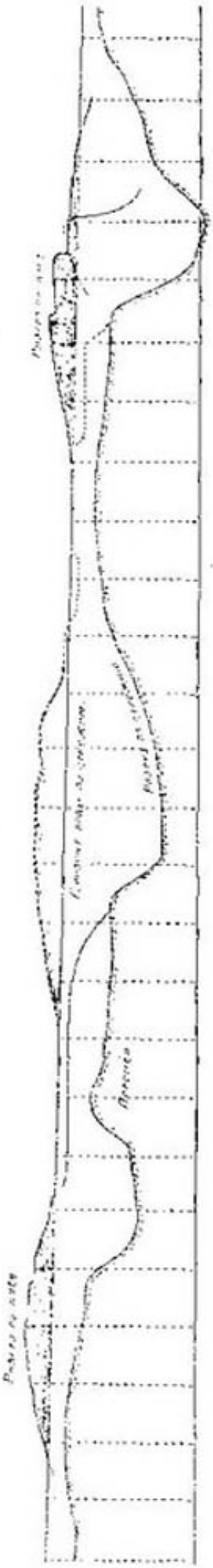


Рис. 28-в. Продольный разрез.

Рис. 28. Взаимное расположение подвижных кос.

они или примкнуты к берегу (*косы, побочни*), или отделены от берега узким протоком. В некоторых случаях отмели образуются и в средней, по ширине, части реки; они называются *осередками*. Отмель имеет в плане удлиненную форму, причем, обыкновенно, в верхнем по течению реки конце мели (в «приверхе») она имеет округленное очертание, а в нижнем конце (в «ухвостьи») она нередко разветвляется клещеобразно. С верхнего конца мель, в своем продольном профиле, поднимается пологим откосом, в нижнем же конце она спускается круто, образуя уступы, и засим переходит в более или менее глубокую ложбину дна, находящуюся вблизи того же берега. Соседние мели противоположных берегов в подводной своей части соединяются пологими откосами между собою в виде седловины, наиболее пониженная часть которой («корыто») обыкновенно находится ближе к середине ширины реки, где и проходит стрежень реки по корыту седловины, пересекая реку по косому направлению, иногда почти под прямым углом к общему направлению реки.

С течением времени отмели на обоих берегах постепенно передвигаются вниз по течению реки. При этом верхний по течению конец мели как бы смывается, а нижний — нарастает. Вместе с мелью перемещается находящаяся в нижнем конце ее глубокая ложбина дна. Причины образования и передвижения таких мелей (кос) еще недостаточно выяснены. Исследователи этих явлений на разных реках об'ясняют их различно: некоторые полагают, что частицы насосов, образующих эти отмели, влекутся вниз по течению, не пересекая реку, другие же, напротив, об'ясняют образование и перемещение означенных отмелей движением частиц наносов поперек реки подобно тому, как это происходит в устойчивых руслах.

Каждый раз после прохода высоких вод, когда отмели обнажаются, они оказываются несколько продвинувшимися вниз по течению. Обыкновенно отмели на обоих берегах передвигаются с более или менее одинаковой скоростью, так что стрежень реки, имеющий извилистое очертание соответственно положения отмелей правого и левого берегов, тоже перемещается вниз по течению, следуя перемещениям отмелей и сохраняя в новом своем месте очертание параллельное прежнему. Этим об'ясняются нередко наблюдающиеся явления, что в каждом месте участка реки отмель у одного из берегов и большие глубины у противоположного берега по прошествии некоторого времени обмениваются своим положением. Скорость перемещения отмелей на различных реках не одинакова: на некоторых она незначительна, на других достигает нескольких десятков и даже сотен метров в год.

Если непосредственно ниже впадения притоков образуются прочно слежавшиеся на дне реки выносы из притоков, то, при известных условиях, они могут оказать такое влияние, что даже на прямых или слабо изогнутых участках реки, расположенных между сими выносами, вышеуказанные отмели (косы) теряют свою подвижность и сохраняют более или менее постоянно свои места. В таком случае меженний стрежень на участке тоже сохраняет свое расположение, причем глубина его на перемелах становится вообще бо́льшая, чем в случае подвижного стрежня.

При значительном сужении прямолинейного участка блуждающие косы на нем вовсе исчезают, однако с ухудшением участка реки вследствие увеличения уклонов в верхнем и нижнем концах участка.

§ 14. Зависимость между деформациями русла реки и гидродинамическими свойствами речного порта.

Как выше уже упоминалось, разработка речного русла и его постоянные деформации происходят вследствие размыва дна и берегов и перемещения продуктов размыва в другие места русла. При этом передвижение твердых частиц происходит двояким образом: частицы или скользят и катятся по дну реки, или несутся во взвешенном состоянии в воде речного потока. Текущая вода способна поднимать в свою толщу и переносить лишь более мелкие частицы; более же крупные частицы передвигаются только по дну, причем чем больше скорость течения, тем более тяжелые и крупные частицы она способна передвигать. Наблюдения показывают, что вообще количество частиц, передвигающихся как по дну, так и в воде, увеличивается с увеличением расхода воды в реке и скоростей течения. По мере же уменьшения расхода воды и скоростей течения более крупные частицы, двигавшиеся по дну реки, останавливаются, а взвешенные в воде частицы опускаются на дно, начиная тоже с более крупных. Однако, размывы русла и перенесение и отложение продуктов размыва зависят не только от величины скорости течения. Ранее упоминалось, что вода, находящаяся в реке, имея поверхностный уклон, движется под влиянием силы своей тяжести. Благодаря уклону, вода, под влиянием упомянутой силы, приобретала бы ускорение, т. е. двигалась бы с постоянно возрастающей скоростью, если бы не встречала сопротивлений своему движению. В действительности, постоянного возрастания скорости течения на реках не наблюдается. В отдельных местах скорости увеличиваются, в других уменьшаются или остаются постоянными. В числе сопротивлений, на преодоление коих должно затрачиваться приращение живой силы текущей воды, находятся сопротивления, оказываемые руслом реки вследствие действия на него текущей воды. Если этому действию текущей воды дно русла способно оказать сопротивление без нарушения спокойного состояния твердых частиц, из которых состоит поверхность дна русла, то размыв последнего не происходит; в противном же случае начинается движение частиц и размыв русла.

Dubuat дал впервые этому действию текущей воды на речное дно математическое выражение в предположении, что течение воды вполне установившееся, равномерное и что приращение живой силы текущей воды полностью поглощается работой только на преодоление сопротивления речного русла, которое он называет трением. По Dubuat, сила действия текущей воды на один квадратный метр дна, при глубине воды t и величине поверхностного уклона воды J, получает следующее выражение:

$$S = \gamma\ t\ J\ \ klgr/m^2$$

или, при весе 1 *кб. м.* воды $\gamma = 1.000\ klgr.$

$$S = 1000.\ t.\ J\ klgr\ m^2.$$

Многочисленные опыты, произведенные в позднейшее время профессором Энгельсом [1]), показали, что сила текущей воды, толкающая отдельные шарики, лежащие на горизонтальном дне, действительно пропорциональна произведению величин глубины и уклона, как это следует из вышеприведенного выражения $S = \gamma\, t\, J$, но что это выражение, правильное для силы, действующей на вертикальную плоскость, не может быть распространено одинаково и для силы, действующей на горизонтальную плоскость дна. В действительности, та работа, которая поглощает приращение живой силы текущей воды в реке, затрачивается на преодоление не только сопротивлений русла, но также и на преодоление сопротивлений, происходящих от внутренних (вихревых) движений в текущей воде. Если обозначить через W внутренние сопротивления течению, а через S сопротивления русла реки (те и другие в килограммах на 1 *кв. м.*), то при равномерном течении сумма этих сопротивлений:

$$K = S + W = \gamma.\ t.\ J$$
$$\text{или}\quad W = \gamma.\ t.\ J - S$$

Следовательно, сила действия течения на ложе реки увеличивается по мере уменьшения внутренних сопротивлений. При отсутствии последних, т. е. при $W = O$, она достигает своего максимума $S_{max.} = \gamma.\ t.\ J.$

Вообще же

$S = \alpha.\ \gamma.\ t.\ J$, где коэффициент $\alpha \leq 1$

$W = \beta.\ \gamma.\ t.\ J$, „ „ $\beta \leq 1$

Результаты своих исследований проф. Энгельс выражает следующими положениями:

1) *Смывающая сила* [2]) приблизительно пропорциональна квадрату средней скорости течения.

2) Смывающая сила возрастает с увеличением пористости грунта ложа потока.

3) При прямоугольном живом сечении величина силы смыва, действующая на 1 *кв. м.* ложа, определяется из выражения

$$S = \alpha.\ \gamma.\ t.\ J\ klgr/m^2$$

где $\gamma = 1.000$ килогр., а глубина t выражена в метрах.

4) Коэффициент α всегда меньше единицы; он увеличивается с уменьшением глубины. Его зависимость от средней скорости еще не установлена.

5) Так как коэффициент α для одного и того же русла является величиной переменной, то смывающая сила $S = \alpha.\gamma.t.J\ klgr/m^2$ не пропорциональна произведению численных величин глубины и уклона.

Из вышеупомянутого следует, что, если действующая на ложе реки смывающая сила течения больше сопротивления грунта дна, то частицы грунта в этом месте приходят в движение и происходит углубление дна. Но

---

[1]) H. Engels: „Versuche über den Reibungswiderstand zwischen strömenden Wasser und Bettsohle". (Изд. 1912 г.).

[2]) Энгельс называет эту силу Räumungskraft.

с увеличением глубины уменьшаются α и J до той поры, когда наступит равновесие между смывающей силой и силой сопротивления грунта, причем углубление дна прекратится. Там, где смывающая сила недостаточна для передвигания частиц грунта, последние будут останавливаться и дно реки будет нарастать, но так как вследствие складывания наносов глубина воды уменьшается, то вместе с тем начнут увеличиваться α и J, причем это будет происходить до тех пор, пока смывающая сила вновь не достигнет величины сопротивления грунта, после чего нарастание дна прекратится. Для состояния равновесия, т. е. неизменяемости русла при однообразном качестве грунта дна реки, необходимо такое соотношение между величинами α, t и J, чтобы их произведение оставалось всюду одинаково постоянной величиной. Места с большой глубиной будут одновременно такие, которые имеют малые уклоны и большие внутренние движения в текущей воде, между тем как места с недостаточной глубиной будут такие, где имеются большие уклоны и малые внутренние движения.

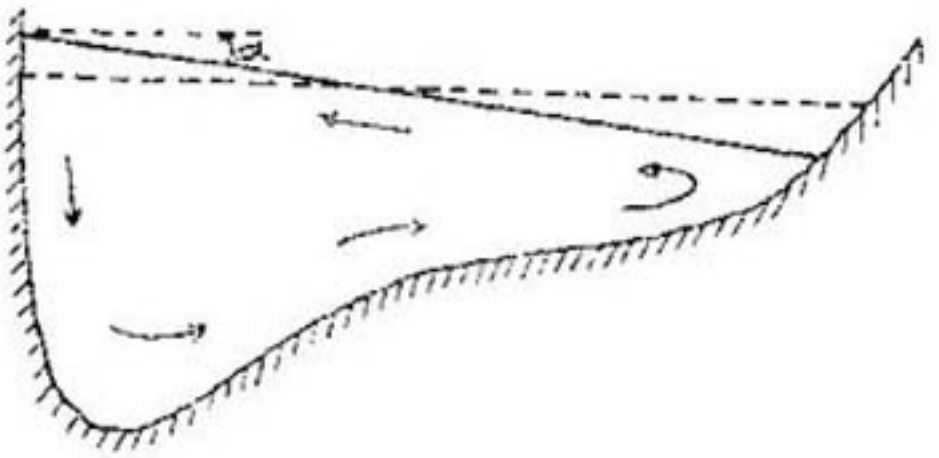


Рис. 29. Поперечные движения частиц воды в извилине реки.

Лабораторные опыты проф. Энгельса подтверждают заключения многих исследователей о том, что деформации речного русла происходят главным образом под влиянием непараллелоструйности речного потока и находящихся в нем вихревых течений; они указывают и значение упомянутых обстоятельств в процессе размыва русла и складывания наносов. Проф. Энгельс приводит, между прочим, следующие об'яснения. В извилине реки, где развивается у вогнутого берега центробежная сила текущей воды, наблюдается возвышение поверхности воды около вогнутого берега и образуется поперечный поверхностный уклон от вогнутого берега к выпуклому (рис. 29). Величина этого уклона пропорциональна квадрату скорости течения (по Бейергаузу $i = Sin\ \alpha = \frac{V^2}{gr}$, где r — радиус кривизны). Но так как скорости течения в реке довольно сильно уменьшаются по мере приближения от поверхности воды ко дну, то в нижних слоях воды влияние центробежной силы соответствовало бы значительно меньшему поперечному уклону, чем на поверхности. Так, например, если скорость течения в одном из нижних слоев воды в два раза меньше, чем на поверхности, то слой этот испытывает давление в 4 раза большее того, которое необходимо для уравновешивания центробежной силы. Поэтому частицы воды нижних слоев, находящихся у вогнутого берега под таким избытком давления, получают дви-

женне в сторону выпуклого берега и образуются течения, показанные на рисунке стрелками, а именно: сверху вниз по откосу вогнутого берега, а засим внизу по направлению от вогнутого берега к выпуклому. Для восстановления же такого возвышения воды у вогнутого берега, какое необходимо для уравновешивания центробежной силы, частицы воды верхних слоев у выпуклого берега движутся по направлению к вогнутому берегу. Таким образом, в поперечном сечении реки образуются круговые внутренние движения частиц воды, показанные стралками, причем вследствие наличия общего течения реки означенные внутренние движения принимают вид спиральной или полуспиральной линии. Под влиянием поперечных течений, имеющих наибольшие скорости около вогнутого берега, происходит размыв откоса и дна этого берега и продукты размыва влекутся, по дну или во взвешенном в воде состоянии, постепенно ослабевающим течением по косой линии от вогнутого берега к выпуклому, где они и складываются.

При опытах профессора Энгельса в криволинейном лотке (рис. 30) прямоугольного сечения, шириною 20 *см.*, высотою около 1 *см.*, при расходе

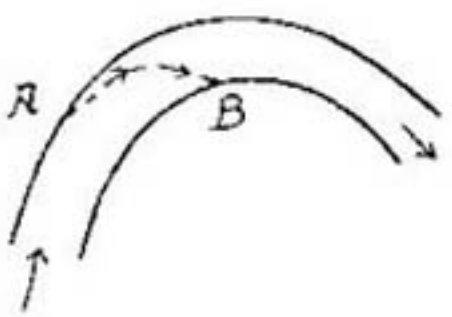


Рис. 30. Перемещение частиц грунта.

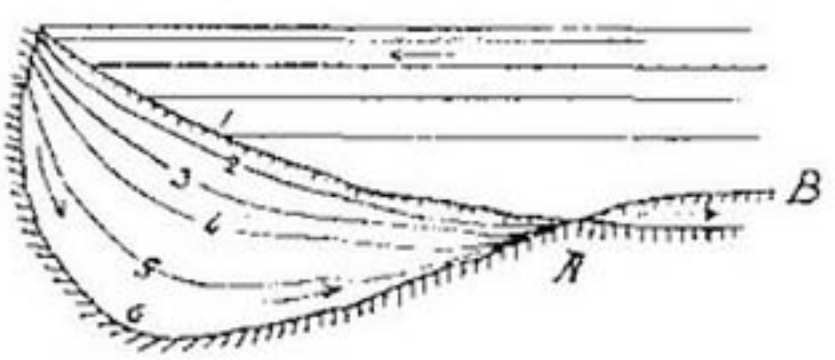


Рис. 31. Размыв вогнутого берега.

воды от 1 до 2 *лтр.* в секунду, помещался, для выяснения внутренних движений в воде, черный угольный порошок на дне около точки *A* вогнутого берега. Под действием течения он перемещался по направлению, показанному пунктиром, из точки *A* к точке *B* выпуклого берега. Менее ясно при этих опытах проявлялось поверхностное поперечное движение частиц обратного направления.

Явлениям, происходящим в реке при размыве берегов и русла, передвижении продуктов размыва и отложении наносов, профессор Энгельс дает следующие об'яснения.

Под влиянием непрерывно действующих на откосе вогнутого берега, а в особенности на подошву откоса, вихревых течений берег постепенно подмывается слоями, как показано на рисунке 31-м. Обрушение вогнутого берега происходит различно в зависимости от того, состоит ли берег из водонепроницаемого глинистого или водопроницаемого песчаного грунта. В первом случае во время подмыва, бывающего при высокой воде, подводный откос берега находится под гидростатическим давлением воды, поддерживающим подмытый у подошвы берег даже при очень крутом, почти отвесном откосе, и обрушение берега происходит лишь тогда, когда высокие воды спадут и гидростатического давления на берег не будет. Во втором же случае вода при высоком ее уровне проникает в песчаный грунт берега, почему откос берега упомянутого гидростатистического давления не испы-

тывает. Но после падения уровня воды в реке пропитавшаяся в берег вода вытекает быстрыми ключами обратно в реку и высасывает мелкие песчинки из грунта берега, так что и этом случае каждый паводок разрушает берег.

Таким образом, работоспособность, которой обладает текущая вода при входе ее в извилину реки, расходуется на протяжении извилины частью на изменение направления течения, частью на рызмыв русла и частью на перенесение частиц грунта, являющихся продуктом размыва. Поэтому текущая вода выходит из извилины уже с ослабленной работоспособностью. Последствием сего является отложение упомянутых частиц, т. е. наращивание наносами дна на перевале.

Лабораторные опыты Энгельса и Ляваля показывают, что отложение наносов происходит следующим образом (рис. 30 и 32). Вследствие потери работоспособности текущей воды в конце извилины, именно около точки B в конце вогнутого берега, частицы грунта, оторванные на дне плеса, складываются в непосредственной близости, т. е. там, где уже начинается нижележащая выпуклость того же берега. Вместе с тем частицы размытого грунта дна и берега на вышележащей части плеса вдоль вогнутого берега AB переносятся вихревыми поперечными течениями к противоположному выпуклом берегу A_1B_1, наращивая здесь дно. Следовательно, из продуктов размыва у вогнутого берега образуются наносные отложения не только у соседнего выпуклого берега, но и вдоль противоположного выпуклого берега. Так как оставшаяся часть живой силы воды должна расходоваться на преодоление сопротивлений течению на перевале, то в пределах последнего поперечные вихревые течения не происходят, а дошедшие сюда с плеса твердые частицы тоже складываются, наращивая дно перевала по всей его ширине. Кроме того, дно перевала наращивается еще и теми частицами грунта, которые увлекаются с отмели A_1 B_1 общим течением речной воды. В результате такого движения наносов являются отмели у выпуклых берегов и нарастание этих отмелей в виде кос, идущих на встречу друг к другу от одного выпуклого берега к другому и образующих, по их соединении, косую к направлению реки песчаную подводную гряду, пересекающую реку (смотр. рис. 23-й).

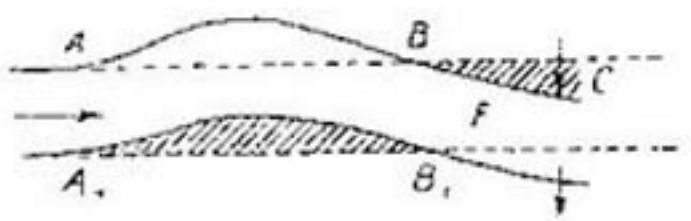


Рис. 32. Образование наносов около выпуклого берега.

Возвышенное на перевале дно реки, реагируя на текущую воду, как подводная плотина, вызывает подпор поверхности воды. Образующееся, поэтому, падение на перевале является причиной восстановления живой силы воды, благодаря чему вода вступает в следующую, соседнюю, извилину с восстановленной работоспособностью, производящей на ней такие же явления, как и на вышележащей извилине реки.

Вышеоб'ясненное движение наносов подтверждается следующими опытами Ляваля. На модели русла извилистого участка реки (рис. 33), дно и берега которого образованы из неразмываемого гравия, вводился в разных местах русла цветной песок, движение которого под влиянием течения можно было проследить. Песок, введенный в русло около точки A, двигался от A

к B и от B к C. Песок, введенный около точки D, тотчас передвигался к A и далее следовал от A к B и от B к C, между тем как песок, введенный около точки E, переносился непосредственно к B, откуда затем направлялся к C.

Прекращение размыва русла и отложения наносов на каком-либо участке реки, т. е. постоянство формы русла, могло бы иметь место только в том случае, если бы, во первых, величина расхода воды была постоянна и, во вторых, если бы на данном участке река не получала каких-либо наносов извне, т. е. как с вышележащей части реки, так и из притоков или со склонов долины. Действительно, в таком случае и при одинаковых качествах грунта дна и берегов реки можно допустить, что наступило бы равновесие между размывающей силой воды и силой сопротивления грунта. Для этого нужно, чтобы под влиянием происшедшей деформации русла размывающая сила уменьшилась настолько, чтобы получилось упомянутое равновесие. При постоянстве расхода воды это может быть достигнуто за счет уменьшения скорости течения, следовательно или увеличения живого

Рис. 33. Отложение наносов при лабораторных опытах.

сечения или уменьшения уклона. Односторонее углубление дна плеса у вогнутого берега, вследствие подмыва берега, постепенно подвигается в сторону за счет размываемого берега, почему работающие на углубление дна струи речного течения не будут действовать всегда на одном и том же месте и развивать живое сечение реки только в глубину; но зато развитие извилины, вследствие размыва вогнутого берега, увеличивает длину реки и тем самым уменьшает поверхностный уклон и скорость течения.

Из сказанного явствует, что равновесие между размывающей силой воды и силой сопротивления грунта размыву, а следовательно состояние покоя речного русла может наступить лишь при таком положении реки, когда расход воды более или менее постоянен и относительно невелик, что соответствует устойчивому меженнему состоянию реки. Но, в действительности, расход воды в реке меняется, и как только он начинает увеличиваться равновесие будет тотчас нарушено. С увеличением расхода повышается уровень воды и увеличивается энергия воды. Происходящее на плесе увеличение размывающей силы производит углубление плеса и продукты размыва переносятся на перевал, где они и остаются, если сила течения недостаточна для дальнейшего их влечения. Поэтому на перевале с увеличением расхода воды повышается как уровень воды, так и дно, а, следовательно, при увеличении расхода воды глубина на перевале увеличивается менее значительно, чем в плесе. Таким образом, высокие воды углубляют плесы в извилинах и наращивают перевалы, разделяющие плесы. Во время половодия все ложе реки находится в движении, при котором частицы наносов, в зависимости

от их величины, веса и формы, передвигаются различно: более тяжелые скользят или катятся по дну, а легкие переносятся в толще воды во взвешенном состоянии. По миновании половодия, с понижением уровня воды, рельеф дна, не влиявший при больших во время высокой воды глубинах дна на распределение уклонов ее поверхности, начинает действовать на поверхность воды, образуя подпор на перевалах. Большие уклоны, получающиеся на перевалах, увеличивают здесь скорость течения. Образовавшиеся на перевале наносы несколько смываются и сносятся в нижележащий плес и это продолжается до той поры, пока уровень воды не понизится настолько, что вновь наступит момент состояния русла в покое.

Как выше было сказано, участки реки, обладающие периодическими явлениями размыва русла и наращения наносами, с сохранением постоянных мест больших и малых глубин, называют участками, обладающими устойчивым руслом. Из приведенных об'яснений этих явлений видно, что устойчивым руслом обладают такие участки, где уже достигнуто известное соотношение между величиной падения реки и качествами наносного грунта, составляющего ложе речного потока, где, вследствие этого, река выработала правильные извилины и где возможны периоды равновесия между размывающей силой течения и сопротивлением ложа. Но, по топографическим и геологическим условиям местности, реки или отдельные их участки бывают различны и могут быть такими, на которых относительные падения (т. е. уклоны) еще так велики, что при изменениях величины расхода воды и зависящих от сего колебаниях поверхности воды размывающая сила течения не уменьшается до равновесия с силой сопротивления, почему влечение наносов происходит непрерывно и по всему ложу реки. С течением времени и такие, т. е. с неустойчивым руслом, участки реки могут при благоприятных условиях постепенно вырабатываться до состояния устойчивых участков. Наносы, спускающиеся по всему такому участку, могут начать складываться на нижеследующем устойчивом участке, повышая дно последнего. Наращенное дно станет оказывать подпорное действие на течение воды в неустойчивом участке. Кроме того, дно неустойчивого участка понижается от постоянного размыва и выноса грунта. То и другое вызывает уменьшение падения на неустойчивом участке, а, следовательно, уменьшение и размывающей силы течения.

Таковы, в общем, теоретические об'яснения явлений при деформациях русла в плесах и на перевалах реки, основанные на лабораторных опытах проф. Энгельса. В дальнейшем, в главе III-ей при изложении методов регулирования рек будут приведены об'яснения и выводы также некоторых других исследователей вопросов о деформациях русла реки, текущей в легко размываемых грунтах.

§ 15. Пороги и водопады.

В длительном процессе разработки русла некоторые реки встречают на своем протяжении твердые породы, которые они не смогли преодолеть и сгладить в обычные пологие формы речного русла. Такие места вызывают аномалии речного течения, выражающиеся большим под-

пором поверхности воды на вышележащем участке, крутыми уклонами и перепадами в пределах имеющегося препятствия, резкими сужениями ширины реки, тоже вызывающими подпор воды и быстротоки, и т. п.

Если речная долина спускается скалистыми террасами, или если речной поток пробивается через твердую преграду, которую он не способен размыть в пологий уклон, то иногда на таких местах вода падает свободно с некоторой высоты вертикально, образуя так называемые *речные водопады*. Более часто встречаются водопады на горных речках, где питающий бассейн реки сравнительно невелик, где значительные массы воды река несет только после сильных ливней, или в период энергичного таяния горного снега и льдов, и где, потому, водопады лишь периодически принимают сколько-нибудь могущественный вид. Но встречаются водопады и на сравнительно многоводных реках, если геологические условия речной долины таковы, что она спускается одной или несколькими террасами по скалистому кряжу, пересекающему речную долину. В таких случаях вода непрерывно падает огромным каскадом. С течением продолжительного времени вертикальный высокий уступ скалы подвергается разрушительному действию непрерывно падающих масс воды и водопад медленно или отступает вверх по течению реки, или размывается в форму круто наклоненного лотка, по которому река течет беспорядочным шумным потоком.

Под наименованием *речных порогов* разумеются такие места реки, где твердое неразмываемое дно расположено ступенчато, или с более или менее крутым уклоном, и усеяно выступами скалистого дна и отдельными крупными камнями. Некоторые пороги представляют остатки некогда бывших водопадов, постепенно сгладивших вертикальный уступ скалистого слоя. В других случаях пороги образовались на местах пересечения реки каменистыми грядами, которые она не была способна размыть с такою равномерностью, как в прилежащих плесах. Иногда пороги встречаются и в нижних участках реки, где при вековой разработке русла реки она откладывала наносы, но еще не успела покрыть наносами возвышающиеся каменные гряды. На протяжении, занятом порогом, скалистое дно реки, испещренное выступами скалы и отдельными большими камнями, оказывает подпорное действие на вышележащий участок реки и вызывает неравномерное распределение падений поверхности воды в пределах порога. Чем ниже стоит в реке уровень воды, тем больше влияние рельефа дна порожистой части реки, тем бо́льшая получается высота общего падения воды в пороге и тем бо́льшую крутизну имеют уклоны поверхности воды на разных местах порога. Напротив, по мере под'ема воды в реке, общее падение на пороге уменьшается, а резкие переломы поверхности воды на протяжении порога постепенно сглаживаются.

Если на реке имеется группа порогов, расставленных на сравнительно небольших расстояниях друг от друга, то поверхность воды на всей части реки, по которой расположены эти пороги, приобретает ступенчатый вид со слабыми уклонами в промежутках между отдельными порогами (плесах) и крутыми перепадами на порогах, так что большая часть всего падения реки на этой ее части сосредоточивается на порогах.

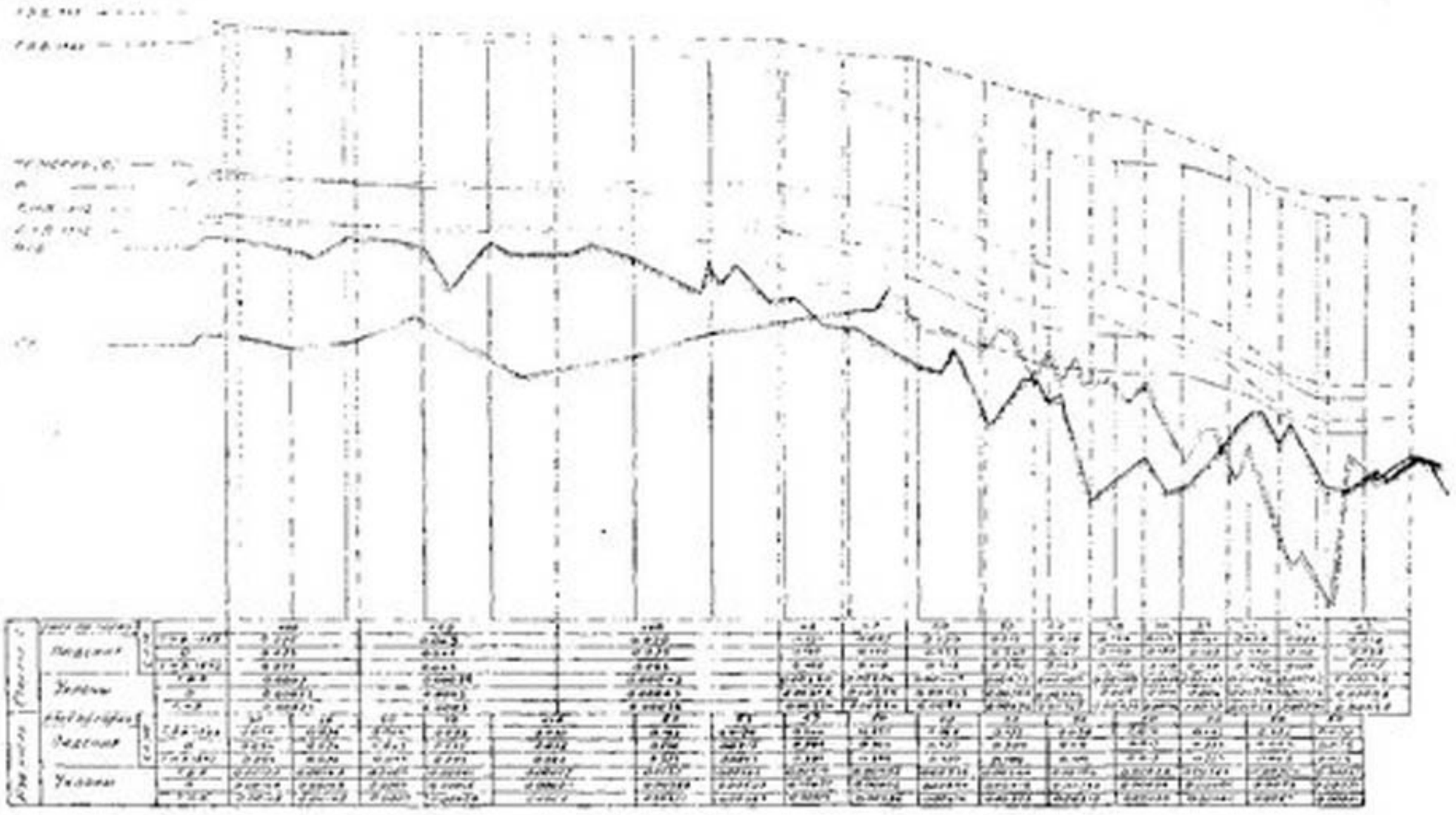


Рис. 31. Продольный профиль порога „Вильный" на р. Днепре. Отштрихованные линии обозначают дно реки по двум направлениям фарватера, называющимся: „Старый ход" и „Новый ход". Пользоваться ими можно только для спуска плотов.

Характерным примером порожистой части большой реки является участок реки Днепра между городами Екатеринослав и Запорожск (б. Александровск). Здесь на длине около 70 *км.* расположено 9 отдельных больших порогов и многочисленные небольшие пороги, носящие название «заборы». Общее падение между крайними порогами составляет при низкой воде около 38 *м.*, а при высоких водах около 34 *м.*, т. е. на 10% менее. Рисунок 34-ый представляет продольный профиль последнего порога («Вильный» порог). Замечательные пороги имеютсч на реке Дунае, где они также группами занимают значительное протяжение реки. В § 28-м приведен рисунок одного из наибольших порогов р. Дуная, называющегося «Железные ворота».

§ 16. Устья рек.

Устья рек, т. е. места излияния речных вод в море или в большое озеро, чрезвычайно разнообразны по их виду и свойствам, так как в этих местах происходит взаимодействие реки и моря. Поэтому разнообразный вид, который вырабатывается устьем той или иной реки, зависит, с одной стороны, от явлений, присущих быту моря в данном его месте, а, с другой стороны, от быта низовьев самой реки. В этом отношении разное влияние моря сказывается на устье реки в зависимости от того, имеет ли морской берег на месте впадения реки прямолинейное направление, или же он образует бухту. Также имеет влияние направление и сила морского прибрежного течения, направление и сила господствующих ветров, влияние волн, характер и высота колебаний уровня воды в море, удельный вес морской воды и некоторые другие обстоятельства. С другой стороны, на вид устья реки влияют: величина расхода воды в реке и его изменения в разные периоды времени, количество и качество речных наносов, колебания уровня воды в реке на ближайшем к устью протяжении и пр. Вход в реку со стороны моря почти на всех реках мелководный, но в устьях некоторых рек эти мели образуются главным образом от речных наносов, в устьях других рек — от наносов, влекомых прибрежными морскими течениями. В том и другом случае наносы откладываются в устье реки благодаря тому, что речное течение при выходе в массу морской воды теряет свою скорость, а морские прибрежные течения, влекущие морские наносы, уменьшают свою силу и изменяют свое направление от встречи с потоком, вытекающим из реки. В некоторых случаях река в своем устье имеет вид широкой мелководной воронки, где место отложения наносов остается более или менее постоянным, образуя так называемый *бар*. Некоторые реки изливаются в море одним руслом, другие разветвляются в устье на многочисленные рукава, разделенные низкими островами, образуя так называемую *дельту*. В особенности сложно взаимодействие факторов морских и речных в том случае, если река впадает в море *живое*, т. е такое, на котором происходят регулярные приливы и отливы (повышение и понижение горизонта), так как в таких устьях бывает ежесуточно по два раза смена течения из реки в море (при отливе) и из моря в реку (при приливе). Не останавливаясь на этих случаях, являющихся у нас редким исключением, приведем об'яснения некоторых явлений, происходящих в устьях рек, впадающих в безприливные моря и в большие озера.

Живое сечение в устье реки определяется положением уровня моря, и если уровень моря остается на постоянной высоте, то в устье реки ее живое сечение не меняется, как на других участках, вследствие колебаний уровня речной воды. Следовательно, через одинаковую площадь живого сечения в устье реки последняя изливает свои воды как во время межени, так и в половодие или при паводках. Поэтому скорости течения в устье реки значительно увеличиваются во время половодия и паводков, а при понижении воды в реке скорости течения в устье становятся малыми. Увеличение скорости течения при высокой воде требует больших уклонов поверхности воды на реке непосредственно выше устья, почему поверхностный продольный профиль реки спускается здесь по кривой, изогнутой вниз, а во время межени по кривой, изогнутой кверху. С увеличением во время половодия и паводков скоростей течения увеличивается размывающая сила потока, которая и производит углубление и уширение русла. Выработавшееся, таким образом, большое живое сечение реки около устья становится слишком большим для меженних вод реки, которые, поэтому, изливаются через устье реки в море с малыми скоростями. По этой причине, образование бара из речных наносов происходит лишь в период высоких вод в реке. При меженнем состоянии реки нарастание бара может происходить от морских наносов, влекомых морским береговым течением и откладывающихся перед устьем реки вследствие вышеупомянутой встречи здесь двух течений — морского и речного, продолжающегося на некотором протяжении в море. Если река впадает в море на мелком месте песчаного побережья со слабым береговым течением, то присутствие бара влечет за собою образование дельты, так как речные наносы, ранее достижения действительного выхода в море, начинают откладываться перед баром. Напротив, при крутых и скалистых берегах, или при сильном прибрежном морском течении и малых речных выносах дельта или вовсе не образуется, или образуется очень медленно.

Образование дельты выражается в следующих явлениях. Река при высоких водах выносит в море свои наносы по тому же направлению, по которому она изливает в него наибольшие массы своей воды. Поэтому она загораждает баром больше всего свое главное направление течения при выходе в море. При последующих высоких водах реки главное течение ее или продолжается по прежнему направлению, в результате чего является удлинение бара в сторону моря, причем на баре река как-бы удлиняет свое устьевое русло, или главное течение устремляется в сторону от образовавшихся возвышений дна моря перед устьем, причем несет сюда наносы и складывает их в море, расширяя баровые наращения морского дна и образуя в них новые, подводные, продолжения речного русла, носящие названия речных *гирл*. Такое блуждание повторяется при каждом половодии; дельта расширяется, повышается и постепенно удлиняется в сторону моря. При этом прежние гирла превращаются в рукава, а наросшие между ними острова покрываются растительностью — обыкновенно камышами.

Нужно заметить, что образованию бара и дальнейшему его развитию способствует также различие плотности речной и морской воды. Отложение в море речных наносов происходит еще и по той причине, что скорость

более легкой речной воды замедляется при встрече с более тяжелой соленой морской водой, причем речная вода стремится расплыться по тяжелой морской воде. Более тяжелые твердые частицы речных выносов складываются немедленно на дно моря, как только речная вода поднимается в верхние слои морской воды; между тем более легкие частицы тех же речных выносов несутся во взвешенном состоянии, в толще речной воды, далее и складываются в более удаленных от устья местах моря.

Если река впадает не непосредственно в море, а ранее протекает через образовавшийся на морском берегу *лиман* [1]), то последний служит как бы осадочным бассейном для отложения наносов, влекомых рекою. Наносы распределяются в бассейне более равномерно по его площади; выход же из лимана в море, представляющий узкий проток, обыкновенно обладает большой глубиной, так как, во первых, речная вода изливается через него в море уже лишившись своих наносов в лимане, а, во вторых, углублению протока способствует то обстоятельство, что при сильных ветрах со стороны моря нагоняется в лиман большая масса воды из моря, которая тем самым повышает уровень воды в лимане; после прекращения ветра, или при изменении его направления, в протоке образуется сильное течение из лимана в море, которое увеличивает глубину протока.

---

[1]) Лиманом называются бассейны, образовавшиеся в морских бухтах, которые отделены от моря косами, выросшими с обеих сторон залива. Такие косы иногда вовсе разобщают прежнюю бухту от моря; если же в бухту впадает река, то между сходящимися от берегов косами остается пролив для выхода в море вод, приносимых в бухту рекою.

ГЛАВА III.

Регулирование судоходных рек.

§ 17. Задачи регулирования судоходных рек.

Общие пояснения.

Рассмотренные в главе II-й явления показывают, что рекам, влекущим наносы и текущим в местностях, где дно и берега реки состоят из грунтов, легко поддающихся размывам, вообще свойственно непостоянство формы русла. В зависимости от меняющихся расходов воды русло таких рек находится в состоянии постоянной или периодической разработки, которая нередко отражается на изменении очертания берегов русла, главным образом, меженнего. Многие явления, при этом происходящие, часто представляют местные затруднения для использования реки в том или ином отношении, а иногда наносят и прямой вред. Недостаточная глубина на перекатах, крутые извилины русла и стрежня, местные увеличения скоростей течения и неправильность последнего,— все такие обстоятельства затрудняют судоходство; те же явления могут служить причиной образования ледяных зажоров с вредными и опасными последствиями. Подмывы и обрушение берегов отнимают ценные земельные участки, могут служить причиной порчи или разрушения прибрежных сооружений, а, кроме того, засоряют русло реки и обогащают реку наносами. Образование около берега широкой мели, отклонение меженнего русла от прежнего своего расположения, разработка побочных рукавов с обмелением прежнего коренного русла и другие подобные явления могут влечь за собою разнообразные нежелательные последствия как для судоходства, так и в ином отношении: ценные пристанские устройства становятся недоступными для судоходства, прибрежные города и селения встречают затруднения в пользовании рекою, выведенные от реки судоходные, оросительные, водопроводные и иные каналы прекращают свое действие вследствие обмеления реки на месте примыкания каналов. В низменных местностях загромождение речного русла наносами и обвалами берегов, сильное развитие извилин реки и другие обстоятельства, затрудняющие сток речной воды, могут вызывать при паводках образование подпоров воды и затопление или заболачивание местности.

Во всех подобных случаях меры паллиативного характера хотя иногда приносят пользу, но сами по себе не могут дать такого улучшения реки, которое сохранилось бы на долгое время. Частичное укрепление берега на месте уже начавшегося обрушения не сохранится на продолжительное время, если причиной размыва берега являются более общие изменения в режиме речного течения и если берегоукрепительные сооружения не соображены с означенными причинами и недостаточно развиты для противодействия им. Землечерпательные работы для углубления дна около обмелевающего берега не сохранят надолго своего полезного значения и даже могут оказаться вовсе бесплодными, если обмеление берега происходит в связи с отклонением стрежня реки или перемещением всего меженнего русла и если не приняты технические меры постоянного характера для установления более благоприятных в данном отношении условий естественной разработки речного русла. Поддержание необходимой для судоходства глубины на фарватере во многих случаях успешно достигается помощью производства землечерпательных работ для образования на перекатах искусственных прорезей в дне, достаточно широких для прохода судов, но и в этих случаях прорези являются только временным воспособлением судоходству: сами по себе они недостаточны для воздействия на улучшение естественного состояния русла, они долго не сохраняются и требуется периодическое ежегодное, а иногда и более частое землечерпание для восстановления обмелевшей или для вырытия новой прорези на том же перекате.

Для коренного разрешения каждой из вышеотмеченных задач требуются технические меры, соображенные с естественным бытом реки, с причинами вредных явлений и могущие воздействовать на них в благоприятном для данной цели отношении, а потому расчитанные на долговременную сохранность своего полезного значения. Такие меры состоят в производстве регулирования реки, требующего применения сооружений постоянного характера.

Ближайшие цели предпринимаемых регуляционных работ могут быть различными. Но, каковы бы ни были цели, задачу регуляционных работ можно выразить в следующей общей формуле: *сохраняя свободное течение реки и при его содействии достигнуть помощью возведения соответствующих сооружений, а в нужных случаях и с производством землечерпания, устойчивого положения речного русла и возможно лучшего его состояния в отношении данной цели.* Применение для этого каких бы то ни было постоянных сооружений в реке должно быть основано на внимательном изучении естественного быта данной реки, приспособляя сооружения к его своеобразным условиям. Насильственного вторжения в естественный быт реки следует по возможности избегать; напротив, нужно более приноравливаться к существующим зависимостям различных элементов. Так, например, естественно вырабатывающемуся хорошему руслу реки свойствен

пологие криволинейные очертания берегов с плавными переходами из одной извилины в другую, равно как плавные переходы от одного рельефа дна к другому; поэтому и регуляционные сооружения не только должны не вносить резких изменений в формах русла и условиях течения воды, но и способствовать смягчению таких резких изменений, если они проявляются на неблагоприятных для судоходства участках реки при естественной разработке их русла. По тем же основаниям сами задания для регулирования реки, в смысле ожидаемых результатов регуляционных работ, должны быть соображены с естественным бытом реки. Нельзя, например, при регулировании реки для судоходных целей устанавливать произвольно требуемую глубину и ширину фарватера, так как пределы возможных в этом отношении достижений ставятся всею совокупностью ряда элементов, из которых сложился быт реки на данном ее протяжении, как то: степень ее многоводности, колебания горизонта и расхода воды, величина падений, рельеф берегов, качества грунта и проч. Нельзя в требованиях к регулируемому участку реки итти далее того, что дает та же река самостоятельно на своих хороших участках, сходных с регулируемым по гидрологическим элементам, но естественно выработавших устойчивое и благоприятное для судоходства меженнее русло.

По сущности и по цели совокупности строительных работ, которые выполняются при регулировании реки, они могут быть сведены к следующим двум группам.

Совокупность некоторых работ имеет целью исправление реки, находящейся в первобытном неудовлетворительном состоянии, в том смысле, чтобы не допускать разбрасывание в стороны речного течения, так сказать обуздать одичалую реку и заключить ее течение в ложе с устойчивыми и благоприятно очертанными берегами. Работы эти состоят преимущественно в закрытии побочных рукавов меженнего русла, в укреплении берегов, а также в создании, где это нужно, новых берегов помощью искусственных сооружений. К ним тоже могут быть отнесены работы по спрямлению слишком больших извилин русла с целью увеличить поверхностные уклоны воды для лучшей естественной разработки русла. Всем таким работам соответствует название выправительных работ, как имеющих своею целью общее исправление реки. Они предпринимаются как для улучшения судоходных качеств реки, так и для иных культурных целей, как то: для предохранения берегов земельных угодий и населенных местностей от размыва, для предохранения от заболачивания низменных площадей речной долины, для уменьшения поступающих в реку наносов и, вообще, во всех случаях, когда нужно закрепить устойчивое положение меженнего русла.

Другая совокупность работ имеет специальную цель привести меженнее русло реки в такое состояние, чтобы как само русло, так и стрежень низких вод, в особенности в пределах полосы,

составляющей судовой ход (фарватер), постоянно сохраняли свое положение и чтобы при таком состоянии речное течение естественно поддерживало бы необходимую глубину на фарватере при низких водах. Эти работы чаще всего предпринимаются для улучшения судоходных условий реки. Они состоят в постройке в меженном русле различного вида сооружений, в большей части подводных, служащих для направления течения и усиления его размывающего действия на дно, а в других случаях, напротив, для укрепления или наращивания дна. К ним также относится производство дноуглубительных работ механическими снарядами. Все такого рода работы правильно было бы называть, по их прямой цели, регулированием меженного фарватера, но в практике русского речного строительства обычно и эта категория работ понимается под общим названием выправительные работы. Регулированию меженного фарватера должны предшествовать вышеупомянутые выправительные работы, но в некоторых случаях оно может выполняться и одновременно с выправительными сооружениями, в особенности, если в реке не происходит сильного движения наносов.

Обращаясь к вопросу об основаниях, которые могут служить для проектирования выправительных и регуляционных сооружений, необходимо прежде всего отметить следующее. Рассмотренные в главе II-ой свойства рек в отношении естественной разработки русла указывают, что формы речного русла в плане и в продольных и поперечных профилях находятся в некоторых определенных соотношениях с другими элементами речного быта, как то: с уклонами поверхности воды, скоростями течения, а также с качествами грунта и с количеством воды, несомой рекою, именно с величиною секундного расхода воды. Однако, эти соотношения не поддаются сколько-нибудь достоверным теоретическим расчетам за отсутствием точных знаний взаимной зависимости весьма сложных явлений, происходящих в речном потоке, где движутся одновременно и вода, и твердые частицы, притом в русле не однообразной и непостоянной формы. Поэтому от прежних попыток основать проектирование регуляционных сооружений на чисто теоретических расчетах по формулам гидравлики пришлось отказаться, так как они приводили нередко к весьма серьезным неудачам в деле регулирования рек. Для подобных теоретических расчетов приходится делать некоторые допущения в отношении речного русла и течения воды, которые в действительности не существуют в естественном речном потоке, а потому и расчеты нередко ведут к таким выводам, которые могут и не осуществиться. Долгий опыт речных регуляционных работ, из коих многие достигли хороших результатов, указывает, что в этом деле лучшим способом разрешения задач, встречающихся при проектировании регуляционных сооружений, является метод эмпирический, основанный главным образом на изучении естественно хороших участков реки, находящихся в сходных условиях с регулируемым участком.

Несколько в иных условиях находятся задачи регулирования речного потока и улучшения судоходных условий на таких участках реки, где дно и берега не поддаются размывам, что имеет место на порожистых участках реки, проложившей свой путь в скалистом грунте. Поэтому способы регулирования порожистых участков рассмотрены далее отдельно (§ 28).

§ 18. Меры для общего упорядочения речного течения. Укрепление берегов. Сосредоточение течения меженних вод.

В реке, остающейся в первобытном состоянии, главнейшие затруднения, которые встречает судоходство, чаще всего представляют малые глубины на перекатах и слишком крутые извилины стрежня. В §§ 11 и 14-м об'яснено в какой зависимости находятся между собою эти неправильности русла. При слишком крутой вогнутости берега размывы дна происходят с чрезмерной силой у вогнутого берега и с такой же интенсивностью продукты размыва складываются на перекатах, вследствие чего глубины на перекатах уменьшаются, а крутизна извилин стрежня увеличивается. Эти неправильности находятся в связи с большою неравномерностью поверхностных уклонов воды, которая бывает на таких участках. Выравниванием уклонов несколько регулируется разработка русла в смысле смягчения упомянутых неправильностей. Неравномерность поверхностного уклона становится наибольшей при низких уровнях воды, почему и выравнивание уклонов должно относиться главным образом к низким уровням. При этом нельзя, однако, изменить величину общего падения реки на более или менее значительном протяжении, так как существующее падение установилось соответственно общим свойствам реки. Поэтому возможность искусственного выравнивания уклонов ограничивается смягчением только местных неравномерностей падения и то в небольших сравнительно пределах. При высоких водах происходит размытие дна в глубоких местах плеса и наращивание наносов на перевалах. Поэтому требуется так воздействовать на реку, чтобы при под'еме воды возможно менее наращивались перекаты, а после спада воды перекаты возможно более углублялись размывом. Соответственно этому и регуляционные сооружения должны быть таковы, чтобы они производили возможно большее влияние при низких водах и возможно меньше стесняли сток высоких вод. Необходимо тоже, чтобы размывы переката, не разбрасываясь по его ширине, сосредоточивались постоянно на одном и том же месте, где находится фарватер.

Изучение естественно хороших участков реки показывает, что меженнее русло лучше сохраняет постоянство своего расположения в плане, имеет менее резкие извилины стрежня и меньшие разницы в глубинах на плесах и на перекатах в тех случаях, когда течение меженних вод сосредоточено в едином русле, т. е. без разделения на

рукава, и когда уклоны поверхности воды более или менее равномерны, а берега русла очерчены по плавным кривым без резких перегибов и без длинных прямолинейных частей русла в переходах из одной извилины в другую. При этом на хорошем перевале, с естественно сохраняющейся формой его поперечного профиля, гребень косы наносных отложений расположен нормально к оси потока и наибольшая естественно поддерживающаяся глубина при низкой воде находится на том месте перевала, где поток развивает наибольшую размывающую наносы работу. Форма в поперечном сечении меженнего русла на таком перевале представляет симметричный с параболическим очертанием лоток („корыто"), ось которого совпадает с осью потока.

Следуя примерам естественно хороших участков реки, требуется и на регулируемом участке привести русло низких вод к подобному же состоянию. К достижению этой цели следует подходить постепенно. Не внося сооружениями резких изменений в режим реки, нужно выполнять работы с такой последовательностью, чтобы сооружения только способствовали речному течению в выработке благоприятного русла и чтобы постепенное развитие сооружений производилось в согласовании их с наблюдающимися явлениями и с выясненной зависимостью последних от уже возведенных сооружений. Поэтому предварительный проект выправительных работ, составление которого должно быть основано на самом тщательном изучении реки на значительном ее протяжении, может служить только ориентировочным планом работ, в который во время исполнения работ вносятся те или иные исправления, в зависимости от происходящих под действием сооружений изменений в режиме речного течения. Для этого одновременно с выполнением выправительных работ необходимо производить правильно организованные изыскательские работы и наблюдения для непрерывного изучения явлений в реке, происходящих во время работ.

Обращаясь к составу выправительных работ, нужно заметить, что они заключаются как в предварительной подготовке меженнего русла, так и в некоторых работах по упорядочению той части речного русла, которая, будучи расположена выше уровня меженних и средних вод, захватывается течением лишь во время половодия и высоких паводков.

Цель работ, выполняемых в зоне высоких горизонтов, заключается главным образом в том, чтобы прекратить вредные разрушения берегов, увеличивающие количество наносов в реке, или предохранить берега и пойму высоких вод от таких размывов, которые становятся опасными в смысле прорытия высокими водами нового рукава для меженних вод, или неблагоприятного отклонения меженного русла от существующего его положения. Исполняя такие работы необходимо избегать всего того, что может увеличить работоспособность течения высоких вод, при которых она и без того уже слишком велика. Так, например, сильное сужение ширины естественно выработавшегося русла на уровнях

высоких вод может принести вредные последствия для меженнего русла, так как вызовет усиление размыва дна в глубоких местах плеса, увеличение количества наносов на перекатах и наращивание высоты последних. Поэтому в пределах колебания уровня высоких вод обыкновенно ограничиваются только берегоукрепительными работами. Укрепление берегов высоких вод более или менее сильной одеждой достаточно произвести лишь на тех участках берега, где он наиболее подвержен действию течения и недостаточно устойчив против этого действия. В местах же, где вода выступает из меженних берегов, образуя разливы со сравнительно малыми на них скоростями течения, обыкновенно бывает возможным ограничиться поддержанием и разведением растительности засевом травы или рассадкой ивовых кустарников, и только в тех случаях, когда растительность плохо принимается, приходится прибегать к иным, по возможности простейшим, способам предохранения поверхности затопляемых площадей. В тех, например, случаях, когда под действием течения высоких вод начинают образовываться на поверхности дна поймы столь глубокие размывы, что в дальнейшем они могут обратиться в нежелательный новый рукав меженнего русла, приходится иногда принимать меры для прекращения разработки вымоины помощью загреждения ее фашинными или каменными запрудами. Но к устройству таковых и к назначению их высоты следует относиться с большой осторожностью, чтобы не вызвать подобными сооружениями вредного уменьшения живого сечения русла высоких вод.

В части речной долины, находящейся ниже среднего горизонта воды, происходит меженнее течение реки при сравнительно небольших колебаниях уровня, причем вся эта часть русла подвергается более длительно действию течения. Очертание берегов этой части русла имеет непосредственное влияние на меженнее течение, на распределение его поверхностных уклонов, на размыв наносов, отложившихся на перевалах, на рельеф дна и на расположение стрежня при низких водах. Поэтому для хорошего и устойчивого состояния меженнего русла приобретает особо важное значение правильное очертание берегов речного течения до горизонта средних вод. Обеспечение благоприятного очертания меженних берегов и составляет вторую задачу выправительных работ, когда они имеют значение вспомогательных или же подготовительных для дальнейших регуляционных работ, уже непосредственно относящихся к улучшению состояния самого фарватера при низких уровнях воды.

Как сказано выше, на естественно хороших в судоходном отношении участках реки меженние воды текут между берегами, имеющими непрерывно более или менее правильное очертание по пологим и плавно между собою сопрягающимся кривым, и обыкновенно заключены в одном русле без побочных рукавов. Стремясь к созданию подобного же положения на регулируемом участке реки, приходится для этого закрывать, где возможно, побочные рукава, устранять разбрасывание

русла или чрезмерные местные уширения его, для чего требуется, по возможности использовав естественные берега и укрепляя таковые, устраивать в некоторых местах новые искусственные берега, а также производить землечерпательные работы для устройства, где нужно, прокопов и для снятия мелей в тех местах устраиваемого русла, где действие течения на смыв мели под влиянием выправительных сооружений требует себе в помощь механическое землечерпание.

Все эти сооружения подробно рассмотрены далее в последующих параграфах. Здесь же мы только отметим, что так как упомянутые сооружения назначаются для образования правильных берегов меженнего русла, то является надобность прежде всего наметить линии этих берегов, так называемую трассу выправительных сооружений. А для этого требуется установить как предполагаемое очертание в плане линий берегов, так и ту ширину, которую нужно придать руслу в разных его местах по длине выправляемого участка реки.

§ 19. *Выправительная трасса. Общие основания для ее назначения.*

Под наименованием *выправительная трасса* мы будем разуметь расположение в плане тех линий, которые обозначают проектное очертание берегов меженнего русла, образуемого при выправительных работах. Так как меженнее русло должно вмещать в себе меженние воды при всех колебаниях величины их расхода, то линии выправительной трассы соответствуют урезу воды при том высшем горизонте меженнего течения, который принят в каждом данном случае в основание выправительных работ.

При назначении проектной трассы меженних берегов следует руководствоваться хорошими участками той же реки, находящимися в одинаковых естественных условиях, но выработавшими и самостоятельно поддерживающими хорошие качества своего русла и течения. Изучая такие участки можно получить полезные указания относительно проектного расположения в плане и ширины выправительной трассы на регулируемом участке. При этом нужно, однако, иметь в виду, что первоначальная цель переустройства берегов меженнего русла заключается главным образом в том, чтобы сосредоточить меженний поток в одном русле, дабы использовать всю его энергию для поддержания русла при низких уровнях, а также, чтобы достигнуть возможного выравнивания поверхностных уклонов на регулируемом участке, которое полезно для более равномерного распределения глубин. Но из этого не следует, что надо уменьшить ширину русла на регулируемом участке до наименьшей из имеющихся на хорошем участке ширин и что надо придать регулируемому участку однообразную ширину на всем его протяжении. Одним только сжатием речного потока и приданием руслу меженних вод однообразной ширины нельзя обеспечить получение необходимой глубины фарватера при

низких уровнях воды. Напротив, излишнее стеснение регулируемого участка может повести к вредным последствиям для общего состояния русла реки как на регулируемых, так и на соседних естественно хороших участках. Сказанное подтверждается тем обстоятельством, что на естественно хороших участках, с равной величиной расхода воды, ширина меженного русла не одинакова как на разных участках, так и на каждом из них в различных местах по их длине.

Вредные последствия такого насильственного нарушения условий, свойственных быту каждой реки, показывают результаты многих регуляционных работ, при которых стремились углубить реку путем только сужения ее ширины.

Методы регулирования рек, в основание которых было положено сжатие потока с установлением однообразной, так называемой, нормальной ширины меженного русла, часто применялись во второй половине минувшего века при работах по улучшению судоходных качеств французских и немецких рек, по примеру коих велись некоторые регуляционные работы и на наших реках. Меженнее течение заключалось между искусственно образованными берегами, поднятыми до среднего уровня воды и расставленными друг от друга на расстоянии, соответствующем нормальной ширине русла, которая исчислялась теоретически. Искусственные берега создавались либо в виде параллельных сооружений—продольных дамб, либо помощью поперечных сооружений, носящих название бун или полузапруд; первый способ показан на стр. 108 рис. 45 и 46, второй—на рис. 47. Как продольные дамбы, так и буны назначались в качестве водостеснительных сооружений, имеющих целью сжать меженнее течение и заключить его в однообразное по форме русло в виде искусственного канала с одинаковой шириной, причем предполагалось, что тем самым поток приобретет более или менее однообразный уклон и однообразную в поперечном сечении форму русла на всем регулируемом участке. Ширина такого русла определялась в качестве нормальной ширины. Она исчислялась теоретически, пользуясь обычными формулами гидравлики для равномерного установившегося течения воды в открытом канале, а именно: $\Theta = F.V$, а $V = C\sqrt{RJ}$, в которых буквы обозначают: Θ — расход воды, V—средняя скорость течения, F—площадь живого сечения, R—гидравлический радиус, J—уклон и C—коэффициент формулы Шези, определяемый по той или иной из имеющихся эмпирических формул. Приведенные два выражения дают зависимость $\frac{\Theta^2}{F^2.C^2} = RJ$. По этим формулам, при известных расходах воды Θ, задаваясь обычно величинами F и R (следовательно, и шириной по урезу воды) соответственно форме, которую предполагалось придать руслу в поперечном его сечении, определялась величина уклона. Сравнивая исчисленную, таким образом, величину нового уклона с существующими уклонами поверхности воды, выяснились те изменения, которые должны

оказаться в падениях на прилежащих участках реки, и, если при этом оказывалось, что такие изменения недопустимы, то соответственно меняли размеры и форму канала пока не достигались приемлемые результаты подсчетов. Таким образом устанавливалась при заданной глубине проектная ширина регулируемого участка реки.

Изучение результатов такого рода регуляционных работ показало, что полезное влияние водостеснительных сооружений на судоходные качества фарватера сохранялось не долго, что во многих случаях регулирование отдельных неудовлетворительных для судоходства участков служило причиной ухудшения естественно хороших участков и что даже в тех случаях, когда такими работами достигалось несомненное улучшение судоходных условий на более или менее значительном протяжении реки, то все же полученное состояние русла, как результат произведенных работ, далеко не отвечало предположениям, которые при проектировании лежали в основе расчетов относительно действия водостеснительных сооружений на речное течение и на форму речного русла. Как сказано выше, теоретеческие расчеты, служившие при этом методе работ для назначения нормальной ширины и для определения других элементов искусственно создаваемого русла, основывались на формулах гидравлики, которые предполагают, что течение воды равномерно и параллелоструйно, что глубина воды и форма поперечного сечения русла однообразны на всем протяжении канала, что продольный уклон поверхности воды тоже постоянен, что вода течет чистая без примеси наносов и что ложе канала вполне устойчиво. Все эти предположения не отвечают действительным условиям, в которых находится речной поток, сжатый водостеснительными сооружениями, а потому естественно, что состояние реки после выполнения регуляционных работ оказывалось не таким, какое предполагалось при их проектировании. Придание такому каналу однообразной ширины и некоторое выравнивание поверхностного уклона, достигавшееся при сжатии потока водостеснительными сооружениями, не было в состоянии обеспечить каналу однообразную глубину, а также симметричную и однообразную форму русла. В одних местах канала дно размывалось и образовывались ямы, более или менее вытянутые в длину и обыкновенно прижатые к берегу, в других местах складывались наносы, образуя мели. Стрежень потока, уклоняясь от оси канала, принимал изогнутую форму. Линия поверхностного уклона с течением времени, тоже приобретала ступенчатую форму и, вообще, созданный канал вскоре начинал приобретать все свойства, которые присущи рекам в их естественном состоянии. Но в то же время влияние искусственного сжатия меженнего потока на отдельных участках сказывается увеличением наносов и уменьшением глубин на других, соседних с ними участках реки. Вредное отражение на естественно хороших участках реки при возведении водостеснительных сооружений на регулируемом участке может сказаться не только в тех

случаях, когда регулируемый участок сужают до ширины, меньшей ширины соседнего хорошего участка, но и при назначении ширины, одинаковой с шириной хорошего участка.

Подобные обстоятельства, нередко встречающиеся в практике регулирования рек, об'ясняются проф. Энгельсом следующими соображениями. Участки, которые естественно выработались в хорошее состояние и самостоятельно поддерживают его, обыкновенно так расположены, что направление течения по ним воды как при средних, так и при высоких уровнях приблизительно одинаково. Это возможно только там, где вовсе не могут образоваться разливы, благодаря замкнутого очертания поперечного сечения русла до уровня самых высоких вод, или же в тех случаях, когда при обра-

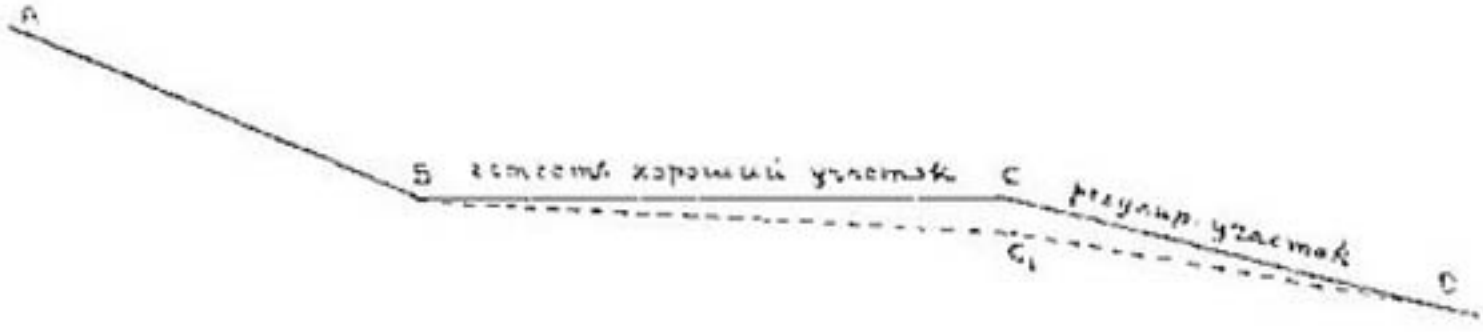


Рис. 36-а.

зующихся разливах течение воды не отклоняется от направления потока при среднем его уровне. Последнее происходит обыкновенно у вогнутых берегов извилин и на таких прямолинейных участках, положение которых совпадает с общим направлением течения разливающихся высоких вод. Такие участки, благодаря сильному размыву дна, разработали свое русло в виде глубоко опущенной ложбины. Они имеют относительно малую ширину и столь слабые уклоны, какие не могут быть получены местным сглаживанием падений при регулировании. Выше и ниже такого естественно выработавшегося хорошего участка имеются переломы поверхностного уклона (рис. 36)

Рис. 36-б.

в точках *B* и *C*. Если при регулировании соседних участков (разумеется случай, когда расходы воды на хорошем и на соседних участках одинаковы) стеснить их ширину до величины, какую имеет ширина естественно хорошего участка, то, конечно, будет достигнута некоторая выгода в том отношении, что стеснение потока вызовет сначала увеличение скорости течения, работоспособность его увеличится и временно нарушится равновесие между работоспособностью текущей воды и сопротивляемостью дна русла, которое станет размываться. Равновесие восстановится в том только случае, когда работоспособность понизится до прежней своей величины. Последнее произойдет когда, вследствие размыва, дно углубится, причем поверхностный уклон уменьшится до величины, соответствующей уклону, потребному для пропуска того же расхода воды при новой увеличенной площади живого сечения потока. Уменьшение же уклона может произойти только постепенным (в направлении против течения) увеличением понижения уровня воды.

Если регулируемый участок CD примыкает к естественно хорошему участку BC в нижнем конце последнего (рис. 36-а), то уменьшение уклона на регулируемом участке выразится понижением точки C до положения C_1 и уклон на хорошем участке увеличится за счет понижения в нижней части сего участка прежнего уровня воды, что сопряжено с уменьшением в этой части прежних глубин.

Если же регулируемый участок AB (рис. 36-б) примыкает к естественно хорошему участку BC у верхнего конца последнего, то тоже изменятся прежние условия хорошего участка. Уменьшение поверхностного уклона на регулируемом участке, перешедшего из положения AB в положение A_1B, уменьшит запас энергии потока при входе его на хороший участок BC. Вследствие сего те внутренние движения частиц воды в потоке, которые обусловливают размывающее действие его, будут развиваться на хорошем участке в меньшей против прежней степени: вынесенные на регулируемого участка наносы станут складываться на хорошем участке, обмелевая его, причем на нем произойдет некоторое повышение уровня воды в верхней части Bd участка и понижение уровня в нижней его части dC_1.

Неудовлетворенность результатами регулирования рек посредством однообразного сжатия потока, а, с другой стороны, появление усовершенствованных землечерпательных машин, способных оказывать могучую помощь механическим углублением дна, возбудили в конце минувшего века весьма живой интерес к вопросу о рациональной постановке дела регулирования судоходных рек. В это же время появились некоторые выдающиеся по своему значению труды авторитетных инженеров-гидротехников [1]), основанные на глубоком изучении свойств реки и на их личном большом опыте в деле регулирования судоходных рек. Хотя методы регулирования, предлагавшиеся авторами этих трудов, во многом отличались между собою, но все они об'единялись на основных мыслях, давших новое направление этому делу. Они определенно указывали, что регуляционным работам нельзя ставить таких задач, которые заключались бы в устранении явлений, свойственных каждому речному потоку, как-то: неравномерность глубин дна и поверхностных уклонов воды, неодинаковая в разных местах ширина русла и форма его в поперечных сечениях, неравномерность движения и складывания наносов и проч. Регулирование может только смягчить эти явления или повлиять на них в благоприятном для судоходства отношении. Указывая вместе с тем на бесплодность прежних попыток подчинить проектирование регуляционных работ чисто теоретическим расчетам, они приближали рекомендуемые ими методы регулирования к подражанию естественным явлениям на реках. Пользуясь для этого такими же регуляционными сооружениями, как продольные дамбы, полузапруды, запруды, берегоукрепительные и проч. устройства, и привлекая на помощь механическое землечерпание, они отводили всем этим сооружениям только роль посильного содействия к благоприятному ходу естественных явлений на реке и к закреплению достигнутых результатов без насильственного вторжения в быт реки. Установленные на таких принципах методы регулирования судоходных

---

[1]) Жирардона, Лелявского, Лохтина, Фарга, Крейтера, Энгельса и др.

рек являются руководящими указаниями, которыми во многом следует пользоваться при производстве регуляционных работ. Далее они приведены в кратком изложении. Нужно заметить, что некоторые различия между этими методами относятся, главным образом, лишь к тем работам, которые предпринимаются собственно для улучшения фарватера низких вод. Но, так как для этого необходимо устойчивое состояние вообще меженнего русла, то все выше упоминавшиеся выправительные работы по укреплению берегов, по сосредоточению меженнего течения в едином русле, по образованию, где нужно, искусственных берегов и т. п. являются в большинстве случаев полезными также для регулирования самого фарватера, как предварительные меры, направленные к общему упорядочению речного течения, а потому их необходимость признается во всех методах исправления фарватера.

Установление трассы берегов меженнего русла зависит, таким образом, от многих обстоятельств. Она должна быть сообразена с гидрологическими условиями как регулируемого, так и ближайших к нему участков реки, причем ее начертание в плане зависит также и от общего рельефа речной долины в пределах заливаемых высокими водами площадей, а также от ее геологических условий. Она вместе с тем должна отвечать требованиям, которые ставит судоходство в отношении фарватера. Поэтому подчинить построение трасс точным общим правилам не представляется возможным. Можно лишь отметить некоторые общие соображения, которые следует иметь в виду при нанесении трасс выправительных сооружений; ближайшие же в этом отношении указания необходимо почерпать из результатов тщательного изучения образцовых, т. е. естественно хороших участков на той же реке.

Извилистое русло вообще свойственно рекам, текущим в размываемых грунтах и влекущим наносы. Развивая извилинами свою длину, река уменьшает поверхностные уклоны воды, причем на естественно хороших участках достигается постоянное или периодическое равновесие между размывающей силой потока и сопротивлениями русла. Тем самым достигается постоянство мест расположения больших глубин и мест отложения наносов, каковые обстоятельства дают благоприятные условия для работ по улучшению фарватера. Но при искусственном дальнейшем развитии извилин работоспособность потока уменьшается и может стать недостаточной для продвижения наносов, вступающих в русло. Поэтому при начертании выправительной трассы для регулируемого участка следует сохранять извилины, а в отношении допустимых пределов их развития руководствоваться примерами ближайших образцовых участков. Исправлять извилины следует только такие, которые затрудняют судоходство или которые вызывают неблагоприятные условия для ледохода и для стока паводков.

Если грунт дна достаточно устойчив и река несет относительно мало наносов, то можно, конечно, свободнее отнестись к вопросу об уменьшении извилин. Но и в сем случае не следует упускать из виду то обстоятельство, что спрямление извилин укорачивает длину русла и увеличивает скорости течения, а потому, если даже не нарушится устойчивость дна против размыва, то при данной величине расхода уменьшится площадь живого сечения и глубина русла. Если же произойдет размыв дна, то последствия его выразятся ухудшением соседних участков, так как в вышележащем участке понизится уровень воды, а в нижележащем станут складываться наносы, как это уже об'яснено выше.

Крутые извилины закрепляют положение глубоких мест вдоль вогнутого берега, но вместе с тем они способствуют тому, что образуется в этом месте слишком глубокий и узкий фарватер, затрудняющий судоходство. Поэтому для установления допустимой крутизны извилин нужно в каждом случае выяснить, насколько это возможно, закономерную зависимость между шириной русла, радиусами, длиной и стрелой под'ема кривой линии в речной извилине, для чего также могут дать полезные указания естественно хорошие участки.

Изгибы русла следует так располагать, чтобы они, по возможности, не пересекались под большим углом с общим направлением течения высоких вод. Иначе высокие воды могут оказывать вредное действие на меженнее русло; при совпадении же направления течения высоких и средних вод они поддерживают друг друга в разработке меженнего русла и продвижении в нем речных наносов. В этом отношении для удачного начертания выправительной трассы меженнего русла имеет весьма полезное значение изучение помощью поплавков или иными способами направлений струй речного потока на регулируемом и на прилежащих к нему участках реки при различных положениях уровня воды.

В местах перехода из одной извилины в другую (перевалы) дно русла возвышено; здесь складываются наносы, вымытые в плесах при высоких водах, и если накопление наносов так велико, что представляет затруднения для судоходства, то такие места получают название перекатов. Если река выработала себе устойчивое русло, такие перекаты являются местами временных остановок наносов, передвигающихся периодически, по этапам, вдоль реки. Постоянство мест складывания наносов на реках с устойчивым руслом облегчает задачу улучшения судоходного фарватера на перекатах. Задача эта должна сводиться не к уничтожению таких перекатов, а лишь к преобразованию их формы из неудобной для фарватера в удобную. Полное уничтожение переката путем размыва наносов течением, что может быть достигнуто искусственным сильным сужением русла на нем, не только не принесет пользы судоходству, но может оказаться даже вредным. Если, вследствие сильного сжатия потока на перекате, сила влечения наносов

будет увеличена настолько, что местное возвышение дна будет смыто и дно углубится, то влияние такой меры можно уподобить последствиям от уборки плотины: подпертый горизонт воды на вышележащем участке понизится; в некоторых его местах, где местные возвышения дна прежде еще не представляли затруднений для судоходства, глубина воды может оказаться недостаточной и вместо уничтоженного переката явится новый перекат в другом месте, а может быть и в нескольких местах. Если же плес, разделяющий два переката, глубок на всем протяжении, то уничтожение нижнего переката скажется понижением горизонта воды на вышележащем перекате, а, следовательно, ухудшением последнего, так как на нем уменьшится глубина и увеличится падение. Таким образом, в обоих случаях фарватер будет в одном месте улучшен, а в других местах ухудшен.

Ввиду сего, при начертании трассы берегов меженнего русла, нужно в отношении расстояний между перевалами, а, следовательно, и числа таковых, руководствоваться примерами хороших участков, причем на регулируемом участке нельзя уменьшать число существующих на нем перевалов, а в некоторых случаях является полезным даже увеличить их число.

Естественно хорошие для судоходства участки реки характеризуются, между прочим, следующими условиями. Русло на перевале имеет более или менее симметричную, приближающуюся к параболе форму дна в поперечных сечениях. На плесах глубина вымоин дна вдоль вогнутых берегов не чрезмерно велика. Ширина меженнего русла по урезу воды обыкновенно больше на плесе и сужается при подходе к перевалу. Берега очерчены плавными кривыми и плавность очертания берегов сохраняется во всех переходах от большей ширины к меньшей и из одной извилины в другую. Такие условия соответствуют благоприятной работе речного потока. В плесе, на который входит поток с накопленной энергией, уширение русла распределяет энергию на большую площадь живого сечения и тем умеряет работу по размыву дна на плесе. Напротив, при подходе к перевалу поток, ослабивший свою энергию работой на плесе, нуждается в сужении живого сечения на перевале, чтобы сохранить способность лучшего продвижения наносов и тем поддерживать достаточную глубину дна на перевале.

Поэтому, при начертании трассы меженних берегов регулируемого русла следует и в названном отношении подражать хорошим участкам реки, уширяя русло в извилинах и сужая его на перевалах. А так как расход воды в реке увеличивается по мере приближения к устью, то для разных участков ширина русла в извилинах, равно как и на перевалах, должна соответственно увеличиваться. Вопрос о зависимости ширины русла от величины расхода воды и о теоретических способах определения нормальных поперечных профилей русла рассмотрен в § 20-м.

Что касается вида кривых линий, по которым наносится на плане трасса берегов, то в этом отношении необходимо иметь в виду, что линии эти должны удовлетворять условию плавного изменения радиусов кривизны от бесконечного радиуса в обоих концах кривой, где она сопрягается по касательной с соседними обратными кривыми или с прямолинейными вставками, до наименьшего радиуса в точке наибольшей кривизны, которая на вогнутом берегу располагается несколько ниже по течению от середины кривой. Для вычерчивания трассы берегов пользуются построением подходящих к упомянутым требованиям кривых (синусоид, кубичных парабол, лемнискат), причем для упрощения способов вычерчивания кривых линий обыкновенно прибегают к нанесению их на план по изгибу упругой стальной линейки или китового уса приемом, описанным далее в § 32. При изложении (см. §§ 23 и 24) методов регулирования фарватера, предложенных Жирардоном и Лелявским, приведены также их указания относительно очертания трассы выправительных сооружений.

Замечательным примером изучения свойств реки в отношении очертания берегов и типичных форм русла являются наблюдения инженера Фарга на р. Гароне. Он посвятил несколько десятков лет весьма тщательному изучению явлений, происходящих на этой реке как при естественных ее условиях, так и при наличии построенных на ней регуляционных сооружений. Фарг установил взаимную связь, в какой находятся на этой реке формы дна русла и очертания его берегов. Его выводы, основанные на этих наблюдениях и подтвержденные некоторыми экспериментальными исследованиями, могут иметь полезное значение в разных случаях, когда при регулировании рек приходится встречаться с вопросами о начертании искусственных берегов. Выводы Фарга формулируются в следующие положения.

Линия больших глубин или тальвег (стрежень) русла следует вдоль вогнутых берегов. Отлогие отмели располагаются вдоль выпуклых берегов.

Тальвег имеет тем бо́льшие глубины, а мели тем более выступают, чем бо́льшую крутизну имеют кривые вогнутого и выпуклого берегов. Максимуму и минимуму кривизны соответствуют максимумы и минимумы глубины.

Это соответствие находится не в одном и том же поперечном профиле. Наибольшая глубина располагается ниже, по течению, вершины вогнутого берега (приблизительно на 0,20 длины кривой); наибольший выступ отмели противоположного выпуклого берега находится ниже по течению вершины выпуклости. Перемел расположен ниже точки, где вогнутость берега переходит в выпуклость.

В продольном профиле тальвег представляет более правильные линии в тех случаях, когда кривая извилин реки (по оси русла) изменяется плавно и непрерывно; всякое же резкое изменение кривой сопровождается резким изменением глубин.

Означенные зависимости имеют место только на таких участках реки, где длина извилин, а именно расстояние между двумя последовательными точками перегиба, не слишком велика и не слишком мала (на Гароне – не более 2.000 метров и не менее 500 метров). Всюду, где упомянутые зависимости не существуют, тальвег состоит из отдельных ям, разделенных друг от друга возвышениями дна, причем последние, в случае их удаления землечерпанием, скоро вновь образуются.

Исходя из этих фактов, Фарг рекомендует некоторые правила для построения регуляционной трассы. Между прочим, он указывает, что для того, чтобы фарватер был устойчив и сохранял свое положение, необходимо, чтобы оба берега русла имели очертание по кривым, причем кривизны должны последовательно переходить от вогнутой формы к выпуклой и обратно, соединяясь в местах перегиба короткими пря-

мыми вставками. Кривизна должна быть непрерывной, причем величина кривизны должна постепенно изменяться от нулевой точки у перегиба до максимальной у вершины кривой и затем вновь постепенно уменьшаться к следующей точке перегиба. Подходящими для очертания кривых линиями он считает лемнискаты. Ширина трассы должна быть непостоянной, увеличиваясь и уменьшаясь согласно схемы, показанной на рис. 37-м, причем ширина должна быть бо́льшая в кривых частях русла и меньшая на перегибах с плавным переходом ширины от большей к меньшей. Абсолютная величина расширений, а также абсолютная величина сужений должны постепенно увеличиваться вниз по течению. Таким образом, согласно чертежа, a_2 должно быть больше чем a_1, a_3 больше чем a_2 и т. д., и тоже b_2 должно быть больше чем b_1. Для увеличения глубины фарватера полезно при равных длинах кривых увеличивать внешний угол касательных к концам кривых. Точки перегибов не должны находиться в одном поперечном сечении, а именно, точка перегиба вогнутого берега

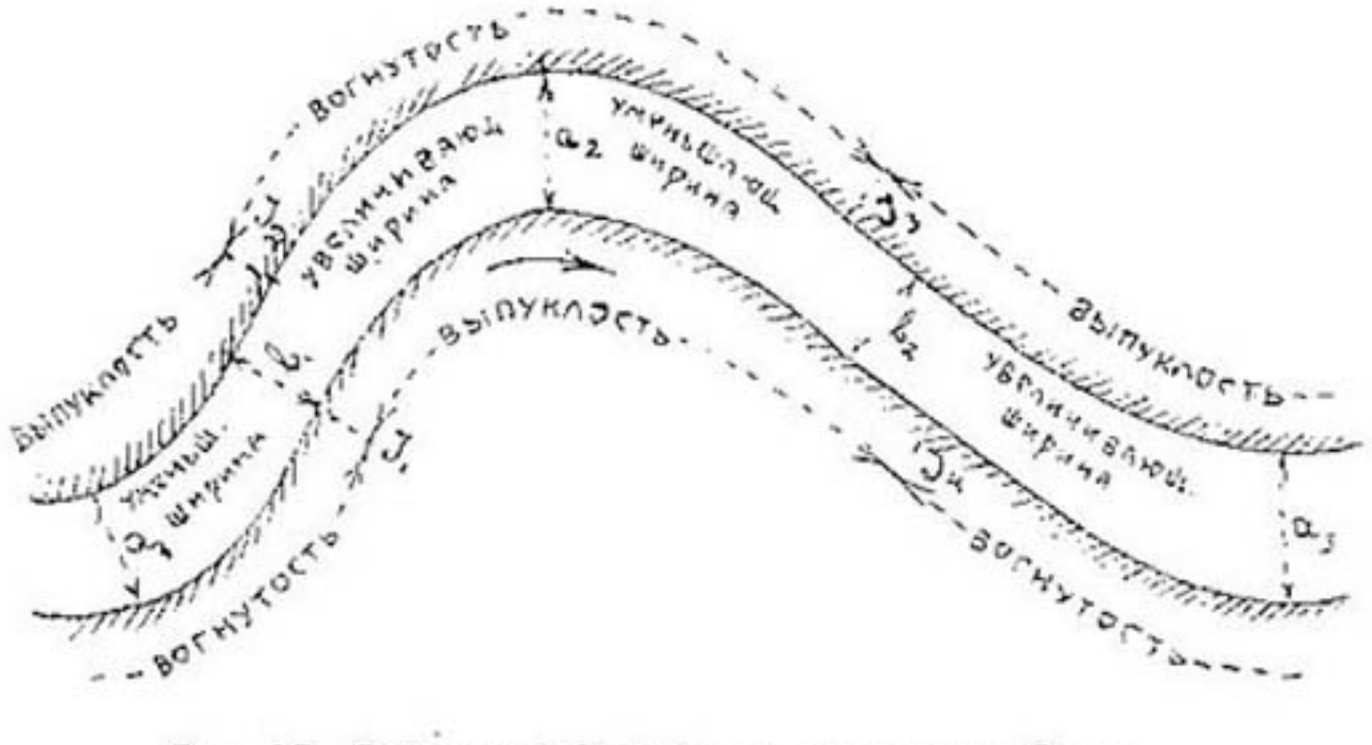


Рис. 37. Очертание берегов по принципам Фарга.

к выпуклый должна быть выше точки перегиба на противоположном берегу выпуклого берега в вогнутый; следовательно, согласно чертежа. J_1 находится выше по течению чем J_2, J_3 выше чем J_4.

§ 20. Проектная глубина и ширина фарватера. Пределы, которые в этом отношении ставятся естественными условиями реки. Методы определения проектных профилей живого сечения русла.

Если регулирование реки производится для надобностей судоходства, то оно должно быть направлено к удовлетворению требований, которые ставит судоходство в отношении качеств фарватера. Однако, требования эти должны быть соображены с теми пределами возможного улучшения фарватера, которые зависят от естественных условий реки. Именно в зависимости от этих условий, а не только от потребностей судоходства, может быть установлена предельно меньшая глубина и ширина фарватера. Естественно хорошие участки реки дают в этом отношении полезные указания, но данные, полученные из обмера таких образцовых участков, не могут быть всегда полностью приняты для установления проектных размеров живых сечений на регулируемом участке.

Перекаты являются обыкновенно теми местами, которые нормируют допустимую глубину осадки судов на данном участке реки. На естественно хороших участках реки наименьшие глубины фарватера также находятся на перекатах и, чтобы судить о пределах возможного увеличения глубины и ширины фарватера на перекатах регулируемого участка, нужно исходить из рассмотрения тех соотношений размеров в поперечных сечениях русла, которые естественно установились на хороших перекатах образцового участка реки, сходного по гидрологическим элементам с регулируемым участком. Как было уже упомянуто, на естественно хороших перекатах, которые обыкновенно расположены в местах перехода из одной извилины в другую (на перевалах), меженнее русло имеет в поперечном сечении симметричную параболическую форму (рис. 38). Если здесь при низком уровне в межень глубина T, ширина на поверхности воды b, а

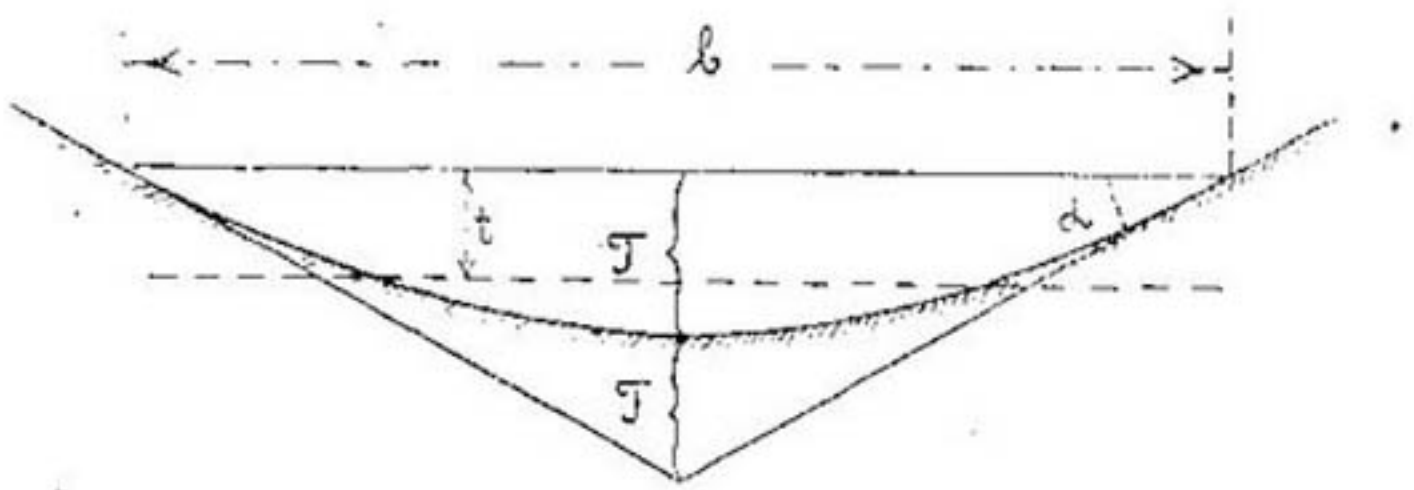


Рис. 38. Параболическая форма живого сечения реки на перевалах.

пологость естественного откоса берегов на урезе воды $Colg\,\alpha = \beta$, то по свойствам квадратной параболы

$$Colg\,\alpha = \beta = \frac{b}{2} : 2T$$

средняя глубина живого сечения

$$t = \frac{2}{3} T$$

и площадь живого сечения

$$F = bt$$

откуда

$$b = 6\beta t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Если при этом низком меженнем уровне расход воды равен Θ, а поверхностный уклон J, то, приравнивая гидравлический радиус живого сечения средней его глубине t, имеем:
средняя скорость течения

$$v = c\sqrt{tJ},$$

расход воды

$$\Theta = F \cdot v = btc\sqrt{tJ}$$

или, заменяя b равной ему $6\beta t$,

$$\Theta = 6\beta t^2 c \cdot \sqrt{tJ} = 6\beta c t^2 \sqrt{J},$$

откуда

$$t = \sqrt[5]{\left(\frac{\Theta}{6\beta c}\right)^2 \frac{1}{J}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Выражение (2), представляющее зависимость гидродинамических элементов на перевалах образцового участка, дает возможность оценить ту предельную величину средней глубины живого сечения на перекатах регулируемого участка, больше которой нельзя рассчитывать получить в результате регуляционных работ. Она является предельной глубиной уже по одному тому, что помощью регуляционных работ нельзя искусственно достигнуть большего выравнивания уклонов, чем то, которое создалось естественно на хорошем участке реки. Имея это в виду и согласуя профиль живого сечения с прочими требованиями судоходства (§ 22), можно установить проектную глубину на перевалах регулируемого участка при низком уровне воды, принятом в основание регуляционных работ.

При установленной проектной глубине на перевалах можно воспользоваться выражениями (1) и (2) также для намечения ширины выправительной трассы. Так как выправительная трасса обозначает линии уреза воды в меженном русле при более высоких горизонтах, для которых создаются новые меженние берега (для высшего меженнего или для среднего вообще уровня речной воды — см. § 22), то, подражая образцовому участку, необходимо произвести на нем обмер живого сечения на перевалах при этом же горизонте воды. Если, как и в первом случае, принять, что живое сечение на перевале имеет параболическую форму, то в выражениях (1) и (2) нужно проставить величины, полученные измерениями при принятом горизонте:

$$t_1 = \sqrt[5]{\left(\frac{\Theta_1}{6\beta_1 c_1}\right)^2 \frac{1}{J_1}}$$

$$b_1 = 6\beta_1 t_1 = 6\beta_1 \sqrt[5]{\left(\frac{\Theta_1}{6\beta_1 c_1}\right)^2 \frac{1}{J_1}}$$

Если расход воды на образцовом и на регулируемом участках приблизительно одинаков и качества грунта сходны, то, определивши величину среднего поверхностного уклона на регулируемом участке $J_2 = \frac{h}{l}$, где h — величина общего падения на участке, а l — длина его, находим профиль параболического живого сечения для перегибов регулируемого русла, которая будет характеризоваться средней глубиной

$$t_2 = \sqrt[5]{\left(\frac{\Theta_1}{6\beta_1 c_1}\right)^2 \frac{1}{J_2}}$$

и шириной по верху

$$b_2 = 6\beta_1 \sqrt{\left(\frac{\Theta_1}{6\beta_1 c_1}\right)^2 \cdot \frac{1}{J_1}}$$

Такую ширину можно считать только как допустимую предельно меньшую ширину на перегибах русла. На извилинах русло должно быть шире, чем на перегибах, потому что силу течения, размывающую дно, нужно увеличить на перегибах, где складываются наносы, а на плесах, где глубина более чем достаточна, полезно даже несколько уменьшить эту силу. Но, так как после образования новых меженних берегов предстоят дальнейшие работы по регулированию фарватера при низких меженних уровнях, то в качестве первоначального намечения линии берегов для среднего уровня воды можно установить некоторую среднюю ширину для всего участка, принявши для этого такое соотношение между шириною на извилинах и на перевалах, какое имеется на образцовом участке при том же уровне воды. Среднюю ширину трассы иногда называют нормальной, но понимать такое название можно лишь в вышеобъ'сненном смысле.

Как будет сказано ниже (§ 22), регуляционные работы по улучшению фарватера для низких уровней воды состоят в укреплении или наращивании дна в местах слишком глубоких вымоин на плесах, в придании берегам в подводной их части нужного очертания и пологости откосов, для чего приходится вдвигать в русло откосы берега или особые так называемые донные полузапруды, строить донные пороги и пр. Ввиду сего при нанесении выправительной трассы нужно всячески избегать большого стеснения потока, дабы возведенные выправительные сооружения для первоначального образования берегов не затруднили дальнейшие работы по регулированию фарватера. Лучше ошибиться в сторону преувеличения ширины выправительной трассы, чем преуменьшения ее, так как первое легче поправимо, чем второе. По тем-же соображениям в вышеприведенной формуле, служащей для определения проектной ширины трассы на перегибах, величина уклона J_1 берется как средний уклон на регулируемом участке, а не как предполагаемый уклон на перегибах, который в действительности будет иметь бо́льшую величину, чем средний для участка. Следует вообще заметить, что приведенный способ определения нормального профиля русла на перевалах, а также средней ширины выправительной трассы, как и другие ниже указанные способы, имеет все же теоретический характер и сохраняет в себе много условного, а потому результаты теоретических подсчетов нужно принимать лишь за грубо приблизительные величины искомых элементов.

Численные величины элементов в формулах, служащих для определения профили живого сечения на перевалах регулируемого участка, получаются путем измерения профилей на перевале образцового участка с выводом из них средней величины для каждого элемента.

При этом коэффициент C может быть исчислен по одной из имеющихся эмпирических формул, например, по формуле Базена

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}},$$

в которой коэффициент шероховатости γ тоже может быть определен по величинам измеренных элементов на образцовом участке. Если, например, перевал на образцовом участке реки (рис. 39-а), длиною L разбить поперечными профилями I, II, III и т. д., взятыми на местах, характерных изменений его в плане, и засим измерить для каждого поперечного профиля, при данном уровне воды, величины площадей живого сечения F_1, F_2, F_3 и т. д., смоченных периметров P_1, P_2, P_3 и т. д., то, нанеся на график, показанный на рис. 39-б, величины площадей живых сечений на верху, а периметров внизу, определяется средняя для всего перевала величина площади живого сечения

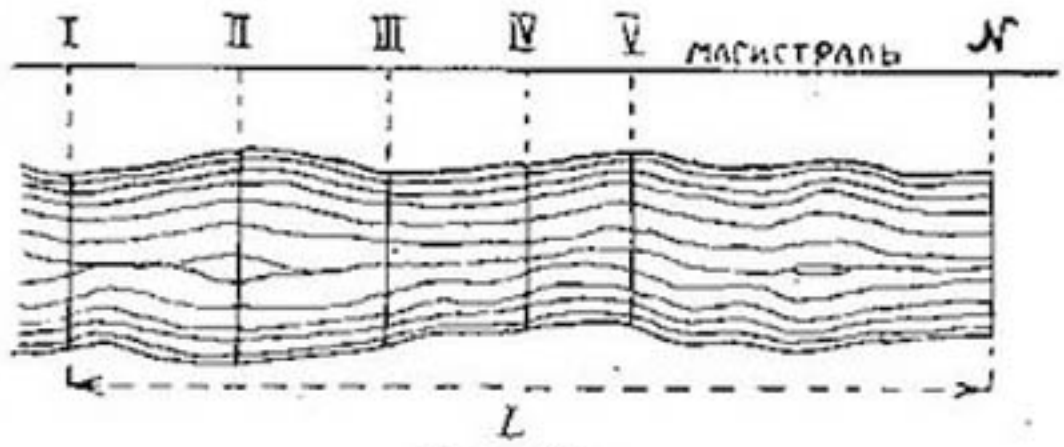


Рис. 39-а.

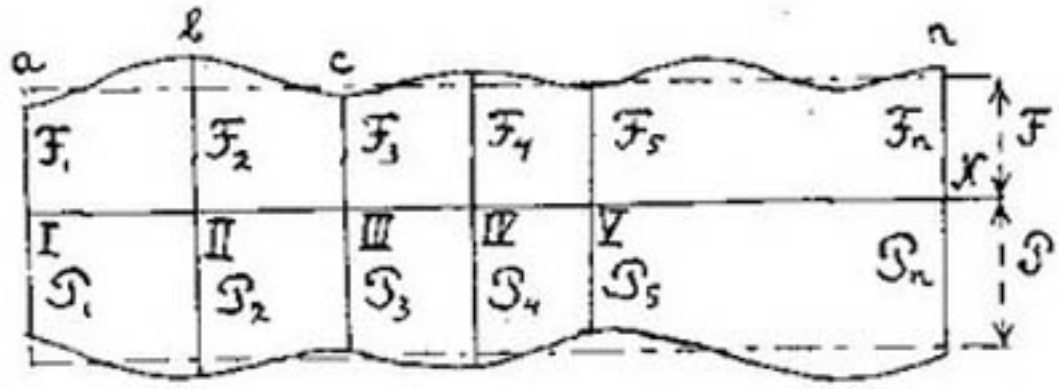


Рис. 39-б.

$$F = \frac{\text{площадь верхней фигуры}}{L}$$

длина смоченного периметра

$$P = \frac{\text{площадь нижней фигуры}}{L}$$

средняя величина гидравлического радиуса $R = \frac{F}{P}$.

При известном для данного горизонта расходе Θ и падении h находим среднюю скорость течения $V = \frac{\Theta}{F}$ и средний уклон $J = \frac{h}{L}$.

По найденным величинам определяем коэффициент шероховатости из выражения

$$V = C\sqrt{RJ} = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}},$$

которое дает

$$\gamma = \left(\frac{87\sqrt{RJ}}{V} - 1\right)\sqrt{R} = \left[\frac{87F\sqrt{RJ}}{\Theta} - 1\right]\sqrt{R}.$$

Так как для естественных рек при обычных качествах грунта, из коего состоят наносы, коэффициент шероховатости мало меняется, то при определении проектного профиля живого сечения по формулам (1) и (2) можно пользоваться величинами коэффициента C формулы Шези, определенными Германеком, которые приведены в таблице на стр. 32-й. При этом значительно упрощаются и сами исчисления помощью подбора.

Численный пример. При известных: расходе $\Theta = 600$ *куб. м.*, уклоне $J = 0{,}0004$ и пологости откоса русла около уреза воды $\beta = 12:1$, требуется определить для параболического профиля русла глубину по средине $\mathcal{T}$, среднюю глубину t, ширину на поверхности воды b и площадь живого сечения F.

Подставляя известные величины в формулу (2), имеем:

$$t = \sqrt[5]{\left(\frac{600}{6 \cdot 12 \cdot C}\right)^2 \cdot \frac{1}{0{,}0004}} = \sqrt[5]{\frac{173600}{C^2}}.$$

Задаемся величиной $C = 35$

$$t = \sqrt[5]{\frac{173600}{1225}} = 2{,}70 \text{ м.}$$

По таблице Германека при $t = 2{,}70$, коэффициент

$$C = \frac{43{,}2 + 44{,}0}{2} = 43{,}6.$$

Подставляем эту величину

$$t = \sqrt[5]{\frac{173600}{1901}} = 2{,}46 \text{ м.}$$

По таблице Германека при $t = 2{,}46$ *м.*, (интерполируя), коэффициент $C = 42{,}6$, что близко к принятому.

Останавливаясь на $t = 2{,}46$ *м.*, получаем:

$$\mathcal{T} = {}^3/_2\, t = 3{,}68 \text{ м.}$$
$$b = 6\beta t = 177 \text{ м.}$$
$$F = \beta t = 435{,}4 \text{ м}^2.$$

Вышеприведенный способ определения проектного профиля живого сечения на перевалах регулируемого участка реки предполагает этот профиль параболическим и не учитывает отдельно того, что, кроме течения воды, в русле будет происходить движение наносов.

Проф. Ф. Крейтер указывает способ определения для регулируемого участка нормального профиля трапецоидальной формы по данным обмера образцового участка, различая при этом два случая: 1) река не несет или несет очень мало наносов и 2) река влечет значительное количество наносов.

В первом случае основанием для расчета служит условие, что русло регулируемого участка, при заданном продольном поверхностном уклоне

воды J_1, должно пропускать тот же расход воды, как и образцовый участок, для которого известны как продольный поверхностный уклон J, так и средние величины элементов его поперечных сечений, найденные вышеуказанным способом. Если обозначим эти средние для образцового участка величины F — живого сечения, R — гидравлического радиуса, V — средней скорости течения, γ — коэффициента шероховатости (по формуле Базена), а все соответствующие элементы для регулируемого русла обозначим теми же буквами, но со значком (1), то для пропуска одной и той же величины расхода воды нужно, чтобы

$$\Theta = F_1 V_1 = F \cdot V$$

или

$$F_1 C_1 \sqrt{R_1 J_1} = F C \sqrt{R J},$$

а так как по Базену

$$C_1 = \frac{87}{1 + \frac{\gamma_1}{\sqrt{R_1}}} \quad \text{и} \quad C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}},$$

то

$$F_1 \frac{87 R_1}{\sqrt{R_1} + \gamma_1} \sqrt{J_1} = F \frac{87 R}{\sqrt{R} + \gamma} \sqrt{J}$$

или

$$\frac{F_1}{F} = \frac{\sqrt{R_1} + \gamma_1}{\sqrt{R} + \gamma} \cdot \frac{R}{R_1} \cdot \sqrt{\frac{J}{J_1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Взявши равенство (3) за основание, приходится для дальнейшего расчета принять какое-нибудь определенное условие. Если принять, что гидравлический радиус создаваемого русла должен быть равен средней величине гидравлического радиуса на образцовом участке, то при $R_1 = R$

$$\frac{F_1}{P_1} = \frac{F}{P}, \text{ или } \frac{F_1}{F} = \frac{P_1}{P}.$$

Поэтому при означенном условии имеем из выражения (3)

$$\frac{F_1}{F} = \frac{P_1}{P} = \frac{\sqrt{R} + \gamma_1}{\sqrt{R} + \gamma} \cdot \sqrt{\frac{J}{J_1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Если, кроме того, возможно принять при одинаковых качествах грунта на регулируемом и образцовом участках, что коэффициенты шероховатости одинаковы, т. е. что $\gamma_1 = \gamma$, то выведенное соотношение упрощается, принимая вид:

$$\frac{F_1}{F} = \frac{P_1}{P} = \sqrt{\frac{J}{J_1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Пользуясь этими соотношениями, можно построить, по данным образцового участка, поперечное сечение трапецоидальной формы

нормального профиля для регулируемого участка реки, если задаться его уклоном J_1 и пологостью (β) откосов его берегов (см. рис. 40).

При этом можно пользоваться следующим способом вычисления.

Величину площади живого сечения и подводного периметра для нормального профиля получаем из выражения (5):

$$F_1 = F\sqrt{\frac{J}{J_1}} \text{ и } P_1 = P\sqrt{\frac{J}{J_1}}$$

По чертежу имеем:

$$F_1 = [S + \beta t]t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(а)}$$

$$P_1 = S + 2t\sqrt{1+\beta^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(б)}$$

из выражения (а) получаем:

$$t = -\frac{S}{2\beta} + \sqrt{\frac{F_1}{\beta} + \left(\frac{S}{2\beta}\right)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(в)}$$

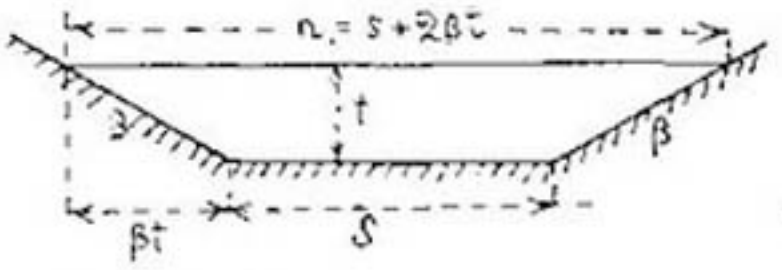


Рис. 40. Трапецоидальное русло.

Подставляя в выражение (б), получаем:

$$P_1 = S + 2\sqrt{1+\beta^2}\left[-\frac{S}{2\beta} + \sqrt{\frac{F_1}{\beta} + \left(\frac{S}{2\beta}\right)^2}\right]$$

или

$$P_1 - S\left[1 - \frac{\sqrt{1+\beta^2}}{\beta}\right] = 2\sqrt{\frac{1+\beta^2}{\beta}F_1 + \frac{1+\beta^2}{4\beta^2}\cdot S^2}.$$

Вычисливши, по величине уклона β,

$$1 - \frac{\sqrt{1+\beta^2}}{\beta} = \gamma_1;\ \frac{1+\beta^2}{4\beta^2} = \psi;\ \frac{1+\beta^2}{\beta} - F_1 = M$$

упрощаем последнее выражение

$$P_1 - S\gamma_1 = 2\sqrt{M + \psi S^2}$$

или, возвысив обе части во вторую степень,

$$P_1^2 - 2\gamma_1 P_1 S + \gamma_1^2 S^2 = 4M + 4\psi S^2$$

$$S^2 - \frac{2\gamma_1 P_1}{\gamma_1^2 - 4\psi}\cdot S = \frac{4M - P_1^2}{\gamma_1^2 - 4\psi}$$

Для дальнейшего упрощения расчетов вычислим

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_1^2 - 4\psi}P_1 = a;\ \frac{4M - P_1^2}{\gamma_1^2 - 4\psi} = B,$$

и, делая подстановку, получаем квадратное уравнение

$$S^2 - 2aS - B = 0$$

откуда определяется ширина по дну:

$$S = a + \sqrt{B + a^2}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(г)}$$

а, зная ее, определяем по уравнению (в) и глубину воды t.

Таким способом можно вычислить и построить нормальные профиля для нескольких горизонтов. Крейтер приводит в своем труде [1]) способ такого же расчета для определения нормального профиля русла, обнимающего как средние воды, так и высокие, следовательно для двух'ярусного русла, т. е. для такого случая, когда высокими водами затопляется не только меженнее русло, но и прилежащие к нему береговые пространства (см. рис. 41).

Что касается учета того обстоятельства, что река несет кроме воды еще и твердые частицы наносов, то Крейтер предлагает при определении нормального профиля живого сечения вводить для рек, влекущих обильные наносы, дополнительное условие, а именно, что профиль регулируемого участка реки должен соответствовать пропуску такого же количества наносов, какое проходит по образцовому участку. В основание своего метода расчета он принимает теорию движения наносов, предложенную Du-Boys [2]). Du-Boys, исходя из выражения $N = 1000\, l\, J$ *кг/кв. м.* данного Dubuat для силы, с которой текущая вода действует на речное дно, и называя эту силу **силой**

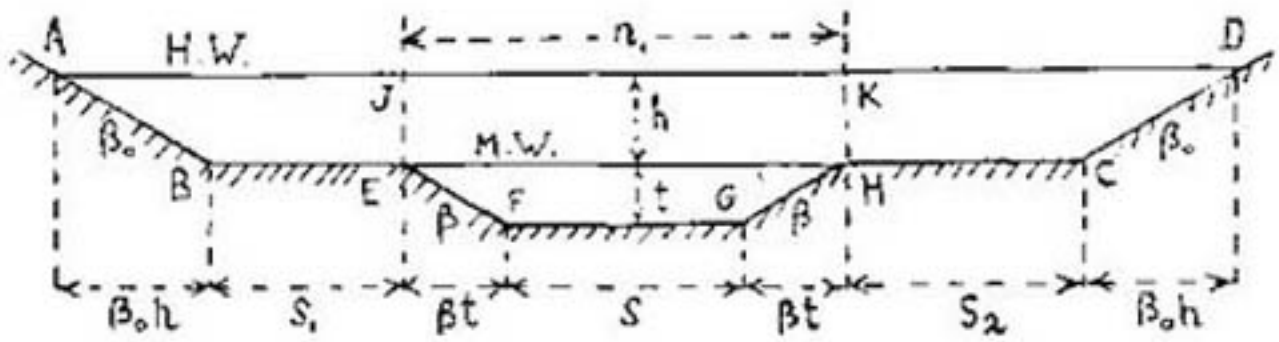


Рис. 41. Двух'ярусное русло.

влечения наносов, выводит, что сила влечения N_0 (в килограммах на 1 кв. метр поверхности дна), при которой только что может начаться движение верхнего слоя наносов, т. е. когда сила влечения равна силе сопротивления, — определяется следующей зависимостью $N_0 = 1000\, l_0\, J = d\, 1000\, (\delta - 1)\, tg\alpha$, где l_0 — наименьшая глубина, на которой может начаться движение верхнего слоя наноса, состоящего из зерен толщиною d, с удельным весом δ, при угле α естественного откоса грунта, состоящего из таких зерен. Развивая свою теорию, Du-Boys доказывает, что при изменениях силы влечения N, в зависимости от глубины и уклона, остается постоянным соотношение между этой силой и количеством q проносимых наносов, причем это соотношение выражается в следующем виде:

$$\frac{q}{N(N - N_0)} = \frac{q_1}{N_1(N_1 - N_0)} = \frac{q_2}{N_2(N_2 - N_0)} = \text{и т. д.} \ldots = E$$

---

[1]) „Der Flussbau".

[2]) Изложение теории Du-Boys можно найти в 1-м выпуске курса внутренних водяных сообщений проф. Б. Н. Кандиба, стр. 66—70, изд. 1922 г., а также в труде К. А. Акулова „Выправительные работы на р. Днепре", изд. 1914 г., ч. II.

и, следовательно, вообще количество наносов, влекомых по дну в данном месте живого сечения на одном метре в ширину реки, составляет

$$q = EN(N - N_0), \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

где q количество наносов в *куб. метр.* в секунду, E постоянное число (коэффициент влечения) для данного рода грунта, а N и N_0 вышеуказанные силы влечения в килограммах на 1 *кв. м.* поверхности дна.

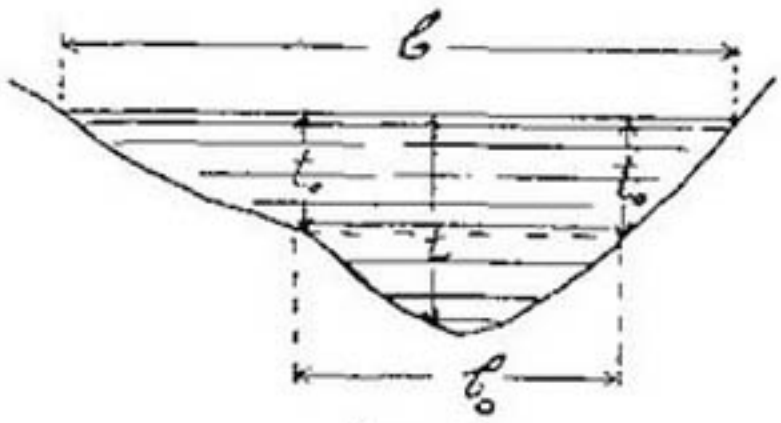


Рис. 42.

Для всего живого сечения (рис. 42—43) полная сила влечения

$$\Sigma N = 1000\, J \int_{x=a}^{x=b} t\, dx = 1000\, J \cdot F_1,$$

где буквой F_1 обозначена та часть площади живого сечения, где возможно влечение наносов. Полное же для всего живого сечения количество влекомых наносов в одну секунду

$$\Sigma q = \int_{x=a}^{x=b} q\, dx = E(1000\, J)^2 \int_{x=a}^{x=b} t\,(t - t_0)\, dx, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

так как суммирование должно быть распространено лишь на ту часть живого сечения Ecg, где глубина t больше глубины $t_0 = \frac{N_0}{1000\, J}$, с которой только и начинается влечение наносов.

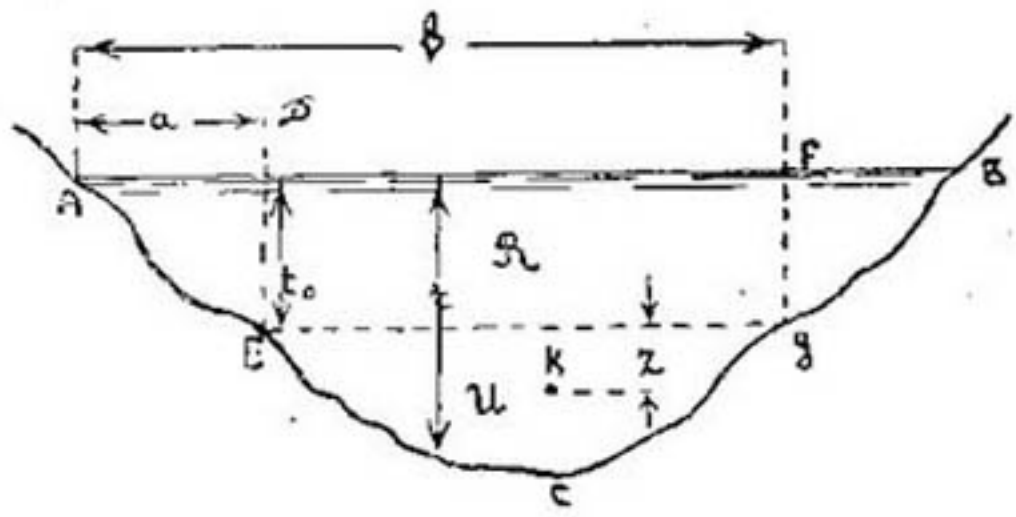


Рис. 43.

Пользуясь этими выражениями Крейтер предлагает следующий способ расчета для определения профиля русла.

В выражении (7) величина $\int_{x=a}^{x=b} t\,(t - t_0)\, dx$, которую обозначим через G, может быть преобразована в следующий вид:

$$G = \int_{x=a}^{x=b} (t - t_0)\, dx = \int_{x=a}^{x=b} t^2 dx - t_0 \int_{x=a}^{x=b} t\, dx \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Первый член $\int_{x=a}^{x=b} l^2 dx$ выражает собою (рис. 43) удвоенную величину статического момента площади $DEcgF$ по отношению линии AB (поверхности воды). Второй член $l_0 \int_{x=a}^{x=b} l dx$ равен той же площади $DEcgF$, помноженной на величину l_0. Площадь $DEcgF$ равна сумме двух площадей: $DEgF$, которую назовем через R, и Ecg, которую назовем через U. Если точка K представляет центр тяжести площади U и находится в расстоянии Z от линии Eg, то уравнение (8) можно заменить следующим:

$$G = Rl_0 + 2U(l_0 + Z) + (R + U)l_0 = U(l_0 + 2Z), \ldots\ldots\ldots(9)$$

а уравнение (7) примет следующий вид:

$$\Sigma q = E(1000\,J)^2\, U(l_0 + 2Z)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(10)$$

Обращаясь к определению нормального профиля, имеем для сего следующие два условия, в которых буквенные обозначения со значком относятся к профилю регулируемого участка, а без значка — к среднему профилю образцового участка.

Первое условие (пропуск расхода воды Θ $м^3$, sec.)

$$\Theta = F \cdot V = F_1 V_1 = F_1 C_1 \sqrt{R_1 J_1}$$

или, принимая для C формулу Базена, имеем

$$F_1 \frac{R_1}{\sqrt{R_1 + \gamma_1}} = \frac{\Theta}{87\sqrt{J_1}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(11)$$

Второе условие (равенство количества пропускаемых наносов)

$$E_1(1000\,J_1)^2 \cdot G_1 = E(1000\,J)^2 \cdot G,$$

откуда

$$G_1 = \frac{E}{E_1}\left(\frac{J}{J_1}\right)^2 \cdot G \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(12)$$

Для образцового участка известна величина уклона J, а величина G определяется по уравнению (9), в котором глубина l_0 может быть определена по наблюдениям.

Для регулируемого участка задаются величиною уклона J_1.

Если бы можно было определить величины коэффициентов E_1 и E, то из уравнения (12) определилась бы и величина G_1. Но, так как нахождение величин этих коэффициентов на практике крайне затруднительно, то Крейтер полагает возможным использовать то обстоятельство, что, по данным опытов, коэффициенты влечения приблизительно пропорциональны величинам наименьшей силы влечения потока $N_0 = 1000\,l\,J$, при которой только что начинается движение

наносов на поверхности дна при данном уклоне и данном роде наносного грунта. Отношение названных сил N_0 — для образцового участка и N_{01} для регулируемого участка можно определить помощью опытов. Поэтому

$$G_1 = \frac{E}{E_1}\left(\frac{J}{J_1}\right)^2 G = \frac{N_0}{N_{01}}\left(\frac{J}{J_1}\right)^2 G \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

Найдя, таким образом, величину G_1 и принимая для нормального профиля трапецоидальную форму (рис. 44), будем иметь для построения этого профиля следующие условия:

1) $$\frac{F_1 R_1}{\sqrt{R_1} + \gamma_1} = \frac{\Theta}{87\sqrt{J_1}} = M$$

2) $$G_1 = t\,(t_{01} + 2Z).$$

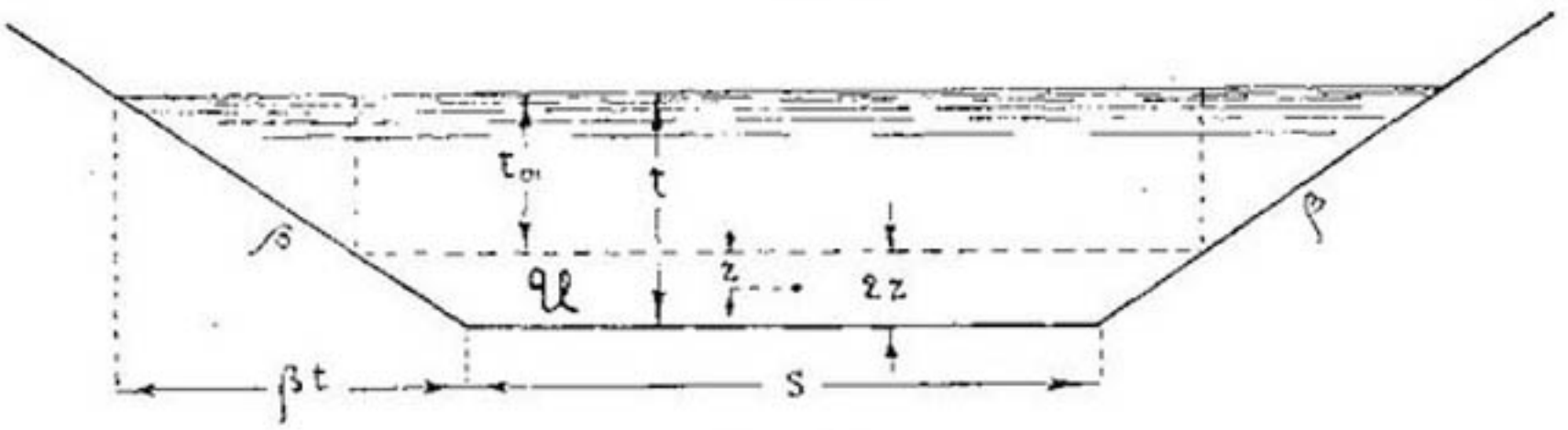


Рис. 44.

где

$$t_{01} = \frac{N_{01}}{1000\,J_1}.$$

Для построения трапеции Крейтер предлагает следующие приемы.

Для трапеции U, имеющей бо́льшую ширину по сравнению с высотою, можно допустить, что центр тяжести площади трапеции находится на половине ее высоты т. е. что $2Z = (t - t_{01})$.

Далее по свойству трапеции имеем:

$$U = [S + \beta(t - t_{01})](t - t_{01}),$$

следовательно

$$G_1 = [S + \beta(t - t_{01})]\,t\,(t - t_{01}),$$

откуда

$$S = \frac{G_1}{(t - t_{01})\,t} - \beta(t - t_{01}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

Тоже по свойствам трапеции имеем:

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= [S + \beta t]\,t \\ P_1 &= S + 2t\sqrt{1 + \beta^2} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (15)$$

Пользуясь выражениями (11), (14) и (15) и приняв уклон откоса β, согласно качеств грунта, определяем неизвестные S (ширину по дну) и t (глубину дна) графически следующим способом.

Вычисляем по уравнению (14) величину S для равных значений глубины t, больших $t_{01} = \frac{N_{01}}{1000\,J_1}$. Засим, по соответствующим величинам t и S вычисляем по

формулам (15) величины. F_1 и P_1, а также $R_1 = \frac{F_1}{P_1}$. Это даст нам возможность выразить в формуле (11) величину $M = \frac{R_1}{\sqrt{R_1 + \gamma_1}}$, как некоторую функцию, зависящую от глубины t, т. е. $M = f(t)$. Вычисляя величину M для разных значений t, мы можем построить эту функцию в виде кривой графика, в котором на оси абсцис отложены величины t, а по оси ординат соответствующие величины $M = f(t)$. Выбравши на этой кривой ту точку ординаты, которая удовлетворяет условию $M = \frac{\Theta}{87\sqrt{J_1}}$ (см. уравнение 11), найдем по тому же графику искомую величину t—глубину дна, а по уравнению (14) соответствующую величину S—ширину по дну, после чего не трудно построить и всю трапецию.

В отношении вышеизложенного метода Крейтера нужно заметить, что приложение его на практике сопряжено со многими затруднениями, в особенности по трудности в каждом данном случае находить лабораторным или иным способом численные величины отношений: либо упомянутых коэффициентов E_1 и E, либо величин силы начального движения наносов N_{01} и N_0. Между тем, едва ли можно помощью этого метода достигнуть меньших неточностей в определении нормального профиля русла, чем при тех ранее указанных, в общем конечно мало точных, но более простых способах, которыми обыкновенно и довольствуются при составлении нормальных профилей для перевалов регулируемого участка реки.

§ 21. Выправительные сооружения.

Для образования берегов русла средних или меженних вод согласно очертания, установленного выправительной трассой, необходимы такие сооружения, которые, первоначально ограничивая в ширину лишь течение воды, способствовали бы впоследствии естественному замелению наносами той части водного пространства, которая ранее захватывалась меженними водами за пределами выправительной трассы. Поэтому искусственные сооружения нужны главным образом в местах, где линии выправительной трассы не совпадают с естественными берегами меженнего русла; в местах же, где линия выправительной трассы проходит по естественному берегу меженних вод, требуется лишь обеспечить устойчивое состояние берега, для чего часто бывает необходимым произвести берегоукрепительные работы на более или менее значительном протяжении. Укрепление естественных берегов меженнего русла является одной из крупнейших работ в числе прочих выправительных работ. С укрепления берегов обычно и начинаются выправительные работы, причем берегоукрепительные работы приходится продолжать и впоследствии в зависимости от выясняющегося влияния выправительных сооружений на речное течение. В некоторых случаях приходится наращивать берег в сторону русла, для чего берегоукрепительная одежда делается широкой,

в виде дамбы, примкнутой к берегу на всем протяжении, и тогда она носит название береговой опояски.

Для создания новых меженних берегов основными сооружениями являются дамбы, выведенные в русле реки, либо параллельно течению, в таком случае они носят название продольные (или *параллельные*) дамбы, либо в виде поперечных сооружений, идущих от естественного берега до линии вновь создаваемого берега, и в таком случае они называются полузапрудами или бунами. Высота тех

Рис. 45. Выправление русла парными (двухсторонними) дамбами.

и других дамб ограничивается уровнем средних вод реки или уровнем высоких меженних вод, лишь немного возвышаясь над ними, так как именно для этих вод и производятся выправительные работы.

Продольные дамбы, в зависимости от местных условий, могут требоваться или по обеим сторонам русла (парные), или только с одной стороны (одиночные). В простейшем виде своего расположения продольные дамбы показаны на рис. 45 и 46-м. Первый из этих рисун-

Рис. 46. Выправление русла односторонней продольной дамбой.

ков представляет русло, заключенное между парными дамбами, а второй—тот случай, когда новое русло ограждено с одной стороны естественным укрепленным берегом, а с другой стороны дамбой. В обоих случаях продольные дамбы сопряжены в своих концах с естественным берегом, а с целью получения более благоприятных условий для естественного заиления при высоких водах пространства, находящегося между дамбой и берегом, продольные дамбы в некоторых местах по своей длине соединяются с естественным берегом поперечными дамбами, которые носят название траверс.

Способ образования искусственного берега помощью полузапруд показан в простейшем виде на рис. 47-м. От берега, на некотором расстоянии друг от друга, выводится в реку ряд дамб-полузапруд, концы

которых доводятся до проектируемого очертания меженнего русла. Пространства между смежными полузапрудами предоставляются естественному заполнению речными наносами. В зависимости от взаимного расположения естественных берегов и от проектируемого очертания нового русла, полузапруды возводятся или только от одного, или же от обоих берегов.

Система выправительных сооружений, состоящих из продольных дамб, стала применяться раньше, чем система полузапруд, но, так как каждая из этих систем имеет, по сравнению их между собою, свои преимущества и недостатки, то впоследствии начали применять одновременно при одних и тех же выправительных работах как продольные дамбы, так и полузапруды, причем такое сочетание продольных дамб и полузапруд стало называться смешанной системой выправительных сооружений.

Относительные качества той и другой из упомянутых двух систем характеризуются следующими обстоятельствами.

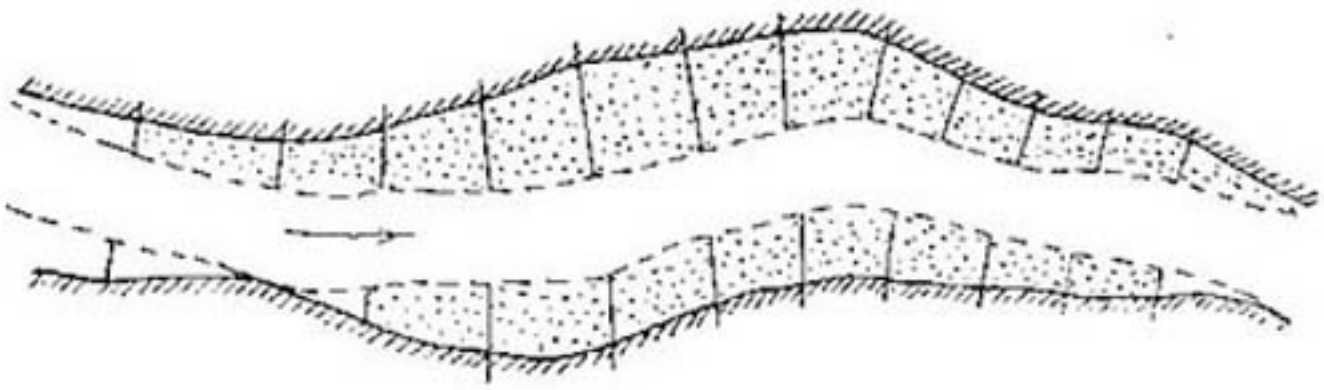


Рис. 47. Выправление русла полузапрудами.

К положительным качествам системы продольных дамб относится то обстоятельство, что продольная дамба, действуя на поток непрерывно, направляет течение плавно, без образования водоворотов, и на протяжении, где дамба выведена по вогнутости, она, подобно хорошему вогнутому берегу, сосредоточивает работоспособность текущей воды на образование вдоль дамбы глубокого тальвега с плавным очертанием в плане. Однако, прижатие вымоин дна к основанию дамбы требует мер предохранения последней от подмыва. При этой системе продольные дамбы сразу устанавливают и закрепляют положение искусственных берегов меженнего русла и ширину последнего; поэтому, если бы исчисленная теоретически ширина русла оказалась в действительности недостаточной, то для исправления положения потребуется переустройство всей продольной дамбы, а иногда и обоих дамб. Для сосредоточения потока при всех меженних уровнях в русле, огражденном продольными дамбами, гребень дамб нужно поднять выше меженних вод, иногда даже выше среднего уровня реки. Но при большой высоте дамб находящиеся позади них пространства трудно подвергаются естественному заилению речными наносами, так как в эти огражденные от реки бассейны могут попадать речные наносы только

в периоды высоких вод, притом только наносы, находящиеся в воде во взвешенном состоянии. Между тем складывание наносов в боковых бассейнах имеет крайне важное значение, так как в противном случае наносы влекутся далее и складываются в нижней части регулируемого участка на фарватере реки, причиняя новые неудобства. Скорейшая засыпка пространства позади продольных дамб важна еще и потому, что продольная дамба, соединенная по концам с естественным берегом, испытывает при под'еме воды в реке большое гидростатическое давление со стороны реки, а засим и переливы воды через гребень дамбы, грозящие прочности самой дамбы. Кроме того, пока пространства между дамбами и естественными берегами не будут полностью засыпаны и обращены в твердое береговое пространство, до тех пор огражденное русло постоянно подвергается опасности быть обойденным течением позади дамб. С целью уменьшить гидростатическое давление на дамбы при под'емах воды, оставляются в продольных дамбах специальные отверстия, в виде перерывов, для сообщения воды, находящейся в реке, с водою в боковых бассейнах. Такие отверстия оказывают некоторую пользу и в отношении проникновения речных наносов в боковые бассейны. Но наличие отверстий, нарушающих непрерывность линии бокового ограждения русла, сопряжено с образованием водоворотов и требует усиления конструкции дамбы в местах ее перерывов. Значительную помощь для заиления боковых бассейнов приносят поперечные траверсы, гребень которых поднят несколько выше гребня продольной дамбы с целью лучшего удержания наносов, влекомых во взвешенном состоянии при высоких уровнях речной воды. Траверсы, как поперечные заграждения пространства между продольной дамбой и берегом, являются вместе с тем мерой предохранения от разработки потоком нового русла в пространстве позади продольной дамбы, пока оно еще недостаточно заполнено наносами. Однако, все перечисленные меры недостаточны, чтобы значительно ускорить естественную засыпку пространства позади продольных дамб. Нередко проходили многие годы без существенного заиления упомянутых пространств.

Обращаясь к другой системе регуляционных сооружений, к полузапрудам, нужно заметить, что она представляет некоторые существенные преимущества перед системой параллельных сооружений. Полузапруды можно не выводить сразу до проектной трассы образуемого русла; их можно удлинять постепенно в зависимости от наблюдаемых результатов действия на речной поток. Поэтому неправильно назначенная трасса меженнего русла исправима без особых затруднений. Головы полузапруд могут иметь пологие откосы со стороны образуемого нового русла; кроме того, гребню всей полузапруды можно придать пологий склон от корня полузапруды до ее головы. Благодаря сему живое сечение сжатого в новом русле потока получает при под'еме и понижении уровня воды более или менее плавное изменение как

своей площади, так и ширины по верху. Полузапруду можно построить с переменной крутизной продольного уклона ее гребня, причем гребень можно с любой крутизной спускать ниже поверхности воды до дна, принаравливая, таким образом, очертание гребня полузапруды к желаемой форме берега в поперечных сечениях русла (так называемые *донные полузапруды*). Естественная засыпка берегов речными наносами происходит между полузапрудами более энергично, чем за продольными дамбами. Пространство между полузапрудами заполняется не только заносом при высокой воде твердых частиц, поднявшихся в толщу воды, но и передвижением частиц по дну при всяких положениях уровня речной воды. Наконец, полузапруды представляют больше удобства, чем продольные дамбы, для засыпки берегов грунтом, вынутым при землечерпании, что часто практикуется при производстве на реках регуляционных дноуглубительных работ. Однако, система сооружений, состоящая только из одних полузапруд, имеет и существенные недостатки, заключающиеся главным образом в том, что до окончательного занесения промежутков между полузапрудами, т. е. до образования, таким образом, сплошной линии нового берега, полузапруды своими выступающими концами нарушают правильное течение воды, образуют водовороты около своих голов и тем вызывают сильные местные размывы, вредные как для прочности полузапруд, так и для состояния дна по фарватеру. Полное заиление пространств между полузапрудами требует иногда значительного времени, в особенности в таких случаях, когда сильное течение легко проникает в упомянутые пространства, достигая до корней полузапруд, размывая и унося ранее отложившиеся наносы. Такими неблагоприятными случаями являются, например, устройство коротких полузапруд около вогнутых берегов, около приверхов островов и т. п.

Вполне естественно, что вышеотмеченные относительные достоинства и недостатки продольных дамб и полузапруд побуждают часто применять *смешанную* систему выправительных сооружений, используя положительные качества того и другого типа сооружений в подходящих случаях.

На рисунках 48 и 49-м приведены два простейших примера плана расположения сооружений на двух регулированных участках реки. На обоих планах естественные берега (среднего уровня воды) обозначены отштрихованными линиями, а трасса искусственных берегов для воды того же уровня изображена пунктирными линиями. Пример, показанный на рис. 48-м, заключает в себе случай закрытия побочного рукава, идущего в обход острова, а на примере по рисунку 49-му имеется случай впадения в регулируемом участке реки небольшого ее притока.

Полузапруды располагаются преимущественно у выпуклых берегов, а также во всех случаях, когда трасса расположена вдали от естественного берега. Расстояние между полузапрудами должно быть выбрано с таким расчетом, чтобы при наименьшем общем протяжении

полузапруд обеспечить возможно скорейший естественный занос пространства между запрудами и образование новой линии берега, а пока это еще не достигнуто, чтобы головы полузапруд достаточно плавно направляли течение. В целях экономии иногда расставляют полузапруды на большом расстоянии друг от друга с тем, чтобы впоследствии, если окажется действительная надобность, построить промежуточные полузапруды. На примере, изображенном на рис. 48-м, такие промежуточные полузапруды обозначены пунктиром.

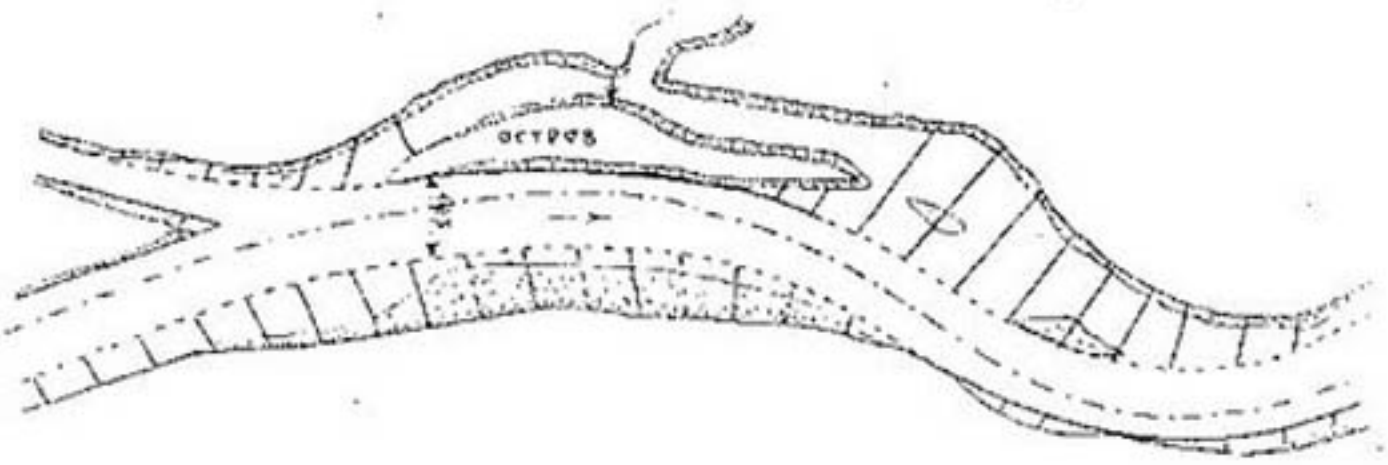


Рис. 48. Смешанная система выправительных сооружений. Участок реки, разделенный на рукава.

Параллельные сооружения являются более благоприятными для направления течения, почему их обычно располагают у вогнутых берегов. При этом если трасса прижимается на значительном протяжении к естественному берегу, то параллельное сооружение состоит из опояски берега; таковая показана на рис. 48-м вдоль берега острова.

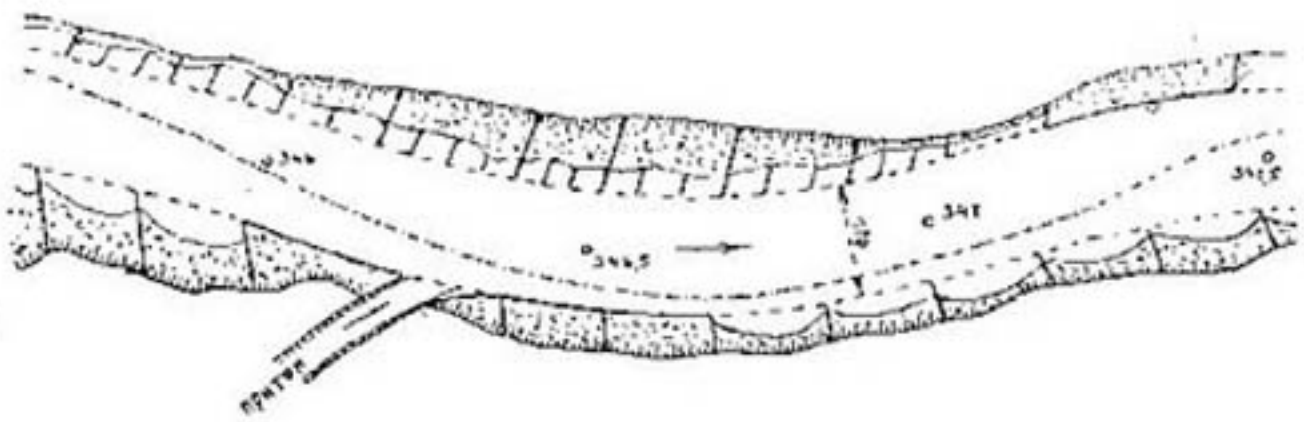


Рис. 49. Смешанная система выправительных сооружений. Участок реки, где впадает приток.

Если естественный берег далеко отстоит от вогнутости трассы, то, применяя продольную дамбу, таковую делают либо в виде глаголеобразных пристроек к головам полузапруд, либо соединяют продольной дамбой головы полузапруд так, что последние приобретают значение траверсов. Продольные дамбы и опояски являются подходящими сооружениями для устройства устьевых сопряжений, для образования правильных стрелок в местах разделения и слияния рукавов и пр. На рис. 50-м приведены схемы разного рода применения параллельных сооружений.

Продольные дамбы и полузапруды приходится строить чаще всего на таких местах реки, где меженнее русло с неправильными очертаниями берегов получило большие местные расширения и где потому требуется помощью упомянутых сооружений сузить ширину русла. В таких случаях они служат водостеснительными сооружениями. Но при выправительных работах нередко встречается необходимость и в таких сооружениях, которые главным образом служат для воздействия на речной поток лишь в смысле сообщения ему правильного течения в благоприятном направлении, без разбрасывания в стороны и без образования водоворотов. Соответственно своего назначения, сооружения эти называются струенаправляющими дамбами. Струенаправляющие дамбы приходится, например, строить для отклонения течения от побочных рукавов, для устранения или для смягчения водоворотов, образующихся вследствие выдвинутых в реку сооружений, в том числе и полузапруд. С тою же целью иногда снабжают полузапруды струенаправляющими дамбами, примкнутыми к голове полузапруды и направленными параллельно течению, причем полузапруды такого рода называют глаголями. В местах пересечения реки мостами струенаправляющие дамбы необходимы для плавного направления течения в мостовые пролеты.

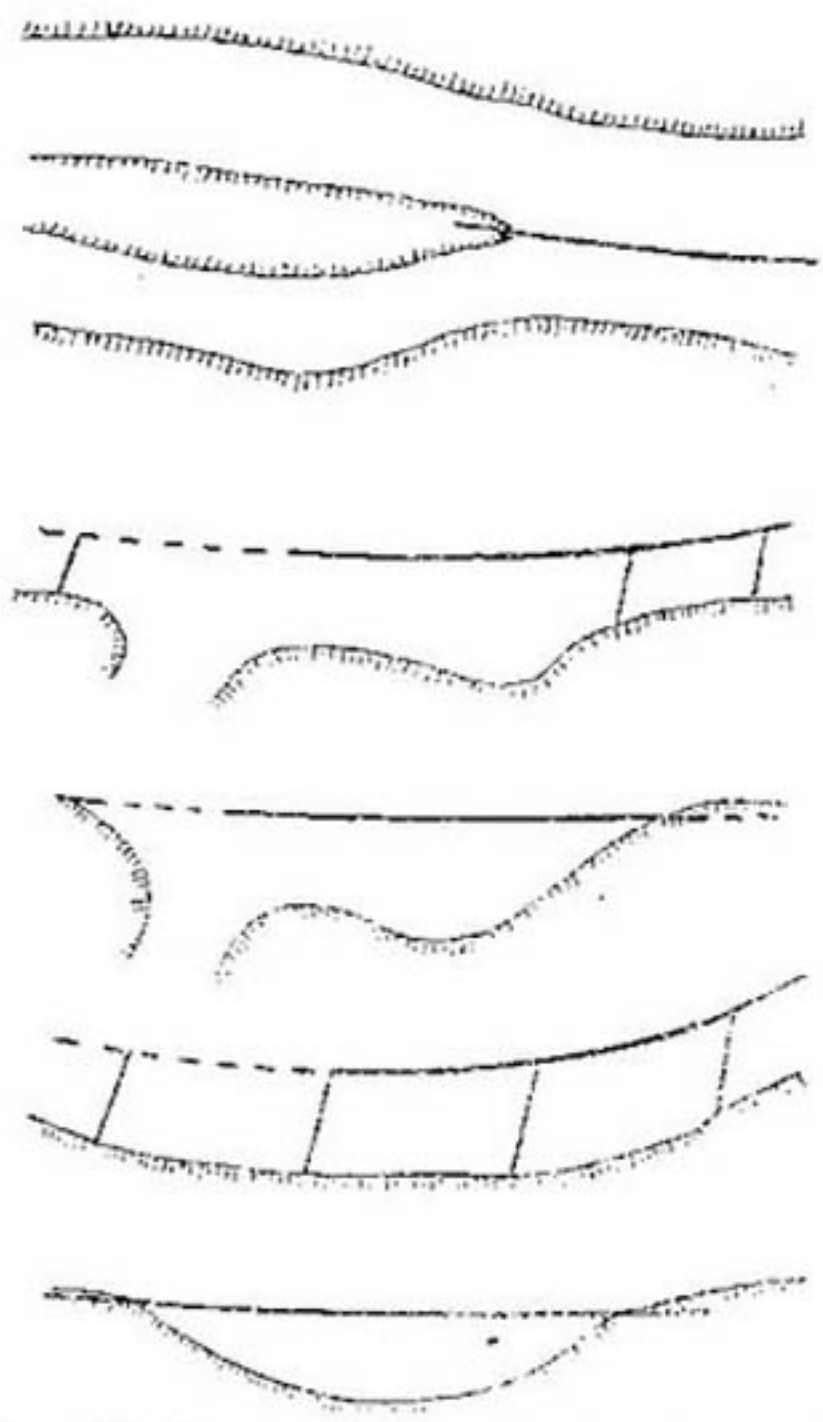


Рис. 50. Схемы расположения продольных дамб в разных случаях.

К задачам выправительных работ, как объяснено выше, относится сосредоточение меженнего течения в едином русле, для чего требуется закрытие побочных рукавов. Закрытие достигается помощью постройки в русле рукава поперечных дамб от одного берега до другого (рис. 48). Такие сооружения носят название запруды. С целью скорейшего заиления рукава часто приходится строить на его протяжении несколько запруд, разделяющих русло рукава на ряд разобщенных между собою прудов.

Если, согласно проектной трассы, меженнее русло приходится в некоторых местах провести по отмелям, по острову или по пойменной части долины, то для первоначального образования русла на таких

местах требуется устройство землечерпательных прорезей или искусственных так называемых прокопов.

Землечерпание тоже необходимо в помощь речному течению при разработке русла, а равно для ускорения образования береговой территории между полузапрудами и за продольными дамбами помощью засыпки в эти места продуктов землечерпания. При таком назначении землечерпательных работ они тоже входят в состав выправительных работ.

Типы расположения и конструкции всех вышеперечисленных выправительных сооружений, а также способы исполнения работ об'яснены далее в главе VI-ой.

§ 22. Фарватер при низких уровнях воды. Регуляционные работы для его улучшения.

В результате выправительных работ достигается известное упорядочение речного течения и создаются более благоприятные условия стока меженних вод. Помощью выправительных сооружений (§ 21) течение меженних вод сосредоточивается в едином русле правильного очертания в плане и заключенном между устойчивыми берегами. В созданном таким образом русле, конечно, не установится однообразной по всей его длине глубины и однообразных форм живого сечения. Дно русла все же будет представлять чередование вымоин и мелей, но при правильном расположении русла в плане достигается уже известная устойчивость его режима в смысле сохранения постоянных мест вымоин дна на плесах в закрепленных извилинах и отложения наносов на закрепленных переходах от одной извилины к другой. Это обстоятельство имеет полезное значение для дальнейших работ по улучшению фарватера при низких меженних водах.

Следует заметить, что выиравительные сооружения, регулируя течение высоких меженних вод, могут быть недостаточными, чтобы влиять на течение воды при самых низких горизонтах, когда при сильно уменьшившемся расходе воды нужно воздействовать на течение для поддержания удобного фарватера с достаточной глубиной на перекатах. Для такого воздействия требуются дополнительные регуляционные сооружения, которые, располагаясь в русле низких вод, образуют и закрепляют благоприятные для фарватера формы русла на фарватере. Поэтому эти регуляционные сооружения должны быть соображены с требованиями судоходных удобств.

Фарватер, т. е. полоса воды, по которой происходит движение судов, должен иметь в плане достаточную ширину и достаточно большие радиусы его изгибов. Ширина фарватера B, считая ее по дну, вообще желательна такая, чтобы судно могло повернуться; при этом условии наименьшая ширина определяется из выражения $B \geq \sqrt{l^2 + b^2}$, или лучше $B \geq l + b$, где b ширина, а l длина наибольшего судна.

Однако, такая ширина фарватера часто не может быть выдержана на регулируемом участке при низких меженних уровнях воды в особенности на перевалах; поэтому приходится довольствоваться шириной, удовлетворяющей условию, чтобы идущие на встречу друг другу суда могли свободно разойтись, для чего требуется ширина фарватера на узких прямолинейных участках его: $B \geq 2^1/_2\, b$ при судоходстве одиночными судами и $B \geq (3—3^1/_2)\, b$ при движении буксирными возами.

Для удобного движения судна по узкому криволинейному фарватеру радиус оси фарватера должен быть не менее ушестеренной длины наибольшего судна ($r \geq 6\, b$), а при судоходстве буксирными возами:

$$r \geq (8 — 10\, b).$$

В закруглениях ширина фарватера должна быть увеличена настолько, чтобы прямоугольный участок узкого прямолинейного фарватера, длиной равный длине судна, мог вписаться в криволинейном фарватере, с некоторым запасом, что геометрически выражается следующим уравнением:

$$q = m \cdot \frac{l^2}{4\,(2\,r + B)},$$

где B ширина криволинейного фарватера, r радиус его оси, q = уширение фарватера.

Поперечный профиль русла должен, в отношении судоходства, удовлетворять условию, чтобы по всей ширине фарватера имелась при низком положении уровня воды в реке глубина, достаточная для движения судов; глубина эта определяется нормальной осадкой судна с некоторым запасом, который принимается обыкновенно от 0,20 до 0,30 метр.

Изображенная на рис. 51-м схема поясняет значение частей профиля. Заштрихованный прямоугольник, шириною b и высотою t, есть часть профиля, нужная для движения судов при том горизонте низких вод, который принят для расчета профиля.

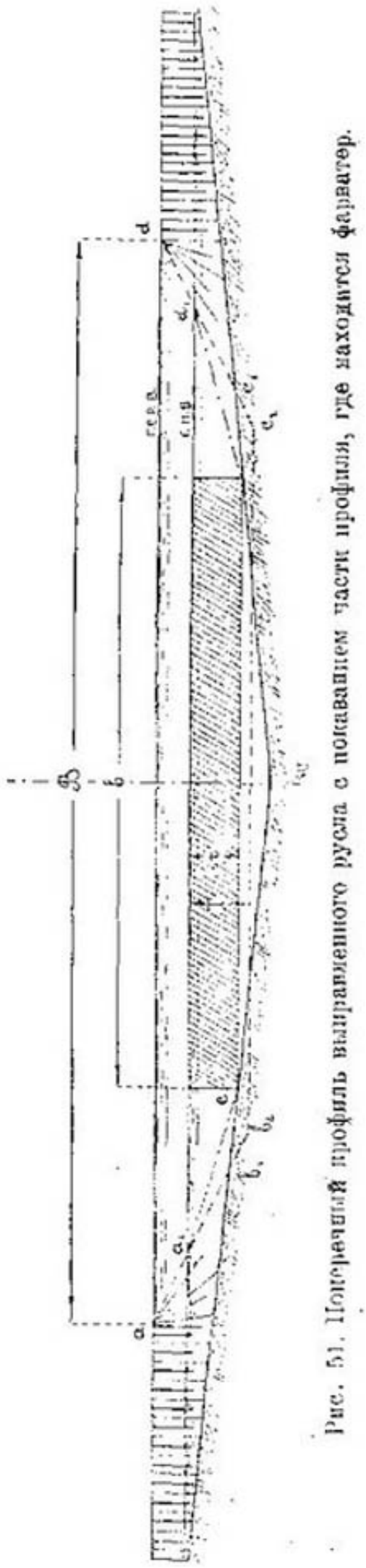


Рис. 51. Поперечный профиль выправленного русла с показанием части профиля, где находится фарватер.

Горизонты ad и a_1d_1 представляют положения уровня воды, которые принимаются в основание регуляционных работ.

Верхний из них ad является горизонтом, ниже которого речное течение заключено в искусственных берегах и, следовательно, до высоты которого возводятся гребни продольных дамб, головы полузапруд, береговые опояски и пр. сооружения. Расстояние B между этими берегами представляет ширину трассы выправительных сооружений. Как выше упоминалось, высота меженних берегов выбирается с таким расчетом, чтобы заключенное между ними русло вмещало в себе меженние воды при всех колебаниях величины их расхода. Практика регулирования рек не выработала определенных указаний, какую именно высоту следует принимать для установления этого горизонта. На реках Германии в большинстве случаев за этот горизонт принимался средний уровень воды в реке, под которым нужно понимать среднюю арифметическую высоту уровня, взятую из всех его колебаний за длинный период времени (10, 20, 30 и более лет). Принимают иногда за этот горизонт так называемый обыкновенный уровень воды, т. е. тот уровень, длительность которого составляет 50% за многолетний период времени наблюдений (см. § 3 стр. 15); этот уровень обычно соответствует зоне, где хорошо принимается растительность для укрепления берегов и гребней сооружений.

Нижний горизонт $a_1\ d_1$ представляет тот наинизший уровень воды, при котором нужно еще обеспечить движение судов при нормальной осадке последних. Обычно за этот горизонт принимают так называемый средне-низкий горизонт, т. е. среднюю высоту из наиболее низких в навигационный период горизонтов, выведенную за многолетний период времени, так как обеспечить помощью регулирования глубину на фарватере, нужную для нормальной осадки судов при самых низких из когда либо наблюдавшихся положений уровня воды, в большинстве случаев вовсе не представляется возможным. Иногда упомянутый горизонт a_1d_1 устанавливается по соображению со средним числом дней в навигацию (например 10—15 дней), когда, по условиям судоходства, можно уменьшить глубину допускаемой осадки судов против нормальной.

Если нормальный профиль проектируется трапецоидальной формы, то проектное дно $b_2\ \ c_2$ должно быть принято несколько шире, чем фарватер b, и несколько ниже глубины t с тем расчетом, что под влиянием течения дно со временем примет параболическую форму $a_1\, wd_1$ без сокращения нужной глубины на ширине фарватера. Боковые стороны трапеции ab_2 и dc_2 делаются по пологому уклону в 1 : 4 — 1 : 5, по которому обычно возводят образующие эти стороны трапеции откосы голов полузапруд или наружные откосы продольных дамб.

Сжатый и симметричный по отношению середины реки профиль, изображенный на рис. 51-м, предполагается для прямых участков реки

и на перевалах; в извилинах фарватер отклоняется ближе к вогнутым берегам, соответственно чему и меняются профиля, как это показано на рис. 52-м.

Вопрос о том, можно ли на данном регулируемом участке реки при том или ином из низких меженних уровней получить такую ширину и глубину фарватера, какая удовлетворяет вышесказанным требованиям судоходства, должен быть выяснем путем изучения профилей хороших участков той же реки, сходных по гидрологическим условиям. Для теоретической же поверки могут служить формулы,

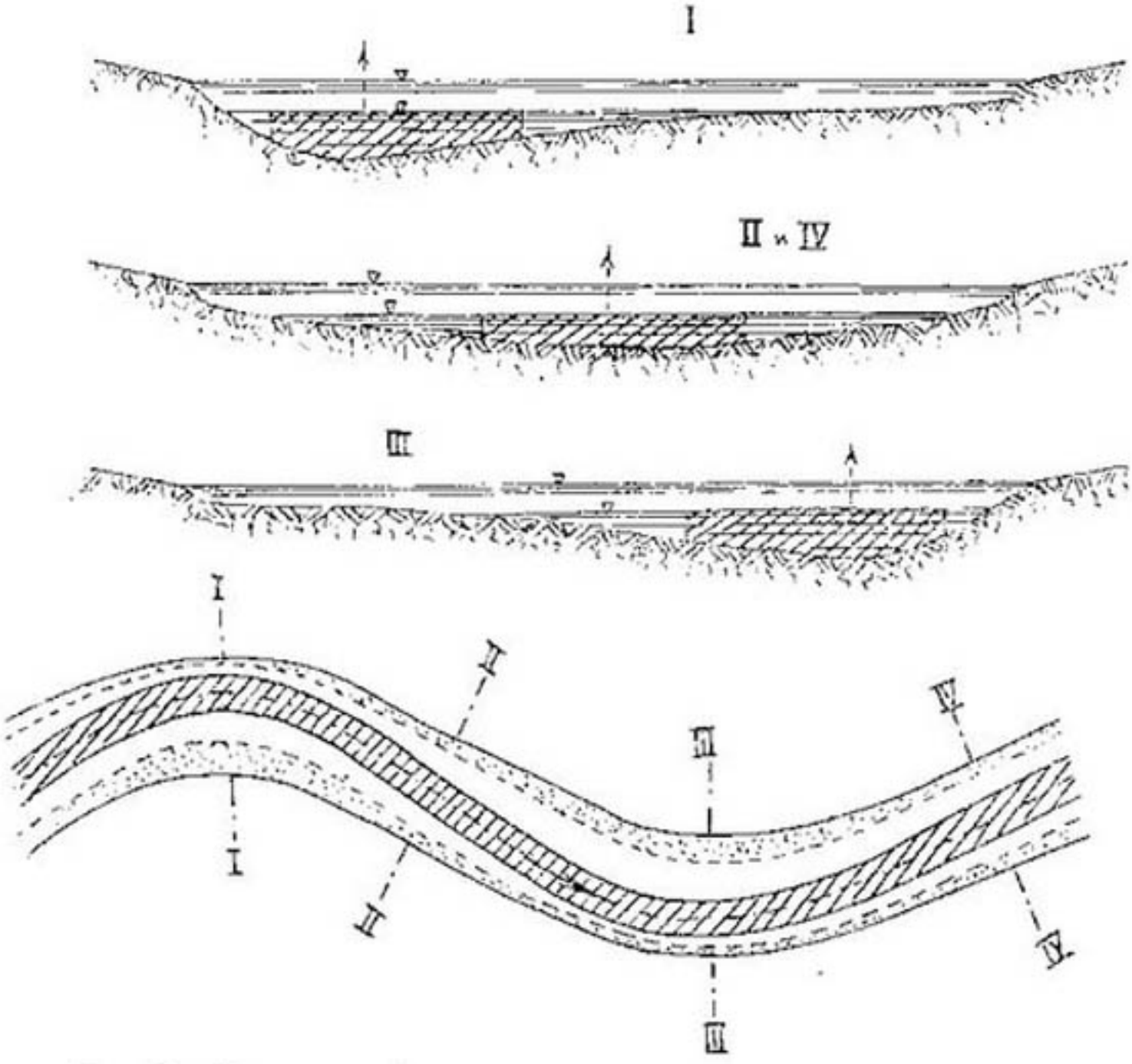


Рис. 52. Положение фарватера в разных местах по длине реки.

приведенные в § 20-м при рассмотрении вопроса о нормальных профилях живого сечения для высоких меженних уровней. Если такое изучение покажет, что при выбранном для регулирования фарватера предельно низшем горизонте расход воды не достаточен для заданного профиля, то придется изменить задание либо в отношении выбора предельно низкого горизонта, повысивши его, либо в отношении ширины фарватера и нормальной осадки судов.

При регулировании фарватера установленный для предельно низшего горизонта профиль живого сечения, также как и при первоначальных работах, не может быть проведен однообразным для всего участка. Нужно иметь в виду, что каждое сжатие русла вызывает его

углубление и смягчение поверхностного уклона; напротив, уширение русла вызывает отложение здесь наносов и увеличение уклона воды. Поэтому, если на плесовом участке уже имеются бо́льшие, чем нужно, глубины и столь пологий уклон, какой не может быть достигнут при выравнивании уклона на перекате, то на плесовой части нужна бо́льшая ширина русла, чем на перекате. Отсюда следует, что при низком уровне ширина регулируемой реки должна вообще колебаться между наименьшей величиной на перевалах и наибольшей в плесах, с плавными переходами от одной ширины к другой. Также не должна быть однообразной и форма живого сечения: на прямолинейных участках фарватера, на перевалах, она может быть симметричной, параболической или трапецоидальной, а на крутых извилинах должна приближаться к треугольной форме с более крутыми уклонами дна со стороны вогнутого берега и с пологим под'емом к выпуклому берегу, также сохраняя плавность перехода от одной формы к другой.

Что касается сооружений, применяющихся для регулирования фарватера, то таковые в разных случаях служат: во 1-х, для постепенного уменьшения площади живого сечения по мере уменьшения расхода воды, во 2-х, для повышения и укрепления дна в местах, где оно подвергается слишком глубокому размыву, в 3-х, для постепенного отклонения, где это нужно, течения от берега и, наконец, для защиты от подмыва в подводной части берегов или их заменяющих сооружений (продольных дамб, береговых опоясков, голов полузапруд и т. п.). Для этой цели применяются д о н н ы е п о л у з а п р у д ы и д о н н ы е з а п р у д ы — п о р о г и. Донная полузапруда представляет собою сооружение, примкнутое к берегу, или к откосу продольной дамбы, или к откосу головы полузапруды; гребень донной полузапруды спускается круто, с уклоном 1/10—1/20 в воду до самого дна. В поперечном сечении донная полузапруда имеет обычно трапецоидальную форму. На рис 51-м показаны буквами a_1 c и d_1 f гребни донных полузапруд, примкнутых к откосу голов обыкновенных полузапруд на уровне низких вод, помощью которых трапецоидальный профиль живого сечения при низкой воде уменьшается до очертания дна a_1 c w f d.

Помощью устройства порогов или так называемых донных запруд можно заделать глубокие рытвины на дне регулируемого русла или даже поднять дно реки на некотором протяжении. Пороги представляют собой ряд расставленных на некотором расстоянии друг от друга поперечных валов, устроенных в виде гряд на дне. Гребни порогов подняты от дна на такую высоту, которая определяется из условия сохранения над гребнем порога глубины, не меньшей той, которая нужна для судоходства при самых низких уровнях воды. Расстояние между порогами определяется по соображению с тем, чтобы промежутки между порогами заполнялись наносами по возможности скорее. Если пороги строятся для закрытия узких продольных вымоин (рытвин)

на дне, то длина порога соотвествует ширине рытвины, причем, однако концы порога, во избежание размыва, должны прочно входить в дно и быть несколько приподнятыми по сравнению с положением гребня порога на середине его длины. Если же нужно поднять все дно, то пороги строятся во всю ширину русла и примыкают по концам к донным полузапрудам, или к головам обыкновенных полузапруд, к откосам продольных дамб, к береговым опояскам и пр. (рис. 53). Для лучшего сопряжения с берегами порогам придают в плане форму не прямой линии, а ломаной так, что середина порога несколько выступает вверх по течению.

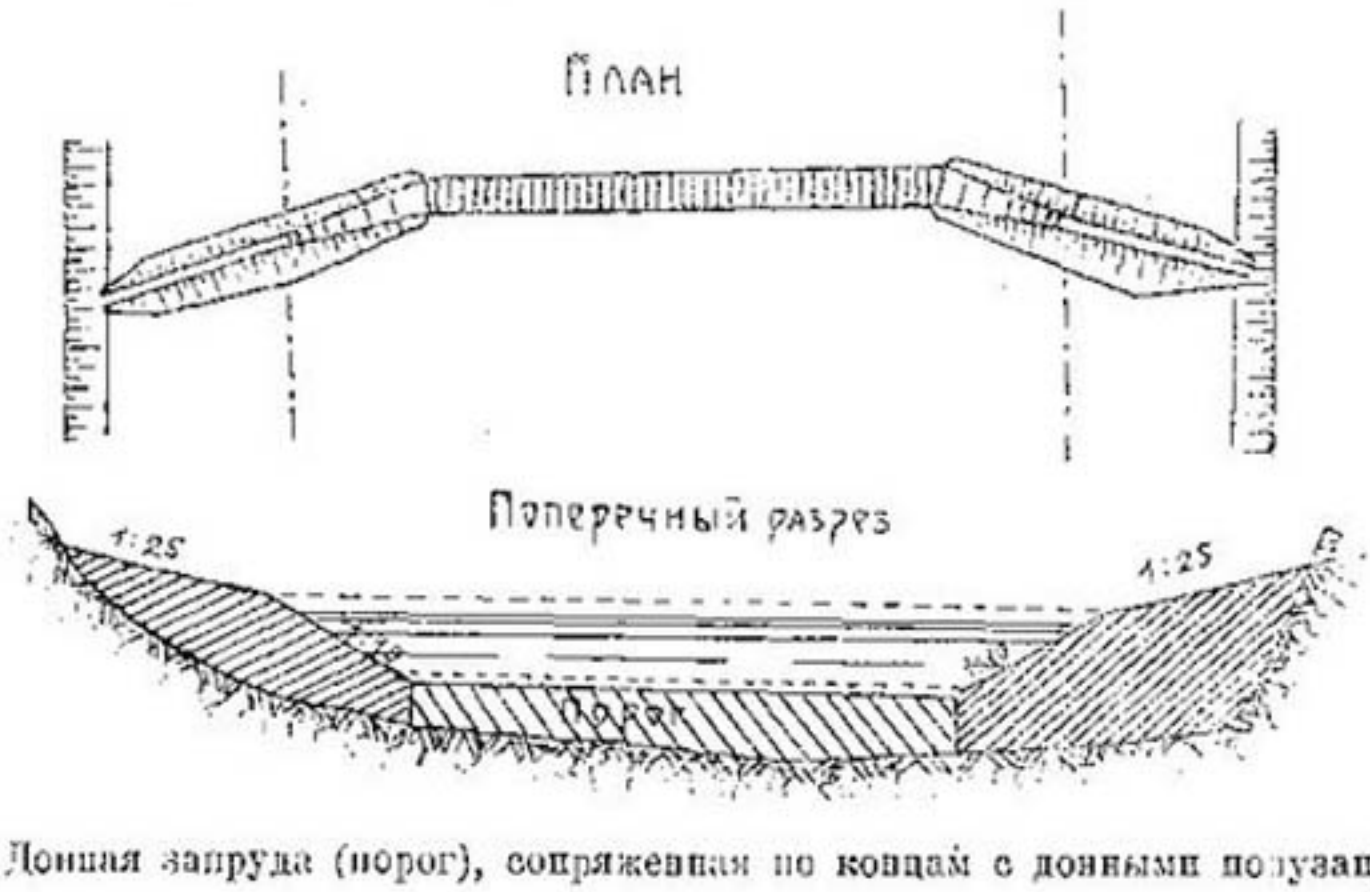


Рис. 53. Донная запруда (порог), сопряженная по концам с донными полузапрудами

Значение донных порогов и донных полузапруд для регулирования фарватера заключается в следующем. Как ранее упоминалось, после образования помощью выправительных работ устойчивых берегов меженного русла, может быть достигнуто в большей или меньшей степени постоянство глубоких мест дна у вогнутых берегов в извилинах, а мелей на перекатах в переходах из одной извилины в другую. Поверхностные уклоны также будут чередоваться: крутые на перекатах и слабые на плесах. Чтобы увеличить глубину на перекатах, нужно увеличить уклоны на плесах с одновременным уменьшением уклонов на перекатах, так как для смыва песков на перекате нужно сохранить живую силу текущей воды во время протекания по плесу, где она расходуется на слишком глубокие размывы дна у вогнутых берегов, а, следовательно, на увеличение живого сечения и изменение его формы и на передвижение продуктов размыва. Чтобы уменьшить расход энергии воды на эту работу, нужно прекратить одностороннее углубление и уширение живого сечения на плесах помощью поднятия дна в выемках и превращения профиля в более правильную и закрепленную форму. То и другое достигается помощью устройства донных порогов и соединенных с ними донных полузапруд. Донными порогами

перегораживается дно на расстояниях, определяемых эмпирически соответственно местных условий. Пороги переходят, с одной стороны, в полого выведенные полузапруды к выпуклым берегам, а, с другой стороны, в более крутые, но правильные откосы вогнутого берега, естественные или образованные донными полузапрудами до высоты горизонта низких вод. По причине происходящего таким образом повышения дна и переформирования живого сечения, поверхность воды в верхней части плеса поднимается. При этом повышение поверхности происходит, подобно подпорной кривой, постепенно с асспмптотическпм переходом в линию крутого уклона над вышележащим перекатом, причем падение на этом перекате уменьшается за счет повышения уровня воды с нижней его стороны. Тем самым глубина на гребне переката увеличивается. Глубина перекатов увеличивается еще и по той причине, что укрепление дна на плесах уменьшает количество наносных отложений, образующих гребни перекатов. Искусственное поддержание глубины на перекатах помощью землечерпательных прорезей тоже облегчается, так как работопоглощающее действие плеса на поток уменьшается, вода вступает на перекат с большей работоспособностью, смывает образующиеся в прорези наносы и переносит последние в нижележащий плес, где наносы используются для заполнения промежутков между порогами. Таким образом, пороги, донные полузапруды и другие устройства, возводимые в русле реки для улучшения фарватера при низких уровнях воды в реке, являются как бы дополнительными устройствами к тем основным работам и сооружениям, помощью которых создается правильное и, по возможности, единое русло для меженних вод вообще.

Вышеописанный метод регулирования судоходных рек выработался, главным образом, на реках германских, где он применяется преимущественно и до настоящего времени. Подобный метод регулирования рек хорошо охарактеризован в докладе одного из авторитетных современных германских гидротехников, инженера Д. Симпфера, сделанном на XII-м Международном Судоходном Конгрессе в Филадельфии в 1912 году, по поставленному на обсуждение Конгресса вопросу об улучшении рек помощью регулирования, помощью землечерпания, а в случаях надобности—и помощью водохранилищ. Поэтому считаем полезным привести здесь некоторые выдержки из упомянутого доклада, именно из той его части, которая заключает в себе описание разработки проекта регулирования реки Везер (см. табл. II).

Проект относился к участку р. Везер от Мюндена до Бремена, общим протяжением 367 *км*. Проектные глубины фарватера при средне-низком уровне воды и при дополнительном питании из проектировавшихся водохранилищ составляли от 1,10 *м*. в верхнем участке, от Мюндена до Карлсгофа, до 1,75 *м*. в нижнем участке. В основание проекта были положены установленные величины расхода воды при средне-низком уровне, составляющие для разных участков от 40 до 100 *куб. м.* в секунду. Точно также были установлены для разных положений уровня воды наличные условия реки по отношению расположения потока в плане, ширины на поверхности воды, поверхностных уклонов, высот уровня воды, движения наносов, степени шероховатости поверхности русла и пр. Целый ряд опытных участков, которые в большинстве являлись уже несколько урегулированными ранее для течения средних вод, были подвергнуты особо тщательному и длительному изучению с целью сделать правильные выводы

относительно наиболее подходящих поперечных профилей р. Везера для средних и средне-низких его вод. При разработке проекта считалось необходимым возможно более приноровить его к естественным условиям реки, причем стремились к получению только таких улучшений, возможность которых указывалась примерами естественно хороших участков реки. Задача несколько облегчалась тем обстоятельством, что р. Везер несет сверху сравнительно немного наносов и не имеет многих подвижных мелей. В качестве специальных мер предосторожности считалось необходимым по возможности избегать увеличения и без того значительных скоростей течения, чтобы не вызывать понижения дна реки размывом и увеличения во многих местах существующей разности между высотой уровня берега и горизонтом средне-низких вод. Там, где можно было бы опасаться размыва и сплошного понижения дна реки, последнее признавалось нужным укреплять наброской камня и устройством донных порогов. Затем было приступлено к установлению величин уклонов, соответственно коих нужно выравнивать поверхностный профиль реки. Несмотря на некоторые ранее выполненные регуляционные работы, продольный профиль Везера имеет много резких изменений уклонов, так что на некоторых участках встречаются уклоны от 0,0003 до 0,0012. Решено было установить для отдельных участков только максимумы уклонов, которые не должны быть превзойдены при выравнивании уклонов. Эти нормы максимальных уклонов уменьшались от 0,0005 (в верхнем участке) до 0,0002 (в нижнем участке около Бремена). На отдельных участках выравнивание уклонов считалось нужным производить лишь постолько, поскольку это нужно было, чтобы не получать слишком частых перемен нормальных профилей живого сечения. Эти последние определялись после установления величин уклонов, причем поперечные сечения определялись по соображению как с условиями благоприятными для стока воды, так и с потребностями судоходства. В последнем отношении наименьшая для фарватера ширина по дну принята такая (25 *м.* выше гор. Мюндена и 30 *м.* ниже его), чтобы в каждом месте пути могли разойтись два воза судов. Вышеупомянутые проектные глубины относились к средне-низкому уровню веды. При проектировании нормальных поперечных профилей, кроме того, предполагалось, что под действием течения образуется вместо проектной горизонтальной линии дна, параболическое его очертание, при котором на оси профиля дно опустится на 0,30—0,45 *м.* ниже горизонтальной линии. В этом предположении и производились вычисления нормальных поперечных профилей для каждого участка реки, причем в каждом таком участке требовалось иметь наибольшую площадь поперечного сечения в местах наиболее пологих поверхностных уклонов и, наоборот, меньшие площади для мест крутых уклонов. Однако, большое разнообразие поперечных сечений неудобно с точки зрения как строительной, так и эксплоатационной. Чтобы избежать частых перемен ширины сечений, предстояло остановиться для каждого определенного протяжения реки или на постоянной ширине поперечного сечения по дну, или на постоянной величине ширины на поверхности воды. При первом решении поперечные сечения в местах с более крутыми уклонами поверхности воды требовали придания подводным откосам регуляционных сооружений большей крутизны с соответствующим уменьшением ширины на поверхности воды, а при более слабых уклонах приходилось делать означенные откосы более пологими, увеличивая тем самым ширину на уровне воды. При втором решении, т. е. при сохранении постоянной ширины сечения на уровне воды, приходится в местах крутых уклонов делать упомянутые откосы более пологими, уменьшая ширину по дну, а при слабых уклонах увеличивать крутизну сих откосов с увеличением ширины по дну. В интересах судоходства желательно при более крутых уклонах давать более значительную ширину фарватера по дну и более крутые откосы, а в интересах лучшего течения воды более подходящим является обратное,—что и считалось необходимым применить при регулировании р. Везера. Ширина по дну изменялась на Везере в пределах от 25 *м.* до 69,4 *м.*, а крутизна подводных откосов берегов и регуляционных сооружений от 1 : 5 до 1 : 10.

Поперечным профилям придавалась на прямых и слабо изогнутых участках в общем симметричная форма по отношению осевой (средней по ширине на поверхности воды) линии реки в плане, а в более крутых извилинах форма, соответствующая естественной—треугольной, т. е. несимметричная в том отношении, что со стороны вогнутого берега очертанию поперечного профиля даются более крутые откосы, а со стороны выпуклого берега—более пологие откосы. При этом сумма уклонов обоих берегов остается постоянной, приблизительно равной сумме одинаковых уклонов, которые придаются обоим откосам симметричного профиля на прямолинейных участках реки.

§ 23. Принципы, установленные Жирардоном; проведение их при регулировании судоходных рек.

Французский инженер Жирардон, преемник инженера Жакс по заведыванию работами регулирования нижнего течения реки Роны и сам долгое время стоявший во главе этих работ, опубликовал свои замечательные труды в 1894 году в докладе VI-му Международному Конгрессу внутренних водных сообщений по вопросу „Улучшение меженнего состояния рек". Труды эти являлись результатом его изучения условий движения воды и наносов в реках с подвижным дном и его опыта в регуляционных работах на р. Роне для улучшения качеств названной реки в судоходном отношении. Свои выводы об естественных свойствах подобных рек Жирардон формулировал в виде указания на ряд существенно важных фактов, в которых необходимо отдавать себе отчет, когда предпринимаются регуляционные работы на реках, влекущих наносы и текущих на размываемых грунтах. Указания Жирардона заключаются в следующем.

1. Естественные водные потоки влекут вместе со своими водами твердые вещества. Количество этих твердых частиц зависит от сопротивления размыву грунтов бассейна и русла; оно увеличивается при всех прочих равных условиях вместе с количеством воды и с уклоном. Движение воды периодично; оно переходит от малого расхода к расходу большому и обратно, но, раз пустившись в путь, вода продолжает свое движение безостановочно до самого моря. Движение твердых частиц следует за периодами движения воды, но вместо того, чтобы быть непрерывным, оно перемежается и нисхождение наносов к морю совершается с остановками.

2. Очертание всех водных потоков извилисто в плане. Они образованы рядом кривых и обратных кривых, которые следуют одна за другой, имея противоположные изгибы и соединяясь более или менее крутыми вставками.

3. Глубина распределена в поперечном профиле русла неравномерно; она больше в частях ложа, представляющих наименьшее сопротивление размыву. Преграды, устойчивые против размыва и выступающие в воду, берега крутые или возвышенные и вогнутые кривые привлекают глубины и удерживают их возле себя.

4. Продольный профиль по стрежню не представляет собою ни единообразного уклона, ни уклона непрерывного, но образуется некоторым числом уклонов, коих переломы и наклонения определены скалистыми грядами или большими притоками. В промежутках между этими узловыми точками продольный профиль поверхности воды составлен из ряда прямых и обратных уклонов, образующих извилистую линию, которая колеблется около среднего уклона всего участка, приближаясь к нему более или менее. Выступы и углубления этой извилистой линии определяются второстепенными притоками и распределением сопротивлений размыву по длине ложа реки.

5. Ложе состоит из ряда плесов, разделенных перекатами, и продольный профиль водной поверхности являет форму лестницы, ступени которой отвечают плесам, а уступы соответствуют перекатам. Эта форма тем менее выражена, чем общий уклон водного потока круче; она в особенности явственна при очень низких водах; она сглаживается и поверхностный уклон стремится к равномерности по мере увеличения расхода.

6. Каждый паводок возобновляет наносные отложения, устилающие ложе и изменяющие его форму. Новая форма приближается к старой общим расположением своих частей, извилистостью берегов и продольного профиля по стрежню; смотря по обстоятельствам, она более или менее отличается от прежней формы очертанием извилин, положением глубин, расположением, общим направлением и рельефом русла.

Но, когда у водного потока берега прочно закреплены, то обыкновенные паводки изменяют форму плана лишь в очень ограниченных размерах и, после их прохода, глубины воспроизводятся в тех же самых точках, перекаты образуются на тех же местах и отличаются от прежнего только рельефом и ориентировкой.

К естественным свойствам реки, которые так ясно охарактеризованы в формулировке Жирардона, приноравливают регуляционные работы и по тому методу, описание которого приведено выше и который мы отмечали как метод, применяющийся до настоящего времени особенно часто на реках Германии. Жирардон в дальнейшем изложении своего труда, относящемся к регулированию рек для улучшения судоходных качеств при меженних уровнях воды, указывает, что такие неправильности, как ступенчатый профиль водной поверхности, неравномерность глубин в поперечных и продольном профилях реки, движение и складывание наносов и пр., необходимо сохранять и при регулировании реки, так как все такие неправильности неизбежны в речном потоке, и что потому не следует стремиться уничтожать перекаты, а нужно лишь улучшать их, т. е. создавать на перекатах более благоприятные условия для судоходства. Как мы видим, такая же мысль, в общем, проведена и в вышеописанном методе регулирования рек, и в этом отношении метод Жирардона нельзя противопоставлять

упомянутому методу, одинаково отказавшемуся от прежних принципов углубления русла реки только помощью сжатия ее течения.

Метод Жирардона менее придает значение выравниванию уклонов, но он одинаково признает существенное значение упорядочения берегов и об'единения русла меженних вод с образованием устойчивых берегов, так как этими мерами закрепляется форма реки в плане и постоянство мест как больших глубин, так и мест складывания наносов. Жирардон признает такое относительное постоянство русла значительным улучшением в условиях существования прибрежных земель, но улучшением недостаточным для судоходства потому, что для последнего главные затруднения именно и заключаются в рельефе и расположении перекатов, причем, однако, упомянутое постоянство упрощает дальнейшую задачу и позволяет во многих случаях найти для нее удовлетворительное решение.

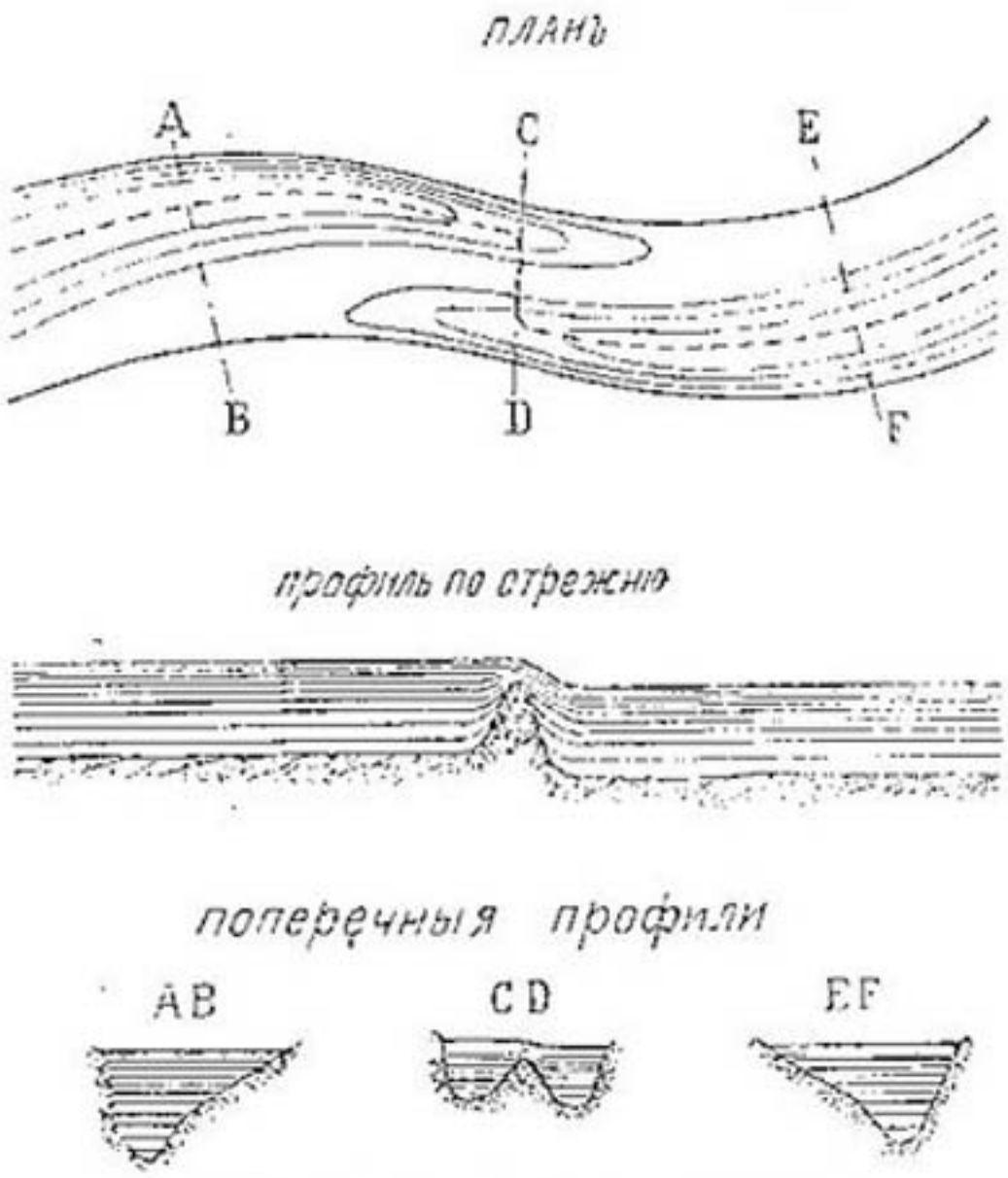


Рис. 54-а. Тип 1-й—(плохой перекат).

Именно в способе образования и обеспечения благоприятного для судоходства рельефа перекатов заключается особенность метода Жирардона.

Жирардон установил понятие о двух основных типах перекатов в отношении положения судового хода на перекате: один из них, № 1-ый, изображенный схемой на рис. 54, Жирардон называет плохим перекатом (mauvais passage), другой, № 2-ой,—хорошим перекатом (bon passage), показанным на рис. 54-б.

Первый тип встречается почти всегда на таких участках, где течение реки разбросано, и даже часто там, где меженние воды сосредоточены в одном рукаве, но когда местные условия или плохо расположенные сооружения благоприятствуют поддержанию одновременно глубоких мест около обоих берегов. Тип этот характеризуется следующим. Ложбины дна с большими глубинами заходят одна за другую; стрежень крутым поворотом переходит от одного берега к другому, следуя по линии, которая приближается более или менее к направлению перпендикулярному общему направлению течения реки. Перекат, разделяющий смежные

плесы, имеет форму пересыпи, вытянувшейся по направлению, близкому к общему направлению течения реки; пересыпь (перемел) представляет собою как бы затопленный водослив, по которому происходит перелив воды тонким слоем на коротком протяжении. Проход судна по такому перекату сопряжен с большими и разнообразными затруднениями.

Второй тип (хороший) встречается почти исключительно только на таких участках реки, на которых течение воды при всех уровнях сосредоточено в едином русле между берегами достаточно устойчивыми. Этот тип переката характеризуется следующими качествами. Ложбины смежных плесов идут одна навстречу другой, не заходя друг за друга. Стрежень расположен по плавной кривой. Перекат, разделяющий плесы, имеет форму пологой мели, нормальной к общему направлению течения; мель представляет затопленный водослив, через который вода переливается плавным и вытянутым слоем. На перекатах такого типа суда не терпят затруднений и неудобств, причем глубина на таких перекатах всегда значительно бо́льшая, чем на перекатах первого типа.

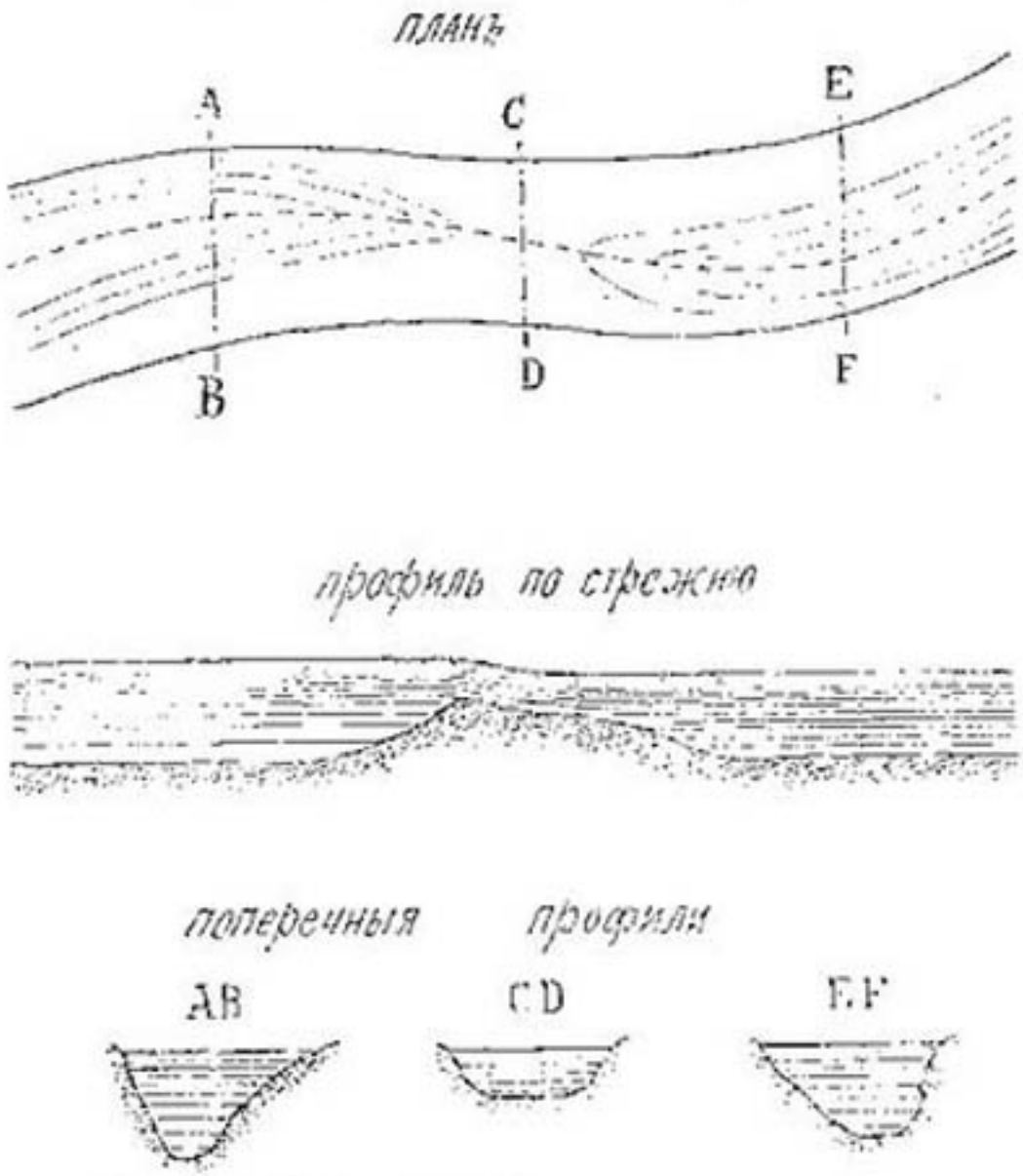


Рис. 54-б. Тип 2-й—(хороший перекат).

Жирардон ставит главною задачею при регулировании судоходной реки—преобразовать перекаты плохого типа в перекаты хорошего типа. Опыт работ на р. Роне показал, что для достижения таких результатов необходимо следующее:

1) собрать все меженние воды в едином небольшем русле, закрывши побочные рукава;

2) фиксировать в этом русле места больших глубин и места складывания наносов, что требует соответствующих форм берегов и для чего необходимы сооружения, образующие и поддерживающие эти формы, и

3) регулировать положение и форму наносных отложений на перевалах.

Первые две стадии работ в общем совпадают с тем, что трактовалось выше, но, по методу Жирардона, придается особо важное значение очертанию в плане тех сооружений, составляющих искусственный берег меженнего русла, которые по отношению течения являются как бы ведущим вогнутым берегом для направления течения.

Трассирование вогнутого берега. Для образования вогнутых берегов признается по этому методу вообще предпочтительным применять продольную дамбу, так как продольная дамба, действуя на течение непрерывно, благоприятна для направления струй и для поддержания такого действия течения, какое влияет на образование и сохранение глубин. Как отмечает Жирардон, при изучении направления судового хода (оси фарватера) на хороших перекатах можно заметить, что судовой ход прижат к вогнутому берегу около вершины кривой его вогнутости, а засим он постепенно отклоняется от берега и переходит на середину русла вблизи места перегиба последнего. Таким образом, судовой ход представляет непрерывную плавную кривую, кривизна которой достигает своего максимума около вершины вогнутого берега и обращается в нуль на месте перегиба русла. Поэтому продольная дамба, образующая вогнутый берег, не должна иметь направление, параллельное судовому ходу. Напротив, кривые образующие направление дамбы, должны быть таковыми, чтобы дамба отходила от судового хода по мере приближения к месту перегиба русла из одной извилины в соседнюю. Рис. 55-ый представляет план регуляционных сооружений на Санкт-Албанском перекате р. Роны. При работах на р. Роне применяли для начертания дамб кривые, составленные по дугам кругов разных радиусов, но возможно применение и иных видов кривых, которые давали бы непрерывную плавную кривую, обладающую вышеуказанными свойствами. Гребень дамбы поднимают на высоту, какая по опытным данным необходима для надлежащего воздействия на русло. На р. Роне возвышение дамб не превосходило одного метра над уровнем самых низких вод. В продольном профиле гребню дамбы признается нужным давать плавную непрерывную кривую понижения, исходя из тех соображений, что действие дамбы на течение нужно наибольшее и наиболее длительное там, где образуются большие глубины, т. е. около вершины кривой вогнутости. В дальнейшем, по мере расхождения дамбы и судового хода, дамбу следует понижать, доводя ее около перегиба до уровня мелей. Продольная дамба должна быть соединена траверсами с естественным берегом. Траверсы необходимы, во первых, для устранения опасности обхода дамбы течением и для облегчения естественного заполнения наносами всего пространства между дамбой и берегом, а, во вторых, для направления течения воды к середине русла в то время, когда уровень воды в реке покрывает гребень дамбы. Ввиду последнего обстоятельства гребням траверсов дают пологий под'ем

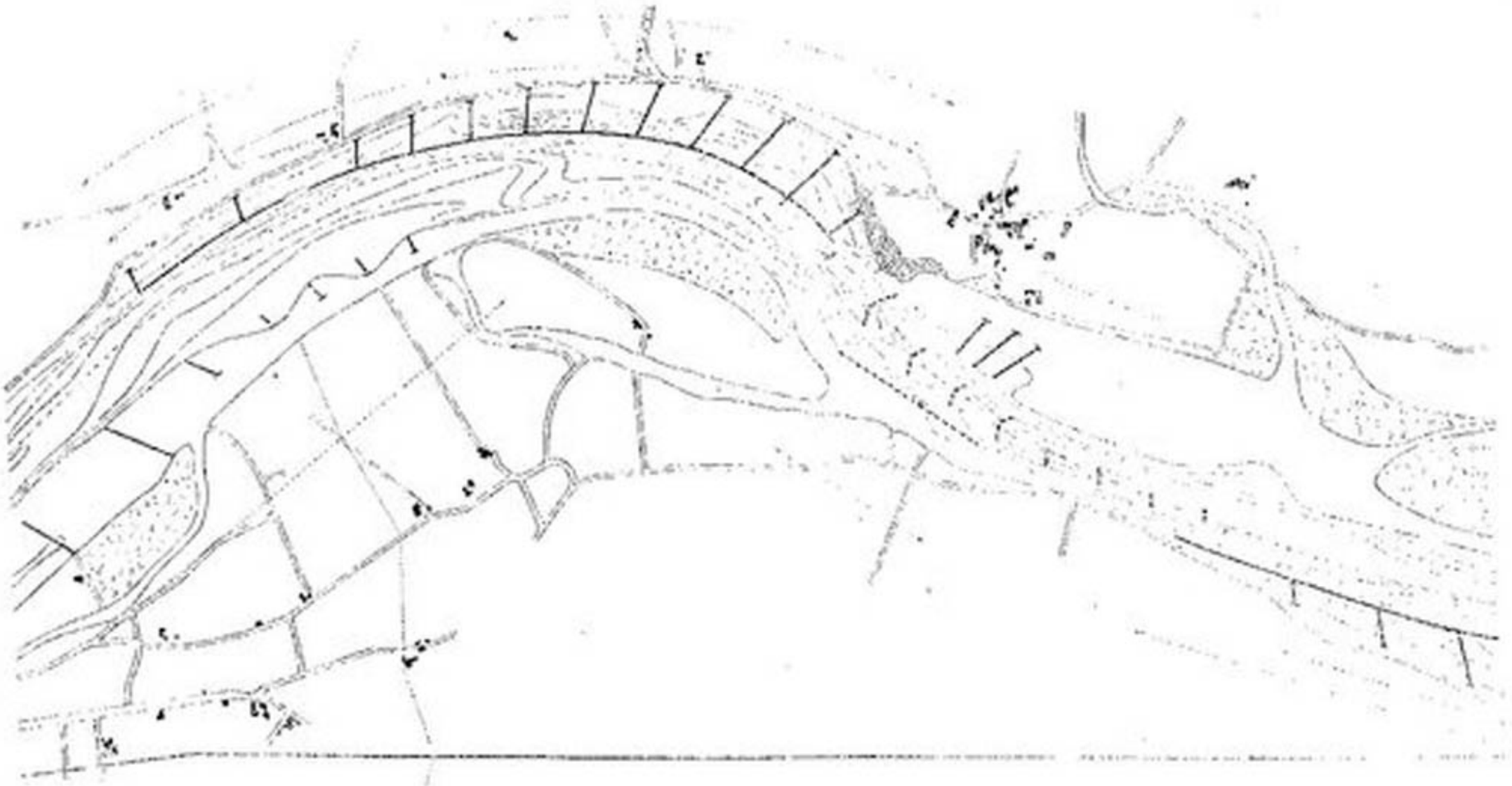


Рис. 55. Регуляционные сооружения на Санкт-Альбанском перекате р. Роны (течение слева направо по рисунку).

то дамбы до корня сопряжения траверса с берегом. Под'ем этот должен быть круче в более крутых извилинах реки.

Трассирование выпуклого берега. Выпуклые берега должны иметь, по возможности, такой вид, какой они представляют в естественном своем состоянии на перекатах хорошего типа, а именно: берег представляет очень пологий скат, позволяет воде постепенно растекаться, не приобретая столь больших скоростей, какие были бы способны размывать поверхность. Если поверхность существующего пологого ската достаточно сопротивляется размывам, то нет надобности в каких-либо искусственных на этом берегу сооружениях. Если же его сопротивление размывам мало, то необходимо укрепить его, для чего выводятся от берега пологие полузапруды, гребень которых делается заподлицо с поверхностью ската. Если же не имеется естественного пологого ската, то таковой образуется искусственно помощью полузапруд с наклонным от берега к фарватеру гребнем. Полузапруды эти должны выполнять роль естественного пологого откоса, а именно способствовать отклонению течения к фарватеру. Продольный уклон гребней полузапруд увеличивается в участках реки с более крутыми извилинами русла.

Назначение мест для перегибов и их закрепление. Чтобы закончить определение элементов для построения трассы берегов, остается еще назначить места перегибов русла, между которыми должны быть расположены кривые участки русла соответственно указанных выше условий плавности и непрерывности их берегов. Положение мест перегибов не может быть избрано произвольно. Перегибы являются в действительности теми этапами, где должны останавливаться наносы, когда убыль воды прекращает движение последних. Расстояние между сими этапами существенно зависит от режима реки, от величин расхода ее вод, от уклонов водной поверхности, от количества и рода веществ, которые влечет река в виде наносов, следовательно от условий, которые не одинаковы не только для разных рек, но и в одной реке для различных ее участков. Наблюдения дают возможность констатировать, что на каком-либо данном протяжении реки, если условия в отношении величин поверхностных уклонов и расходов воды более или менее однообразны, то расстояния между каждыми смежными перекатами (разумея под ними места складывания наносов) заключаются между пределами, мало расходящимися. В этих пределах и следует назначать расстояния между перегибами, руководствуясь при выборе мест для перегибов как примерами местных условий на хороших перекатах, так и тем соображением, чтобы по возможности сохранить число перекатов, которые естественно образовались на участке. Если это число требуется при проектировании трассы несколько изменить, то предпочтительно увеличить число перегибов, а не уменьшить его, имея в виду, что каждый перекат соответствует известному падению поверхности воды, а величина таких

паденнй уменьшается с увеличением числа перепадов, в данном случае перегибов.

Деформирование переката. Правильное трассирование борегов способно закрепить складывание наносов лишь на определенных местах, но в большинстве случаев его недостаточно для регулирования форм складывания наносов в смысле получения благоприятного их рельефа. Поэтому достигнутое полезное влияние очертания берегов должно быть дополнено действием сооружений, специально назначенных для влияния на перекат в смысле постепенного изменения кривой перехода судового хода по перекату в форму более благоприятную. На перекатах хорошего типа глубины не слишком велики и фарватер широк; стрежень (судовой ход) всегда довольно удален от берега, отодвигается от него постепенно, причем глубины соответственно постепенно уменьшаются по мере приближения к перегибу. Профиль в поперечном сечении постоянно имеет форму, сходную с треугольником, вершина которого приходится на дне по стрежню, а основание находится на поверхности воды, причем основание широкое, а высота треугольника умеренная; вершина остается постоянно достаточно удаленной от вогнутого берега и уклоны сторон треугольника, более крутые со стороны вогнутого берега, являются в общем все же довольно пологими уклонами. Высота треугольника (глубина воды) уменьшается по мере удаления вершины треугольника от вогнутого берега; одновременно уменьшаются уклоны сторон треугольника, но более быстро для стороны, ближайшей к вогнутому берегу, так что вблизи перегиба (перевала) уклоны становятся равными с обоих сторон; по другую сторону этого перегиба формы поперечного сечения симметрично и постепенно воспроизводятся в обратном порядке.

На плохом перекате глубины значительны вблизи вогнутого берега, фарватер узок; стрежень очень приближается к этому берегу, отделяясь от него внезапно и круто для перехода к другому берегу. Большие глубины сохраняются вдоль берега до самого перегиба реки, где сразу прекращаются, а на противоположном берегу они возникают. Поперечный профиль всегда имеет форму тоже близкую к треугольнику, но его основание на поверхности воды узкое, а высота большая; его вершина очень близка к вогнутому берегу и уклоны с обоих сторон очень крутые. Такое положение сохраняется почти до самого перевала, за которым опять восстанавливается без переходных симметричных форм.

Чтобы получить хорошее состояние переката, нужно заменить недостатки поперечных профилей на плохих перекатах рациональными формами профилей, которые естественно установились на хороших перекатах. Это достигается тем, что на некотором расстоянии друг от друга образуют благоприятные формы поперечного сечения помощью донных полузапруд и донных запруд (порогов), поставленных на уровне достаточно низком, чтобы не препятствовать судоходству и не нарушать спокойного состояния поверхности воды. Уменьшая

глубину дна пороги вызывают уширение фарватера. Преследуя цель отклонить течение от вогнутого берега донные полузапруды должны быть направлены несколько вверх по течению и гребень полузапруды должен спускаться по уклону от берега. Наинизшая точка гребней полузапруд, определяющая максимумы глубин фарватера, закрепляет в то же время положение наибольших скоростей течения и оси фарватера. Эта ось должна находиться тем ближе к берегу, чем ближе находится рассматриваемое сечение к вершине кривизны берега, а наибольшая глубина должна одинаково отвечать месту наибольшей кривизны. Поэтому донные полузапруды в этих местах должны иметь более крутые уклоны, чем донные полузапруды на других местах, и их концы должны быть опущены в реку более глубоко. По мере приближения к перегибам, уклон и углубление донных полузапруд постепенно уменьшаются. В тех случаях, когда размыв дна происходит слишком энергично и донные полузапруды недостаточно защищают дно, то устраивают пороги во всю ширину русла, причем порог переходит в оба берега в форме донных полузапруд.

Таковы, в общем, правила, которых придерживались на работах по регулированию р. Роны под руководством Жирардона.

§ 24. Метод регулирования судоходных рек, предложенный инженером Лелявским.

Инженер Лелявский обосновал свою теорию формирования речного русла и предложенный им метод регулирования судоходных рек на результатах многочисленных и широко поставленных наблюдений, которые были организованы Лелявским на р. Днепре и его притоках в связи с производством выправительных и землечерпательных работ. В труде Н. С. Лелявского „О речных течениях и формировании речного русла“ [1]) изложена его теория, объясняющая явления, происходящие в русле реки, и их зависимость от особых впервые подмеченных Лелявским свойств речного течения. Помощью изобретенного им прибора, так называемого подводного флюгера, который дает возможность определить в любой точке живого сечения реки направление струи потока (направление наибольшей скорости течения в этой точке), Лелявский, на основании большого числа измерений, установил понятие о двух видах течения воды в речном русле. При известных условиях в некоторых местах реки текущая вода принимает вид клинообразно сходящихся струй, направленных наклонно вниз ко дну, в других же местах — струи, напротив, как бы расходятся веерообразно. В первом случае сосредоточивается живая сила текущей воды, дей-

[1]) Доклад инженера Н. С. Лелявского в 1894 году на Международном Судоходном Конгрессе.

ствующая на размыв русла, в другом случае расхождение струй способствует отложению наносов. Первый вид течения Лелявский называет сбойным течением, а второй вид—течением расходящимся. Под влиянием таких видов течения и происходят, по его мнению, наблюдающиеся явления деформации речного русла.

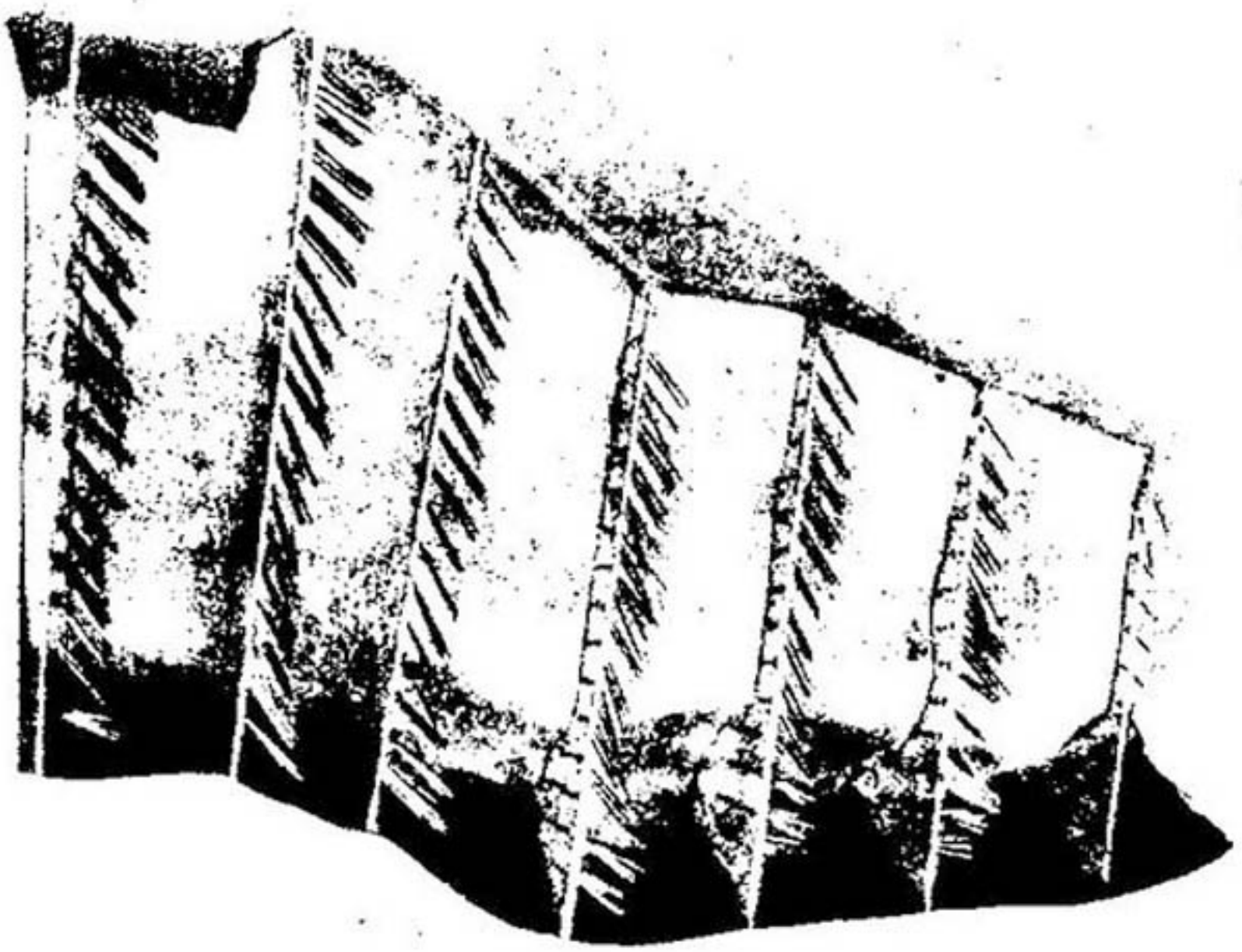


Рис. 56. Струи речного потока. Рисунок изображает фотографический снимок с находящейся в музее Института Инженеров Путей Сообщения модели участка реки Днепра на одном из его перекатов. В виде игол на модели изображены направления струй и их скорости, измеренные помощью особого прибора („Струеизмерителя").

Не останавливаясь на подробном изложении теории Лелявского, отметим здесь только некоторые его выводы, находящиеся в прямом отношении к тем методам расположения регуляционных сооружений, которые рекомендуются Лелявским и подробное объяснение коих можно найти в его сочинении „Об углублении наших больших рек" [1].

По объяснению Лелявского процесс формирования речного дна под действием потока состоит в следующем.

---

[1]) Доклад инженера Лелявского Съезду русских деятелей по водным путям (изд. 1904 г.).

В руслах рек существует два течения (рис. 57): одно—верховое, сбойное, сходящееся, клинообразное, которое, спускаясь на фарватере до дна, делает в нем продольные гладкие углубления и по своему действию может быть уподоблено плугу, прорезывающему в дне продольную борозду и отваричивающему на сторону взрываемый грунт; другое течение—донное расходящееся веерообразно, уклоняющееся постепенно от направления сбойного по фарватеру к почти нормальному направлению к берегам. Действием донного течения грунт, вырытый на фарватере и размытый из вогнутого берега, складывается на пологие отмели и по ним катится перебрасываемый зигзагами в косых направлениях по поверхностям песчаных валиков.

Рис. 57. Расположение сбойного и донного (расходящегося) течения.

При этом происходит следующее. Частицы воды, находящиеся в поверхностном слое, в недалеком расстоянии от берега, направляются косвенно к фарватеру, достигая коего, постепенно спускаются вниз, проносятся над дном почти параллельно ему, затем они, мало по малу, уклоняются в сторону и, вступая в сферу донного течения, начинают ударяться в дно пологого берега, теряя приобретенную при движении по фарватеру живую силу. При этом они то отражаются кверху, то вновь ударяются в дно и так движутся далее, постепенно отклоняясь к берегу, пока не попадут в верхние слои воды, с коими вновь начинают спускаться, направляясь к фарватеру. Чем круче поворот вогнутого берега, тем быстрее происходит опускание водяной частицы из верхних слоев ко дну, тем более живая сила, приобретаемая этими частицами при их движении, и тем больший происходит размыв дна. Поэтому глубина на плесах обратно пропорциональна радиусу кривизны, а место расположения наибольших глубин не находится непосредственно против наиболее кривой части вогнутого берега, но несколько ниже по течению там, где частицы воды, имеющие наибольшую живую силу, достигают поверхности речного дна.

На фарватер направляется сбойное верховое течение, образовавшееся из донного после оставления им наносов; поэтому верховое течение представляет собою чистую воду, не могущую производить отложений на фарватере. Если сила сбойного течения настолько велика, что оно размывает вогнутые берега, то этой же силы достаточно для того, чтобы течение пронесло вымытый грунт по фарватеру, не засоряя его,

и сложило этот грунт на косы и отлогости берегов. Затем, освободившись от наносов, донное течение достигает поверхности воды и, обратясь в верховое, в чистом виде вновь устремляется к фарватеру. Благодаря такому расположению течений, фарватер никогда, за исключением случайных причин, не подвергается занесению песчаным грунтом, который может надвигаться на фарватер только сверху, спускаясь в виде кос. Только при низких горизонтах, когда поперечные сечения реки в плесах делаются чрезмерно велики для уменьшившегося расхода воды, дно плесов может подвергаться занесению тонким слоем ила, отлагающегося от оседания илистых частиц из медленно двигающейся в это время по плесам воды.

Сбойное течение у вогнутых берегов образуется, по мнению Лелявского, исключительно благодаря тому, что вогнутый берег, постепенно загибающийся в сторону русла, постоянно встречает фарватерное течение, которое, от него отклоняясь, пересекает новые струи, притекающие к вогнутому берегу, и, вследствие претерпеваемого от них гидравлического давления, опускается вниз, устремляясь на размыв речного дна. В то же время донное течение по выпуклому берегу, переходя в верховое течение, непрерывно снабжает русло новыми струями, направляющимися на фарватер.

С того пункта, от которого вогнутый берег перестает пересекать приливающие струи верхового течения, начинается ослабление сбоя воды, сопровождающееся уменьшением глубин на фарватере. Затем, по мере отступания берега от общего направления русла, уменьшается угол схождения струй и, наконец, струи вместо того, чтобы сходиться к фарватеру, начинают растекаться в разные стороны. В этом месте гладкая продольная вымоина дна заменяется волнообразною поверхностью с постепенно уменьшающимися глубинами; фарватер, как место сходящихся струй, прекращается, и мутное донное течение выходит на поверхность воды.

Передвижение наносов происходит порывами и не прямо вниз по течению, но зигзагами, в косвенных направлениях к гребням песчаных валиков. Одни валики стираются и заменяются другими, ниже их лежащими, и, таким образом, совершается поступательное движение наносов, вследствие чего и гребень косы подвигается вниз по течению.

Отложение наносов на перевале, где фарватер пересекается косою, образованной из наносов, происходит при весеннем растекающемся по косам течении воды, так как при весеннем горизонте, когда песчаные косы залиты водою, наиболее суженными местами являются средние части плесов, и расхождение весенних струй начинается с того места, где расстояние между гребнями берегов начинает увеличиваться, приблизительно там, где прекращается вогнутость берега. По мере понижения горизонта воды отложение наносов на перевале начинает уменьшаться в зависимости от обнажения песчаных кос, которые, отклоняя

струи к середине русла, производят сужение угла их расходимости. При дальнейшем понижении уровня воды происходит в некоторых местах перевала смыв отложившихся наносов в связи с изменениями формы косы и искривлением стрежня на перевале.

Что касается метода улучшения в судоходном отношении больших рек, то Лелявский указывает, что руководящим началом для рационального углубления таких рек должна служить отмечаемая им зависимость, в которой находятся между собою в речном потоке состояние глубин и вид течения. Эта зависимость формулирована Лелявским следующим образом. В тех местах речного потока и непосредственно ниже, считая по течению, тех мест речного потока, где оказываются сходящиеся течения, обнаруживаются углубления в сыпучем русле потока, т. е. увеличение глубин, по сравнению с вышележащею и боковыми соседними участками русла. Обратные явления, т. е. уменьшение глубин, обмеления в русле, наблюдаются всегда на местах разделения струй и ниже этих мест, считая по течению. Поэтому, для углубления какого-либо места на реке необходимо осуществить на нем и выше его сходящееся сбойное течение. Осуществить это можно или помощью постройки постоянных струенаправляющих сооружений, или в некоторых случаях помощью прорытия землечерпанием соответствующей прорези, или же комбинируя обе эти меры вместе.

Следовательно, чтобы фарватер был непрерывно достаточно глубок, необходимо, чтобы на всем его протяжении поддерживалось сходящееся сбойное течение. Сооружения, предназначенные для поддержания или образования такого вида течения, должны иметь характер только струенаправляющих сооружений. Они не должны стеснять живое сечение реки и уменьшать ее ширину, так как образующееся на фарватере вдоль берега сбойное течение должно иметь место для перехода в расходящееся течение по пологому склону дна к другому берегу, куда донное расходящееся течение выносит и где оно оставляет продукты размыва и, обращаясь засим в верховое обратное течение, дает приток новых сильных струй к фарватеру, поддерживая тем самым сбойное фарватерное течение.

Струенаправляющими сооружениями могут служить как продольные дамбы, так и полузапруды и запруды. Лучше выполняют такую роль продольные дамбы, как действующие в отношении направления струи непрерывно на всем своем протяжении. Полузапруды, в особенности если они наклонены косвенно по течению, также могут служить для направления струй, но действие их ограничено, так как за головой полузапруды струи теряют свое направление и, уклоняясь в сторону течения, начинают расходиться, вызывая обмеление.

Так как при естественном состоянии реки глубокие части фарватера располагаются в плесах вдоль вогнутого берега, имеющего достаточную кривизну, а перевалы, где складываются наносы, помещаются на перегибах русла, то для обеспечения достаточно глубокого

фарватера нужно в плесах закреплять вогнутые берега с благоприятными очертаниями вогнутости, а для улучшения неудовлетворительных мест стараться развить протяжение вогнутых очертаний, придав таким берегам достаточную кривизну для удержания вдоль них течения и, по возможности, удлинить вогнутости вниз по течению до мест расположения перегибов. На перегибах русла, с целью образования глубокого фарватера через складывающиеся здесь косы (перемелы), необходимо тоже создать сбойное течение, что может быть достигнуто помощью струенаправляющих сооружений, как пояснено далее.

Трассировка вогнутого берега на плесах. Наблюдения показывают, что речное течение происходит не параллельно вогнутым берегам, а направляется по кривым линиям от выпуклых берегов к вогнутым, пересекая направление вогнутого берега под косыми углами. Расположение и сила струй, подходящих к вогнутому берегу, различны у разных частей этого берега. Об'ясняется это следующими обстоятельствами. Нужно заметить, что находящиеся на перевале косы, идущие навстречу друг другу от выпуклых берегов смежных плесов, пересекают реку по косому направлению (см. глава II § 11, рис. 23). Поэтому верхняя по течению часть вогнутого берега образует с подводной частью вышележащей косы острые углы. Струи, переливающиеся через подводный гребень кос, ударяются в верхнюю по течению часть вогнутого берега с большою силою. Ударившись в берег, они вслед за сим уклоняются вниз ко дну тем круче, чем больше углы, образуемые ими в плане с направлением берега. По об'яснению Лелявского, такого явления, т. е. опускания воды ко дну потока, не было бы, если бы ниже, считая по течению, не было прилива к тому же вогнутому берегу все новых и новых струй, которые не допускают ранее приливши м к берегу струям получить свободное вдоль него направление, а заставляют их, после удара в берег, спускаться ко дну и там внизу между берегом и гребнем косы течь под непрерывно вновь приливающими к берегу струями верхового течения.

Приток новых сильных струй к вогнутому берегу прекращается против нижней по течению оконечности подводного гребня косы, где он переходит в обнаженный гребень той же, но уже сухой песчаной косы. Идущее вдоль вогнутого берега течение, не будучи более с этого места прижато к нему переливши мися через подводный гребень струями, станет растекаться к выпуклому берегу и откладывать наносы, вымытые из вогнутого берега. Препятствовать такому растеканию воды в сторону выпуклого берега не следует, так как постройкою сооружений со стороны выпуклого берега мы могли бы образовать сбой воды и фарватерное течение у выпуклого берега, что и набюдается нередко на неудобных в судоходном отношении участках реки. Растекшаяся к выпуклому берегу часть воды сама себе закроет дорогу разбросанными наносами и вернется вновь к вогнутому берегу для возобновления сбоя. Нужно

только позаботиться о том, чтобы при первом отливе воды, после прекращения удара ее в берег, сбойное течение у вогнутого берега не прекратилось или не уменьшилось значительно. Для этого служит достаточная кривизна берега, который, чем сильнее поворачивает в сторону русла, тем под бо́льшим углом пересекает речные струи и, принимая на себя удар, заставляет их опускаться вниз и размывать дно по близости подошвы берега.

В виду такого расположения течений у вогнутых берегов, Лелявский дает следующие практические указания для трассировки вогнутых берегов. Верхняя, по течению, часть берега до оконечности противолежащей косы обеспечена прижатостью к ней фарватерного течения, благодаря удару сливающейся с косы воды, и потому не нуждается ни в увеличении кривизны очертания, ни в придании последнему особенной правильности. Нижняя же часть того же берега должна, во избежание отлива от нее сбойного течения, иметь достаточную для этого кривизну без быстрых увеличений ее радиусов. Образующееся, благодаря кривизне берега, сбойное течение близ него поддерживает глубину, а эта последняя, уменьшая сопротивления движению воды, привлекает сюда струи от вогнутого берега и обеспечивает их дальнейшую сходимость, а также незаносимость фарватера. Что касается величины радиусов кривизны и постепенного их уменьшения, следовательно общей формы вогнутости, то их можно определить или путем наблюдения над естественно хорошими плесами в сходных по гидрологическим условиям участках реки, или посредством опытных выправительных работ.

При назначении проектной трассы вогнутого берега следует вести ее, вообще, придерживаясь общего направления берега, но местами приходится отступать как в сторону реки, так и за гребень берега. В первом случае для осуществления трассы могут служить продольные дамбы с поперечными траверсами, а также и полузапруды, а во втором случае могут потребоваться земляные выемки и землечерпательные работы. Что же касается типов береговых обделок, то, имея в виду, что удар воды в вогнутый берег бывает особенно силен в верхней по течению его части, а засим постепенно ослабевает в нижней оконечности, следует профиль поперечного сечения береговых обделок давать соответственно силе подмыва.

Сооружения на перегибах русла. Вышеописанным устройством вогнутых берегов при выправлении речного течения возможно обеспечить вдоль них постоянную судоходную глубину, а потому вообще желательно по возможности развивать длину вогнутых берегов за счет сокращения перегибов русла, на которых течение тем безпорядочнее, чем длиннее эти перегибы.

Обращаясь к вопросу об обеспечении необходимой глубины фарватера на самих перегибах, Лелявский полагает, что так как течение воды может быть, согласно вышеизложенного, только сходящимся

или расходящимся, причем первое располагается вдоль глубоких частей русла и само производит углубление вдоль своего установившегося пути, а второе сопровождается явлениями противоположными и для судоходства нежелательными, то единственным средством для достижения углубления два по фарватеру на перекате нужно считать образование вдоль него сходящегося сбойного течения, подобно тому, которое имеется выше перегиба, вдоль вогнутого берега.

Способ образования помощью постоянных сооружений сбойного течения на перекате он об'ясняет на примере участка реки, показанного на рис. 58 и 59-м.

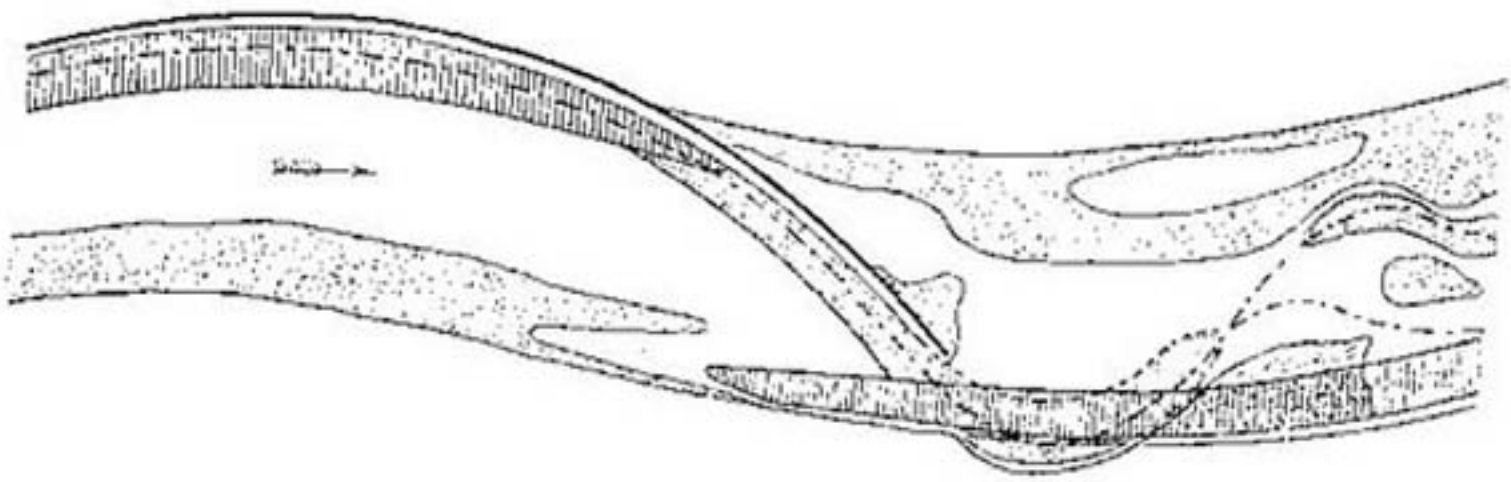


Рис. 58. Теоретически желательное расположение на перекате струенаправляющей дамбы для поддержания сбойного течения.

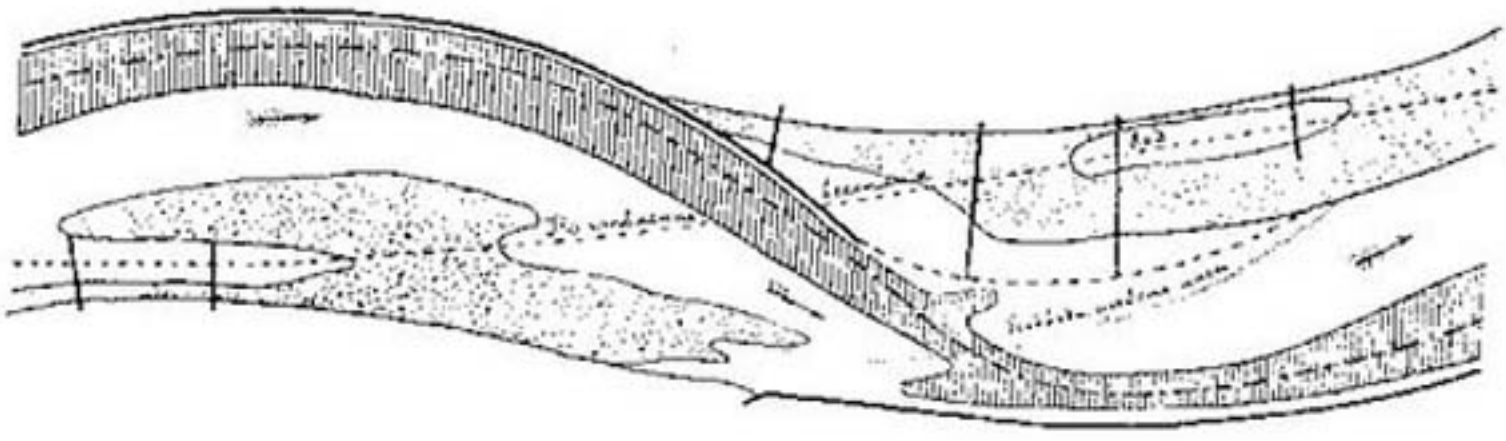


Рис. 59. Практически осуществимое расположение струенаправляющей дамбы на перекате.

Чтобы сохранить на перекате такое же сбойное течение, какое имеется вдоль левого вогнутого берега вышележащего плеса, нужно было бы продолжить тот же вогнутый берег, помощью струенаправляющих сооружений, по всему переходу воды через перекат до места образования сбоя струй у нижележащего правого вогнутого берега (рис. 58). При таком построении ведущего воду берега можно было бы расчитывать, не ослабляя струй на перегибе, достигнуть таких же глубин, какие имеются вдоль соседних вогнутых берегов, т. е. достигнуть полного выравнивания глубин как на вогнутых плесах, так и на перегибах русла.

Однако, в действительности, осуществление подобной трассы ведущего берега встречает нижеследующие препятствия. Между оконечностью искусственного берега на перегибе и противопо-

ложным вогнутым естественным берегом получается столь узкое отверстие, в которое должен пройти весь расход воды, что по выходе из него вода должна получить неминуемо растекающееся движение, причем,—чем больше угол, образуемый направлением течения, ударяющего в берег, с очертанием сего последнего,—тем быстрее вода отольет от берега и тем, конечно, труднее будет удержать течение у такого хотя бы и сильно вогнутого берега. Последствием подобного отлива воды в сторону выпуклого берега окажется веерообразное разбрасывание струй и отложение мели, как показано на рис. 58-м.

Таким образом, с одной стороны, необходимо для образования сбойного течения на перегибе русла круто отвернуть течение от вогнутого берега к нижележащему противоположному вогнутому берегу, а, с другой стороны, подвести достигнутое сбойное течение к этому последнему берегу возможно положе для ослабления силы удара воды в него и, затем, отлива от него. Чтобы достигнуть хотя бы в некоторой степени обоих означенных целей, необходимо (рис. 59), продолжая вогнутое очертание берега по перегибу, примерно, на $^1/_3$ до $^1/_2$ его ширины, перегнуть трассу, изменив ее вогнутость на выпуклость, и продолжать сию последнюю вниз по течению настолько, чтобы не допустить отлива воды от вогнутого берега. Длина искусственной выпуклой части берега будет тем больше, чем положе противолежащий ведущий воду берег, т. е. протяжение выпуклой части должно быть пропорционально радиусу кривизны вогнутого берега при всех других одинаковых обстоятельствах.

Показанные на рис. 59-м полузапруды, расположенные только в верхней по течению части выпуклого берега непосредственно за отогнутым на перевал концом вогнутого ведущего берега, не всегда нужны, но в некоторых случаях они могут быть полезными для укрепления пологого склона подводной части выпуклого берега и для предохранения от образования продольных вымоин около выпуклого берега, показанных на рисунке. Однако, такие полузапруды отнюдь не должны стеснять живого сечения реки и уменьшать его ширину, а потому их гребень должен полого спускаться, следуя поверхности дна и, по возможности, не возвышаясь над ним.

Вышеописанный способ выправления русла на перегибах Лелявский формулирует, в виде правила, так: *следует удлинять или развивать нижние оконечности вогнутых берегов и выдвигать выступы в русло верхних частей выпуклых берегов.*

При таком выправлении течения достигается углубление и достаточно устойчивое состояние фарватера на перевале, со значительным увеличением крутизны поворота течения, а, следовательно, и самого фарватера. На нижней части последнего глубина будет несколько меньше, чем на соседних вогнутых плесах, но это обстоятельство имеет свое полезное значение, так как присутствие

возвышенности дна на перегибах сохраняет подпор на вышележащем плесе, что, полезно для сохранения спокойного течения на плесах и глубин плеса в наиболее повышенных местах его дна. Иначе, в этих местах после понижения уровня воды, вызванного понижением гребня косы на перевале, могут оказаться недостаточными глубины фарватера также на некоторых местах плеса.

Сравнивая свой метод регулирования судоходных рек с методом по которому при выправительных работах образуются и закрепляются берега меженнего русла с обеих его сторон по установленной заранее выправительной трассе обоих берегов, Лелявский отмечает, что, при последнем упомянутом методе, фарватер на перегибе русла, как не обладающий сбойным течением, не обеспечен в отношении своего устойчивого положения и достаточной глубины. Об'ясняя это на примере, изображенном на рис. 60-м, где сплошными линиями показаны выправительные сооружения обоих берегов, он указывает, что недостаточное выдвижение вогнутого берега, и притом без соответствую-

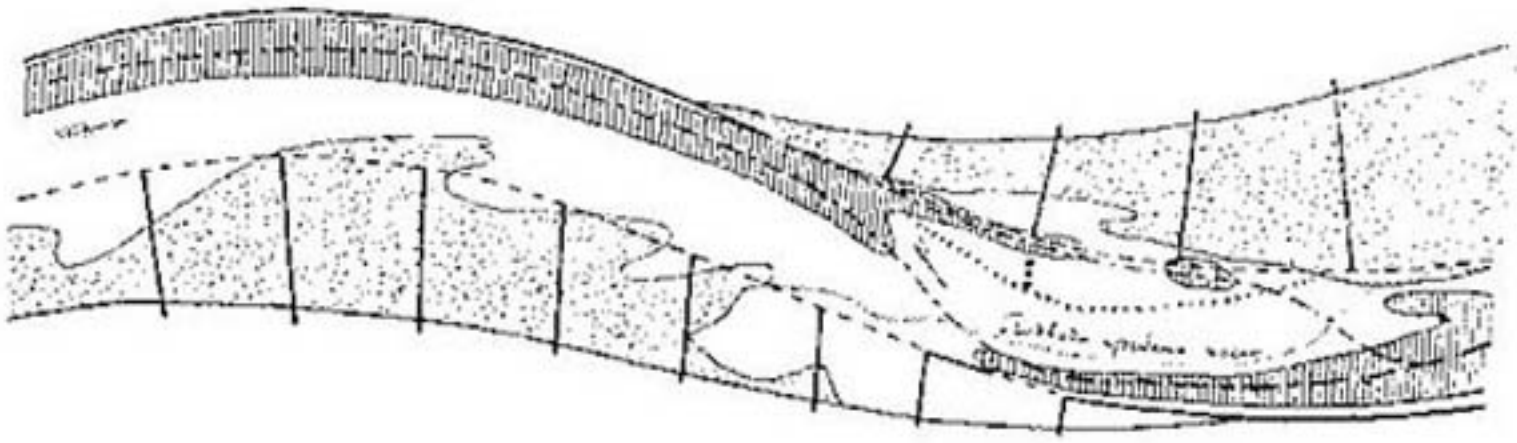


Рис. 60. Фарватер, не обеспеченный сбойным течением при двухлинейной трассе выправительных сооружений.

щего увеличения крутизны его поворота, служит причиной растекания струй и нагромождения наносов на перегибе фарватера. Переставшее поддерживаться сбойное течение может частично образовываться у выпуклого берега, делая на некотором протяжении размывы выпуклого берега вдоль линии оконечностей полузапруд и раздвоя стрежень, что еще более искажает перекат и затрудняет поддержание на нем фарватера. Хотя постепенным удлинением полузапруд, можно воздействовать на течение в смысле продолжения сбойного течения и в результате получить на перевале один устойчивый и глубокий фарватер, но, по мнению Лелявского, ранее указанный способ достигает эту цель скорее, а вместе с тем он устраняет надобность в целом ряде крупных сооружений, в виде полузапруд на выпуклом берегу, расположение которых в нижней по течению части выпуклости является, к тому же, вредным для поддержания сбойного течения в нижней части вогнутого берега. Стесняя русло, эти полузапруды препятствуют правильному переходу донного течения по пологому дну выпуклого берега в течение верховое, т. е. препятствют тому выше-

описанному процессу, который происходит при поддержании сбойного течения на фарватере плеса вдоль вогнутого берега.

Из всего вышеизложенного усматривается, что метод Лелявского можно охарактеризовать как метод, ограничивающийся хотя и активными, но только струенаправляющими, а не водостесняющими, постоянными сооружениями, ведущими течение вдоль вогнутых берегов и в переходах от вогнутости одного берега к вогнутости противоположного берега с поддержанием на всем протяжении фарватера сбойного течения. В отличие от двухлинейной трассы, фиксирующей меженнее русло с обоих берегов, по методу Лелявского устраивается один лишь берег и не закрепляется противоположный. В этом отношении, так же как и по некоторым другим приведенным мыслям, метод Лелявского в известной степени сближается с ранее описанным методом Жирардона. Основы метода Лелявского проводились, хотя и не в полном виде, при некоторых работах по улучшению судоходных условий на р. Днепре, нередко достигая хороших результатов.

Необходимо упомянуть, что метод Лелявского относится собственно к выправлению течения; что же касается заграждения боковых рукавов и протоков, то таковое имеет значение отдельное и самостоятельное,— собрание меженних вод, независимое от описанных работ по выправлению течения, и при том значение весьма важное, ибо чем больше, чем многоводнее река, тем, при всех других одинаковых условиях, и глубина на ней больше. В этом отношении все вышеприведенные методы регулирования рек сходятся, одинаково придавая важное значение общему упорядочению меженнего течения и сосредоточению его в едином меженнем русле.

ГЛАВА IV.

Частные случаи регулирования рек.

§ 25. Спрямление извилин помощью прокопов.

Из ранее сказанного мы видели, что извилистость реки является естественным следствием самостоятельной разработки речного русла в размываемых грунтах и что при регулировании судоходных рек следует, в общем, сохранять извилины, так как они способствуют поддержанию устойчивого положения стрежня и больших глубин на плесах. Однако, в некоторых случаях сильно развитая извилистость или слишком крутые повороты русла вызывают вредные явления, для устранения которых требуется прибегать или к смягчению крутых извилин, или же к устройству так называемых прокопов. Последнее заключается в том, что излучину естественного русла заменяют искусственно вырытым руслом, соединяющим по прямому или слабо изогнутому направлению начало излучины с концом ее. Иногда прокоп спрямляет не одну излучину, а простирается на несколько извилин, причем такие прокопы называют сложными (двойной, тройной и т. д.), в отличие от простого прокопа.

К устройству прокопов приходится обращаться в следующих, например, случаях: 1) если слишком крутая извилина затрудняет движение судов; 2) если при ледоходе она задерживает плывущие льдины и вызывает образование зажоров; 3) если вогнутый берег подвергается в крутой извилине столь сильному размывающему действию течения, что защита его берегоукрепительными сооружениями сопряжена с непомерно высокими расходами; 4) если сильно развитая излучина реки, весьма значительно удлиняющая русло и тем самым уменьшающая поверхностный уклон воды, задерживает большое количество наносов, которые вызывают обмеление русла и служат причиной образования побочных рукавов реки или заболачивания долины; 5) если по той же причине замедляется сток воды во время паводков, благодаря чему образуется подпор воды и происходят наводнения. Иногда устройство прокопов бывает необходимым для улучшения устья впадающего в реку притока, для выигрыша места, нужного для проведения железной или обыкновенной дороги, для каких либо иных сооружений и т. п.

Прокоп, соединяющий концы излучины, спрямляет данный участок реки и увеличивает на нем поверхностный уклон. Поэтому прокоп отвлекает к себе значительную часть воды от старого русла, причем по мере того, как живое сечение в прокопе увеличивается вследствие естественной разработки его течением, старое русло замелевает. Если этого недостаточно для полного занесения прежнего русла, то для сей цели обращаются к устройству в реке, около начала прокопа, струенаправляющей дамбы, отжимающей течение воды в прокоп, или же прибегают к полному загреждению старого русла одной или несколькими запрудами.

Но, прежде чем приступить к устройству прокопа, необходимо дать себе отчет, какое влияние он может оказать на соседние участки реки.

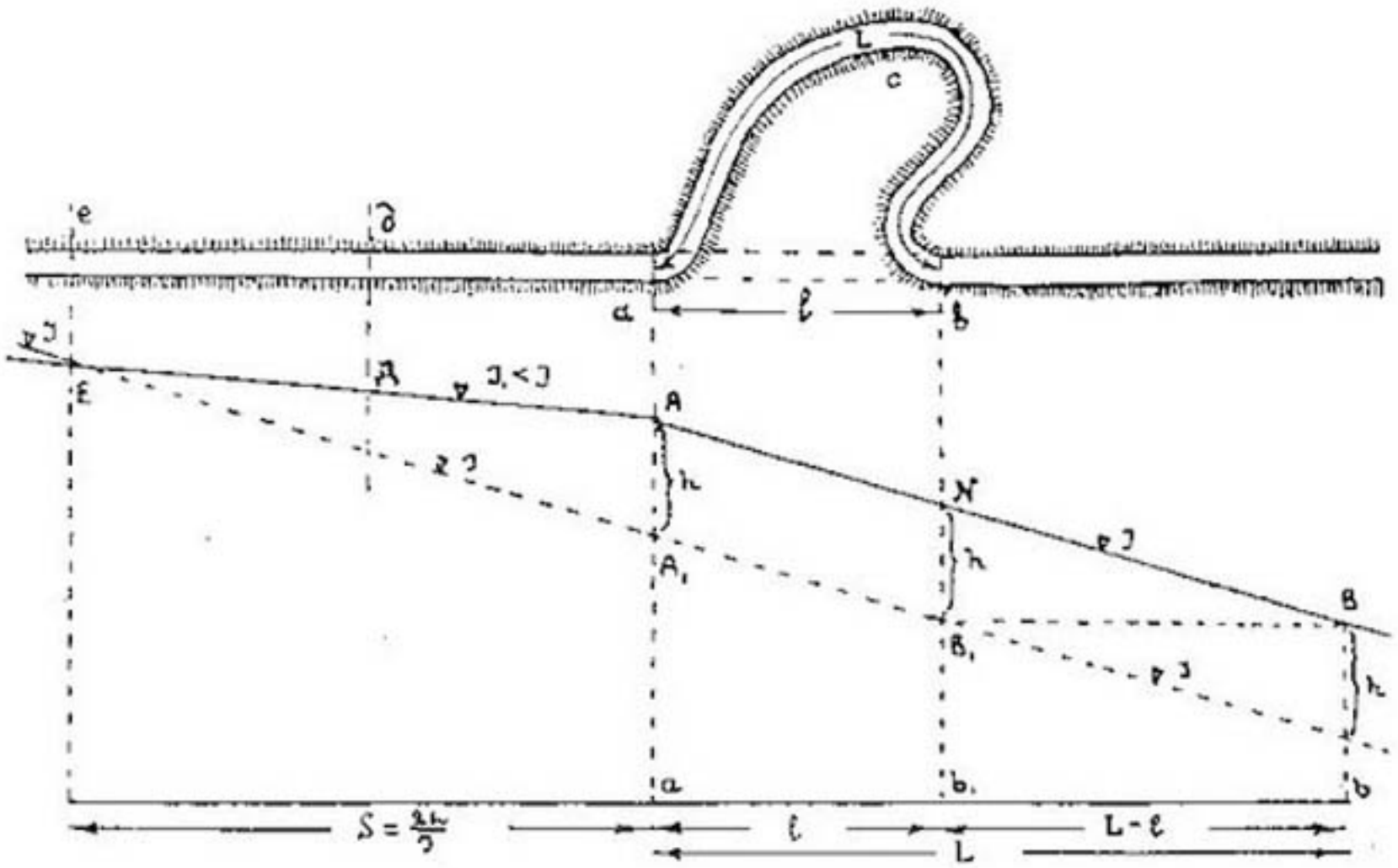


Рис. 61. Влияние прокопа на поверхность воды в случаях неразмываемого грунта.

Излучина ($a\,c\,b$) длиннее, чем заменяющий ее прокоп ($a\ b$) (рис. 61) поэтому и сопротивление ложа реки течению на излучине ($a\ c\ b$) больше, чем в прокопе. Следовательно, наличие излучины вызывало некоторый подпор воды в точке (a), соответствующий разности между величинами означенных сопротивлений. По причине подпора, уклон поверхности воды на вышележащем участке (ea) уменьшился с J до J_1. После устройства прокопа этот подпор исчезает, почему поверхность воды в реке понижается как около начала прокопа (a), так и на некотором вышележащем от точки (a) протяжении. При оценке возможной величины понижения уровня и дальности его распространения можно исходить из следующих соображений.

Если ложе реки неразмываемое, или если вообще уклоны и скорости течения настолько малы, что нельзя ожидать больших размывов

дна как в искусственном русле прокопа, так и на прилежащих к его концам участках реки, то можно считать, что влияние прокопа на вышележащий от него участок реки выражается только в том, что уничтожается то добавочное сопротивление течению, которое дает излучина по сравнению с прокопом, а следовательно то падение уровня воды $h = Bb = NB_1$, которое соответствует сокращению длины реки между (a) и (b) на величину $L - l$ (рис. 61). Поэтому влияние устройства прокопа равносильно случаю, если бы существовавшая на месте a плотина, дававшая подпор h, была бы убрана. Принимая подпорную кривую поверхность воды за параболу, дальность распространения подпора определяется, согласно свойств параболы, длиною $S = \frac{2h}{J}$ [1]). Это и есть расстояние ae от начала прокопа, на которое будет распространяться понижение уровня воды, вызванное устройством прокопа.

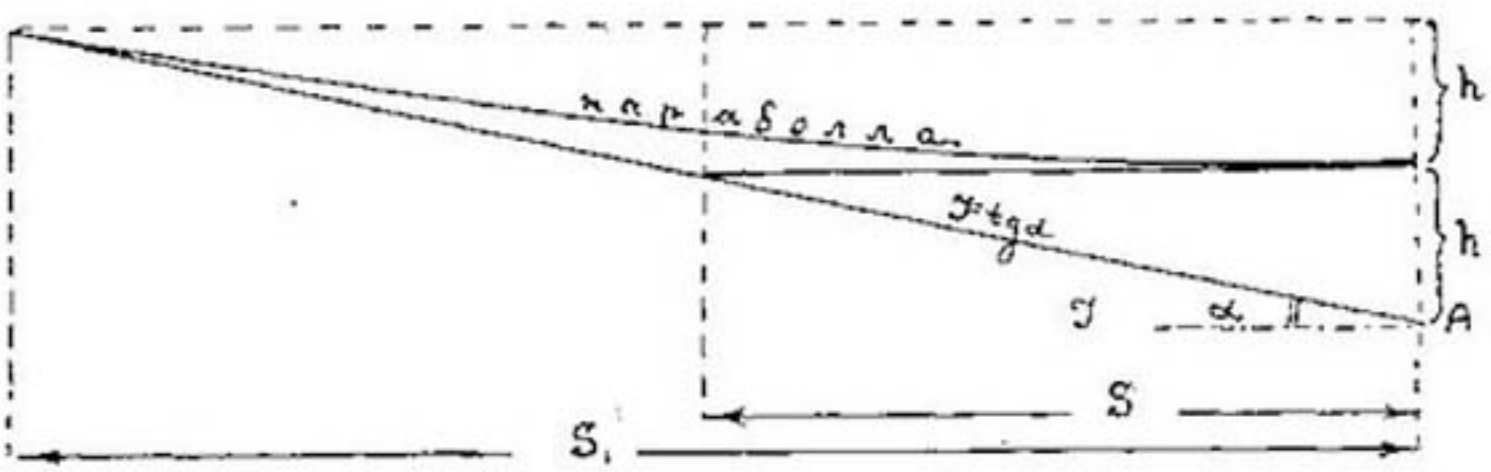


Рис. 62. Кривая подпертого уровня воды.

Если по качеству грунта и скоростям течения можно ожидать, что после устройства прокопа будут происходить размывы русла, то предугадать заранее, до устройства прокопа, величину понижения поверхности воды и дальность распространения этого явления затруднительно. В общем нужно ожидать следующих явлений (рис. 63). При размываемом грунте существующий до устройства прокопа профиль поверхности воды CAB соответствует установившемуся равновесию между размывающей силой потока и сопротивлением русла. Вслед за прорытием прокопа произойдет у нижнего его конца b_1 размыв дна и понижение уровня воды, так как поверхность воды в прокопе займет положение AB_2, представляющее уклон больший прежнего, вследствие

---

[1]) В этом можно убедиться рассматривая рис. 62-й. Наклонная прямая линия представляет свободную поверхность воды в реке с уклоном $J = tg\alpha$. Если в точке A поставлена плотина, образующая подпор h, то на некотором протяжении реки выше плотины поверхность воды примет вид плавной выгнутой вниз кривой линии, которая около плотины переходит в горизонтальную линию, а в другом конце касается с прямой свободной поверхности воды. Если принять эту кривую за параболу, то, по свойствам последней, проекция касательной на ось параболы равна $2h$. Следовательно, из прямоугольного треугольника имеем, что расстояние $S_1 = \frac{2h}{tg\alpha} = \frac{2h}{J}$

чего увеличится скорость течения и размывающая сила потока. Равновесие между этой силой и сопротивлением ложа в прокопе нарушится и дно последнего станет размываться, причем размыв распространится также и на вышележащий участок. Размыв будет продолжаться, постепенно уменьшаясь, пока не установится вновь равновесие между размывающей силой потока и сопротивлением ложа, причем поверхность воды займет положение по линии CB_2, имеющей на участке уклон больший, чем прежняя поверхность воды CA. Определить теоретически положение точки C невозможно, но к приблизительному

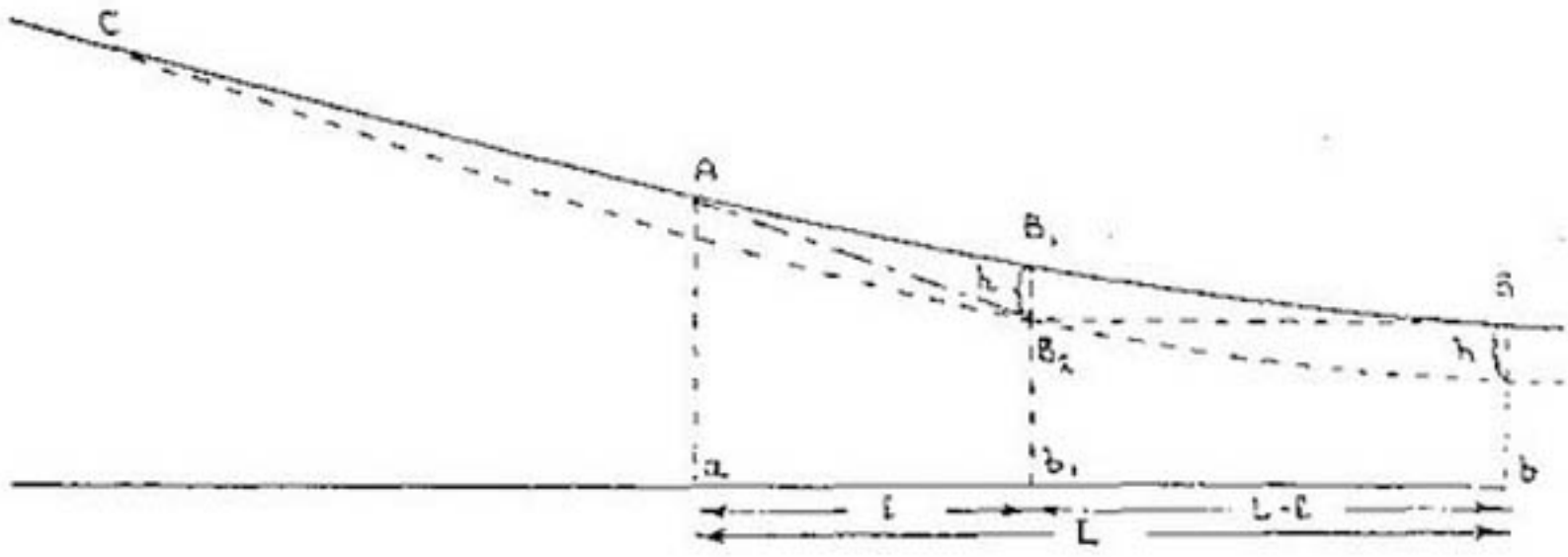


Рис. 63. Влияние прокопа на поверхность воды в случаях размываемого грунта.

решению этого вопроса можно подойти следующим образом. При размыве дна будут оставаться на его поверхности более крупные частицы грунта, вследствие чего сопротивление размытого дна будет более прежнего. Поэтому для установления равновесия между размывающей силой течения и сопротивлением русла требуется уклон больший прежнего. Среднюю величину этого требующегося уклона можно приблизительно определить, приравнявши его к уклону другого участка реки (если таковой имеется), на котором расход воды одинаков с расходом на данном участке, а качества грунта на поверхности дна сходны с качествами нижних слоев грунта на прокопе и примыкающем к его началу участке. Проведя под этим уклоном прямую линию от точки B_2 до пересечения с линией прежнего положения поверхности воды, получаем точку C, т. е. место, начиная от которого произойдет понижение поверхности воды вследствие устройства прокопа.

В обоих рассмотренных случаях предполагалось, что живое сечение и качества грунта в излучине реки и в прокопе одинаковы. Если же живое сечение и качества грунта в прокопе будут более благоприятны для стока воды, то поверхностный уклон для пропуска расхода воды в прокопе будет меньший и понижение поверхности воды в сечении (a) и на вышележащем участке станет еще большим.

Продукты размыва дна в прокопе и на вышележащем участке выносятся в ниже за прокопом лежащий участок. Если уклон этого участка не меньший, чем на прокопе, то означенные продукты будут

уноситься далее; в противном случае на сем участке будут складываться наносы. Таким образом, при устройстве прокопов следует считаться с тем обстоятельством, что он будет вызывать понижение поверхности воды на вышележащем участке, а в некоторых случаях и складывание наносов на нижележащем участке. Если же на нижележащем участке имеются места, где условия стока воды менее благоприятны, чем в прокопе, то на этих местах могут образоваться мели и вредные подпоры воды, вызывающие заболачивание низких берегов. Поэтому ранее устройства прокопов следует озаботиться производством соответствующего регулирования нижележащей части реки. Вообще, влияние прокопов на понижение поверхности воды вышележащих участков и образование подпоров на нижележащих участках может быть тем больше, чем круче естественные уклоны реки. Поэтому на судоходных реках спрямление извилин реки помощью прокопов встречается чаще в низовьях рек и на равнинных местностях, где уклоны реки вообще малы.

Способы устройства прокопов об'яснены в § 33-м (стр. 249).

§ 26. Места разделения русла на рукава.

В местах, где поток делится на два или несколько рукавов, условия менее благоприятны для разработки устойчивого русла и для поддержания необходимых глубин. Деление на рукава увеличивает сопротивления течению, вызывает большую неравномерность уклонов, затрудняет прохождение наносов и способствует образованию перекатов. Регулирование реки на таких участках тем более затруднительно, что расход воды распределяется по рукавам неравномерно в зависимости от относительной величины их живых сечений, от длины рукавов, от их поверхностных уклонов и от разных других обстоятельств, причем распределение воды меняется при увеличении или уменьшении расхода воды в реке, вызывающих соответствующие колебания уровня воды и перераспределения уклонов ее поверхности.

Одной из важнейших мер при регулировании реки является, как было сказано ранее, сосредоточение меженнего течения в едином русле помощью закрытия побочных рукавов. Однако, бывают случаи, когда такая мера не может быть осуществлена повсеместно. Сохранение двухрукавного русла бывает, например, необходимо, когда это вызывается потребностями города, расположенного по обе стороны реки и на междурукавном острове, когда на берегах обоих рукавов имеются важные пристанские устройства, когда существующие в таких местах крупные мосты или иные сооружения не допускают закрытия рукава и в некоторых других случаях. В подобных условиях приходится поддерживать оба рукава реки в том состоянии, которое соответствует пред'являемым требованиям, насколько это возможно по естественным условиям участка реки. Задача регулирования двух-

рукавного русла становится особенно трудной, если речное дно и берега состоят из легко размываемого грунта и река несет много наносов. Практика регуляционных работ на таких участках имеет много примеров неудачных результатов работ и неожиданных последствий по причине сложности явлений, с которыми приходится считаться в местах разделения реки на рукава.

Рассмотрим некоторые обстоятельства течения при наличии двух рукавов.

На реках, текущих в размываемых грунтах, разделение на рукава происходит чаще всего или вследствие образования из наносных отложений осередка, постепенно превращающегося в остров, или по причине прорытия весенними водами протока между концами извилины русла. В том и другом случаях общая ширина рукавов обыкновенно больше ширины неразделенного русла, а глубина в рукавах меньше. Это обстоятельство можно объяснить следующим образом. Представим себе, для упрощения рассуждений, что река разделилась на два рукава, имеющие одинаковые качества грунта и одинаковый поверхностный уклон воды (рис. 64). При таких условиях живые сечения в рукавах будут подобны между собою в том смысле, что для каждого из них отношение средней глубины к ширине одинаково, т. е.

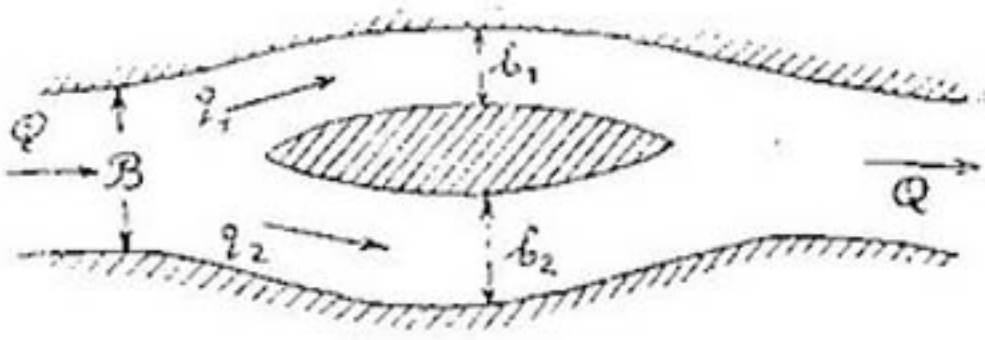


Рис. 64.

$$\frac{t_1}{b_1} = \frac{t_2}{b_2} = n,$$

причем зависимость ширины рукава от расхода воды в нем выразится, в таком случае, в следующем виде:

$$q = fv = b\,t\,C\sqrt{t\,J} = b^{5/2}\,n^{3/2}\,C\sqrt{J}.$$

Поэтому, если расход одного рукава равен q_1, а другого q_2, то

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{5/2} \text{ или } \frac{b_1}{b_2} = \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^{2/5}.$$

Если участок реки, шириною B, перед ее разделением на рукава имеет одинаковые с рукавами качества грунта и поверхностный уклон, то его живое сечение будет тоже подобно живым сечениям рукава, т.е. $\frac{B}{T} = n$ и расход воды $Q = q_1 + q_2 = B^{5/2}\,n^{3/2}\,C\sqrt{J}$.

При разделении расхода поровну на оба рукава, т. е. при $q_1 = q_2 = q$ имеем $2q = Q$

или:

$$2\,b^{5/2}\,n^{3/2}\,C\sqrt{J} = B^{5/2}\,n^{3/2}\,C\sqrt{J}.$$

После сокращения, $b = (0{,}5)^{2/5}\,B \cong {}^3/_4\,B$.

Поэтому расход воды разделится поровну на рукава, если оба они будут иметь одинаковую ширину, приблизительно равную $^3/_4$ ширины перед разделением на рукава.

Следовательно, общая ширина обоих рукавов $2b \approx 1{,}5B$, а так как по условию $\frac{t}{b} = \frac{T}{B}$, то средняя глубина t в рукавах будет меньше средней глубины T в неразделенном русле.

Уменьшение глубин в неразделенном на рукава русле вызывает, подобно перекатам, образование подпора уровня на месте разделения русла на рукава, как это показано на рис. 65-м. Изменение в распределении расхода воды между рукавами влияет на состояние русла того и другого рукава, так как привлечение в рукав большего количества воды вызывает разработку его русла в ширину и глубину, а отвлечение воды способствует отложению наносов и обмелению рукава.

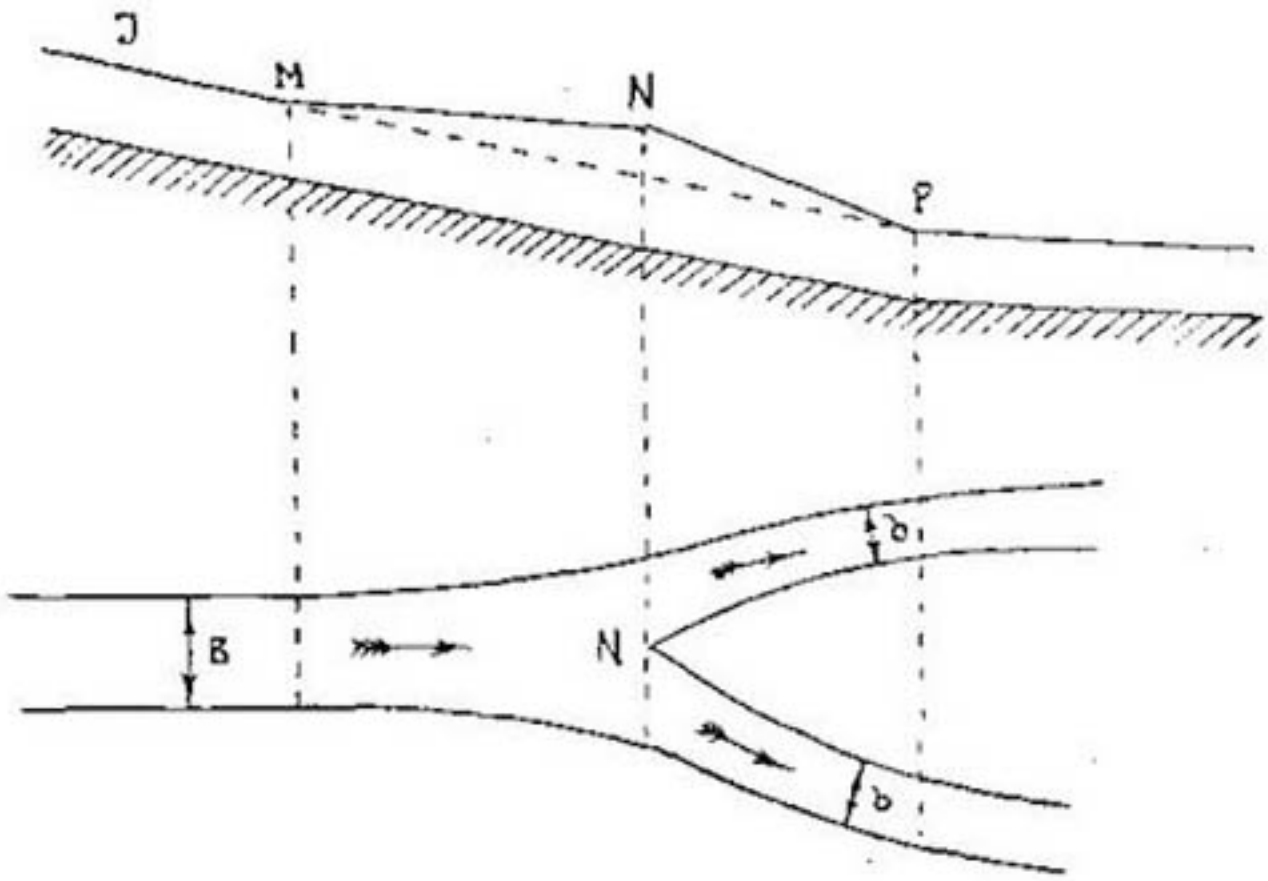


Рис. 65. Поверхность воды в местах разделения реки на рукава.

Если оба рукава, получая равные части расхода воды, имеют одинаковое состояние русла, притом такое, каким можно удовлетвориться, то поддерживать такое состояние несколько легче, так как для сего требуется, главным образом, только закрепить существующий режим. Закрепление режима достигается помощью берегоукрепительных работ для предохранения от размыва как берегов обоих рукавов, так и струеразделной стрелки, помощью производства дноукрепительных работ в местах глубоких размывов, а также помощью землечерпания для удаления наносов как в рукавах, так и на месте их слияния позади острова. Впрочем, и при таких обстоятельствах поддержание обоих рукавов может встречать большие затруднения в зависимости от условий течения высоких вод. Если при высоких паводках и половодии главная масса воды устремляется по одному из рукавов, от

режим рукавов может резко меняться в зависимости от неодинаковой силы и продолжительности наводков. Наиболее действительным средством в таких случаях является землечерпание для удаления наносов, нарушающих прежний режим, в связи с укреплением берегов, подверженных размыву при высоких водах. Вообще значение высоких вод очень велико для состояния рукавов, почему изучение направлений течения и распределения по рукавам расхода воды при паводках и половодии крайне важно для установления целесообразных мер регулирования рукавов.

Задача регулирования рукавов становится гораздо сложнее и труднее, когда расход воды в реке делится между рукавами не поровну. В этих случаях для достижения и сохранения определенного соотношения между величинами расхода воды в двух рукавах требуется придание и закрепление соответствующего направления берегам русла выше его разделения на рукава и на некотором протяжении самих рукавов, а также придание соответствующей формы и направления верхней стрелке острова. Стрелка вообще должна быть укреплена и достаточно заострена для плавного разделения течения, причем иногда для этой цели ее удлиняют вверх по течению в виде продольной струенаправляющей дамбы. Впрочем, регулирование берегов часто бывает недостаточно и в помощь ему требуется производить периодическое землечерпание.

Если необходимо увеличить глубину в одном из рукавов, то эта цель может быть достигнута двумя способами. Помощью вышеуказанных работ по выправлению и укреплению берегов можно направить в этот рукав бо́льшее количество воды и тем самым увеличить в нем размывающую силу течения, последствием чего явится углубление рукава. Другой способ заключается в том, что рукав углубляется помощью производства на нем землечерпания, причем, однако, для сохранения достигнутой глубины необходимо одновременно с землечерпанием произвести работы по уменьшению ширины рукава соответственно новой его глубине. Сужение рукава достигается помощью регуляционных сооружений, указанных в § 21. Но уменьшение ширины рукава без одновременного углубления его землечерпанием может привести к нежелательным последствиям. Ограничение ширины рукава вызовет образование подпора в реке перед местом раздвоения русла. Под влиянием подпора вода станет направляться в другой рукав в количестве большем прежнего, вследствие чего этот рукав может настолько углубиться и расшириться за счет ухудшения состояния рукава, который желали улучшить, что в общем результат работ окажется совершенно противоположным цели, для которой они были предприняты.

Во всех рассмотренных случаях требуется позаботиться о надлежащем состоянии реки также и в нижней части разделенного на рукава участка, главным образом на месте слияния обоих рукавов вновь

в единое русло. Здесь сталкиваются между собой течения неодинакового направления, выходящие из рукавов, а потому энергия и работоспособность потока уменьшаются, последствием чего является складывание наносов. Последние образуют мели, которые стремятся удлинить нижний конец междурукавного острова, увеличивая тем самым длину рукавов. Накопление мелей распространяется вниз по течению. Означенные явления происходят тем сильнее, чем больше угол, под которым сходятся рукава при их слиянии. Поэтому необходимые здесь меры улучшения реки состоят в том, чтобы направить выход течения из рукавов под возможно более острым углом друг к другу и закрепить такое положение прочным сооружением. С названной целью пристраивают к нижнему концу острова прочно с ним сопряженную стрелку (рис. 66). В плане придается стрелке AB треугольная форма, с боков она ограничена откосами, в продольном профиле гребень стрелки, начинаясь в корне с высоты поверхности острова, опускается по наклонной плоскости до закругления (головы), устроенного на уровне низкой воды, и идет далее пологим откосом до дна.

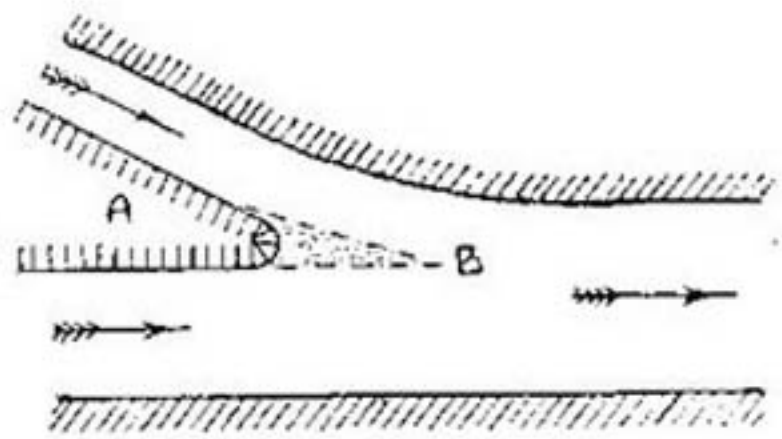


Рис. 66. Стрелка в нижней части острова.

Из всего вышеизложенного видно, что постановка задачи одновременного коренного улучшения состояния обоих рукавов реки, в особенности если желаемое улучшение состоит в образовании по обоим рукавам глубокого и одинаково удобного фарватера для судоходства, вообще трудна, а в некоторых случаях такую задачу и вовсе нельзя ставить, так как разрешить ее удовлетворительно не представляется возможным. Тем меньше шансов на успех для работ, ставящих себе целью улучшение и поддержание в одинаковом виде нескольких рукавов при числе их, большем двух.

Чем река больше и многоводнее, чем больше она несет наносов, тем вообще труднее поддается она регулированию и, в частности, тем сложнее становится задача об улучшении и поддержании требуемого состояния рукавов в местах разветвления речного русла. На таких реках искусственное распределение расхода воды по отдельным рукавам (в необходимых для их регулирования величинах), только помощью берегоукрепительных и выправительных постоянных сооружений, строящихся с целью воздействовать на поток и сообщить течению желательные направления, является задачей в большинстве случаев непосильной. Непосильность ее обыкновенно заключается не только в огромной стоимости требующихся для сего работ, но и в трудности подойти теоретическим путем к правильному проекту работ при столь сложных явлениях, какие имеют место на больших

реках. Подход же к решению названной задачи путем опытов постепенного возведения регуляционных сооружений сопряжен тоже с непомерными расходами, а во многих случаях с риском принести этими сооружениями большой вред для происходящего судоходства или для прибрежных населенных пунктов.

Поэтому на больших реках единственно правильным способом изыскания мер, нужных для регулирования рукавов реки, является производство землечерпания по углублению рукавов или по устройству прорезей с целью привлечения в тот или иной рукав большего количества воды для естественной разработки его русла. Только после достижения удовлетворительных результатов землечерпания можно обратиться к возведению берегоукрепительных и иных постоянных сооружений, нужных в помощь землечерпанию и для закрепления благоприятного состояния рукава.

Примером работ по регулированию многорукавного русла большой реки, претерпевших большие неудачи, прежде чем были достигнуты удовлетворительные результаты, могут служить весьма длительные работы, исполнявшиеся на участке реки Волги около города Саратова. Волга в этом месте (см. план табл. II-ая), на протяжении около 30 *км* между селами „Приставное" и „Береговой Увек", течет, делясь на рукава, по широкой долине, имеющей легко размываемые грунты и загроможденной песчаными наносами и подвижными косами. Русло главного рукава неустойчивое в плане, с подвижным дном, образующим перекаты, меняющие свое место и конфигурацию дна. На противоположных берегах реки расположены крупные населенные пункты: город Саратов на правом берегу и слобода Покровская на левом. В этом месте коренные берега реки несколько сближены и к этому месту река подходит тремя рукавами: р. Тарханка, р. Коренная Волга и р. Сазан. В прежнее время р. Тарханка представляла могучий рукав, так что до сороковых годов минувшего века судоходный фарватер направлялся по Тарханке и проходил вдоль правого берега около Саратова. Впоследствии меженнее русло р. Тарханки было занесено песками, и Тарханка, также как р. Сазан, принимала участие главным образом в пропуске только весенних вод. Против Саратова в реке образовался из наносных песков обширный остров („Городской"). Узкий проток между этим островом и правым берегом, ныне называющийся Городским рукавом, некоторое время соединялся своей верхней частью с главным рукавом по так называемому „Староречью", так что для судов, приходящих к саратовским пристаням, некоторое время еще имелся, хотя и мелководный, выход в главный рукав как вверху, так и внизу Городского рукава. Но затем, в восьмидесятых годах минувшего века, проход по Староречью был засыпан песчаной косой, подвигавшейся вниз от Вознесенского острова, а в Городской рукав суда имели доступ только снизу; но, так как в этом месте судовой ход не имел достаточной глубины, то при низкой воде саратовские пристани оказывались вовсе отрезанными от Коренной Волги. Такое положение требовало принять меры для обеспечения глубоководного подхода к Саратову, а так как по Волге совершается оживленное транзитное судоходство и так как Покровская слобода имеет очень важное значение для грузового движения по Волге и для передачи грузов на правобережные железные дороги, то задача требующихся мер являлась очень сложной. Требовалось обеспечить глубоководный транзитный судовой ход и глубоководные подходы как к правобережным саратовским, так и к левобережным покровским пристанским линиям, причем задача еще осложнялась тем обстоятельством, что нужно было обеспечить удобные входы в зимовочные затоны, расположенные как на правом берегу реки (Тархановский), так и на левом берегу (Покровский).

Первоначальные попытки открыть Городскому рукаву верхнее сообщение с главным рукавом (Коренной Волгой) помощью устройства землечерпательной прорези по направлению прежнего Староречья не увенчались успехом, так как для этих работ пользовались землечерпательными снарядами, имеющими весьма малую производительную способность и весьма несовершенную конструкцию. В девятидесятых годах минувшего века была сделана попытка разрешить вышеупомянутую задачу помощью выправительных сооружений, предполагая помощью сих сооружений направить главный рукав к правому берегу. С этою целью (см. план табл. II-я) была сделана землечерпательная прорезь через Городской остров, а для направления к ней течения главного рукава построены от левого берега полузапруда со струенаправляющей дамбой и запруда, преграждающая этот рукав. Хотя прорезь быстро размылась в глубину и ширину, но сооружения не только не принесли пользы, но оказались крайне вредными. Повлиять на левобережный режим реки, т. е. стремление ее течения к левому берегу, эти сооружения не могли; глубоководный судовой ход у правого берега не образовался, пришлось вновь открыть его по прежнему направлению главного рукава; между тем под влиянием этих сооружений образовались большие перекаты и водовороты, так что транзитный фарватер был испорчен и пришлось разобрать построенные сооружения.

Поэтому, вовсе отрешившись от мысли о возможности достичь желаемую цель помощью активных выправительных сооружений, в начале нынешнего века вновь обратились к прорытию землечерпательными машинами входа сверху в Городской рукав по направлению прежнего Староречья. Благодаря постановке сильных землечерпательных и землесосных снарядов и умелому ведению работ, вход через Староречье был в 1902 г. открыт, и, таким образом, установился сквозной путь вдоль города, сначала недостаточно глубокий по причине мелей и каменистой гряды в нижней его части, но постепенно улучшавшийся последующими работами, заключавшимися в удалении означенных препятствий и в расширении рукава и верхнего входа в него. С того времени Городской рукав и сквозной по нему ход поддерживаются более или менее успешно, причем ежегодно после прохода весенних вод приходится землечерпанием восстанавливать канал по Староречью и удалять наносы в рукаве. Транзитный судовой ход по главному рукаву тоже восстановился в удовлетворительное состояние, требуя небольших землечерпательных подчисток на перекатах. Но остается еще не разрешенным вопрос о восстановлении подходов к левобережным Покровским пристаням и к ватону, из года в год приходящих в худшее состояние вследствие заноса их песками.

§ 27. Места слияния реки с притоками.

На месте слияния с притоком режим реки претерпевает некоторые изменения, так как приток увеличивает расход воды в реке и вносит в реку влекомые им наносы. В зависимости от относительного количества и качества последних влияние притока на реку выражается различно. Если за счет притока происходит в реке прибавление расхода воды в относительно большем размере, чем наносов, то размывающая работоспособность речного потока увеличивается более, чем сопротивления течению. Вследствие этого, непосредственно ниже устья притока русло реки углубляется, поверхность воды понижается и уклон ее становится более пологим (рис. 67). Если, напротив, как это чаще и бывает, приток обогащает реку относительно больше наносами, чем водою, то в реке сопротивления течению возрастают сильнее, чем работоспособность потока воды, а потому образуется накопление

наносов и подпор воды (рис. 68). Наносы, которые влечет приток во время своих паводков, состоят обыкновенно из более крупных зерен, чем речные, причем высокие воды в притоке и в реке часто не совпадают по времени, а при таких условиях река оказывается не в состоянии увлекать далее по течению наносы, поступившие в реку при паводке притока. В силу отмеченных обстоятельств образование наносных отложений на месте слияния реки с притоком составляет обычное явление.

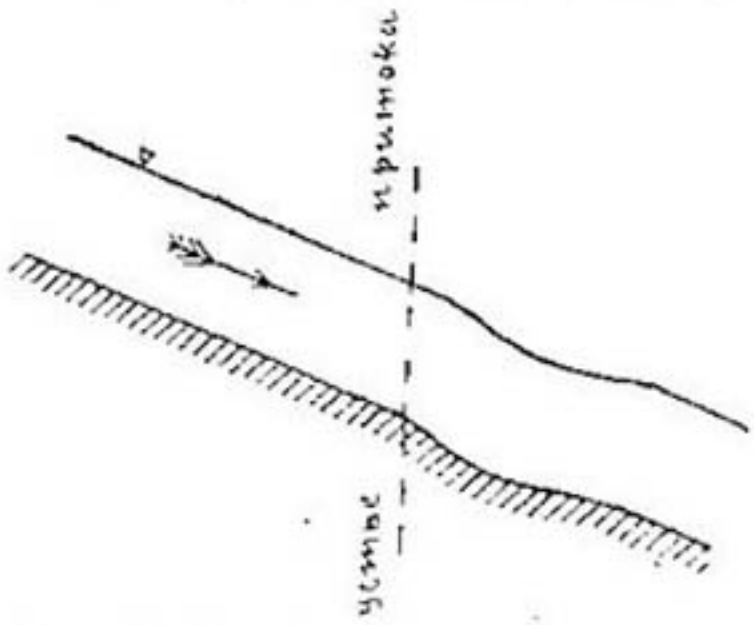


Рис. 67. Профиль реки на месте слияния с притоком, несущим мало наносов.

Наносы, пришедшие из притока, складываются, в виде косы, в русле реки непосредственно ниже устья притока. При крупнозернистых наносах притока, в виде гравия или гальки, они образуют в реке форму конической высыпки.

Влияние угла, под которым сходятся река и приток, выражается в том обстоятельстве, что течения разных направлений, сталкиваясь между собою, ослабляют энергию речного потока и тем самым способствуют откладыванию наносов. С этой точки зрения уменьшение угла слияния притока с рекою представляется обстоятельством благоприятным в смысле уменьшения наносных отложений. Однако, польза острого угла не безусловна для всех случаев. Примеры регулирования мест слияния рек указывают, что в некоторых случаях искусственное придание этому слиянию очень острого угла не достигало цели и даже ухудшало положение. В горных местностях впадение в реку под прямым углом горных потоков, несущих большие количества тяжелых наносов, является наиболее частой естественной формой слияния притока с рекой, и такая форма нередко применяется с успехом при регулировании горных потоков. Но нельзя упускать из виду того обстоятельства, что приток, несущий во время паводка большое количество крупнозернистых частиц, складывает их в реке большими массами в короткое время. Вследствие этого в реке образуется большой подпор воды, который остается в течение времени, пока, под влиянием увеличившейся под действием подпора скорости течения, река не смоет наносы и не унесет их далее вниз по течению. Если же противоположный

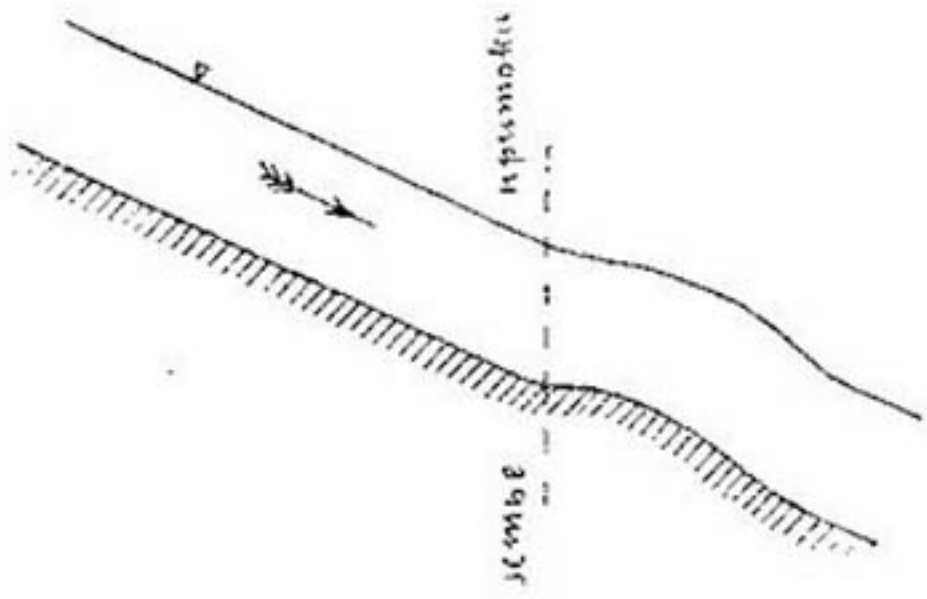


Рис. 68. Профиль реки на месте слияния ее с притоком, несущим много наносов.

берег поддается размыву, то под влиянием того же подпора река, размывши берег, может изменить положение своего русла в этом месте. Поэтому и на таких реках искусственое увеличение угла сопряжения притока с рекой допустимо лишь в тех случаях, когда образование в реке временных подпоров поверхности воды не грозит какими-нибудь вредными последствиями.

В обычных же условиях более спокойных рек и их притоков придание плавной формы слияния двух потоков помощью соответствующего очертания берегов и заострения стрелки сопряжения является наиболее частым способом регулирования таких мест реки. Если же река и ее приток оба судоходны, то необходимость острого угла их сопряжения обусловливается также требованиями удобств и безопасности для плавания судов.

Если река и приток подходят к месту своего слияния прямолинейными участками, то для уменьшения угла сопряжения возможно перенести помощью прокопа устье притока ниже по течению реки, как показано пунктиром на рис. 69-м. Нужно, однако, иметь в виду, что такое перенесение может дать полезные результаты в том лишь случае, если река около нового места впадения притока обладает смывающей работоспособностью не меньшей, чем на старом месте. В противном случае, например если уклон реки на нижележащем участке меньше, чем на вышележащем, перенесение устья притока ниже по течению реки может еще ухудшить состояние наносов. По тем же соображениям невыгодно выводить устье притока к выпуклому берегу извилины, так как энергия потока реки в ее извилинах сосредоточивается вдоль вогнутого берега и ослаблена около выпуклого берега.

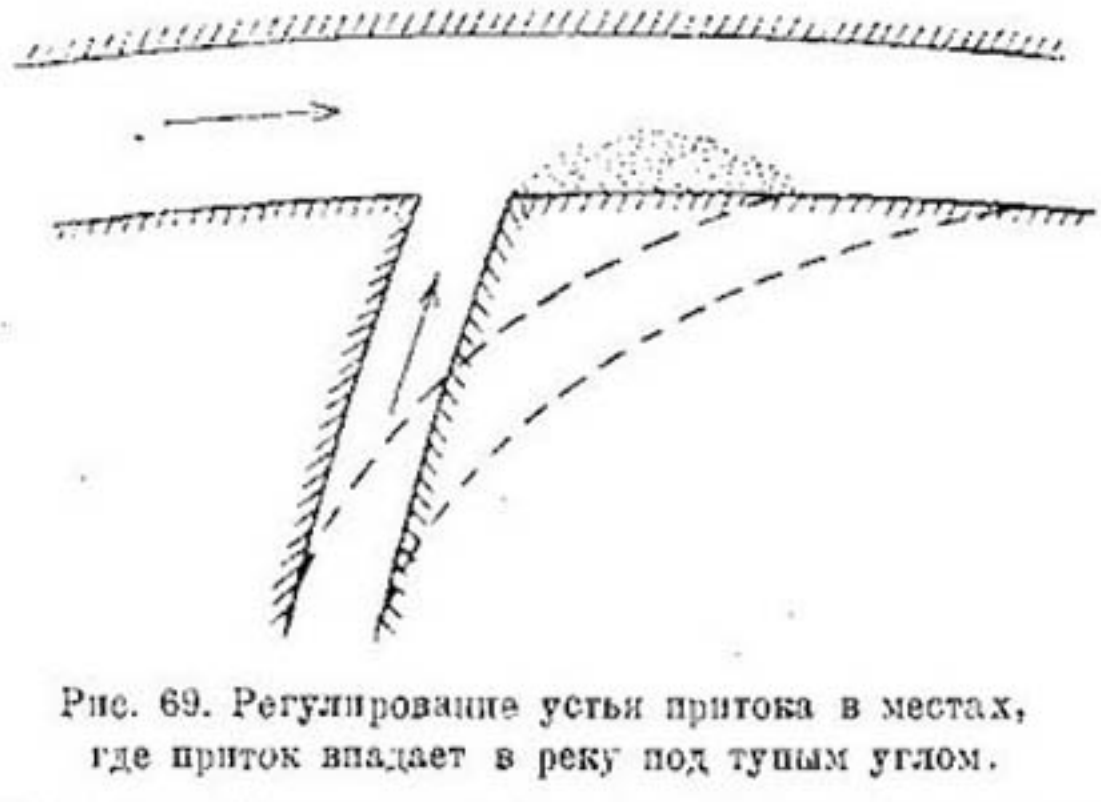


Рис. 69. Регулирование устья притока в местах, где приток впадает в реку под тупым углом.

Относительно очертания берегов на месте слияния реки с притоком можно различать три типичных случая (рис. 70—*a*, *b*, *c*). Очертание берегов и устьевой стрелки должно способствовать плавному слиянию обоих потоков; при этом ширина об'единенного русла на месте слияния должна быть менее суммы ширин соединяющихся русел, как это было уже об'яснено в § 26-м относительно регулирования рукавов. Сопряжение по типу рис. 70—*a* удовлетворяет первому условию, но около стрелки Z ширину об'единившегося русла трудно сделать менее суммы $b + b_1$ обоих русел, так как выдвижение стрелки далее

по течению вызвало бы нежелательное местное сужение этих русел. Последствием излишней ширины ниже стрелки явится накопление наносов B и искривление течения для обхода мели. Прямолинейное сопряжение, по типу рис. 70—b, допуская придание нужной ширины об'единенному руслу, менее удовлетворяет условию плавного слияния потоков. Наиболее благоприятным является сопряжение по обратным кривым, показанное на рис. 70—c, так как, удовлетворяя плавности слияния, тип этот допускает возможность получить помощью удлинения стрелки нужную ширину об'единенного русла B, меньшую суммы обоих русел.

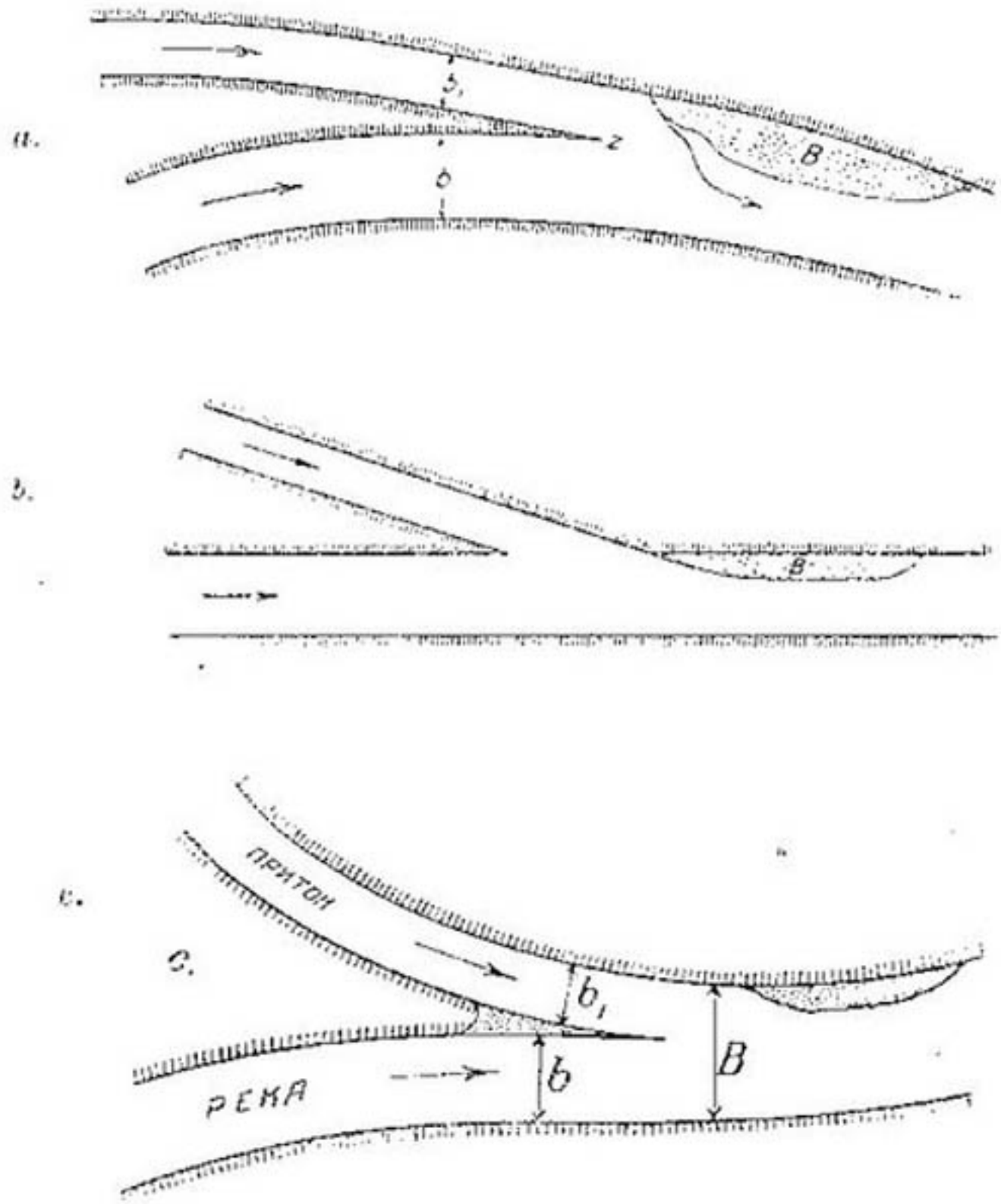


Рис. 70-a, b, c. Типичные формы сопряжения русла реки и притока.

Что касается требуемой формы устьевой стрелки в продольном и поперечных ее профилях, то она должна удовлетворять тем же условиям, которые были указаны в § 26-м для стрелки сопряжения рукавов реки.

В периоды времени, когда паводки на притоке миновали, а сама река находится в состоянии высоких паводков, может происходить в отно-

шении образования наносных отложений обратное явление, а именно наносы, влекомые рекою, могут входить в устье притока и складываться в нем в виде косы около того берега притока, который расположен в сторону направления течения реки. Наносы эти увлекаются из реки круговым течением, образующимся в притоке, как показано на рис. 71-м, вследствие того, что речное течение действует у стрелки сопряжения *C* всасывающим образом и тем понижает уровень воды около примыкающего к стрелке берега притока; для восстановления увлеченной воды образуется течение от противоположного берега и, таким образом, устанавливается круговое течение. После спада высоких вод в реке новые паводки притока выносят эти отложения обратно в реку. Но в некоторых случаях высокие воды реки настолько замелевают устья притоков (главным образом маленьких притоков), что происходит общее заболачивание местности в низовьях притоков. Бороться с таким явле-

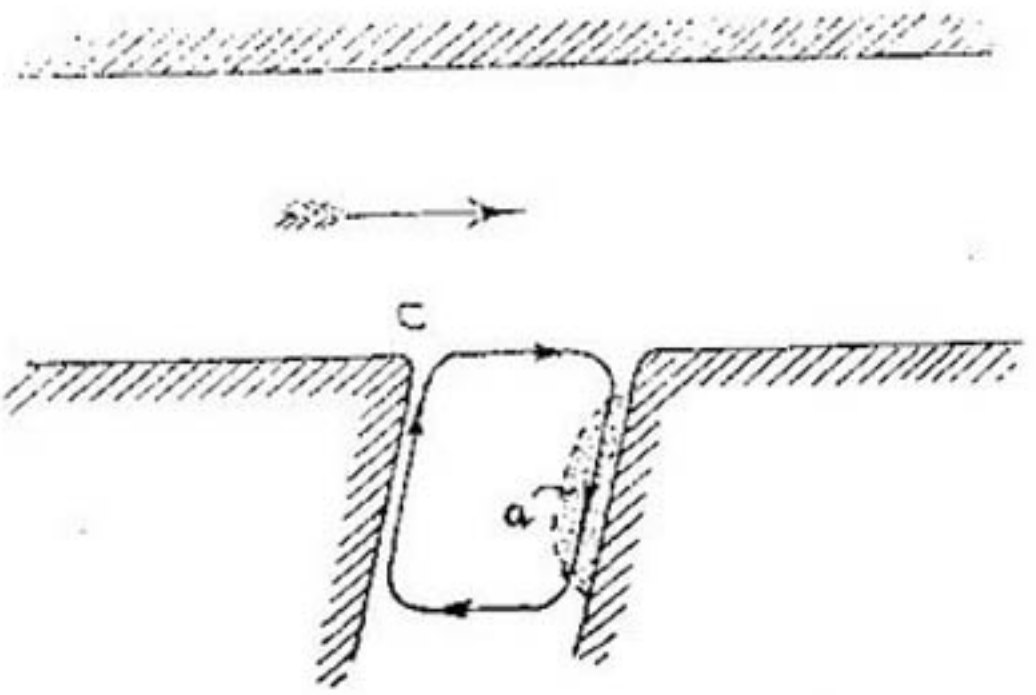


Рис. 71. Влияние высоких паводков реки на образование в устьи притока наносных отложений.

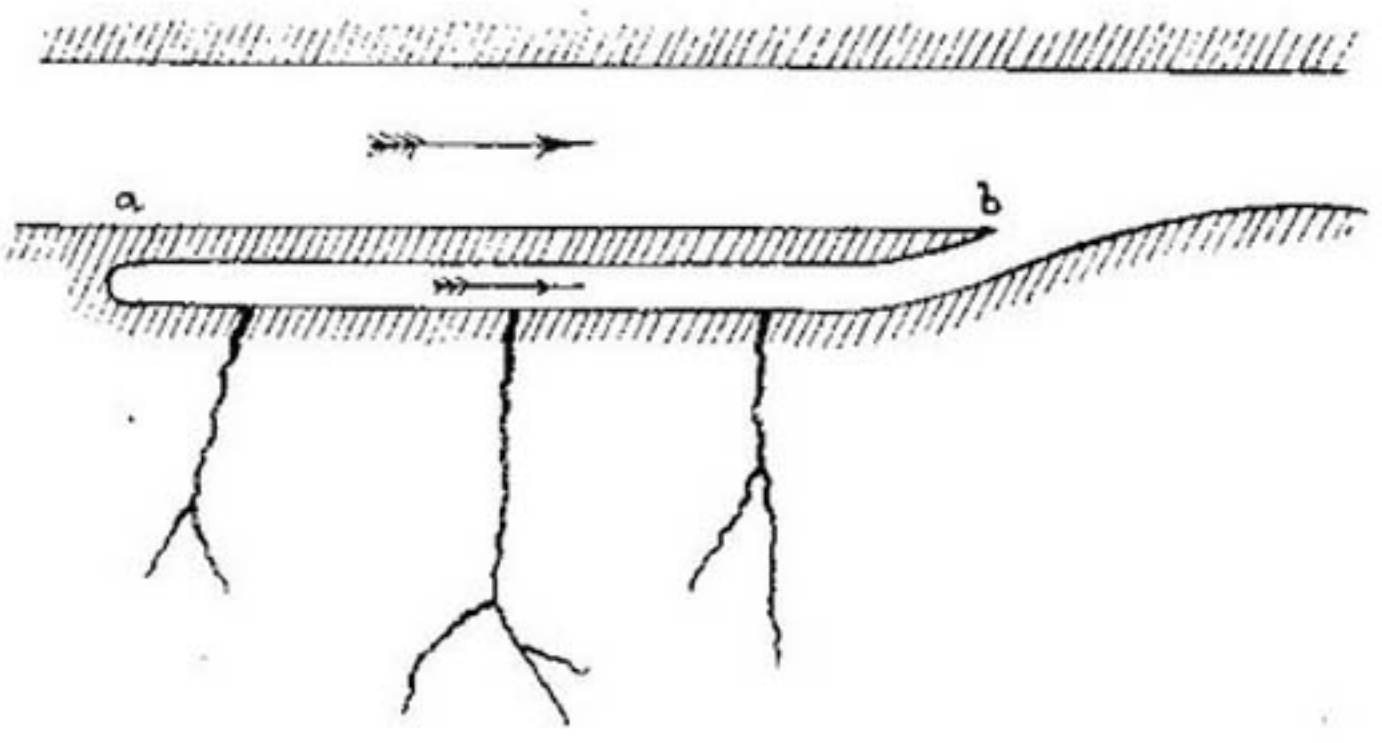


Рис. 72. Регулирование устьев небольших притоков помощью выпуска их вод в канал.

нием только помощью исправления формы сопряжения притока с рекой не представляется возможным. В этих случаях приходится прибегать к обвалованию низменных местностей, заливаемых водами притоков. Если же притоки маловодные, а количество их значительно, то, как показывает пример успешной борьбы с подобными явлениями на Верхнем Рейне, более рациональным средством может служить отделение притоков от реки высокой дамбой *ab* (рис. 72) и вырытие позади дамбы

канала. Канал принимает в себя воды притоков и отводит их в реку ниже по течению на таком расстоянии, что уровень высоких вод реки в точке b находится ниже уровня воды в устьях притоков; благодаря сему подпор, оказываемый рекою на поверхность воды канала, не достигает притоков.

§ 28. Регулирование порожистых частей реки.

Задача улучшения судоходных условий порожистой части реки находится в совершенно отличных условиях от тех, при которых приходится регулировать реку в местах, где ее ложе состоит из наносных легко размываемых грунтов. В речном пороге дно реки состоит из скалистой гряды или нагромождения тяжелых камней. Не поддаваясь размыву течением и образуя как бы выступы дна (рис. 73-a), порог действует на речное течение как подводная плотина. Уменьшенная на пороге площадь живого сечения реки требует для пропуска воды при величине расхода, с которым она подходит к порогу, увеличения скоростей течения, вследствие чего образуется подпор воды непосредственно перед началом порога, а на самом пороге поверхность воды приобретает очень крутые уклоны J_2. Соответственно уменьшается глубина воды t на пороге. Главнейшие затруднения, которые встречает судохолство на порогах, состоят в малых глубинах и очень больших скоростях течения с перепадами, водоворотами и др. неправильностями. Положение судоходства ухудшается еще тем обстоятельством, что скалистое дно испещрено выступами и усеяно отдельными камнями, представляющими опасность для плывущего судна.

Ближайшей задачей для улучшения условий судоходства в порожистом участке реки представляется, на первый взгляд, уничтожение той части скалистого грунта, которая образует выступающий порог. Это может быть сделано, разрыхливши скалистый грунт взрывами и удаливши обломки скалы и отдельные камни так, чтобы сгладить порог в ровную наклонную плоскость. В этом случае резкий перепад воды сгладится и скорость течения несколько уменьшится. Однако, такое улучшение на пороге может быть достигнуто лишь за счет уменьшения подпора и, следовательно, за счет понижения уровня воды на вышележащем от порога участке реки. Последнее обстоятельство часто оказывается недопустимым, так как с понижением уровня воды могут оказаться на протяжении вышележащего участка недостаточные для судоходства глубины.

Поэтому, ранее приступа к расчистке порога, требуется установить ту предельную величину, на которую можно допустить понижение уровня воды на участке реки выше порога. Пусть на рис. 73-b первоначальный уровень воды занимает положение, изображенное пунктиром; тоже пунктиром изображено первоначальное положение дна порога в продольном профиле, а допустимое понижение уровня воды перед

порогом изображено на том же рисунке сплошной линией. Сделавши соответствующую срезку дна порога во всю ширину реки, мы понизим до этой допустимой высоты уровень воды, несколько сгладим поверхностный уклон воды на пороге и, следовательно, несколько уменьшим скорости течения на пороге, но мы можем вовсе не получить какого либо увеличения глубины на пороге, так как и дно, и поверхность воды одинаково опустятся.

Если же расчистку дна сделать не по всей ширине реки, а, как показано на рис. 73-*c*, лишь узкой полосой *ab*, ширина которой соответствует только необходимой ширине фарватера, то значение такой прорези в дне реки по отношению общей величины живого сечения реки будет не велико и прорезь *ab* не окажет сильного влияния на понижение уровня воды в реке, между тем как глубина на прорези может быть значительной. Такой способ улучшения судоходных условий в порожистых частях реки и применяется всего чаще.

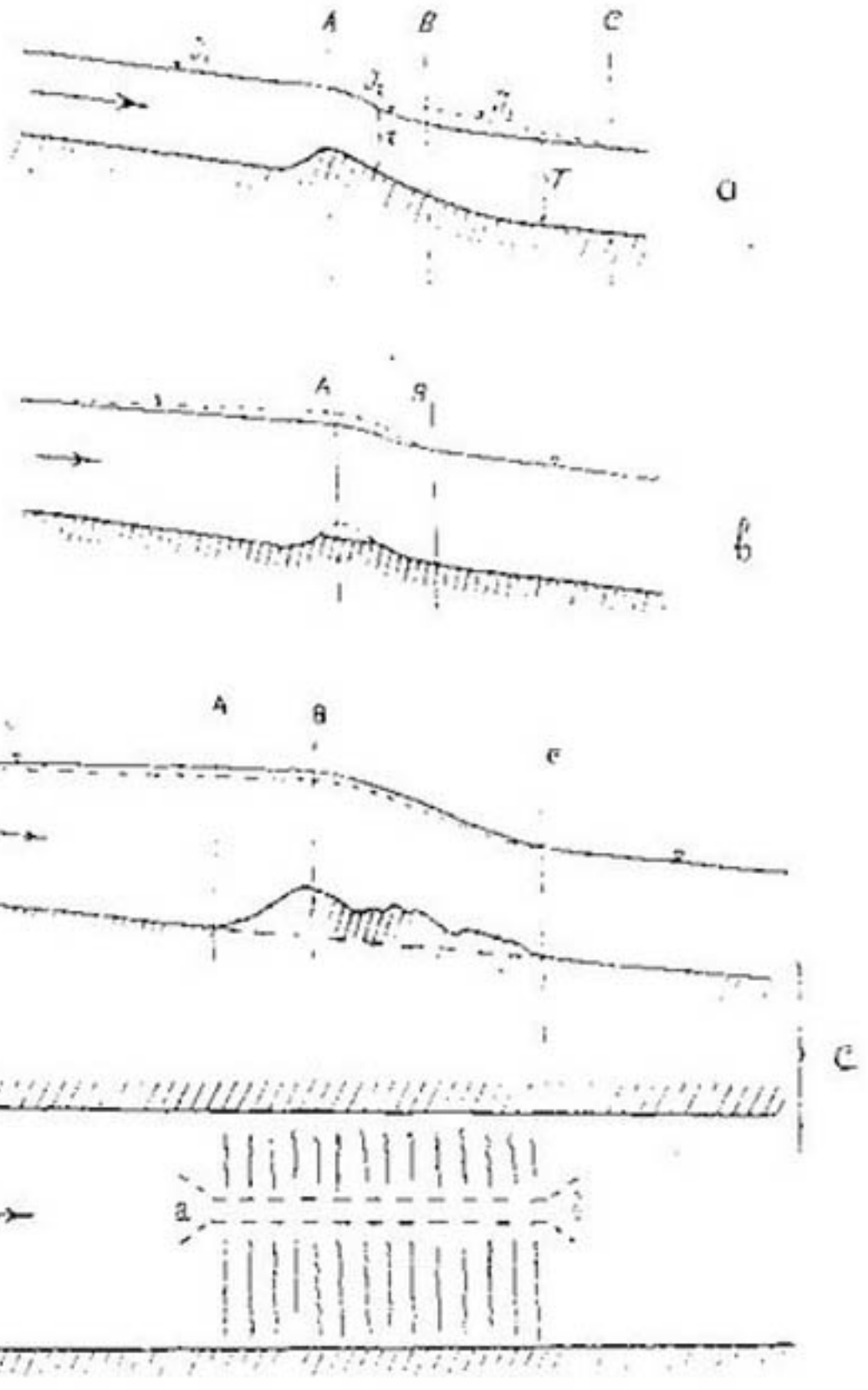


Рис. 73-*a*, *b*, *c*. Регулирование порожистых частей реки.

Еще более существенные результаты могут быть получены, если сделать прорезь в канале, огражденном дамбами, как показано на рис. 74-м. Такой канал имеет следующее значение. Он может быть сделан длиннее порога и дно его может быть выравнено с приданием ему однообразного или несколько меняющегося, по длине, уклона, величина которого определяется расчетом. Поэтому падение поверхности воды, сосредоточенное в пороге на коротком протяжении, может быть в канале распределено на большее протяжение, что соответствен-

но уменьшает крутизну уклона. Так, например, падение в пороге H при низком горизонте, сосредоточенное почти полностью на протяжении l, будет в канале распределено по всей длине последнего L, и вместо среднего уклона поверхности воды в пороге $J_1 = \frac{H}{l}$ будет получен в канале средний поверхностный при низком горизонте $J_0 = \frac{H}{L}$. Если оградительные дамбы канала выведены выше уровня высоких вод в реке, то и при высоких водах средний поверхностный уклон воды в канале тоже будет меньший, чем в реке. Проектный профиль канала в его поперечных сечениях, наименьшая (при низких уровнях воды в реке) глубина канала и наибольшая допустимая скорость течения в канале назначаются в зависимости от требований судоходства. При больших падениях порога по необходимости приходится допускать высшие для судоходства пределы скорости течения, какими для взводного судоходства при буксирной тяге можно считать не более 2½ м. в секунду. При туэрной и механической тяге скорость течения в канале может быть повышена до 3½—4 м. в секунду.

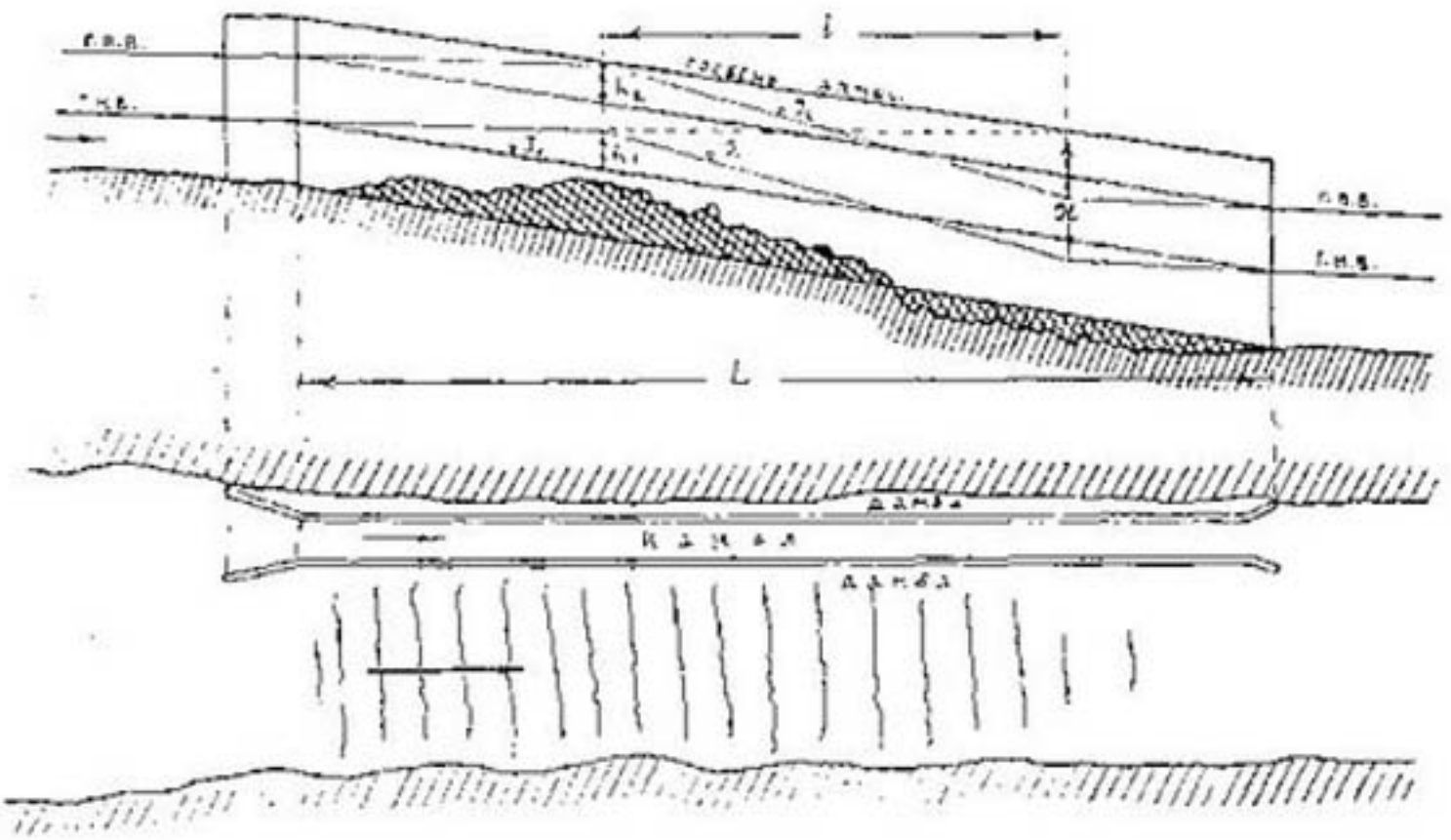


Рис. 74. План и продольный профиль канала, огражденного дамбами.

Вследствие больших скоростей течения обыкновенно в таких каналах не допускается встречного движения судов; тем не менее поперечный профиль канала должен иметь значительные запасы, подобные тем, какие даются в обыкновенных каналах, где отношение площади живого сечения канала к площади наибольшего поперечного сечения судна в его подводной части принимается от 3-х до 4-х. Величина продольного уклона дна, а, следовательно, длина канала могут быть определены теоретически по заданным: поперечному профилю канала, предельно меньшей глубине воды в канале и наибольшим допустимым скоростям течения воды в канале, а также предельным величинам скачка или

перепада воды, если таковые, по условиям судоходства, допустимы. Расчет и построение теоретического продольного профиля дна и поверхности воды в канале делаются пользуясь уравнением неравномерного движения воды в открытых руслах.

Важным условием для устройства такого рода открытых каналов в речных порогах является: во первых, чтобы дно реки в пределах полной длины канала было скалистое, не подвергающееся размыву течением воды в канале, и, во вторых, чтобы дамбы канала были водонепроницаемы, так как поверхность воды в канале и в свободной части реки в пределах длины порога будет находиться не на одинаковой высоте, как это видно по схеме рисунка 74-го, где буквами h_1 и h_2 показаны превышения уровня воды в канале над уровнями воды в реке в первой, по длине канала, его части; подобная же разность горизонтов, но обратного значения, будет и во второй по длине канала части его.

С целью придания каменным дамбам канала необходимой водонепроницаемости они могут быть построены согласно типов, показанных на рисунках 75 и 76-м. В первом типе дамба, построенная из

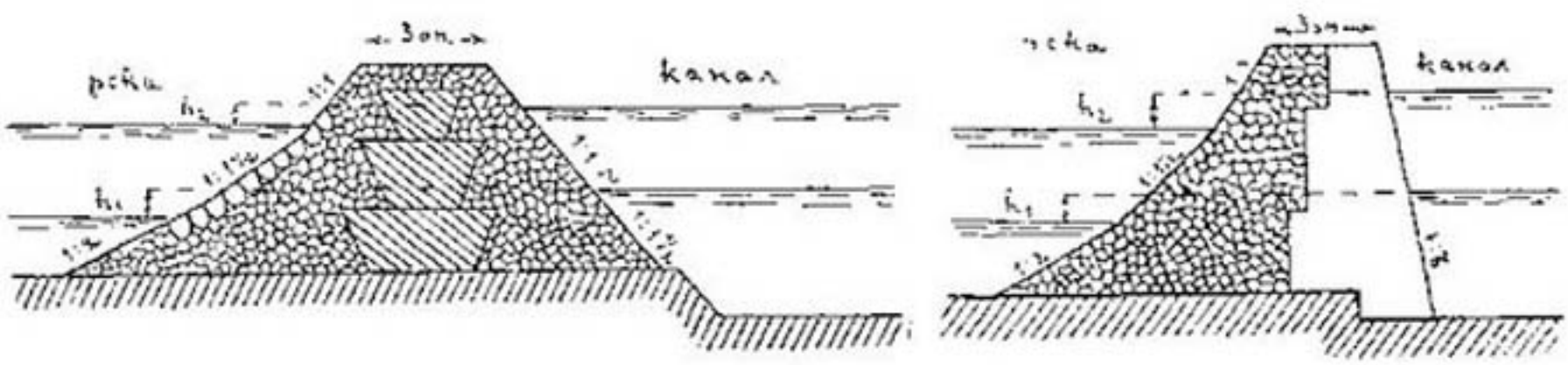


Рис. 75 и 76. Типы каменных дамб канала.

каменной наброски, имеет для водонепроницаемости ядро из песчано-глинистого грунта; во втором типе часть дамбы со стороны канала построена из бетонной или каменной на цементном растворе кладки, причем эта стенка защищена со стороны реки от разрушительного действия ледохода широкой отсыпью из накидного камня.

В известных случаях улучшение судоходных условий порожистой части реки может быть получено помощью струенаправляющих дамб, сжимающих речное течение и тем самым распределяющих падение поверхности воды в пороге на более значительное протяжение. Рис. 77-ой представляет собою порожистый участок реки с внезапным расширением русла. Вследствие этого речное течение при входе в расширенное русло образует перепад с большими и неправильными скоростями течения и малой глубиной t на судовом ходе. Устройством струенаправляющей дамбы AB можно как бы продолжить узкое русло и превратить крутой перепад в достаточно пологий уклон, показанный на рисунке пунктирной линией. Само собою разумеется, что в подобных случаях также необходимым условием является неразмываемость

дна и берегов русла реки и водонепроницаемая конструкция струенаправляющей дамбы.

Примером весьма крупных работ по регулированию порожистых частей реки являются работы, исполненные в девятидесятых годах минувшего века в порожистой части р. Дуная. Проложивши свой путь между Карпатами и Балканами, река Дунай, на протяжении 104 *клм.* от Бабакая до так называемых „Железных ворот", течет в скалистом русле, испещренном порогами и нагромождениями камней. Общее

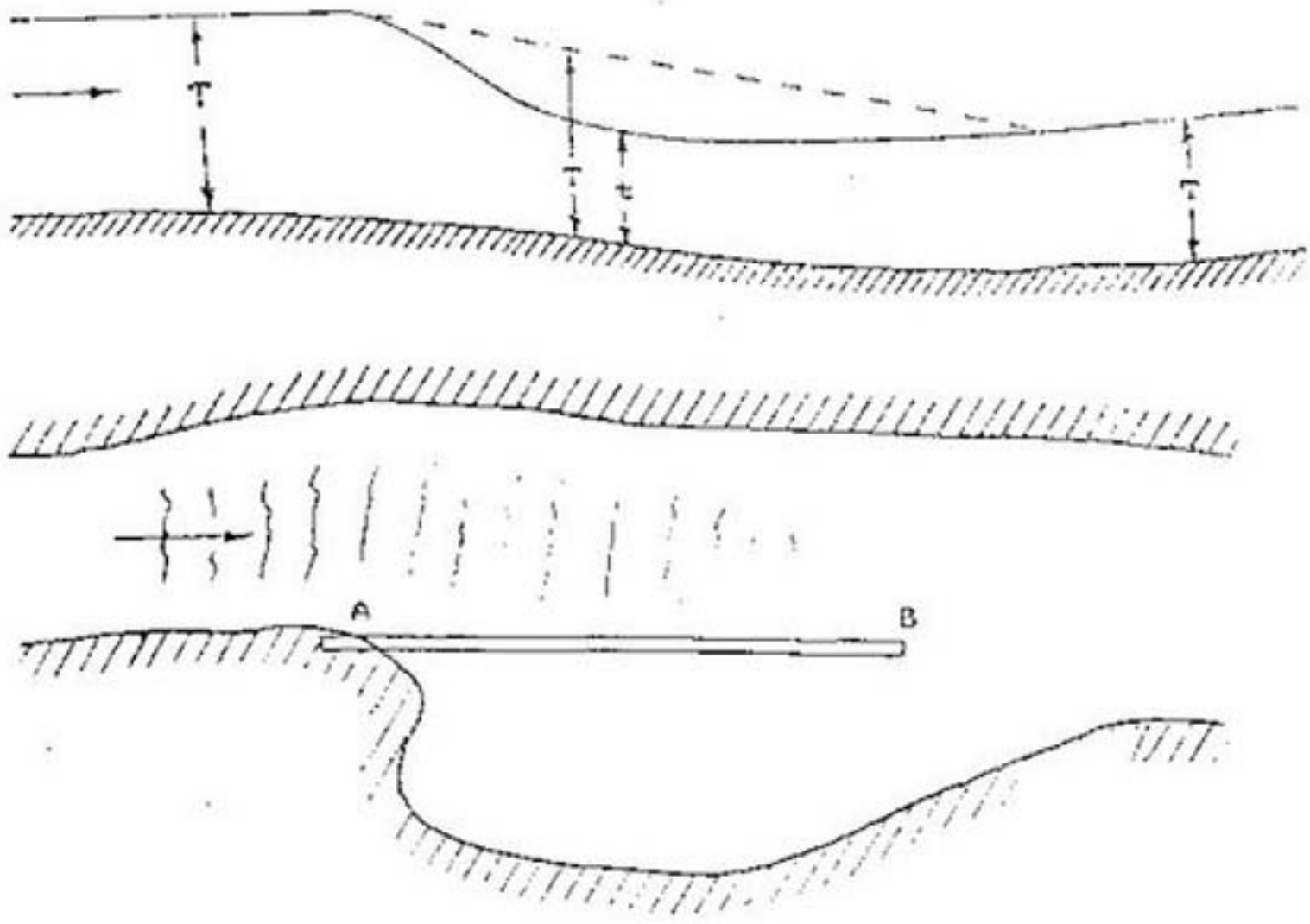


Рис. 77. Порожистый участок реки с внезапным расширением русла.

падение реки, составляющее на этом протяжении около 26 *м.* при низких уровнях воды, сосредоточивается в отдельных местах на коротких участках так, что частные уклоны поверхности воды достигают в некоторых местах до 1:500 и даже до 1:250. Глубина воды на судовом ходе в некоторых порогах составляла при низких горизонтах всего лишь 0,6 *м.* и даже менее. Регулирование порогов было исполнено на некоторых порогах только помощью расчисток дна, на некоторых порогах помощью струенаправляющих дамб, а на главном пороге „Железные ворота" был устроен около правого берега реки открытый огражденный дамбами канал, изображенный на рис. 78-м. В результате работ глубины судового хода были увеличены, но все же скорости течения в порогах и в канале „Железных ворот" остались довольно большими, так что судоходство терпит и ныне значительные затруднения, а в „Железных воротах" пришлось организовать туэрную тягу судов.

Значительные работы по регулированию порогов помощью расчисток и открытых каналов были произведены на Днепре, в поро-

жистой части реки между гор. Днепропетровск (б. Екатеринослав) и гор. Запорожск (бывший Александровск), а также на некоторых других реках. Но вообще нужно заметить, что регулирование порогов помощью расчисток дна и устройства открытых каналов приносит существенную пользу только при сравнительно небольших паденпях порога. При более значительных паленпях такпе работы, несмотря на высокую их стоимость, не разрешают коренным образом задачи об улучшении судоходных условий в пороге: они улучшают условия сплава плотов и отчасти судов, но в большинстве случаев взводное судоходство продолжает терпеть большие затруднения и после регулирования порога. Лучшим средством, коренным образом разрешающим такую задачу, является шлюзование порога. А так как на реках многоводных большое паденпе в порожистой части реки дает мощную гидравлическую энергию, могущую быть использованной при шлюзовании реки, то этот последний способ улучшения судоходных условий порожистой части реки является в большинстве случаев наиболее выгодными в экономическом отношении.

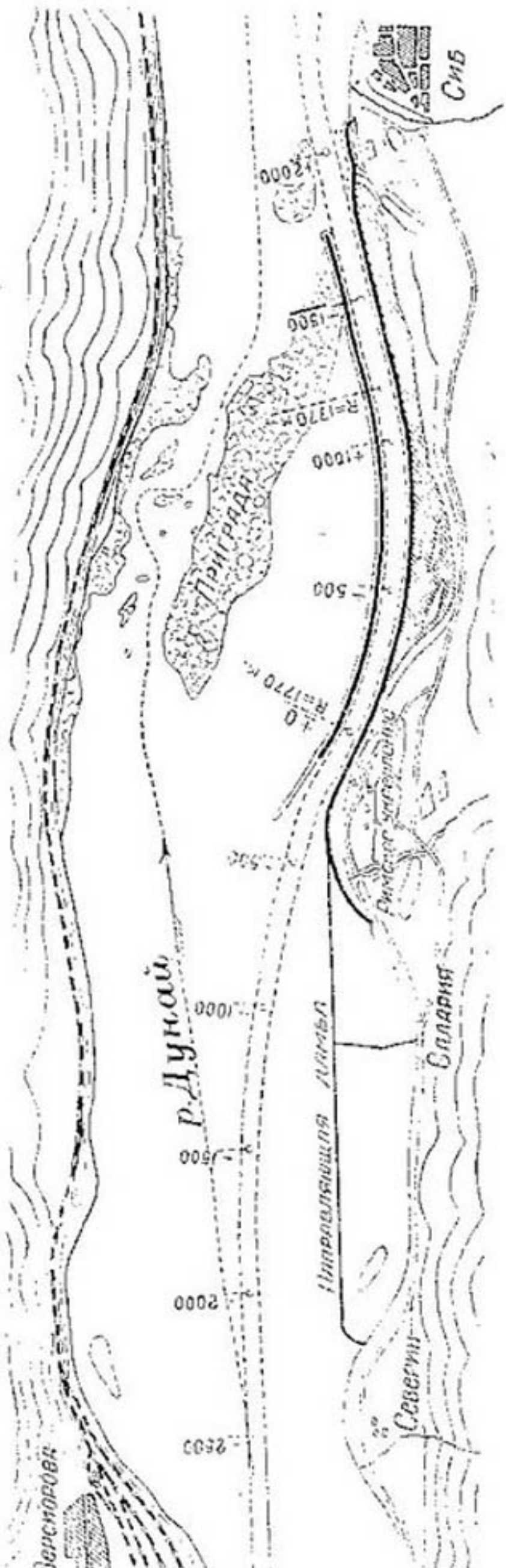


Рис. 78. План порога „Железные ворота".

ГЛАВА V.

Роль механического землечерпания в работах по урегулированию рек.

§ 29. Землечерпание, как составная часть регуляционных работ.

Хотя землечерпательные машины стали появляться на реках давно, еще в первой половине минувшего века, но существенное значение речные землечерпательные работы начали приобретать лишь в последние десятилетия минувшего века, когда конструкции дноуглубительных снарядов достигли известной степени усовершенствования. Дальнейшие, продолжающиеся до настоящего времени достижения в отношении улучшения прежних и появления новых типов снарядов еще более усилили значение землечерпательных работ на внутренних водных путях.

Главнейшие усовершенствования выразились достижением большой производительности работы землечерпательных и землесосных снарядов, изобретением удобных способов удаления выпутого грунта, установки и перемещения снарядов и т. п. Производительность работы отдельных речных землечерпательных машин еще в семидесятых и восьмидесятых годах минувшего века обыкновенно выражалась несколькими десятками кубических метров в один рабочий час; между тем, к концу минувшего века обычные, рядовые, речные землечерпалки и землесосы стали обладать производительностью в несколько сот кубических метров в час, и с того же времени стали появляться на реках землесосы чрезвычайно сильные, производительностью более 1.000 и до 3.000 куб. метр. выемки в час. Усовершенствование рефулерного способа удаления грунта с места его выемки значительно облегчило производство всякого рода дноуглубительных работ на реках и дало возможность рационально использовать продукты землечерпания, складывая их на берегах или же в таких местах русла, где полезно образование насыпей, или где складывание продуктов землечерпания не грозит засорением фарватера.

Вполне естественно, что при появлении столь могущественных и удобных приспособлений для производства подводных выемок и для перемещения земляных масс механическое землечерпание стало находить себе широкое применение также и при регулировании рек по-

мощью постоянных выправительных сооружений. До того времени на постоянных регуляционных сооружениях, как на единственном тогда способе улучшения судоходного состояния реки [1]), лежало совершенно самостоятельное выполнение всех задач как по улучшению фарватера, так и по дальнейшему поддержанию достигнутых глубин. Между тем, из всего, что ранее сказано о регулировании помощью постоянных сооружений, явствует, что способ этот при целесообразном его выполнении и при надлежащем развитии регуляционных сооружений достигает общего улучшения реки, может создать более устойчивое меженнее русло, сделать местные выравнивания поверхностных уклонов, несколько сгладить резкие изменения в глубинах дна по фарватеру, придать последнему более плавные и удобные очертания в плане и более благоприятную конфигурацию дна,—но способ этот не может обратить речной фарватер в канал с однообразным руслом и всюду одинаковой глубиной. Движение и складывание наносов будет происходить и после регулирования реки и, хотя наносы будут складываться только на определенных местах, в более благоприятных для судоходства формах и с бо́льшими на них глубинами, чем это было до регулирования, тем не менее однообразной для всех таких мест фарватера глубины и всегда постоянной ее величины нельзя достигнуть только одними регуляционными сооружениями. Между тем, наименьшие глубины в отдельных местах протяжения фарватера определяют допустимую осадку судов и, таким образом, ограничивают судоходную глубину всего пути. Если-же имеются средства углублять такие отдельные места, снимая на них излишние накопления наносов, то тем самым увеличивается судоходная глубина всего пути. Таким именно средством является механическое землечерпание. При судоходной эксплоатации реки на том ее протяжении, где успешно выполнено регулирование постоянными сооружениями, к механическому землечерпанию на фарватере приходится прибегать обыкновенно периодически, ставя дноуглубительные снаряды только в некоторых определенных местах, где естественный смыв наносов недостаточен, а требуется периодически удалять наносы помощью механических снарядов. Правильно исполненные регуляционные сооружения облегчают упомянутую задачу землечерпательных работ, так как производить последние приходится в русле, уже приведенном в достаточно устойчивое состояние. Поэтому, располагая сравнительно небольшим числом землечерпательных машин можно поддерживать на регулированной реке значительно бо́льшую судоходную глубину фарватера, чем та, которою приходится довольствоваться при отсутствии помощи механического землечерпания.

Но, независимо от только что об'ясненной роли землечерпания, как вспомогательного средства для поддержания глубины на некото-

[1]) Не прибегая к шлюзованию реки.

рых отдельных местах уже зарегулированной реки, землечерпание является во многих случаях весьма полезною составною частью и самих работ по урегулированию реки постоянными сооружениями. Как мы видели, при регулировании реки приходится нередко исправлять и даже вовсе изменять в отдельных местах направление меженнего русла, создавая ему новые берега помощью разного рода дамб и заставляя реку силою течения размыть себе русло по указанному направлению. Однако, чтобы течение способно было произвести такую работу, необходимо искусственно увеличить живую силу потока, для чего нужно образовать подпор воды и сжать поток сооружениями, может быть, больше, чем то нужно для будущей ширины русла. В таком случае приходится рисковать всеми вредными последствиями излишнего стеснения потока и подвергать сами сооружения таким усилиям, которые они не будут испытывать впоследствии, когда выработается желаемое русло. Пользуясь землечерпательными снарядами можно иногда ту же работу выполнить в ином порядке: сначала углубить землечерпанием русло по требуемому направлению, привлечь тем самым течение на это русло и, по мере дальнейшей естественной его разработки, закрепить новые берега русла искусственными сооружениями. Несомненно, что если такое решение по местным условиям возможно, то приведением его в исполнение можно достигнуть и большей скорости работ, и меньшего количества искусственных сооружений и меньшей их стоимости.

С подобными же обстоятельствами приходится встречаться при закрытии побочных рукавов реки с целью сосредоточить меженнее течение в едином русле. Если оставляемый рукав не обладает достаточными площадями живых сечений своего русла, то при заграждении побочного рукава запрудами естественно должен образоваться значительный подпор воды в реке около места ее разветвления, чтобы направить весь расход воды в оставляемый рукав. При этом, под влиянием увеличенных скоростей течения, будет происходить размыв русла этого рукава, а продукты размыва будут выноситься течением в нижележащий участок реки. Запруды потребовались бы менее высокие и сильные, последствия закрытия рукава стали бы менее рискованными, если сначала углубить землечерпанием оставляемый рукав, а засим уже приступить к заграждению другого рукава. Аналогичные соображения можно привести в пользу применения землечерпательных машин при устройстве прокопов в извилинах реки. При рассмотрении вопросов, с которыми приходится считаться в тех случаях, когда при двухрукавном русле требуется по каким-либо причинам регулировать оба рукава, было уже подробно выяснено, какую важную роль должно нести механическое землечерпание для возможности сколько-нибудь успешного выполнения такой задачи регулирования.

К сказанному нужно добавить, что во всех случаях, когда при регулировании реки постоянными сооружениями требуется образовать

новые береговые площади, например, в пространствах между полузапрудами или за продольными дамбами, и когда образование таких площадей естественным заносом происходит слишком медленно, то наиболее действительным средством является завалка этих пространств грунтом от землечерпания.

Таким образом, в настоящее время работы по регулированию рек постоянными сооружениями почти всегда находятся в самой тесной связи с землечерпательными работами. Эти два рода работ не должны быть противопоставляемы друг другу. Напротив, они дополняют друг друга во всех случаях, когда ведутся по общему хорошо согласованному плану: механическое землечерпание помогает действию постоянных регуляционных сооружений в разработке русла или в образовании новых берегов; постоянными сооружениями закрепляется устойчивое состояние выемок, сделанных дноуглубительными снарядами. Надо полагать, что при дальнейшем развитии методов регулирования рек механическое землечерпание приобретет еще большее значение. Регулирование, как искусство, всего более основанное на данных опыта, должно в каждом отдельном случае подходить к решению своей задачи весьма осторожно и последовательно, тщательно изучая все явления в реке, вызывающиеся работами еще в стадии их производства. Землечерпание менее нарушает естественный быт реки, чем возведение в ней искусственных сооружений; вредные последствия землечерпания легче исправить, чем последствия крупных искусственных сооружений. Поэтому во многих случаях регулирования представляется более осторожным и правильным устанавливать такой порядок работ, который начинался бы с землечерпательных подчисток и прорезей и, по мере выяснения их влияния, сопровождался бы укреплением берегов, а засим возведением и других регуляционных сооружений, которые обеспечили бы на будущее время правильную самостоятельную работу течения и закрепили бы устойчивое состояние русла.

§ 30. Землечерпание, как самостоятельный способ поддерживания глубины судового хода.

Все вышеприведенные соображения о роли землечерпания в регуляционных работах относятся к таким рекам и к таким случаям, когда, во первых, по естественным свойствам реки возможно помощью регулирования постоянными сооружениями достигнуть желаемых для судоходства качеств фарватера, а, во-вторых, когда по совокупности предъявляемых к реке требований является необходимым, а по состоянию материяльных средств возможным обратиться к регулированию реки постоянными сооружениями, как способу, имеющему своей задачей коренное улучшение реки, расчитанное на долгую сохранность его. При отсутствии же упомянутых условий роль землечерпательных работ изменяется, или же приходится искать разрешение задачи иными способами.

В пояснение сказанного нужно прежде всего заметить, что вообще не каждая река может быть урегулирована в смысле достижения хорошего и устойчивого состояния фарватера при сохранении течения воды в реке свободным. Это возможно преимущественно на тех реках или участках реки, где эрозионная деятельность реки уже закончилась в том смысле, что путем длительного размыва своего ложа река настолько понизилась и смягчила свои уклоны, что между размывающей силой потока и сопротивлением русла достигается в известной степени равновесие, нарушаемое только периодически, при сильных паводках, и не повсеместно. Если же река находится еще в стадии разработки своего ложа и поэтому все ее ложе находится постоянно в неустойчивом состоянии, то расчитывать на длительную сохранность результатов регулирования реки вообще нельзя.

Но и к реке, пригодной для регулирования, могут быть пред'явлены только такие требования в отношении глубины и ширины фарватера, которые допустимы при данных гидрологических элементах реки, разумея под ними расход воды, падение реки, ее ширину, качества грунта ее ложа и т. др. Вопрос этот был уже рассмотрен в § 20-м, где указан и метод для приблизительной оценки тех пределов улучшения фарватера, которыми для каждой данной реке ограничиваются возможные результаты регуляционных работ, в зависимости от свойств реки.

Если же река по своим свойствам не поддается регулированию или если требования судоходства превышают те пределы, которые могут быть достигнуты регулированием реки при данных гидрологических ее элементах, то задачу коренного улучшения судоходных качеств реки приходится разрешать шлюзованием реки. Только в некоторых случаях, а именно, когда судоходные требования в отношении глубины на фарватере не могут быть удовлетворены лишь в течение короткого периода самых низких вод, между тем как величина расхода воды колеблется в значительных пределах, возможно для малых рек и при подходящих топографических условиях применить одновременно как регулирование русла постоянными сооружениями, так и регулирование стока воды в реке помощью создания в бассейне реки больших водохранилищ. Назначение водохранилищ заключается в том, чтобы скоплять в них воду в период половодья, а при наступлении низкой межени производить из водохранилищ дополнительное питание реки. При наличии такого регулирования стока величина минимального расхода воды в реке увеличивается, соответственно чему регулированное русло может обеспечить большую глубину фарватера.

Но часто бывают и такие обстоятельства, что невозможность улучшить судоходные условия данной реки помощью регулирования постоянными сооружениями обусловливается не недостаточной водоносностью реки и вообще не такими соотношениями гидродинамических элементов реки, которые ставят слишком низкие пределы для возможных достижений регуляционных работ в отношении качеств фарватера,

а другими причинами, не позволяющими выполнить регуляционные работы в должном об'еме, соответствующем естественным свойствам реки. Причины эти заключаются чаще всего либо в грандиозности требующихся для данной реки регуляционных работ и чрезвычайно высокой стоимости таковых, а также очень длительном времени, нужном для их осуществления, либо же в том, что затраты, требующиеся для регулирования реки, не отвечают размерам совершающегося на ней судоходства и не могут быть окуплены теми выгодами, которые будут получены в результате исполненных регуляционных работ.

При подобных обстоятельствах приходится обращаться не к способам коренного улучшения, а лишь к таким мерам, помощью которых возможно было бы поддерживать судоходство на реке, устраняя хотя бы временно главнейшие затруднения его. Если река многоводна, течет в достаточно разработавшемся русле с мягким грунтом и имеет умеренные уклоны, то главнейшие затруднения судоходство встречает только в отдельных местах, обыкновенно на некоторых перекатах, имеющих при низких уровнях воды недостаточную для судов глубину или слишком узкий, или слишком извилистый судовой ход на перекате.

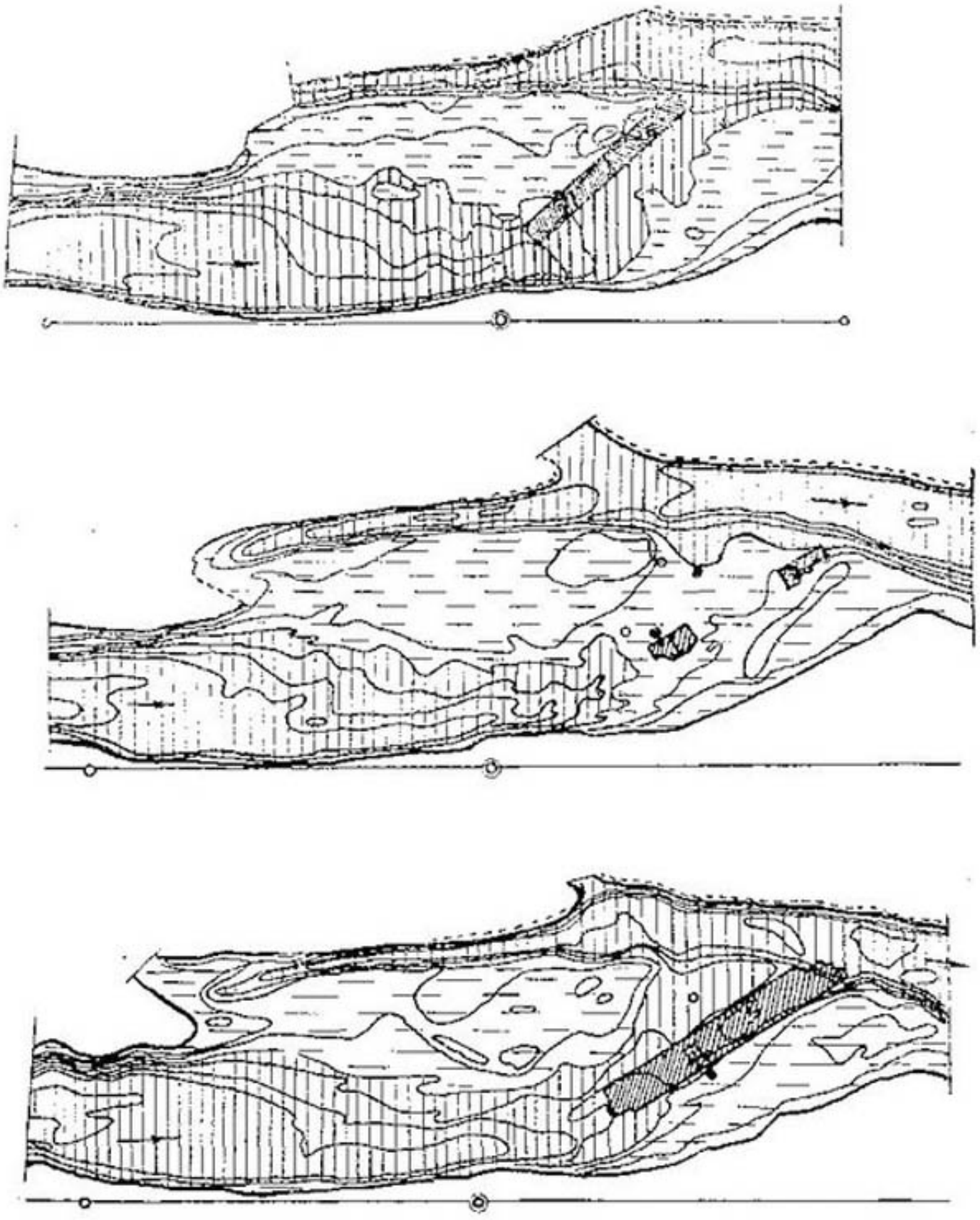
Опыт показал, что лучшим средством для временного устранения подобных местных затруднений судоходству является сделание на перекате землечерпательной прорези, которая, сохраняясь некоторое время, служит судовым ходом в затруднительном месте речного фарватера. Опыт широко поставленных на некоторых реках землечерпательных работ показал, что при достаточном количестве дноуглубительных снарядов, при хорошем знании свойств перекатов и при умелой организации землечерпательных работ последние способны обеспечить судоходству на весь навигационный период достаточно глубокий и удобный фарватер. В таком виде землечерпательные работы могут рассматриваться, как самостоятельный способ поддержания нужного для судоходства фарват-ра („поддержания глубины транзита") на значительном протяжении реки.

Сущность этого способа заключается в следующем. Общее протяжение реки, на котором требуется поддерживать глубину помощью землечерпания, разделяется на несколько участков значительной длины, причем в каждом участке все землечерпательные работы на судовом ходе об'единены в заведывании одного лица или специального учреждения, в непосредственном распоряжении которого находятся и все землечерпательные снаряды, назначенные для этого участка. В распоряжении Заведывающего землечерпательными работами данного участка имеются специальные промерочные партии для производства с'емок и промеров глубины на перекатах. С'емки и промеры служат для наблюдения над состоянием перекатов, для назначения прорезей, которые должны быть сделаны землечерпанием, для суждения о состоянии прорезей и вообще для получения разных данных, необходимых для наблюдения над состоянием судового хода и для распоряжения

работой землечерпательниц. Землечерпательные работы по устройству прорезей начинаются вскоре после прохода весенних вод, в то еще время, когда глубина на перекатах значительна. Это необходимо, чтобы ко времени наступления низких вод в реке подготовить прорези на всех, по возможности, более крупных перекатах, а засим, в период низких меженних вод, располагать достаточным числом машин, чтобы приходить на помощь только в тех местах участка, где обнаружится заносимость прорезей или иные затруднения судоходству. Назначение места прорезей, их направления и глубины, до которой должна быть сделана срезка землечерпанием, является трудной задачей, требующей от Заведывающего работами очень хорошего знания свойств реки и ее перекатов, так как глубина воды на том или ином перекате в данное время зависит не только от положения уровня воды, но и от разных факторов, влияющих на деформации перекатов. Поэтому правильность и своевременность выполнения прорезей на разных перекатах в значительной мере зависит от уменья Заведывающего работами предугадывать возможные глубины на перекатах на основании тех данных, которыми он может располагать. Установить точные общие правила производства землечерпательных прорезей на перекатах не представляется возможным, так как разные реки и разные перекаты на одной реке имеют во многом свои индивидуальные свойства. Сделанная прорезь иногда успешно сохраняется до конца навигации, иногда даже самостоятельно развивается в глубину и ширину под влиянием течения, которое в ней сосредоточивается; нередко прорези сохраняются и до следующей навигации; иногда они без дальнейшей помощи землечерпания еще более разрабатываются в глубокий и достаточно устойчивый фарватер, так сказать саморегулируются. В других случаях, напротив, одна и та же прорезь требует для своего поддержания неоднократной работы землечерпательницы в течение одной навигации. При подвижном песчаном грунте перекатов землечерпательные прорези имеют способность перемещаться при паводках, сохраняя или изменяя прежнее свое направление, иногда без чувствительного уменьшения глубины и ширины.

При сделании прорезей продукты землечерпания должны быть удалены в такое место, где бы они не могли принести вреда судоходству. Поэтому, в зависимости от местных условий, вынимаемый грунт или отвозится на значительное расстояние в глубокие места реки, не эксплоатируемые судоходством, или рефулируется на отмели, иногда даже выбирая местом свалки верхнюю или нижнюю косу переката, чаще верхнюю, имея в виду, чтобы при перемещении прорези сваленный грунт не оказался на месте, где будет требоваться повторное землечерпание для поддержания глубины на переместившейся прорези. В случае необходимости, сложенные в русле или около берегов продукты землечерпания укрепляются для предохранения их от смыва.

На рисунках 79, 80 и 81-ом изображен, в качестве примера, один из перекатов р. Волги (Георгиевский перекат) на участке Рыбинск—Н. Новгород, с показанием землечерпательных прорезей, делавшихся на этом перекате в течение навигаций 1904, 1905 и 1906 гг.



Георгиевский перекат.

Рис. 79, 80 и 81. Планы переката с показанием землечерпательных прорезей, делавшихся в течение навигаций 1904, 1905 и 1906 г.г.

Рисунок 82-й изображает диаграмму перемещений и работы двух землечерпательных машин в 1905 году на перекатах в пределах участка р. Волги длиною 290 верст от города Рыбинска до Георгиевского переката.

Как сказано выше, производство землечерпательных прорезей не может быть подчинено каким-либо точным общим правилам. Но на реках, где широко поставленные и правильно организованные землечерпательные работы для поддержания глубины транзита ведутся в течение долгого времени, накопляется много опытных данных, дающих полезные указания, которыми и руководствуются производители работ.

В качестве характеристики обстоятельств, с которыми приходится иметь дело при производстве землечерпательных прорезей на перекатах, ниже приведены некоторые выводы, сделанные одним из опытнейших руководителей землечерпательных работ на р. Волге, инженером Н. А. Антоновым, относительно перекатов и землечерпательных прорезей на среднем плесе р. Волги [1]). Выводы эти формулированы в следующие положения:

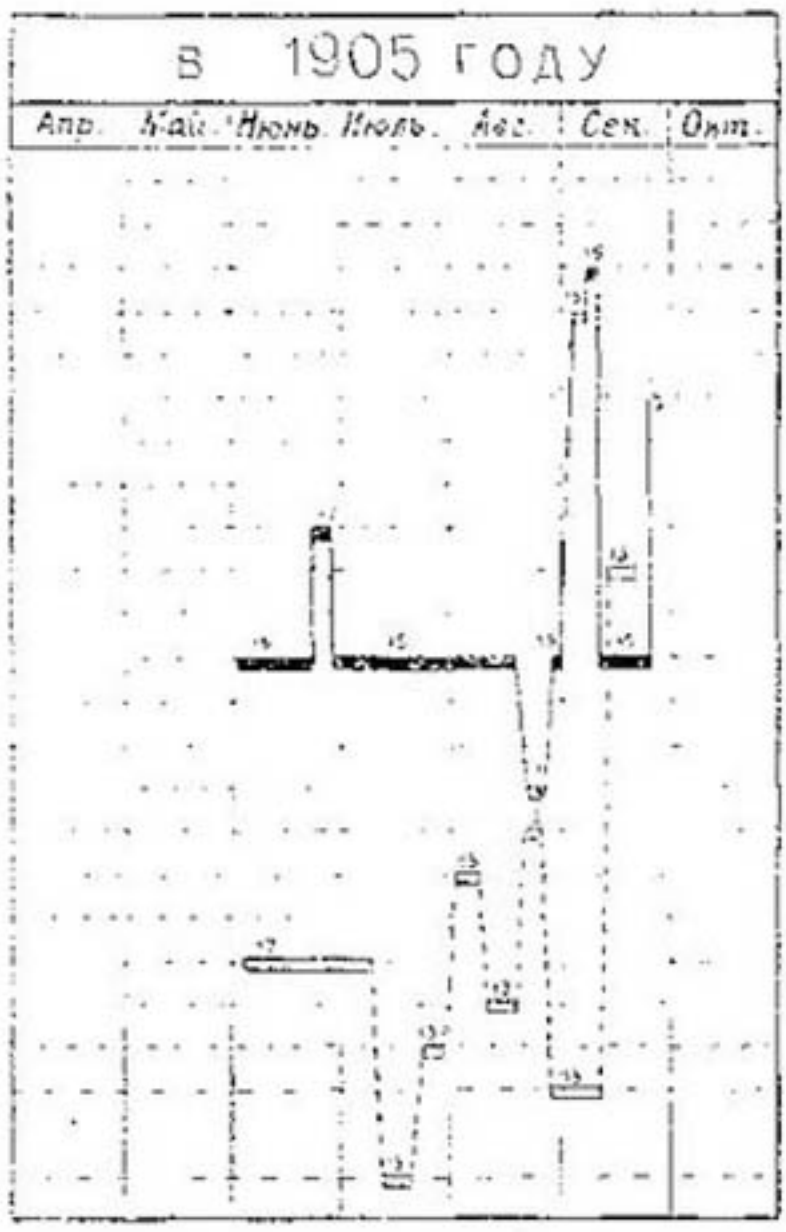


Рис. 82. Диаграмма перемещения и работы двух землечерпательных машин в 1905 г.

1) В период весенних вод или высоких летних наводков землечерпательные прорези, как общее правило, засоряются, сужаются, спускаются вниз по течению и искривляются. Не подчиняются вышеприведенному правилу те прорези, направление которых с направлением течения высоких вод совпадает или составляет весьма острый угол и которые, кроме того, расположены в том месте, где скорость весеннего течения близка к наибольшим весенним скоростям данного поперечного сечения реки.

2) Общее правило, что по мере убыли воды перекаты размываются, имеет отступления, особенно часто встречающиеся: а) при длинных прямых ходах, б) когда непосредственно выше данного хода в межень происходят размывы берегов или песчаных кос.

3) Крутые прорези (т. е. образующие с осью ложа реки угол более 45°) держатся лучше, чем пологие (с углом менее 45°) только в течение той навигации, когда они выполнены, но весенние воды и даже высокие летние наводки действуют на них губительно. Наоборот, пологие прорези при высоких водах весьма часто размываются.

4) Для устойчивости прорези весьма благоприятно постепенное сужение верхней глубины и плавный переход ее в прорезь в виде приемной воронки.

5) При наличии на перекате двух ходов они являются конкурирующими между собою и развитие одного вызывает замеление другого. Пока данная прорезь держится хорошо и размывается, другого хода обычно не образуется; наоборот, если прорезь держится плохо и требует частых подчисток, то следует ожидать разработки нового хода.

---

[1]) Н. А. Антонов: „Типичные явления, относящиеся к вопросу об устойчивости прорезей и величине их перемещения, и критические выводы относительно результатов землечерпания".

6) Удачными землечерпательными работами перекат выводится из строя перекатов, требующих углубления, но обычно не навсегда, а на более или менее продолжительное время.

7) Для устойчивости каждого хода, прореи или определенного ее участка одним из неблагоприятных обстоятельств является нахождение выше по течению сильно подвижных песчаных масс (осередков, кос, побочней и т. п.), путь естественного перемещения которых пролегает через данный ход, прорезь или ее определенный участок.

8) Когда изменения в русле реки, происшедшие за несколько последних лет, ясно не указывают на стремление потока к естественному образованию нового хода, разработка его землечерпанием обычно оказывается неудачной. Наоборот, при явном образовании нового хода, прорезь, плохо державшаяся и ранее, начинает заноситься еще быстрее.

9) Прореи, сделанные по новому направлению, даже в том случае, если оказываются вполне удачными, т. е. впоследствии превращаются в широкие рукава, в первое время своего существования обычно требуют подчисток.

10) Настойчивыми повторными работами иногда удается подчинить поведение переката воле производителя работ; иначе говоря, те прореи, которые несколько навигаций держатся плохо, затем разрабатываются и обращаются в широкий поток, целый ряд лет не требующий подчисток.

11) Землечерпательные прорези, не имеющие сквозной глубины, т. е. не законченные, обыкновенно быстро замелевают.

12) Прореи, пролегающие по сухим пескам, сохраняются хуже пролегающих по сравнительно глубоким местам.

13) При прочих равных условиях короткие (менее 500 метр.) прореи оказываются устойчивее длинных (более 500 м.). Первые часто оказываются достаточно устойчивыми и сохраняются в том виде, в котором были сработаны, длинные же сохраняются только в том случае, если на значительном протяжении разрабатываются в широкий поток.

14) Наиболее устойчивому состоянию судоходного рукава соответствует расположение его у неразмываемого берега, причем если последний имеет вогнутость постепенно увеличивающуюся вниз по течению.

15) Часть изменений, внесенных землечерпанием в конфигурацию дна перекатов, даже при неудачных и заброшенных прорезях иногда оказывается настолько устойчивой, что их не сглаживает целый ряд весенних вод.

16) Тот же перекат выходит после высоких вод в различном состоянии, очевидно, в зависимости от продолжительности весенних вод, высоты их под'ема, а также характера этого под'ема и, особенно,—спада. Поэтому выход переката в данном году в сравнительно хорошем состоянии не указывает еще на наступление периода его улучшения, равно как выход в плохом состоянии—на наступление периода его ухудшения.

17) Величина годичного перемещения прорези варьирует от нуля до 85 метр. За среднюю можно принять 40—50 метр. Величина этого перемещения вероятно зависит от: а) величины проекции скорости течения (в нижних слоях), проходящей через средину прорези, на нормаль к ней, б) продолжительности высоких вод или паводков, при которых такое перемещение происходит, в) степени легкости грунта, в котором прорезь пролегает. Для практических грубо приближенных предположений о перемещении какой-либо прорези можно руководствоваться указанными выше пределами и считать, что перемещение будет тем больше, чем грунт переката легче, чем высокие воды стояли дольше и поднимались выше и чем данная прорезь круче. Так как углы, образуемые прорезью с осью ложа реки, изменяют от 0 до 90°, то последний фактор естественно оказывает на величину перемещения наибольшее значение. Если направление прорези совпадает с направлением весенних скоростей (или, как принимается, с осью ложа реки), то перемещение будет равно нулю, независимо от прочих условий.

Примечание. За величину перемещения прореи принимается: отрезок нормали к биссектрисе угла, образуемого осями исполненной и перемещенной прорезей, пересекающей эти прорези в середине их длины. В частном случае, когда прорезь осталась параллельной самой себе, величина перемещения определится длиной нормали между их осями.

Сравнивая вышеобъясненный способ поддержания фарватера помощью землечерпания с регулированием реки помощью постоянных сооружений, мы видим, что регулирование реки имеет целью общее улучшение речного русла как в отношении глубины его, так и в отношении удобных очертаний в плане, достаточной ширины, правильных течений и проч., причем на судоходных реках регуляционные работы, в состав которых входит возведение постоянных сооружений в связи с производством землечерпания, направлены к тому, чтобы создать речной фарватер вполне устойчивым на долгое время и облегчить поддержание на нем глубины помощью землечерпания. Вместе с тем в состав регуляционных работ входят технические мероприятия, направленные и к общему улучшению реки, как то: предохранение берегов от разрушений, упорядочение движения и складывания наносов, укрепление наносных отложений, смягчение уклонов, местных неправильностей течения и т. п.

Между тем рассматриваемый способ поддержания фарватера только помощью землечерпания имеет главною целью лишь обеспечить судоходству необходимую глубину в данную навигацию расчисткою межеванных ходов на перекатах. При этом, по самому характеру необходимых для того землечерпательных работ, приходится поступаться некоторыми неблагоприятными от них последствиями на общем состоянии речного русла, как, например, складывание продуктов землечерпания в русле реки.

Таким образом, землечерпание, в том виде, как оно применяется самостоятельно, может служить средством для временного воспособления судоходству, регулирование же должно быть рассматриваемо, как способ коренного улучшения реки, необходимого как для полного удовлетворения потребностей судоходства и будущего его развития, так и для других общекультурных целей. Но нужно иметь в виду, что регулирование при правильном и последовательном его выполнении принадлежит вообще к числу работ, требующих весьма значительных денежных затрат и длительного времени для своего осуществления. Чем река больше, чем больше в ней расходы воды и колебания уровня и чем менее устойчиво русло, тем более сложны явления, происходящие в реке, тем более крупные требуются регуляционные сооружения, тем более возможны ошибки в разрешении разных задач, связанных с расположением сих сооружений, и тем труднее исправимы последствия таких ошибок. Землечерпание в этом отношении находится в ином положении: большим рекам свойственны длинные и глубокие плесы; малые глубины группируются в немногих местах на отдельных перекатах; на перекатах больших рек землечерпательная прорезь лучше сохраняется; кроме того, составляя ничтожную часть живого сечения большой реки, прорезь не вызывает заметного понижения уровня воды, в противоположность малым рекам, где вырытие прорези может совсем не увеличить глубины вследствие понижения уровня воды в реке;

наконец, чем шире река, тем больший простор для складывания продуктов землечерпания и тем меньшее влияние они могут иметь на речное течение. При таких условиях вполне естественно, что на многих больших реках приходится по необходимости отказываться от коренного улучшения судоходных условий реки помощью регулирования постоянными сооружениями и ограничиваться землечерпанием, которое при надлежащей организации работ может служить верным средством для поддержания нужной глубины на фарватере. Такая мысль была проведена еще в 1900 году на VIII-ом международном судоходном Конгрессе в Париже, который, в результате обсуждения докладов об улучшении судоходных условий больших рек, формулировал свое заключение в следующем изложении: „По мере того, как размеры русла и количество протекающей воды в реках возрастают, а их уклон уменьшается,—применение метода регулирования посредством постройки постоянных сооружений (дамб и полузапруд) требует все большего и большего расхода времени и денег, приводящего к практической невозможности применить названный метод. Между тем, метод землечерпания получил несколько лет тому назад усовершенствования, увеличивающие в неожиданном размере мощность и экономичность этого способа действия. На больших реках, когда размеры судоходного движения это оправдывают, применение землечерпания, в связи с укреплением берегов, где это окажется нужным, и даже в том случае, если бы землечерпание пришлось возобновлять периодически, является средством надлежащим и поистине единственно практически осуществимым. Следует сказать, что даже и на реках меньших размеров можно наряду с постройкой постоянных сооружений дать с пользою землечерпанию большее развитие, чем оно получило до сего времени".

Землечерпание, как самостоятельный способ улучшения судоходных условий, получило наиболее широкое применение в Америке на р. Миссисипи и у нас на р. Волге.

Начало организации на Волге такого способа поддержания нужной для судоходства глубины относится к первым годам нынешнего века, когда были приостановлены некоторые крупные регуляционные сооружения на волжских перекатах. С того времени необходимая для судоходства глубина успешно поддерживается почти исключительно землечерпанием на всем протяжении р. Волги от Рыбинска до устья. Река Волга в этом отношении разделена на четыре участка: 1) Верхний плес, протяжением 537 *клм.* от устья р. Шексны до с. Кстово (30 *клм.* ниже устья р. Оки); 2) Средний плес, протяжением 481 *клм.* от с. Кстово до устья р. Камы; 3) Верхняя часть низового плеса, протяжением 832 *клм.* от устья р. Камы до гор. Саратова и 4) Нижняя часть низового плеса, протяжением 912 *клм.* от гор. Саратова до гор. Астрахани. В результате работ, при наличии около 20—24 землечерпательниц,

поддерживалась в довоенное время на транзитном фарватере глубина на перекатах, считая от низкого меженнего горизонта, не меньшая: на верхнем плесе 1,42 *м.* (8 четвертей аршина), на среднем плесе 1,77 *м.* (10 четв.) и на нижнем плесе 0,95—2,13 *м.* (11—12 четв.). За последнее до войны пятилетие 1910—1914 гг. на верхнем и среднем плесах, при общем протяжении их 1018 *клм.* ежегодно приходилось производить землечерпание на 78 до 89 перекатах, исполняя в среднем около 3-х миллионов куб. *м.* выемки в год и затрачивая на эти работы в среднем около 870.000 рублей в год. Одновременно производились работы по укреплению в некоторых местах берегов, подверженных вредным размывам.

На реке Миссисипи, по характеру работ, требующихся для поддержания фарватера, можно различать три главнейшие части ее протяжения. На верхней части реки, от г. Миннеаполиса до впадения реки Миссури, длиною 1070 *клм.*, обладающей более устойчивым ложем при сравнительно малом количестве влекомых наносов, поддержание глубины до 1,8 *м.*, считая от низкого меженнего горизонта, достигается главным образом регуляционными сооружениями. Землечерпание, сравнительно в небольших количествах, требуется преимущественно при начале регуляционных работ. На средней части реки, от устья р. Миссури до устья р. Огайо, длиною 320 *клм.*, где расход воды более значителен, количество влекомых мелко-зернистых наносов велико, а меженнее русло и его берега терпят значительные размывы, регуляционные работы состоят большей частью только в укреплении берегов; землечерпанию же отводится бо́льшая роль в деле поддержания глубины судового хода, которая на этой части реки доводится до 2,45 *м.* от низкого меженнего уровня. На нижней части р. Миссисипи, от впадения в нее р. Огайо до устья, длиною 1700 *клм.*, на которой расход воды, колебания уровня и движение наносов весьма велики, хотя и производятся берегоукрепительные работы, но их значение для улучшения фарватера мало, а глубина судового хода 2,75 *м.* от низкого меженнего уровня поддерживается почти исключительно землечерпанием в отдельных местах реки—на ее перекатах. Следует заметить, что как на нижней, так и на средней частях реки произведены и продолжаются крупные работы по регулированию русла высоких вод помощью ограждения низких прибрежных местностей защитными дамбами, причем этим сооружениям, назначенным главным образом для защиты от затопления местностей, придается полезное значение также и в отношении благоприятного их влияния на состояние меженнего русла.

———

ГЛАВА VI.

Типы и конструкции регуляционных сооружений.

§ 31. Строительные материалы и виды их употребления для регуляционных сооружений.

Регуляционные сооружения, состоящие из различного вида берегоукрепительных устройств, речных дамб, полузапруд, запруд и проч., занимают значительные протяжения и требуют для своего устройства весьма большого количества материалов. Поэтому для их постройки приходится пользоваться наиболее дешевыми материалами и преимущественно такими, которые могут быть добыты вблизи места производства работ, не требуя сложных и дорогих способов доставки. Особенность упомянутых сооружений заключается еще в том, что они возводятся непосредственно на грунте дна реки или ее берегов, без устройства специальных фундаментов, а потому конструкция сооружения должна быть такова, чтобы при возможных осадках и подмывах грунта сооружение приспосабливалось к деформациям своего основания без расстройства тела сооружения и чтобы происходящие изменения его форм можно было легко восстановить в требующийся вид. Кроме того, находясь в воде и подвергаясь действию ее течения материал должен обладать достаточной устойчивостью в теле сооружения.

Упомянутым условиям отвечают: камень в виде наброски, тяжелые грунты—гравий, галька, глина, плотные песчано-глинистые породы, а из древесных материалов—хворост в разных видах его скрепления, которые часто об'единяют названием „фашинный материал". Перечисленные материалы главным образом и применяются в больших количествах для регуляционных сооружений. Кроме них, употребляются и другие материалы, но обыкновенно только в качестве вспомогательных, как то: лес в обделанном и необделанном виде, железная проволока, гвозди и поковки, пеньковые веревки и нек. др.

Камень. Для регуляционных работ можно применять различные породы камня, если качества их отвечают условиям прочности сооружений и удобствам производства работ. Камень должен обладать достаточным удельным весом, не менее 2-х, должен быть нерастворн-

мым в воде и устойчивым против действия мороза и других атмосферных факторов. Поэтому нужно вообще избегать каменных пород, имеющих значительную пористость, и не следует употреблять глинистых, мергелевых и песчаных сланцев. По способу добычи камень может быть рваный, колотый, ломанный и булыжник (кругляк). Для производства каменной наброски предпочтителен рваный камень и вообще с неровными поверхностями, так как он более устойчив в каменной наброске, подверженной действию течения. Величина камней должна быть соображена как с условиями необходимой устойчивости, так и с удобствами производства работ. В наброске, подверженной действию течения, и в надводных частях сооружения камни, весом менее 3 *кгр.*, не следует допускать; при больших скоростях течения предельный низший вес отдельных камней должен быть увеличен. Очень крупные камни неудобны для производства работ; кроме того, если ядро сооружения заполнено мелким материалом, то наброска, составленная из больших камней, недостаточно защищает этот материал от вымытия его через большие промежутки между камнями наброски. Материалом для загрузки ядра сооружения может служить мелкий камень, гравий, крупный песок и тяжелые неразмокающие глинистые земли. Для мощения отбирается камень подходящей призматической формы или употребляется булыжный камень.

В регуляционных сооружениях каменная наброска является наиболее частым видом применения каменного материала, в особенности для подводных частей сооружения. Производство работ по устройству каменной наброски весьма просто и не требует сложных приспособлений. Но каменная наброска имеет и некоторые отрицательные качества: откосы наброски значительно увеличивают количество употребляемого камня; находясь в наброске наружные камни сопротивляются действию течения только силою своего веса, который не всегда бывает достаточен. Для некоторых сооружений, в особенности для их надводных частей, требуется иметь более плотное каменное строение в виде стенок с вертикальными или ступенчатыми боковыми гранями. В этих случаях устраивается сухая каменная кладка или кладка на мху, реже применяется кладка на растворе, как сравнительно дорогая. Однако, сухая кладка, а тем более кладка на растворе, легко подвергается расстройству и разрушению при деформациях нижнего строения, на котором она возведена, между тем осадки и подмывы регуляционных сооружений представляют частые явления, почему и требуют специального к ним приспособления самого типа сооружения.

Вышеуказанные недостатки в значительной степени устраняются применением особого способа устройства сухой кладки, предложенного в 1906 году итальянским инженером Пальвисом и получившего в настоящее время большое распространение при берегоукрепительных и выправительных работах на реках Италии, Франции и Испании. Способ этот состоит в том, что каменная наброска заклю-

чена в сетчатых оболочках правильной формы, получивших название габионов Пальвиса.

Габион Пальвиса представляет собою сеточный ящик параллелопипедальной формы (рис. 83), который после установки в тело сооружения заполняется камнем. Все грани ящика состоят из сетки, сплетенной из оцинкованной проволоки, толщина которой принимается от 2 до 6 миллиметров в диаметре, в зависимости от размера габиона и от нагрузки, которую он несет. Ребра ящика составляют также оцинкованные железные прутья, но диаметром от 5 до 15 миллиметров в зависимости от тех же обстоятельств. Тот вид, который имеет габион до его сборки в форму ящика, представлен на рисунке 84-м. Он состоит из шести прямоугольников, обозначенных на рисунке номерами I—IV, T и T; каждый прямоугольник окаймлен прутьями, за которые заплетается сетка и около которых, как на петлях, может вращаться сетчатая прямоугольная грань ящика. Прямоугольник III служит дном ящика, II и IV — продольными боковыми его стенками, T и T—поперечными стенками, I — крышкой. Такое устройство ящика сделано для удобства перевозки габионов, во время которой весь габионный ящик складывается в плоское тело. Доставленный на место работ габион складывается в форму ящика, причем ребра поперечных стенок скрепляются с ребрами продольных стенок обвязкой проволокой, как показано на рис. 85-м. После сего ящик устанавливается в сооружение, связывается проволокой с соседними ранее установленными ящиками, а также с нижележащим уже заполненным ящиком. Засим установленный ящик заполняется камнем и закрывается крышкой, которую тоже привязывают проволокой к стенкам. Для сообщения стенкам ящика, испытывающим

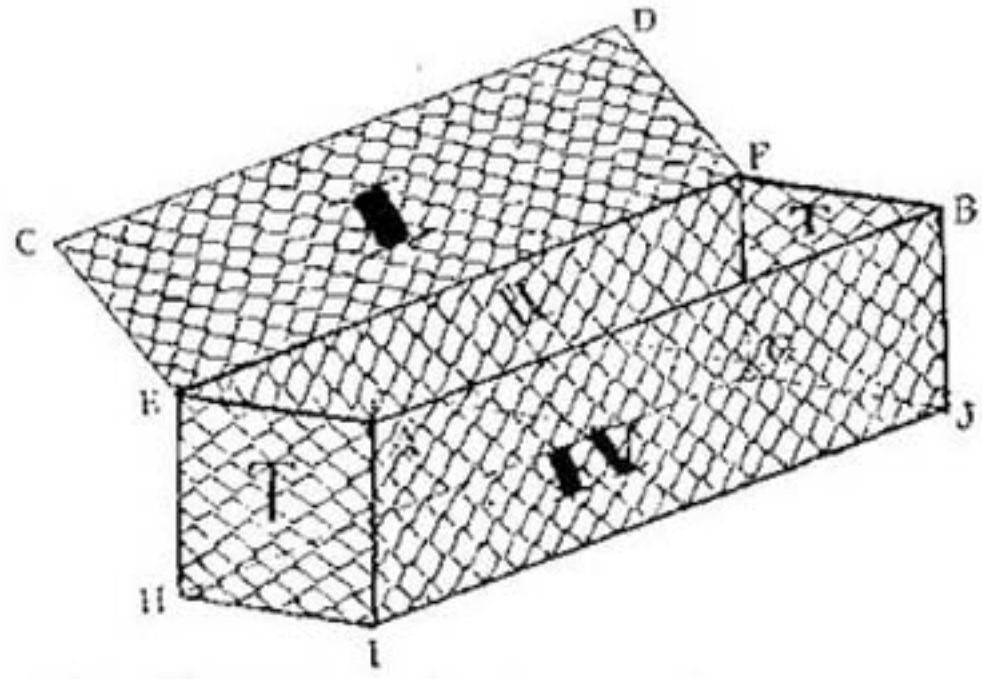


Рис. 83. Габионный ящик в собранном виде.

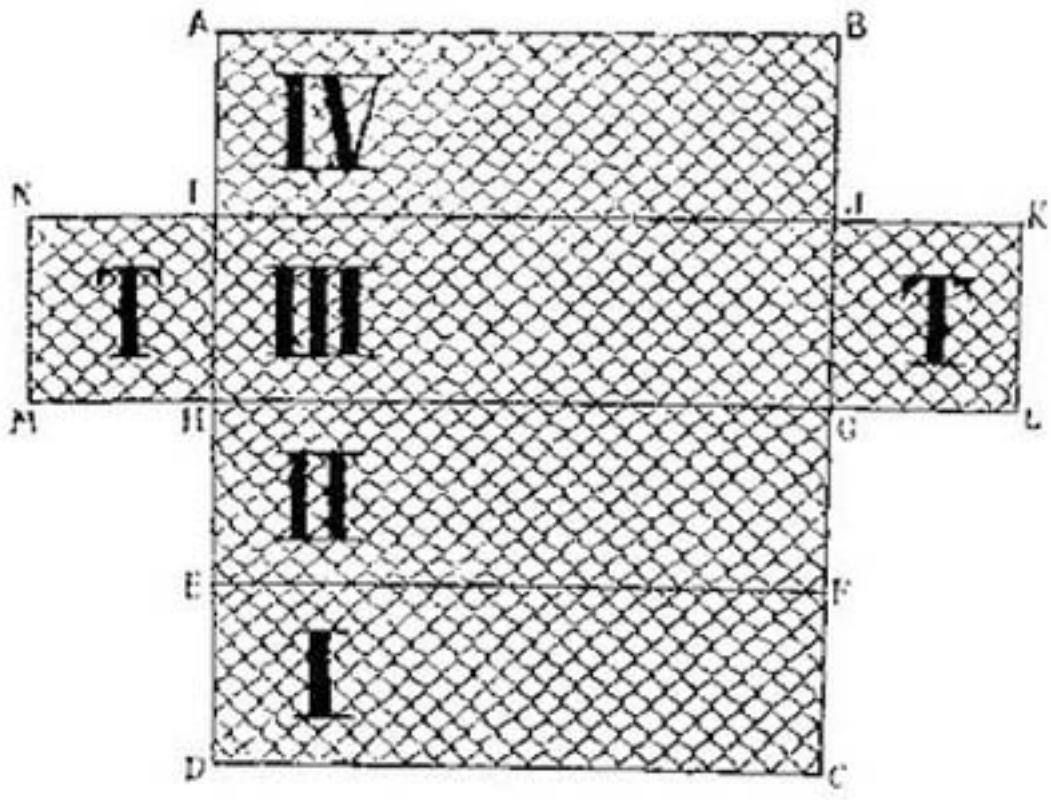


Рис. 84. Развернутый габионный ящик.

боковой распор камня, большей жесткости, делаются внутри ящика проволочные связи (рис. 86 и 87), а именно связи *а—а*, соединяющие продольные стенки между собою, и связи *в—в*, соединяющие поперечные стенки с боковыми стенками.

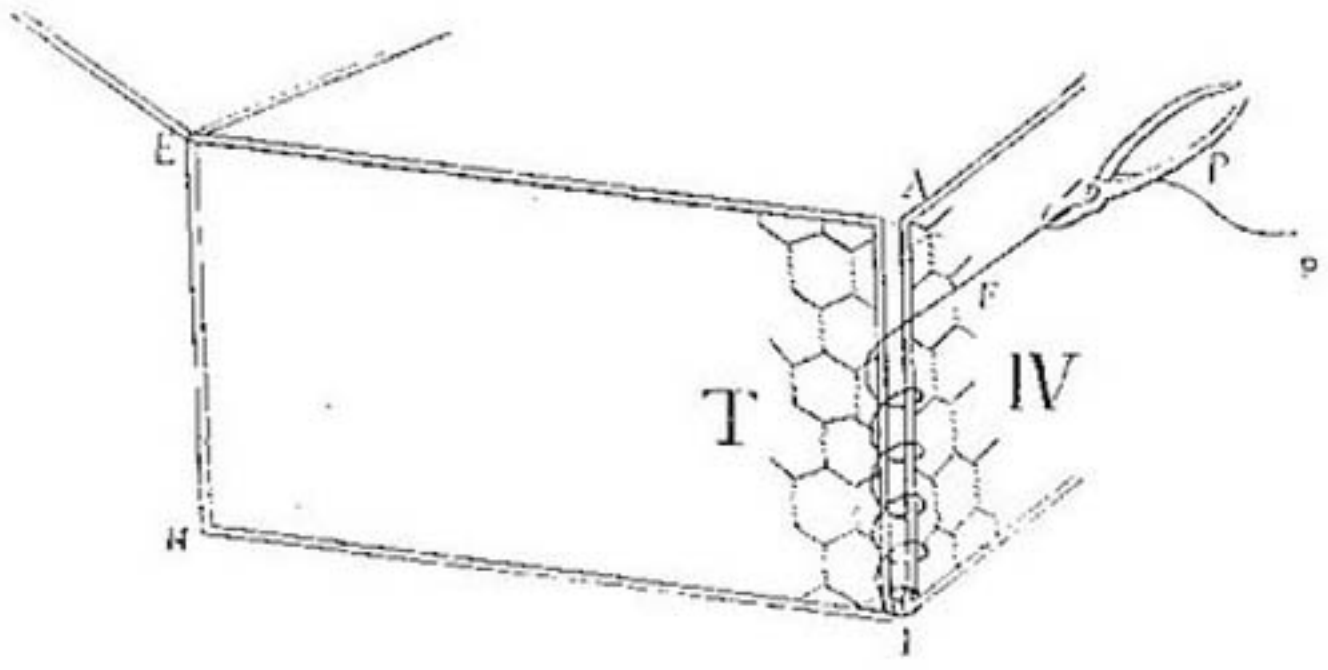


Рис. 85. Скрепление проволокой *(р)* ребер габионного ящика. Стягивание проволоки производится клещами *(Р)*.

Габионы делают обычно следующих размеров: по длине от 2 до 6 *м.*, а по ширине и по высоте от 0,5 до 2 *м.* Камень для заполнения габионов может употребляться как рваный, так и булыжник. При недостатке крупного камня можно употреблять в ядро заполнения мелкий камень или гальку, причем в этих случаях необходимо дно и стенки габиона обложить внутри сухой кладкой крупного камня (рис. 88).

До настоящего времени габионы употреблялись чаще всего для укрепления берегов в виде подпорных стенок; встречаются также построенные из габионов полузапруды, струенаправляющие и др. речные дамбы. При возведении таких сооружений габионы укладываются в несколько рядов по ширине и по высоте, причем нижний слой габионов, составляющий как бы основание сооружения, делается менее высоким и выступающим из сооружения широким уступом. Если сооружение состоит по высоте из нескольких рядов габионов, то каждый вышележащий ряд кладется тоже с уступом. Ступенчатые боковые поверхности габионного сооружения необходимы как для лучшего распределения давления на основание, так и для уменьшения распора камня на сетку. Габионы в применении для берегоукрепительных и некоторых других речных сооружений представляют многие выгодные качества, особенно в таких местностях, где трудно доставать подходящий хворост для фашинных работ, но имеется на месте камень. Сравнительно с употреблением каменной наброски габионы уменьшают

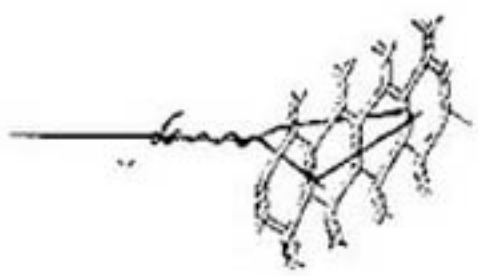


Рис. 86. Прикрепление к стенкам внутренних проволочных связей.

потребное количество камня. Благодаря малому весу габионов, простоте работ по их плетению и установке в сооружение, производство работ не сложно и не требует дорогих приспособлений. Габионы могут изготовляться на месте работ или доставляются готовыми, так как перевозка их не трудна, благодаря малому весу и возможности складывать габион в удобный для перевозки вид. Находясь в теле сооружения габионы предохраняют камень от размыва течением, почему можно употреблять камень меньших размеров. Обладая малой жесткостью своей формы, габионы способны деформироваться, не нарушая прочности сетчатой оболочки. Поэтому, в случаях осадки или подмыва, сооружение из габионов приспособляется к ним, не теряя своей устойчивости. Как показывают опыты иностранных работ с габионами, оцинкованная проволока сохраняется в воде довольно долгое время; наносы, влекомые рекою при паводках, заполняют с течением времени промежутки между камнями, находящимися в габионах, уплотняя габионы, причем является даже возможность делать по наружным поверхностям габионного сооружения ивовые рассадки, которые, прорастая, способствуют укреплению сооружения.

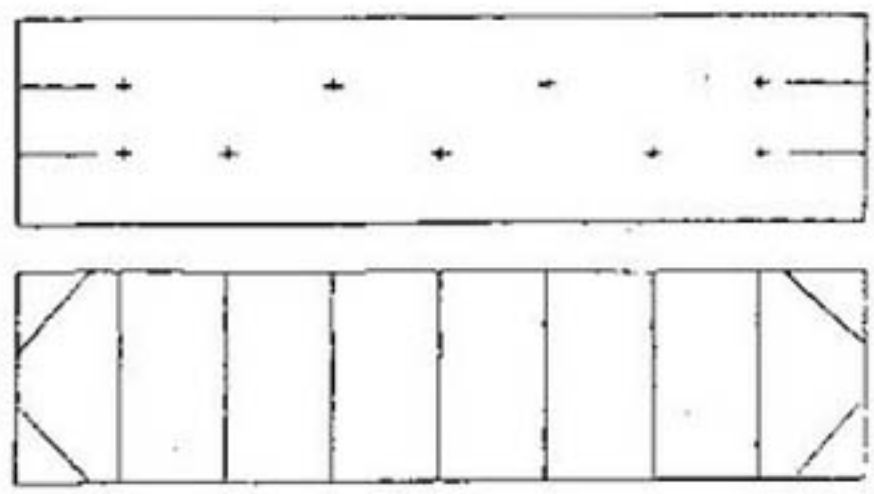


Рис. 87. Связи габионного ящика.

Имеются примеры употребления габионов и иных, кроме параллелопипедальной, форм, например, цилиндрической или в виде сетчатых мешков. Цилиндрический габион, заполненный на берегу камнем, может быть скатан по откосу берега на большую глубину; сетчатый, наполненный камнем мешок может быть спущен на дно тоже при большой глубине. Поэтому употребление габионов в таком виде заменяет собою укладку так называемых тяжелых фашин, о которых сказано далее.

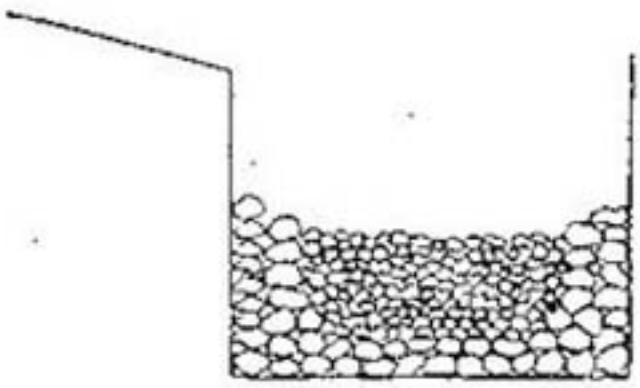


Рис. 88. Заполнение габиона мелким камнем.

У нас в СССР габионы были впервые применены по инициативе и под руководством Ленинградского Научно-Мелиорационного Института в 1923 году для некоторых речных сооружений в Туркестане.

Земли, идущие на заполнение ядра сооружения или для загрузки хворостяной и фашинной кладки, должны быть неразмокаемые в воде и по возможности тяжелые; илистые земли для этой цели вовсе не следует допускать. Для образования слоя, служащего основанием каменной мостовой, нужно употреблять материал, не размывающийся и предохраняющий от размыва естественный грунт; для этого служит

щебень, крупный песок, гравий, чура. Если мостовая кладется на грунте без подсыпки упомянутого слоя, то для предохранения грунта от размыва и высасывания камень кладется на мхе, причем, однако, нужно иметь в виду, что мох недолговечен и что, впитывая в себя много воды, он может во время морозов делать пучины в мостовой и расстраивать последнюю. Мелкий песок в регуляционных сооружениях вовсе не допускается, так как он легко высасывается течением из сооружения или из основания мостовой. Там, где предполагаются рассадки ивняка, кустарника или травы, а также в засыпке хвороста, если требуется прорастание последнего, употребляется растительная земля.

Хворост имеет, как материал, весьма широкое применение для регуляционных сооружений. Под названием хвороста разумеются срубленные тонкие стволы молодых деревьев, кустарников и древесных ветвей. В сооружениях он употребляется как в необделанном виде, так и в разного вида скреплениях хвороста, как то: прутяные канаты, фашины и фашинные тюфяки. Черенки свежесрубленного хвороста употребляются и для рассадок, делающихся с целью укрепления берегов, отмелей и надводных частей речных сооружений.

Рис. 89. Плетеный прутяной канат.

Хворост должен быть возможно прямой, длинный, гибкий с неголстыми (не более 4 сантиметров) комлями. Во многих случаях требуется хворост, обладающий способностью прорастать находясь в сооружении, т. е. пускать ростки и развиваться в тонкие деревья или кустарники.

Таким условиям наиболее удовлетворяют различного вида ивовые растения. В некоторых случаях возможно допускать хворост и других пород, почему хворост, как строительный материал, принято различать двух главнейших родов: „ивовый“ и „разнородный“. Из многочисленных видов ивовых растений наилучшим материалом для регуляционных сооружений являются лозовые или тальниковые: краснотал, белотал, чернотал, краснолозник, козья ива, корзиночная ива и некоторые другие. Из них всего лучше применять для рассадок чернотал, белотал и козью иву, так как эти виды ивы при произрастании хорошо выдерживают морозы. К разнородному хворосту относятся хворосты как других лиственных пород, так и хвойные. Из лиственных пород более пригодными являются тополи, так как ветви и побеги тополей гибки, длинны, прямолинейны и способны прорастать. Худшими породами растений для хвороста являются хвойные. Они не способны прорастать, хрупки и не прямолинейны. Их можно употреблять только для подводных нижних слоев сооружения.

Лиственный хворост при его заготовке очищается от листьев. Оставление листьев можно допускать в тех только случаях, когда хворост употребляется в подводные части сооружения. Если хворост кладется в сооружение с таким расчетом, чтобы он прорастал, необ-

ходимо употреблять хворост свежесрубленный, осенней или весенней рубки, причем предпочтительна позднеосенняя рубка. Как общее правило, следует соблюдать, чтобы нарубленный хворост не оставался долго лежать без употребления в дело, так как он легко загнивает и трухнет.

Помощью скрепления хвороста в некоторые выработавшиеся на практике формы получаются фашинные материалы, представляющие большие удобства для производства работ и дающие известные выгоды в смысле сообщения сооружениям необходимой прочности и предохранения их от подмыва теченнем. Для изготовления таких составных материалов употребляются, кроме хвороста, железная проволока, пеньковые веревки и шпагат, а в некоторых случаях и камень. Означенные материалы и способы их изготовления заключаются в следующем.

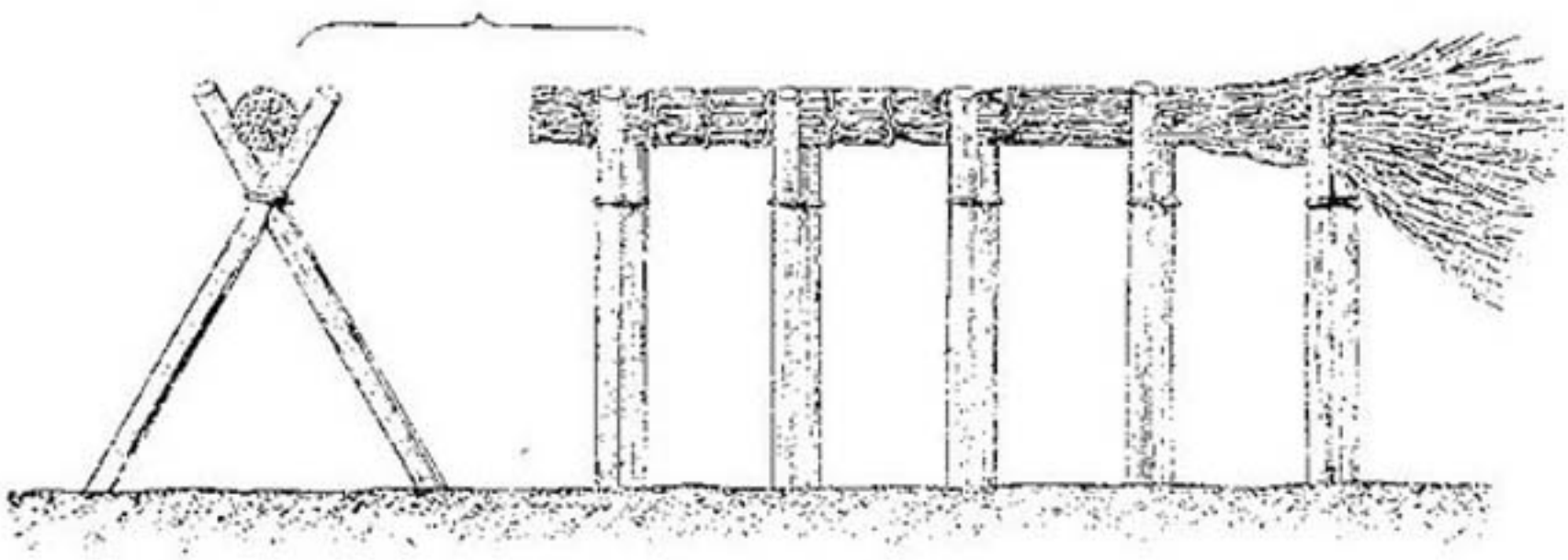


Рис. 90. Вязка фашин.

Прутяные канаты делаются произвольной длины, толщиною от 10 до 15 *см.* в диаметре, для чего связываются в пучки или сплетаются между собою длинные, тонкие и гибкие, очищенные от веток и листьев хворостины, преимущественно ивовые. В зависимости от способа скрепления хворостин, канаты называются вязаные или плетеные. Вторые применяются реже. Они плетутся в три пряди, как показано на рисунке 89-м, причем каждая прядь состоит из сложенных в перевязку и скрученных вместе тонких хворостин. Способ изготовления вязаных канатов сходен со способом вязки фашин, показанным на рис. 90-м. Для этого устраивают козлы, расставленные по прямой линии через 90—100 *см.* друг от друга и состоящие каждый из двух наклонно забитых и перекрещивающихся кольев, связанных в пересечении тонкой веревкой. Высота козел от земли до перекрещивания делается около 60 *см.* с таким расчетом, чтобы было удобно работать стоя. На козлы укладываются хворостины комлями в одну сторону, стыки хворостин идут в перевязку, так что предшествующая хворостина заходит на одну третью часть следующей по длине хворостины. Уложенный таким образом хворост туго перевязывается через каждые 20—30 *см.* ивовыми вицами, причем вица обвивает три раза канат, а концы вицы прочно закладываются в толщу каната (рис. 91), или же делают

вицу с петлей (рис. 92). Делая обвязку, нужно туго стянуть в этом месте хворост, для чего служит так называемая затяжка, состоящая из двух кольев и прикрепленной к ним веревки или тонкой цепи (рис. 93). Вицей называется тонкая ивовая хворостина, специально подготовленная, чтобы при обвязке она не ломалась. С этой целью хворостины, предназначенные для виц, или распаривают на пепле тлеющего костра, или каждую хворостину отдельно скручивают руками, придерживая ее комель под каблуком сапога. Вместо виц можно употреблять просмоленную веревку, диаметром около 1 *см.*, или же тонкую, диаметром 1—2 *мм.* железную проволоку, отожженную для большей гибкости.

Рис. 91. Обвязка прутяного каната вицей.

Фашиной называется пук хвороста, туго стянутого в нескольких местах вицами (или веревками и проволокой). Употребляющиеся фашины могут быть сведены к следующим видам: а) обыкновенные или легкие фашины—однокомельные и двухкомельные, б) тяжелые фашины и в) весьма длинные, так называемые бесконечные тяжелые фашины.

Рис. 92. Обвязка прутяного каната вицей, имеющей петлю.

Обыкновенные фашины делаются длиною от 2 до 3 метр. и толщиною около 0,3 метр., перевязанные в двух или трех местах вицами. Если комли всех хворостин обращены в одну сторону и ровно срезаны, а не обрезанные метлы составляют другой конец фашины, то фашина называется однокомельной (рис. 94); такие фашины всего чаще употребляются для регуляционных сооружений. Если же фашина связана из хворостин, обращенных попеременно к одному и другому концам фашины, и оба ее конца ровно обрезаны, то такая фашина называется двухкомельной. При упомянутых размерах фашина легко переносится одним человеком, что имеет важное значение в смысле удобства производства фашинных работ. В зависимости от потребностей, размеры эти иногда изменяются, но соблюдая упомянутое условие относительно веса фашины. Изготовляются обыкновенно фашины на козлах таким же способом (рис. 90), как и прутяные канаты. Для закрепления фашин и прутяных канатов в фашинной и хворостяной кладке употребляются колья толщиною от 4 до 7 *см.*, а длиною от 0,5 до 1,5 метр., в зависимости от потребности; колья заострены

Рис. 93. Затяжка, служащая при обвязке прутяных канатов.

с одного конца и имеют на другом конце сук или костылек (рис. 95). Такими кольями прокалывается фашина или прутяной канат насквозь. Поэтому расстояние между обвязками на канатах и фашинах должно быть таково, чтобы обвязка не рвалась при прокалывании кольев.

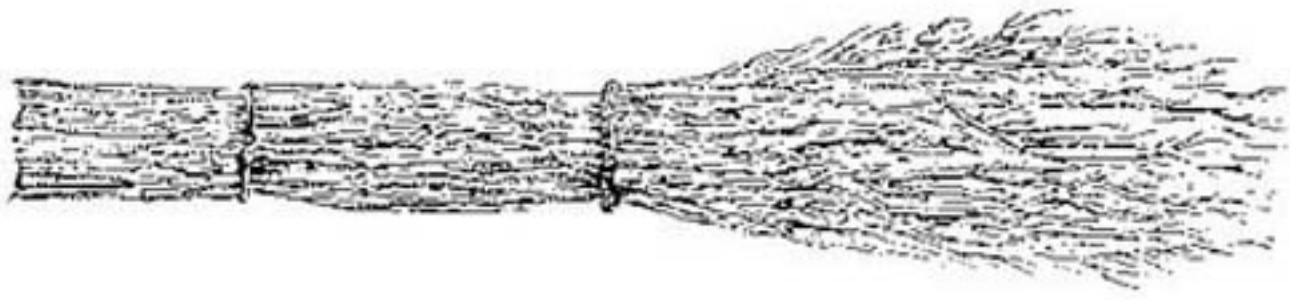


Рис. 94. Однокомельная фашина.

Тяжелые фашины употребляются в тех случаях, когда необходимо, чтобы фашина собственным весом погружалась в воду и, находясь на дне реки, оставалась достаточно устойчивой против действия на нее течения. Тяжелая фашина состоит из хворостяной оболочки, внутренность которой заполнена мелким камнем или гравием без примеси песка (рис. 96). Хворост кладется комлями попеременно к одному и другому концам фашины и обвязывается подобно тому, как в двухкомельных фашинах. Тяжелые фашины, в зависимости от их назначения, делаются различной длины—от 5 до 10 и более метров. Их средняя толщина составляет обыкновенно от 0,7 до 1,0 метра. Обвязки делаются проволочные (толщина проволоки до 3 миллиметров) или цепные, располагая их на расстоянии 30—45 см. друг от друга. Затягивание обвязки производится как показано на рис. 97. Для изготовления фашины служат стулья (станки), конструкция которых понятна по рис. 98 и 99-му. Так как переноска тяжелых фашин затруднительна, то они изготовляются в таком месте, чтобы имелась возможность тут же сбросить их в воду на место своего назначения. Например, при укреплении берега тяжелыми фашинами изготовляют фашину вдоль бровки берегового откоса, а если нельзя фашину скатить с берега, то фашина изготовляется на палубе судна, которое подводится к месту назначения фашины, чтобы сбросить с борта судна (рис. 100).

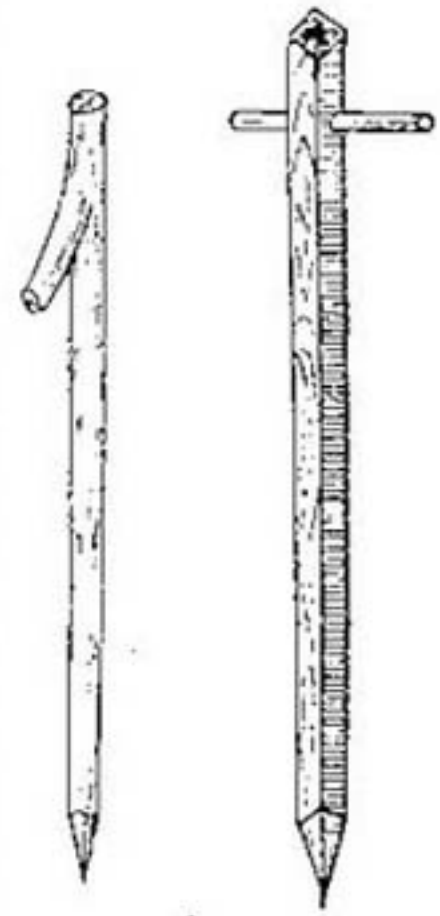


Рис. 95. Колья для закрепления фашин и прутяных канатов в фашинной кладке.

Бесконечные фашины (или, как их иногда называют, фашинные кишки или колбасы) имеют такую же конструкцию, как вышеописанные тяжелые фашины, но они изготовляются одновременно с укладкой их на место назначения так, что по мере вязки готовая

часть фашины спускается в сооружение, причем фашина может быть произвольной длины. Чаще всего такие фашины употребляются для укрепления подводного откоса берега. При этом можно одновременно изготовлять и укладывать не только одну, но и две и даже три безконечные фашины. На рисунке 101-м показан способ последовательного изготовления и укладки двух безконечных фашин: фашина № I изготовляется на стульях, расположенных вдоль верхней бровки откоса и скатывается по откосу к нижней бровке, затем вяжется фашина № II, под нее укладываются брусья S такой длины, чтобы их конец мог опереться на уже спущенную фашину № I, и по этим брусьям скатывается фашина № II. Подобным способом можно уложить целый ряд фашин и по ширине и по высоте. На рисунке 102-м показан способ одновременной вязки и погружения трех бесконечных фашин. Вязка

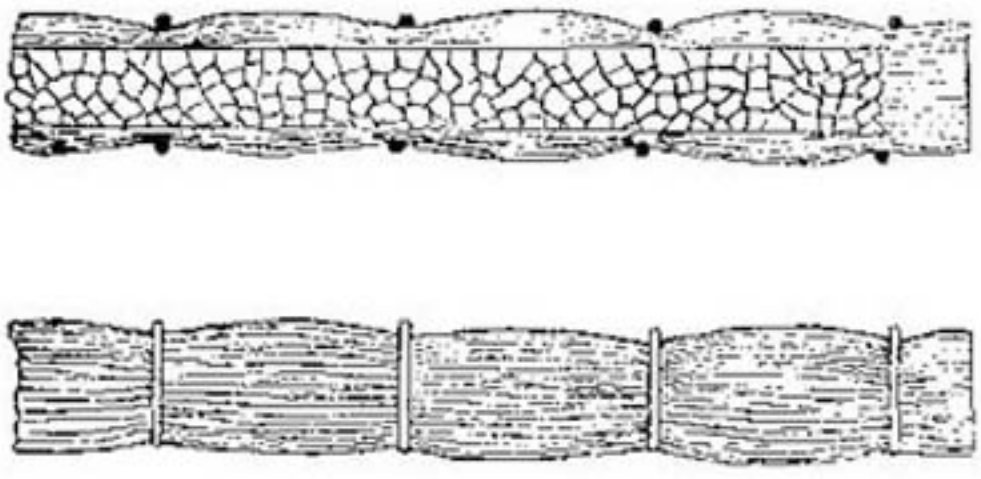


Рис. 96. Тяжелая фашина.

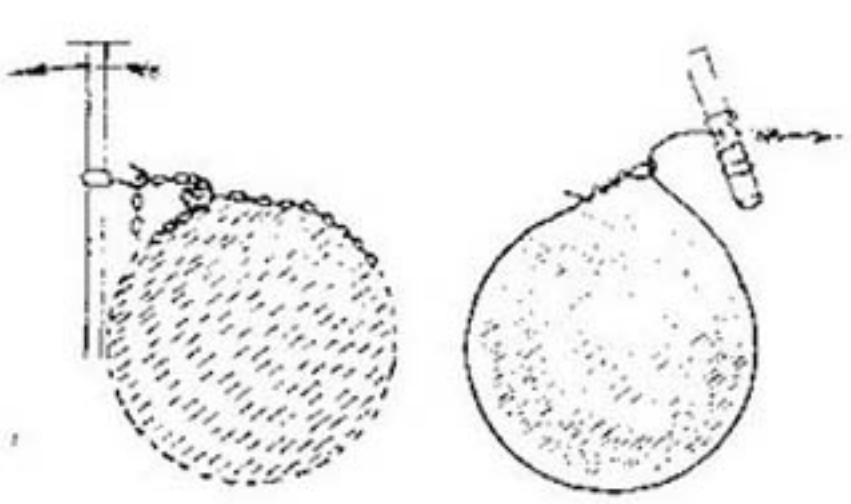


Рис. 97. Затяжка тяжелой фашины проволокой.

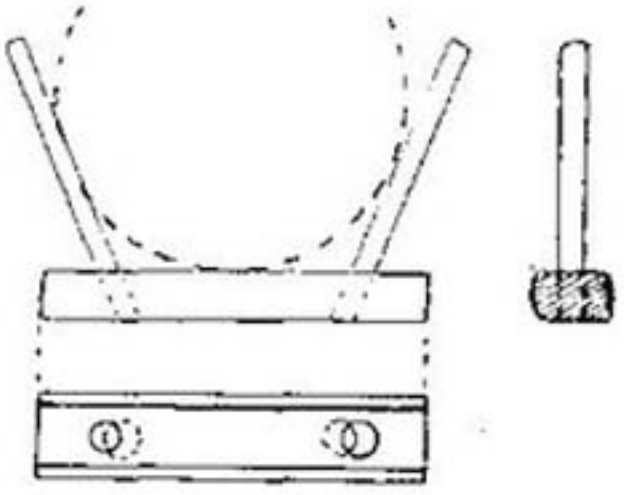


Рис. 98. Конструкция станка для изготовления тяжелой фашины.

и погружение фашины № I идет впереди, за ней следует вязка фашины № II на освободившихся от первой стульях и погружение этой фашины. Еще далее позади также вяжется фашина № III и погружается по верху двух первых.

Тюфяки фашинные и хворостяные. Тюфяк представляет собою большое по площади, но сравнительно небольшой высоты тело, составленное из хвороста или из фашин, которое заключено между двумя образованными из прутяных канатов сетками, нижней и верхней, связанных между собою смоленными веревками или железной проволокой. Тюфяки делаются преимущественно прямоугольной формы, весьма разнообразных размеров, шириною до 15 метр. и

длиною до 50-ти и более метров. Толщина тюфяка определяется в зависимости от его назначения, от степени ровности той поверхности, на которую он укладывается, от глубины воды и от величины скоростей течения. Хворостяные тюфяки делаются обычно толщиною от 45 сантиметров (тонкие тюфяки) до 80 сантиметров (толстые тюфяки). Фашинные тюфяки делаются в два, три и даже более слоев сложенных в его теле фашин. При укладке тюфяка на очень неровную поверхность, требуется от него большая гибкость для заполнения углублений, а, следовательно, меньшая высота тюфяка. Для образования сооружения из кладки тюфяков один над другим, выгоднее применять толстые тюфяки для уменьшения их числа. Тюфяк легче воды и потому для погружения его на дно реки, равно как для удержания тюфяка во время затопления его высокими водами тюфяк загружается сверху камнем.

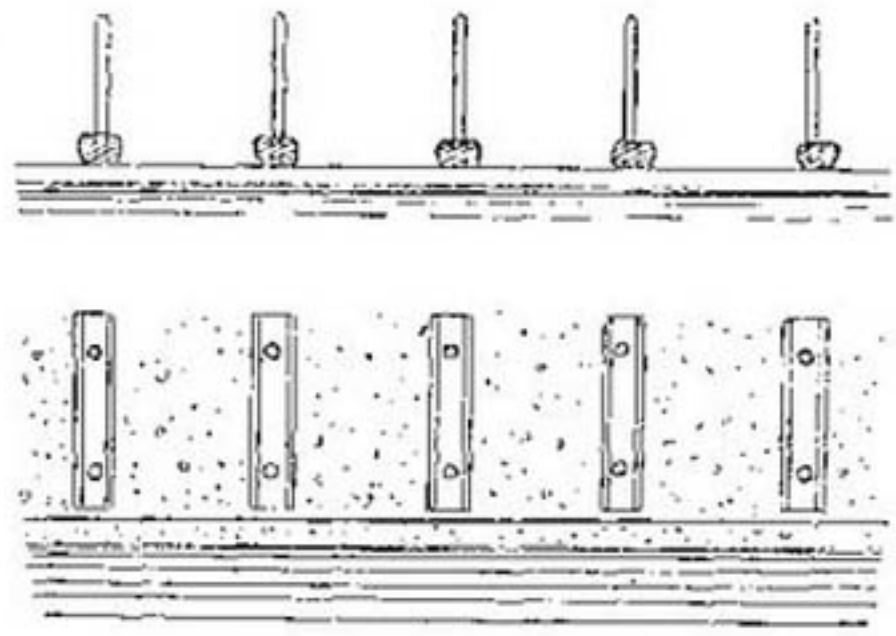


Рис. 99. Установка станков для изготовления тяжелой фашины.

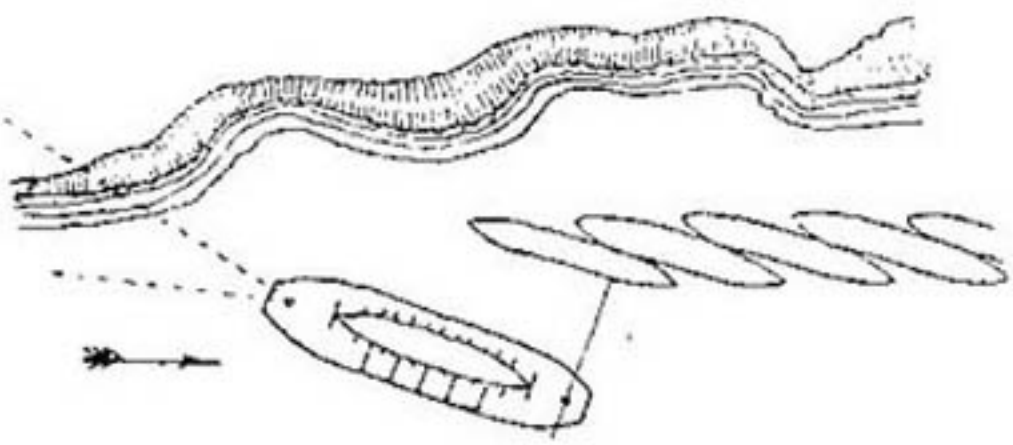


Рис. 100. Укладка тяжелых фашин с судна.

Вязка тюфяка производится следующим образом. Прежде всего. связывается нижняя сетка, состоящая из продольных и поперечных рядов прутяных канатов (рис. 103,105 и 106). В каждом направлении расстояние между канатами от 0,9 до 1,0 метр. Нижний ряд канатов кладется по ширине

Рис. 101. Вязка и спуск двух длинных тяжелых фашин.

тюфяка, а верхний по длине его, причем ширина и длина всей сетки, считая между осями крайних канатов, делается на 0,45 метр. менее размера соответствующих сторон тюфяка Во всех местах пересечения продольных и поперечных рядов канатов связывают их просмоленной веревкой (диаметром около 6 миллиметров), причем оста-

ляются свободными оба конца веревки такой длины, чтобы она была достаточна для пропуска через всю толщину тюфяка и для обвязки тою же веревкой пересечений канатов верхней сетки. Затем, во все пересечения канатов нижней сетки вставляются колья, так называемые „козульки" (рис. 104), имеющие длину несколько большую толщины тюфяка. Упомянутые концы веревок надевают на верхний обделанный в виде вилки конец козульки, для чего концы веревок связываются в петлю. Нижняя сетка изготовляется или на месте устройства тюфяка, или в стороне от него. В последнем случае ее затем переносят на место вязки самого тюфяка. Когда нижняя сетка перенесена, на нее кладется тело тюфяка, т. е. хворост или фашины. Укладка хвороста или фашин до требуемой толщины тюфяка делается слоями, а именно: первый по высоте слой фашин или хвороста кладется поперек тюфяка, для удобства спуска с подмости; второй слой

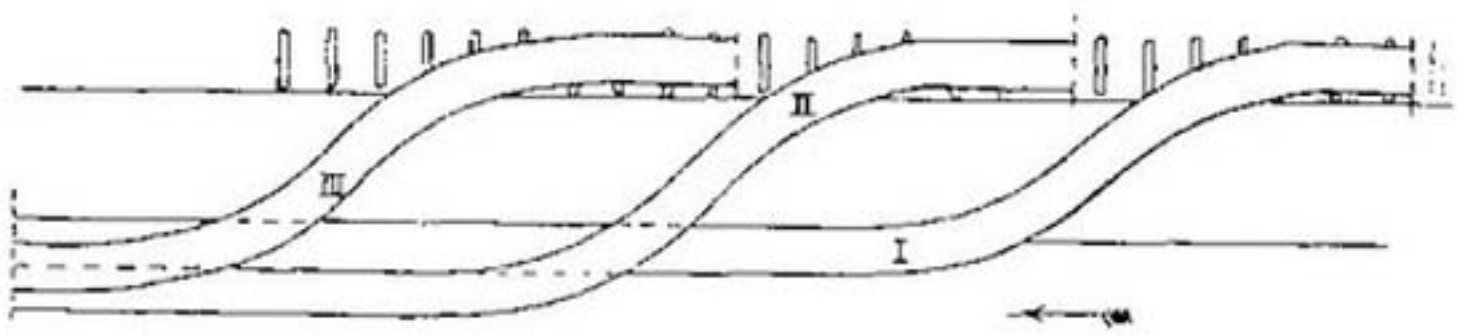


Рис. 102. Вязка и спуск трех тяжелых длинных фашин.

вдоль тюфяка, третий опять поперек и т. д., причем верхний слой следует иметь поперечный. Как хворост, так и фашины укладываются комлями внаружу тюфяка, а метлами внутрь. На верхний слой укладывается вторая (верхняя) сетка прутяных канатов, изготовленная так же, как нижняя, причем все узлы пересечений канатов верхней сетки должны находиться над соответствующими узлами нижней сетки. После сего концы веревок снимают с козулек и верхняя сетка туго притягивается к нижней веревками помощью аншпугов для уплотнения хворостяного или фашинного тела тюфяка. После сего аншпуги вынимаются из петель веревок, а веревки туго обвязываются вокруг прутяных канатов верхней сетки в узлах их пересечения. В таком виде тюфяк готов к употреблению в дело. Козульки могут быть вытащены. На поверхности тюфяка прутяные канаты верхней сетки образуют квадратные ячейки (рис. 105-*a* и *b*), которые служат для наброски в них камня при загрузке тюфяка, причем канаты, представляя как бы перегородки между ячейками, препятствуют камню скатываться с тюфяка. Если для этого толщина прутяного каната не достаточна, то ячейки нужной глубины образуются помощью устройства плетней, которые плетутся по рядам колышков, забиваемых для сего в тюфяк, или же для той же цели козульки делаются более длинными и их не вынимают из тюфяка. Забивка кольев в тюфяк через канаты верхней сетки делается иногда также с целью сообщения тюфяку большей

жесткости. Фашинный тюфяк прочнее хворостяного, почему употребление того или иного зависит от назначения тюфяка.

Изготовление тюфяков должно быть приурочено ко времени употребления их в дело, имея в виду, что хворост, оставаясь долгое время

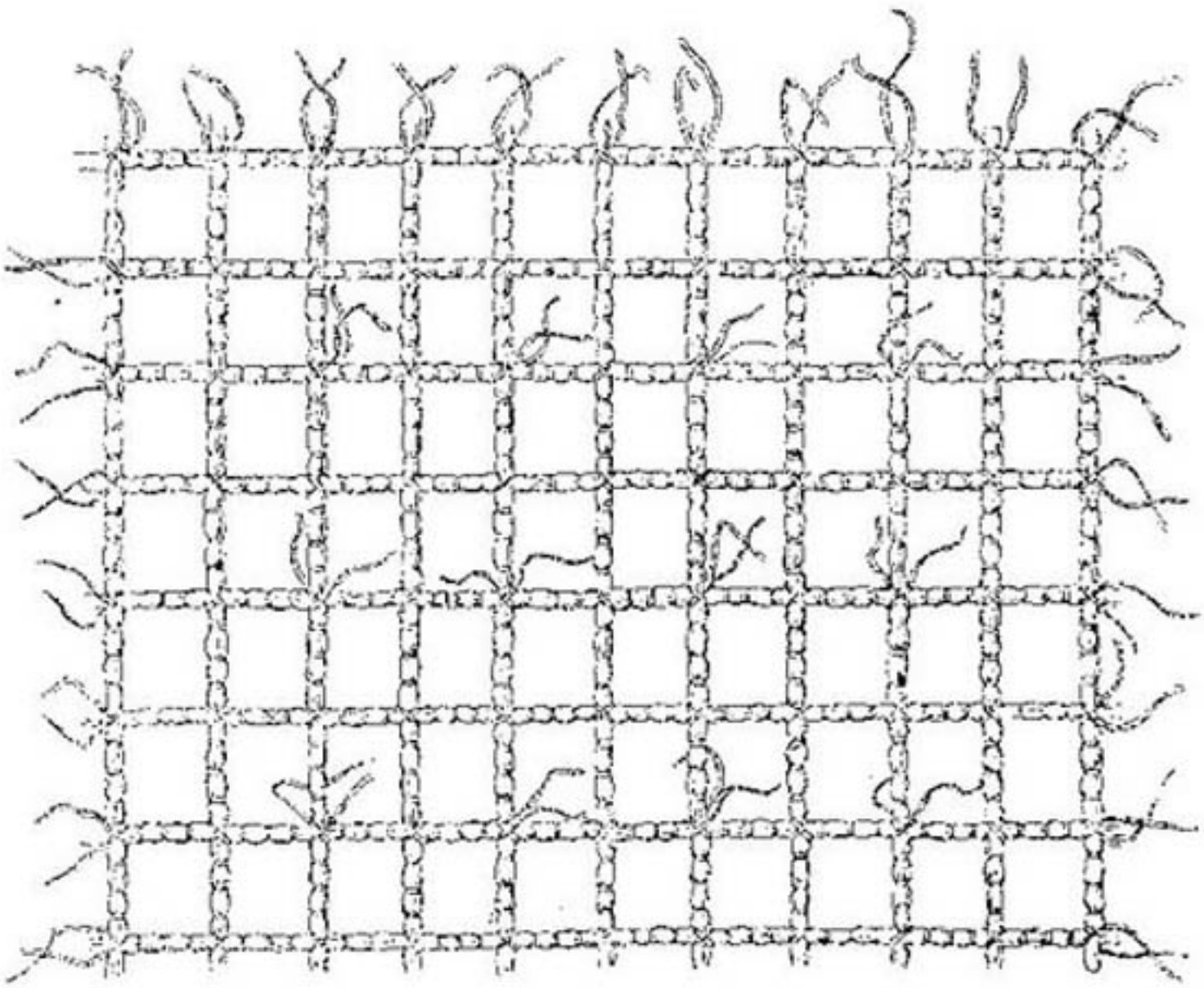


Рис. 103. Нижняя сетка прутяных канатов, служащая для скрепления тюфяка.

на воздухе, подвергается усыханию под действием солнечных лучей или гниению от попеременного смачивания водой.

Для укладки тюфяков на место назначения обыкновенно пользуются низким стоянием уровня воды в межень и зимою. Способ их укладки зависит от того, придется ли класть тюфяк на место не покрытое водою или погружать в воду, а также от времени укладки, а именно зимою—со льда, или при отсутствии ледяного покрова. Если укладка тюфяков производится на местах, которые во время исполнения работ не покрыты водою, то вязка тюфяка и загрузка его камнем производятся на том месте, на котором он должен лежать, причем, укрепляя берег тюфяками, можно вязать тюфяки на довольно крутых откосах. В этих случаях полезно, ранее загрузки камня, подсыпать на поверхность тюфяка слой растительной земли, необходимой для прорастания кольев и хвороста тюфяка. Если же приходится погружать тюфяк в воду, то, в зависимости от времени работ, вязка тюфяка произво-

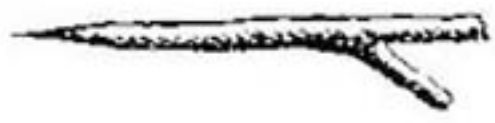


Рис. 104. Козулька.

дятся или на берегу, после чего он спускается на воду, или со льда, если работы производятся зимою.

При вязке на берегу сначала устраиваются подмости, состоящие в следующем (рис. 106). На спланированном откосе берега, не круче полуторного, укладываются перпендикулярно к реке, начиная от уреза

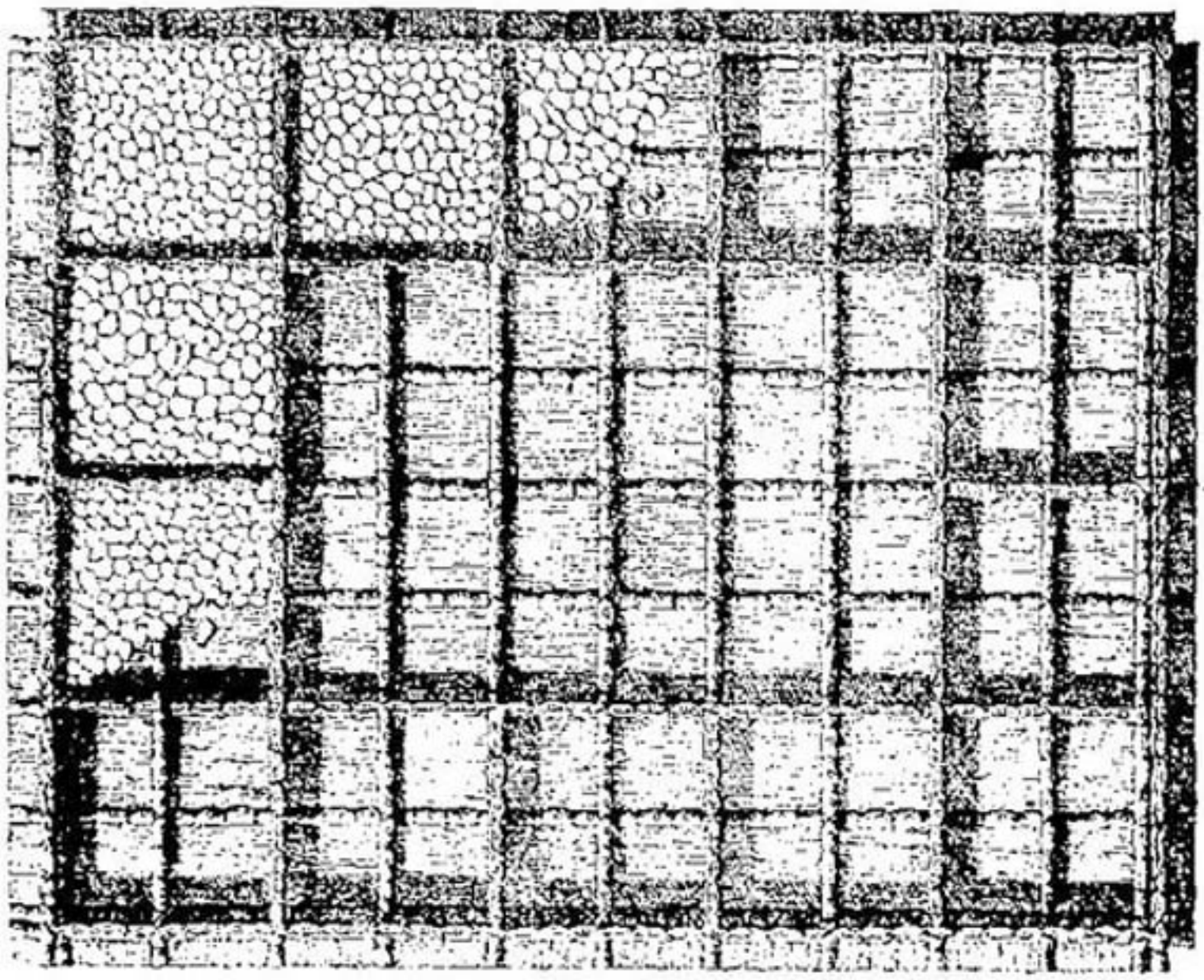


Рис. 105-*a*.

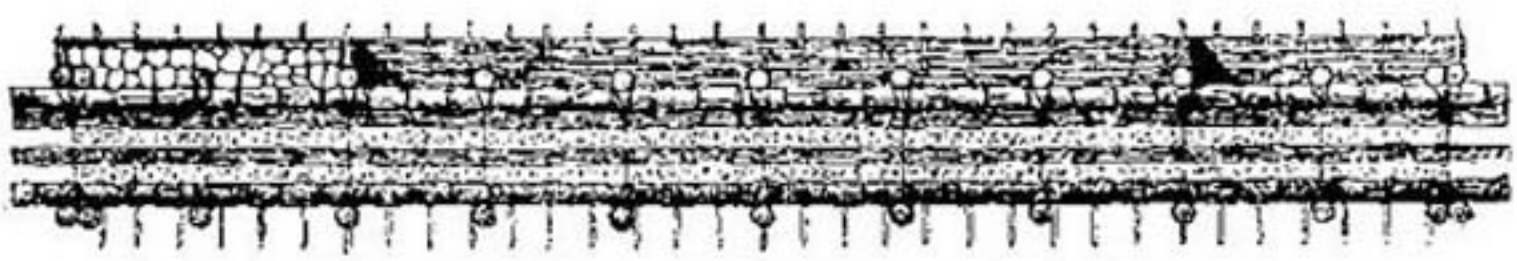


Рис. 105-*b*. Связанный хворостяной тюфяк.

воды, пластины на расстоянии 1—1½ метра друг от друга. На пластины кладутся, в качестве катков, круглые ровные бревна толщиною 8—12 сантиметров, а на катки второй ряд пластин, на которые укладывается нижняя сетка тюфяка, заранее подготовленная и засим перенесенная на подмости. После сего производится вязка тюфяка вышеописанным способом. Чтобы тюфяк не скатился во время его изготовления, к концам катков и продольных пластин привязываются пеньковые канаты, которые закрепляют за свайки, забитые с береговой стороны тюфяка и по его бокам. Когда тюфяк готов, то по всем его

сторонам привязываются к нему длинные канаты, необходимые для перевода тюфяка по воде и для направления его при погружении в воду. После сего развязываются канаты, удерживающие подмости, тюфяк скатывается в воду вместе с поддерживавшими его верхними пластинами. Последние вытаскиваются из-под тюфяка, а тюфяк, плавающий на поверхности воды, подводится к месту укладки, где точно устанавливается в требуемом положении. Для погружения тюфяка становятся по его сторонам лодки и небольшие речные суда с нужным запасом камня, которым засим постепенно и равномерно нагружают ячейки тюфяка, причем при погружении тюфяка поддерживают его с судов канатами, чтобы он равномерно по всей своей площади погружался в воде и лег на дно в назначенном месте. Такая работа должна производиться осторожно опытными людьми, так как при больших скоростях течения и значительной глубине воды тюфяк может порваться, опрокинуться или лечь в неправильном положении.

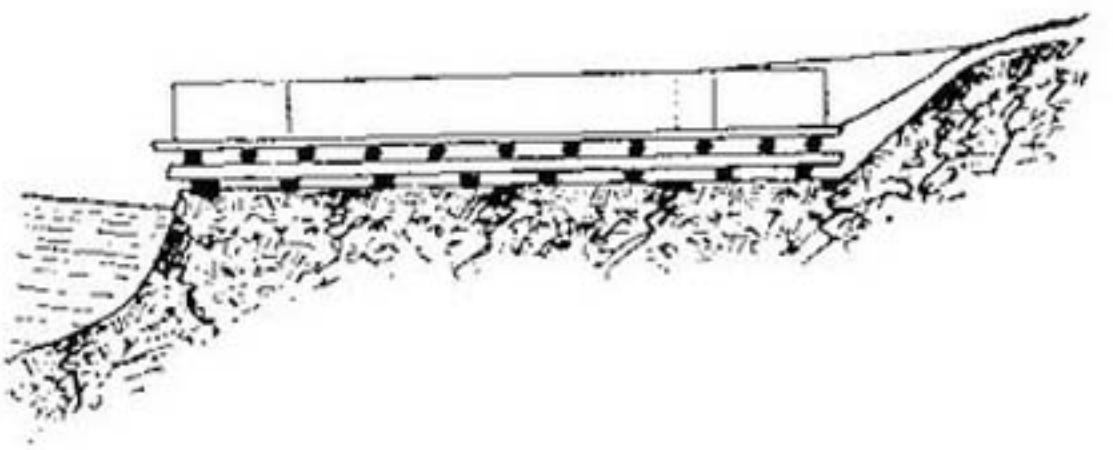


Рис. 106. Подмости для вязки тюфяка на берегу.

Зимняя погрузка тюфяков со льда значительно удобнее. Производится она следующим образом. Предварительно на поверхности льда точно обозначают место, на котором должен на дне реки лежать тюфяк. Место это очищается от снега и по всей его площади делается прорубь (*майна*) такой же формы в плане, какую имеет тюфяк и немного (на 20—30 сантиметров) шире и длиннее, чем тюфяк. Разрубленный лед вытаскивается из воды и майна очищается от мелкого льда и ледяной каши. Засим майну перекрывают поперек пластинами или брусьями, размещая их на 0,9—1,0 метр. друг от друга и опирая их концы на лед по продольным краям майны, причем для лучшего распределения давления на лед иногда подкладывают под концы поперечин продольный лежень. На упомянутых поперечинах кладется нижняя сетка прутяных канатов, а засим производится вязка всего тюфяка. Когда тюфяк готов и к нему прикреплены канаты, идущие на все четыре стороны тюфяка, то из-под тюфяка вытаскиваются пластины, причем тюфяк остается плавающим на воде. После сего производится

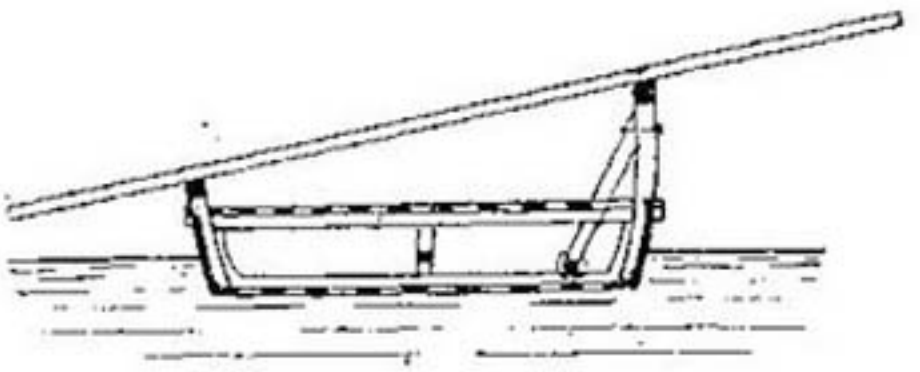


Рис. 107. Судно для вязки и погрузки ленточного тюфяка.

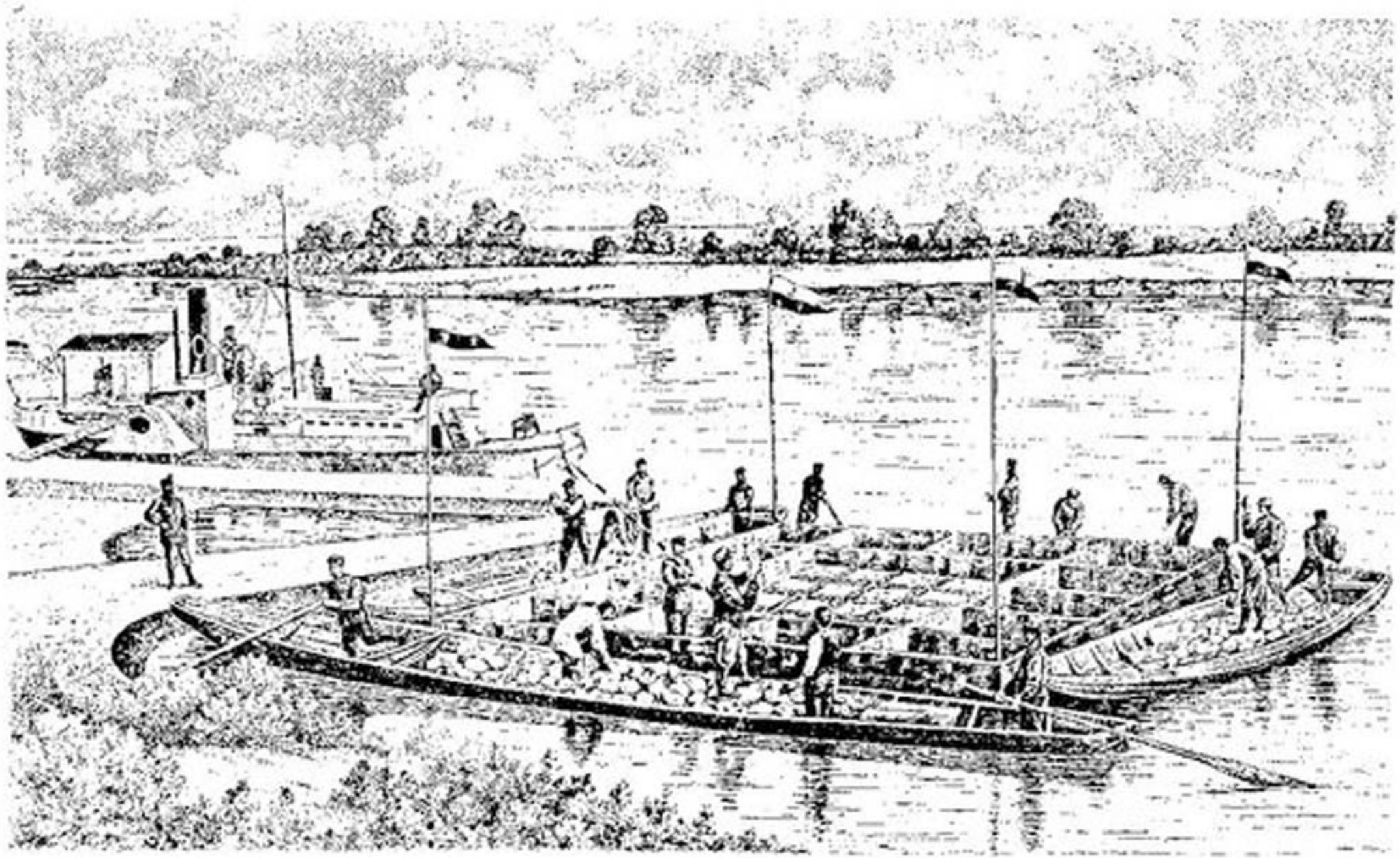


Рис. 108. Погрузка тюфяка на дно.

постепенная равномерная загрузка камнем ячеек тюфяка и последний опускается на дно, поддерживаемый с боков канатами.

Если требуется подводная укладка тюфяков на большом протяжении в виде ленты, то иногда прибегают к вязке и погрузке так называемых *ленточных* или *бесконечных* тюфяков. Для этого служит судно, на котором устроена наклонная платформа (рис. 107). Материалы подаются с другого судна. На наклонной плоскости производится вязка тюфяка, причем по мере готовности тюфяк постепенно с нижнего конца платформы спускается в воду и загружается на дно камнем готовая часть тюфячной ленты; в то же время судно соответственно отодвигается якорными канатами, а на платформе судна продолжается дальнейшая вязка ленточного тюфяка.

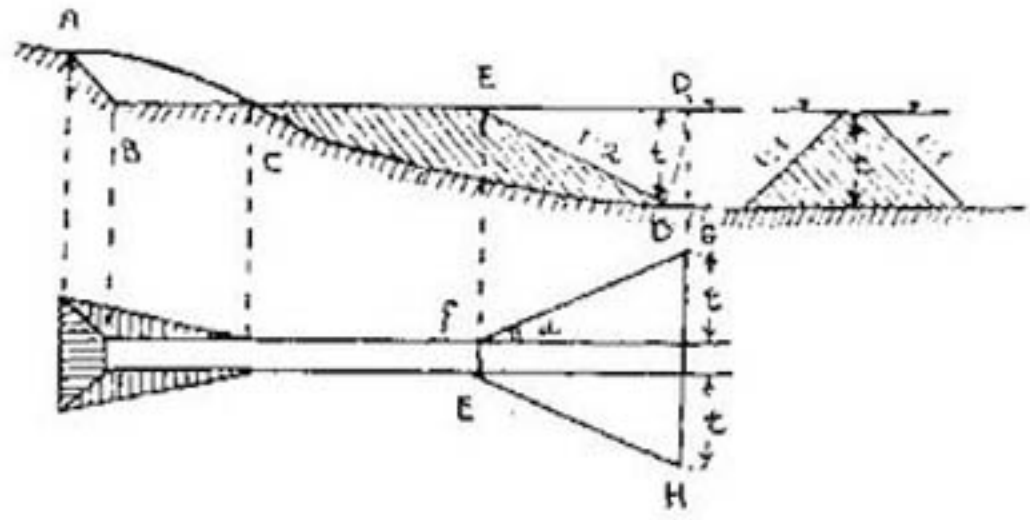


Рис. 109. Веерная кладка фашин для образования подводной части дамбы.

Рисунок 108-й изображает производство работ при погрузке фашинного тюфяка около подошвы регуляционного сооружения на р. Висле.

Веерная фашинная кладка. Регуляционные сооружения, имеющие вид примкнутых к берегу дамб, могут быть построены из так называемой погружаемой или веерной фашинной кладки. Этот способ нередко применяется для постройки полузапруд, продольных дамб, береговых опоясок и струенаправляющих дамб.

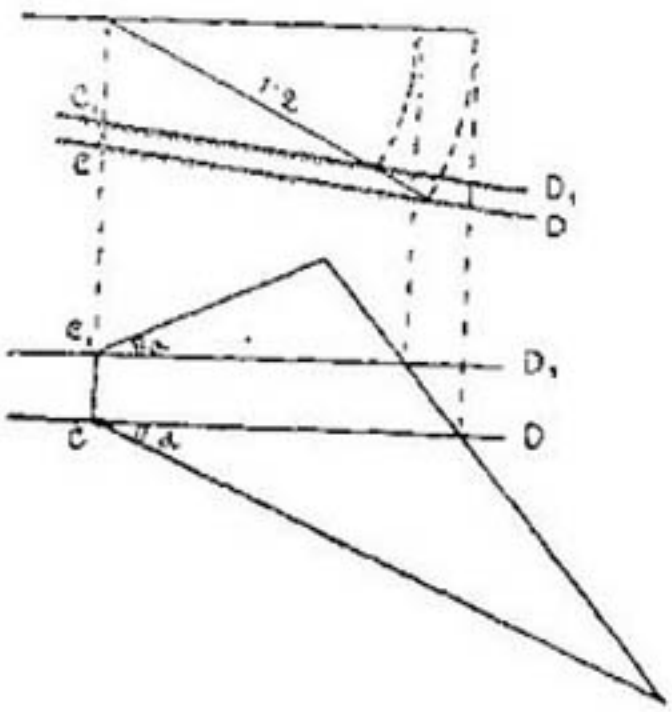


Рис. 110. Форма слоев фашинной веерной кладки при крутом уклоне дна.

Сущность упомянутого способа заключается в следующем.

В поперечном вертикальном разрезе сооружению придается форма трапеции с одиночным уклоном откосов (рис. 109). В продольном разрезе сооружение состоит из фашинных слоев, расположенных наклонно, обыкновенно с уклоном 1 : 2. Если представить себе, что каждый такой слой ранее, чем он займет свое положение в теле сооружения, будет вязаться на плаву на поверхности воды, то, чтобы составить из таких слоев дамбу проектного поперечного профиля, необходимо, чтобы каждый слой имел в плане тоже форму трапеции, причем верхняя сторона трапеции должна быть равна ширине сооружения на рабочем уровне воды, нижняя сторона трапеции должна быть равна ширине сооружения в его основании,

а угол α наклона боковых сторон трапеции определится из выражения

$$tg\alpha = \frac{l}{\sqrt{l^2 + (2l)^2}} = \frac{1}{\sqrt{5}},$$

чему сответствует $\alpha = 24,^{0}6'$. В случаях, когда глубина дна реки cd и c_1d_1 по обоим сторонам сооружения неодинакова (рис. 110), форма слоев в плане должна принять вид, показанный на рисунке.

Фашинная кладка производится в следующем порядке. Она начинается от берега, причем для образования корня сооружения, прочно сопрягающего сооружение с берегом, делается на берегу выемка

Рис. 111-*a*.

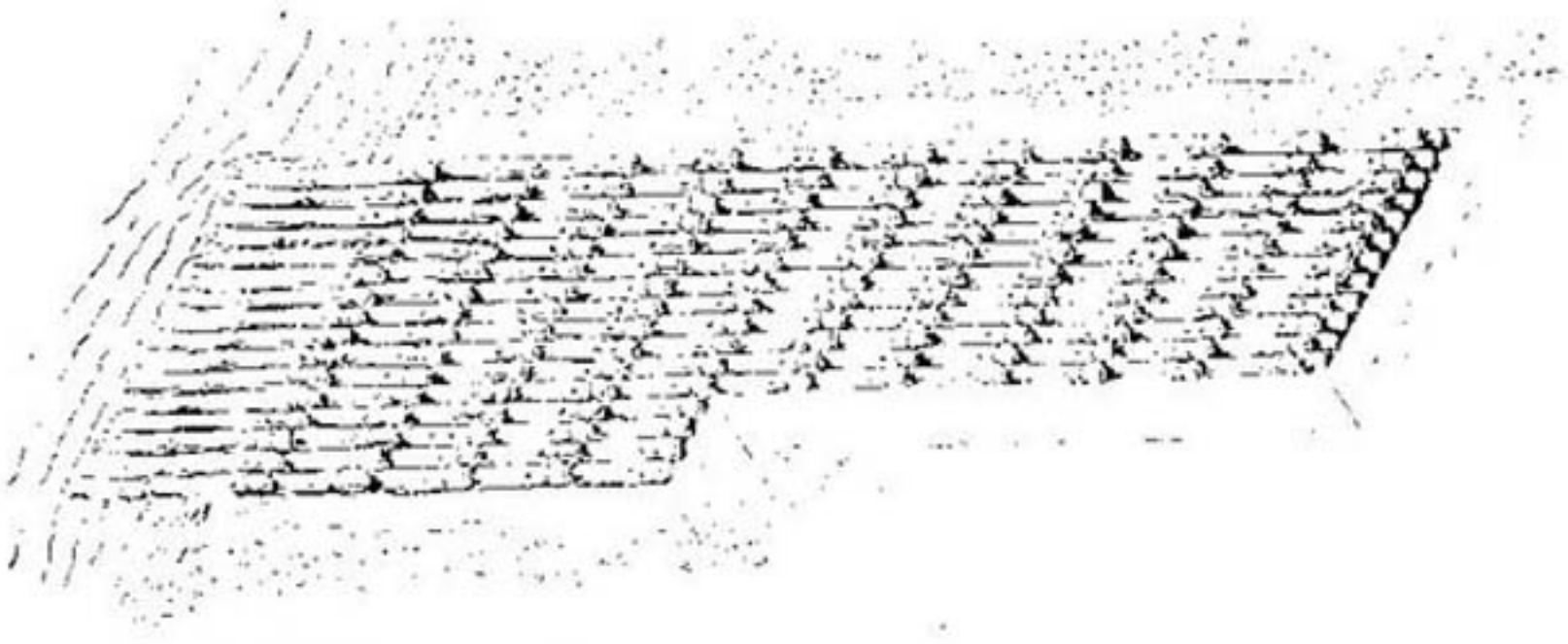


Рис. 111-*b*. Корень дамбы, строющейся из веерной фашинной кладки.

до уровня рабочего горизонта, т. е. до уровня воды, при котором производятся работы. В этой выемке укладываются фашины рядами, как показано на рис. 111-м (*a* и *b*). Фашины кладутся метлами в сторону реки, причем каждый последующий ряд перекрывает две трети предыдущего ряда и прибивается кольями, а по верху уложенных таким образом фашин насыпается тяжелая, по возможности не размываемая, земля. Ширина корня делается равной ширине сооружения по верху; в нем все фашины расположены параллельно друг другу по направлению оси сооружения. Когда корневая часть устроена и далее приходится уже погружать фашины в воду, то работа производится следующим образом. Фашины в каждом последующем слое кладутся не параллельно друг другу, а расставляются веерообразно (рис. 112) так, чтобы ширина слоя в комлях фашин была равна ширине сооружения на урезе воды, а ширина слоя в метлах фашин равна ширине сооружения на дне.

Каждый последующий ряд перекрывает на две трети предыдущий ряд и все они связываются между собою и с корневой частью прутяными канатами, которые прибиваются кольями (рис. 113-*а* и *б*). Когда несколько рядов положено, то ранее их погружения на дно укладывается на этом основном слое второй слой, так называемый обратный, потому что фашины хотя направлены метлами в сторону реки, но ряды их кладутся начиная с конца выведенной кладки в обратном направлении — к берегу (рис. 114). Обратный слой тоже скрепляется прутяными канатами, прикрепляемыми помощью кольев, пробитых до нижнего слоя фашин. Засим оба слоя (основной и обратный) загружаются землею, по возможности не размываемой, настолько, чтобы под влиянием этой нагрузки слои изогнулись и погрузились в воду до дна. Таким же образом подвигается постепенно по оси сооружения дальнейшая кладка, причем сооружение получает в продольном профиле вид, показанный схематически на рис. 115-м, на котором белые полоски изображают слои фашин, а заштрихованные—земляную загрузку. В конце сооружения верхний слой делается более длинным с тем, чтобы он пошире перекрыл дно, причем хвостовая часть этого слоя загружается каменной наброской. По окончании устройства кладки ее оставляют на некоторое время, пока не произойдет полная осадка, после чего наращивают и закрепляют гребень сооружения устройством так называемого венчающего слоя. Слой этот делается из таких же рядов фашин, как обратные слои, или же иным способом, например укладкою фашин поперек сооружения перпендикулярно или наклонно к его оси,

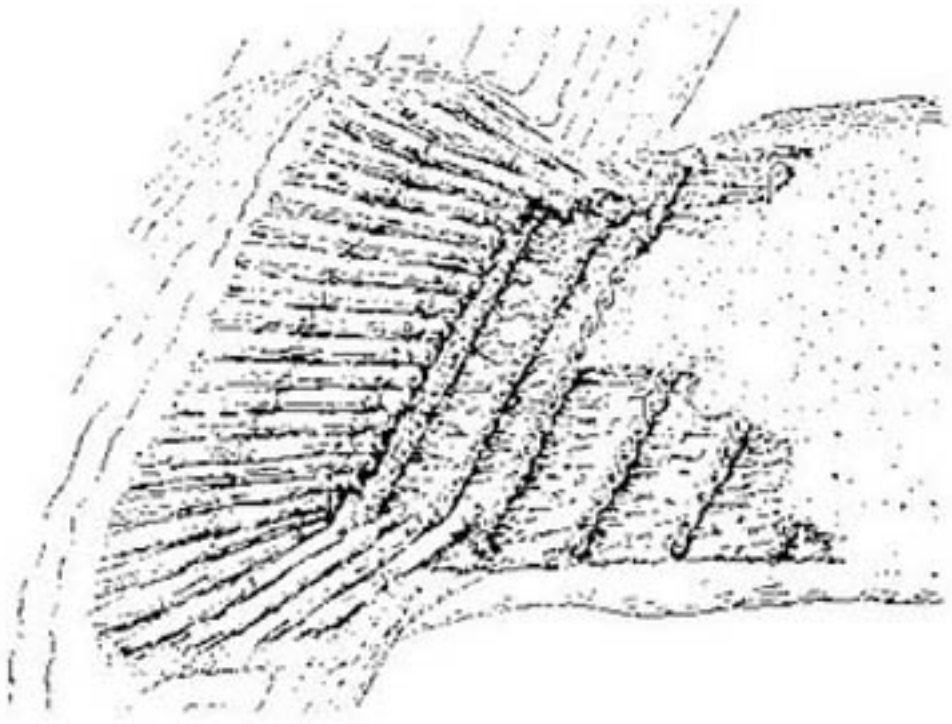


Рис. 112. Начало погружения веерной кладки в воду.

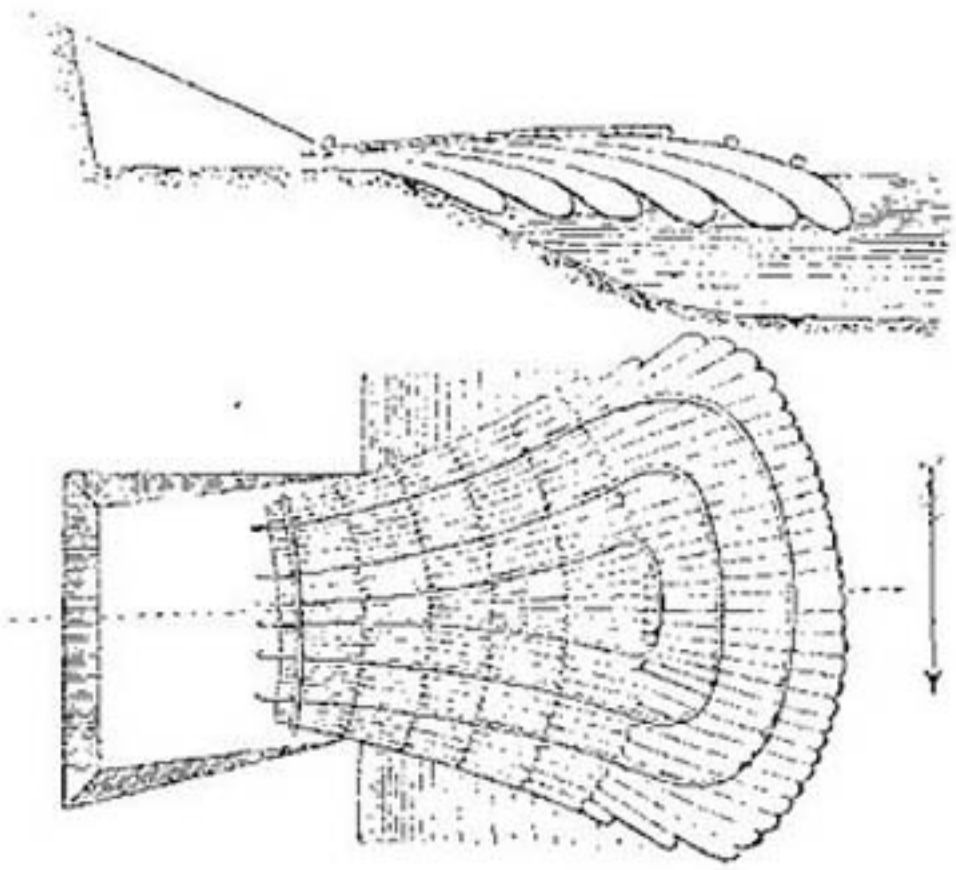


Рис. 113-*а* и *б*. Расположение слоев в разрезе и в плане.

комлями внаружу. Если гребень сооружения требуется поднять на большую высоту, то вместо одного венчающего слоя делается несколько слоев из продольных и поперечных слоев фашин или хвороста с прикреплением каждого слоя рядами прутяных канатов. Венчающий слой покрывается неразмываемой землей с плотной утрамбовкой. Надлежащую прочность получит надводная часть сооружения только после прорастания хвороста, почему хворост и фашины в этой части сооружения нужно употреблять из свежесрубленных, легко прорастающих ивовых пород.

Удовлетворительное состояние сооружений, построенных из фашинной кладки, зависит в значительной степени от искусства в производстве такой кладки. Поэтому применение веерной кладки может быть рекомендовано лишь в тех случаях, когда имеется возможность располагать опытными в такого рода работах мастерами и рабочими. Так как погружаемая кладка удобоисполнима на глубинах, не превышающих 5—6 фут., то при большей глубине тело сооружения из веерной кладки располагается на фашинных тюфяках, уложенных на дне в один или несколько рядов, в зависимости от глубины дна. Тюфяки выпускаются на ширину с таким расчетом, чтобы образовать пологие откосы сооружения и прикрыть дно для его защиты от размыва около подошвы сооружения. Рисунок 116 изображает в плане более сложное расположение веерной кладки в угле сопряжения опояски с ее корневой частью.

Рис. 114. Кладка обратного слоя.

Рис. 115. Разрез сооружения из веерной фашинной кладки в готовом виде.

Сипайные работы. В Туркестане и других местностях Закаспийского Края, где реки отличаются сильными паводками, быстрым течением, чрезвычайно подвижным дном и неустойчивым положением русла, иногда внезапно меняющего свое направление, сыздавна применяется оригинальный способ устройства берегоукрепительных и регуляционных сооружений помощью так называемых сипаев. Большинство туземных ирригационных сооружений построено этим способом. Сипайные работы также широко распространены в Индии и в Китае.

Сипай (в переводе на русский язык—тренога) представляет собою простую конструкцию, составленную из связанных между собою бревен в виде трехгранной или четырехгранной пирамиды (рис. 117-*a* и *b*), высотой от 4 до 8 *м*., в зависимости от глубины дна, на котором она ставится. Основу сипая составляют бревна, толщиною от 10 до 18 *см*., связанные возле верхнего их конца обыкновенной неоцинкованной проволокой диаметром 4—5 *мм*., в несколько (10—20) обмоток, а внизу расставленные так, что в своем основании сипай представляет равносторонний треугольник или квадрат. Угол наклона бревен зависит от

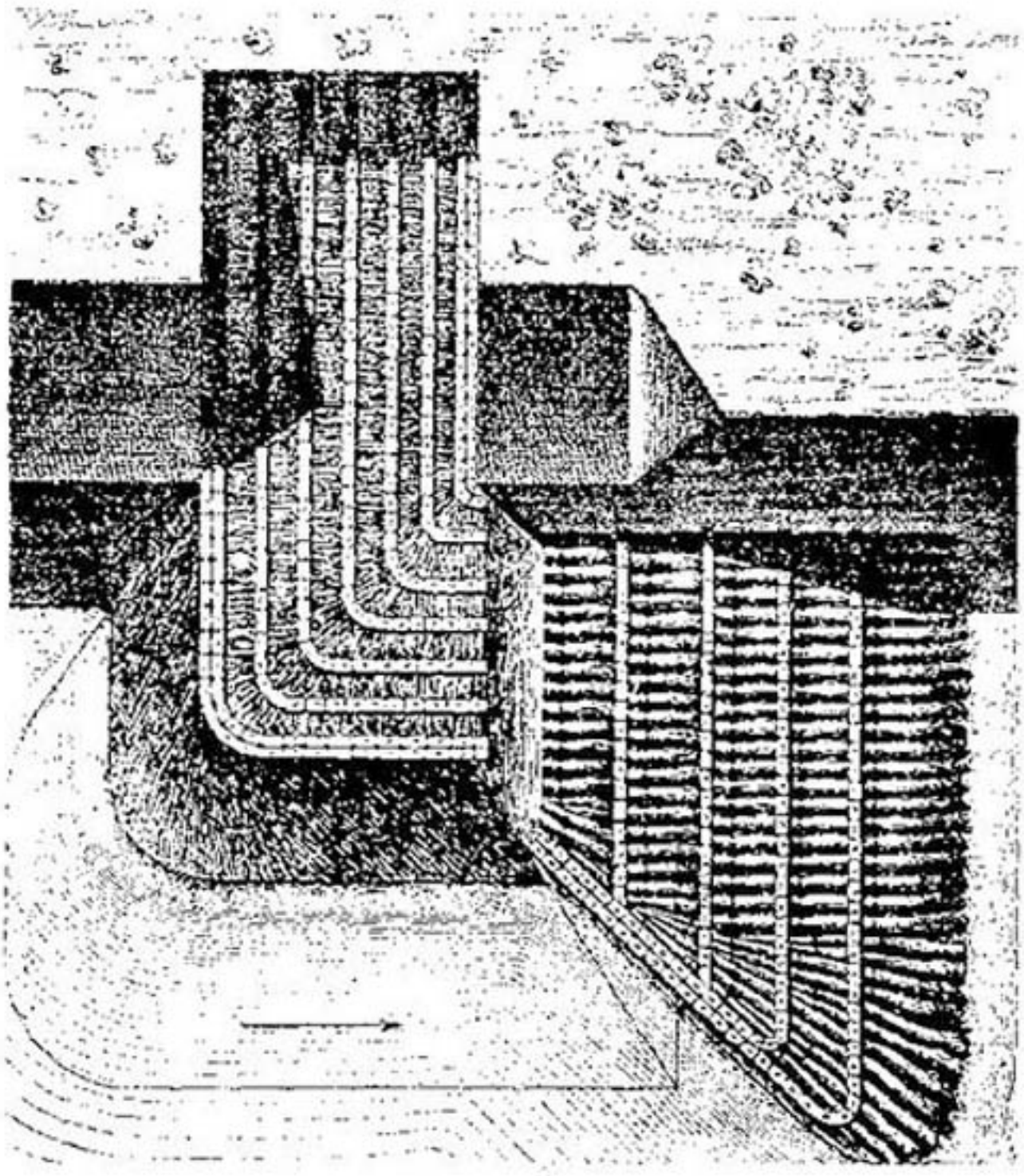


Рис. 116. Расположение веерной кладки в угле сопряжения опояски берега с ее корневой частью.

степени устойчивости, которую нужно придать сипаю при данных местных условиях. На высоте от основания, равной глубине дна, где придется устанавливать сипай, его ноги скрепляются горизонтальными бревнами такой же толщины, которые также крепко связывают проволокой с бревнами ног сипая. Чтобы эти горизонтальные бревна („обвязка") не скользили по ногам сипая при нагрузке, проволочная обмотка закрепляется на месте железными скобами. В четырехножном сипае (его называют „черпай") для сообщения необходимой жесткости, кроме наружной обвязки прикрепляют таким же способом диагональные

бревенчатые связи. Приготовленный в таком виде сипай притаскивается к берегу, опускается в воду и подводится к месту установки, где устанавливается в вертикальное положение. Вследствие значительной тяжести сипая для его передвижения и установки пользуются троссами и блоками, которые прикрепляются к верхнему и боковым местам скрепления бревен. Для погрузки сипая в требуемом месте на дно реки, кладут на бревнах обвязки поперечные жерди (рис. 118), связывая их с обвязкой и друг с другом так, что образуется из них редкая решетка. Засим начинается так называемая сипайная кладка: на упомянутую решетку кладется слой (толщиною 1—1,2 *м.*) хвороста, который иногда связывается для этой цели в пучки или снопы; хворост сверху покрывается слоем соломы, чтобы через хворост не проваливался камень, а по соломенной настилке производится нагрузка из камня слоем 15—30 *см.* (рис. 119). Под влиянием нагрузки и размыва дна течением, усиливающимся под прогнувшейся решеткой, ноги сипая постепенно углубляются в дно, сипай вместе с первым рядом сипайной кладки садится и, когда кладка станет погружаться в воду, начинают делать второй ряд кладки, предварительно покрыв первый ряд кладки соломой, на которую кладется слой хвороста, засим кладется слой соломы, на ней камень и так продолжают загрузку, пока ноги сипая настолько углубятся в грунт, что первый ряд кладки ляжет на дне. Рядом с первым сипаем устанавливается второй сипай (рис. 120), который загружается в том же порядке, как и предыдущий, а для соединения кладки обоих сипаев в одну сплошную, между смежными сипаями промежуток заполняется кладкой в таком же порядке, как выполняется кладка в сипаях, причем для образования решетки между сипаями жерди

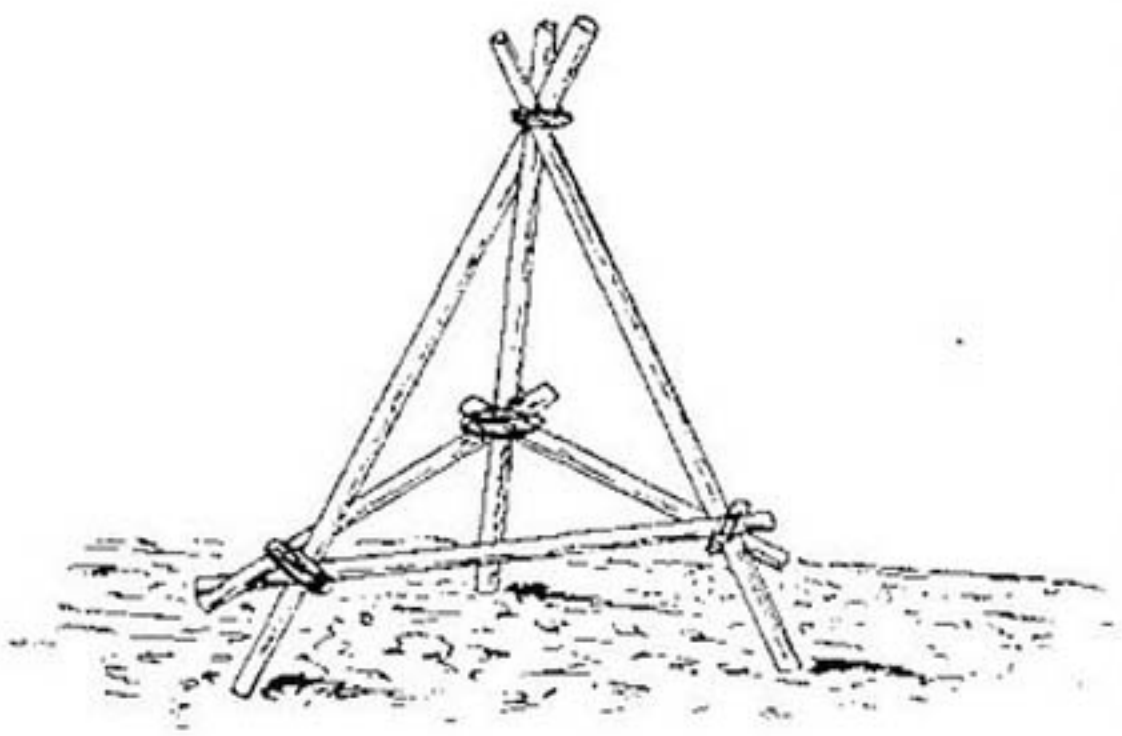


Рис. 117-*a*. Трехножный сипай.

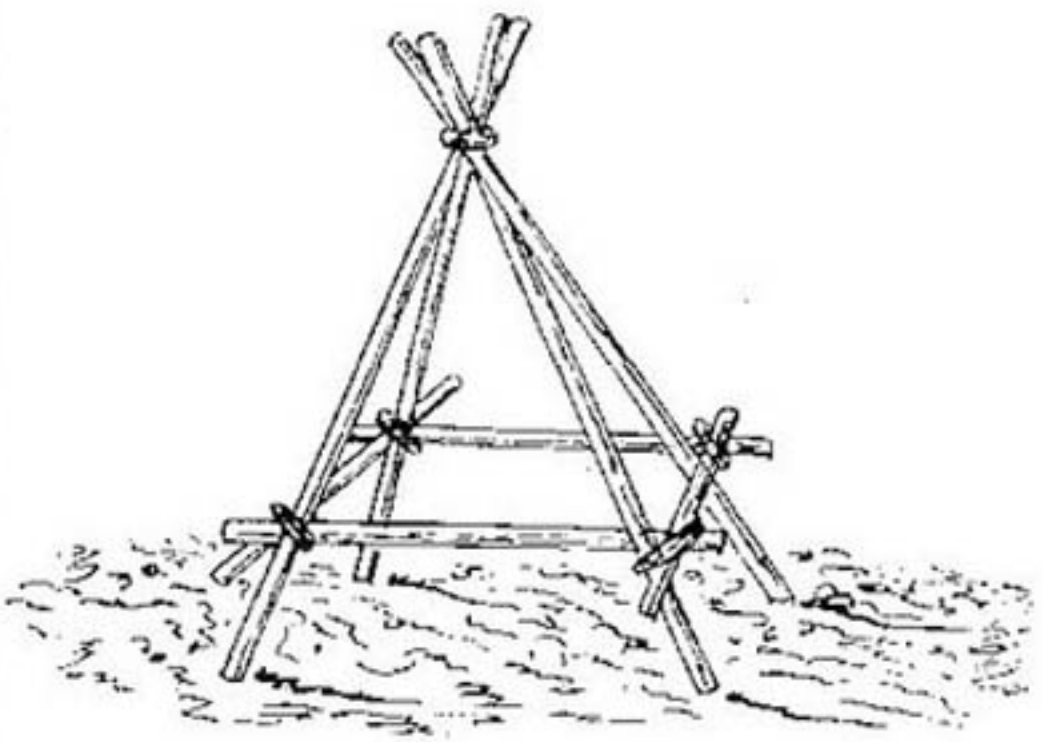


Рис. 117-*b*. Четырехножный сипай.

сипайной решетки выдвигаются настолько, чтобы они перекрывали междусипайный промежуток, или же при погружении первого сипая к его обвязке привязываются жерди, другой конец которых прикрепляется к обвязке второго сипая, и загрузка второго сипая производится одновременно с загрузкой междусипайной решетки. Таким

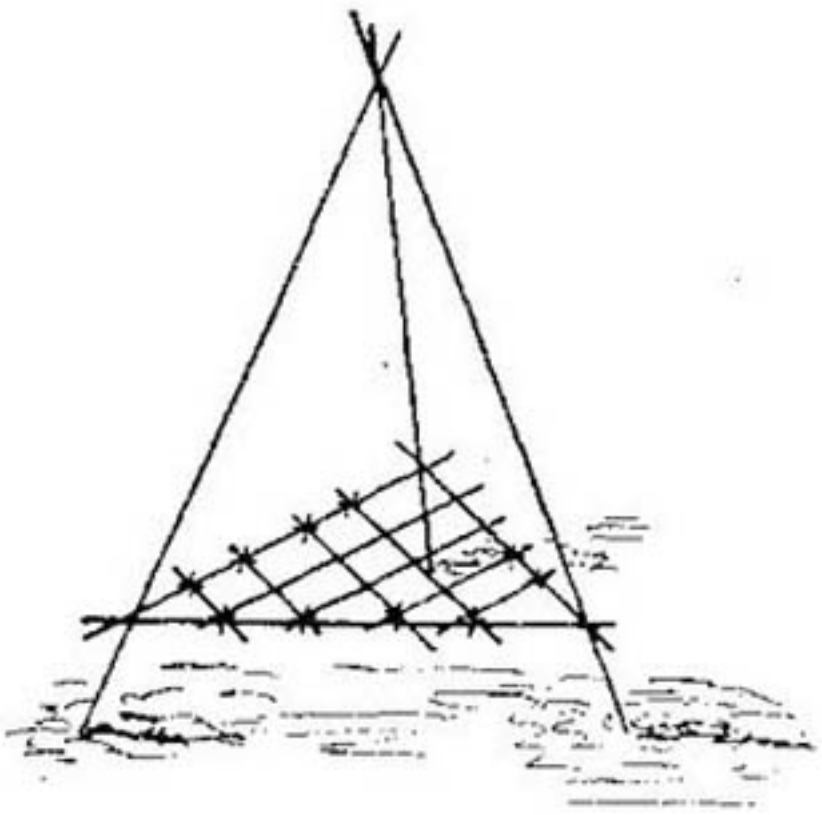


Рис. 118.

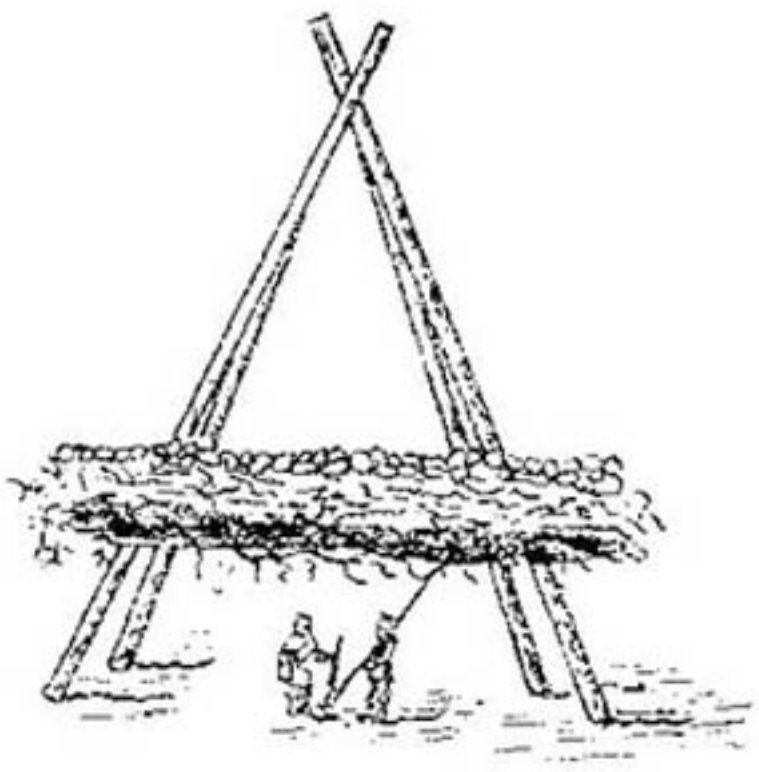


Рис. 119.

способом можно вывести сипайное сооружение на любую длину, равно как сделать его шириною не в один, а в два и более рядов сипаев. Постройка сипайного сооружения может происходить при больших

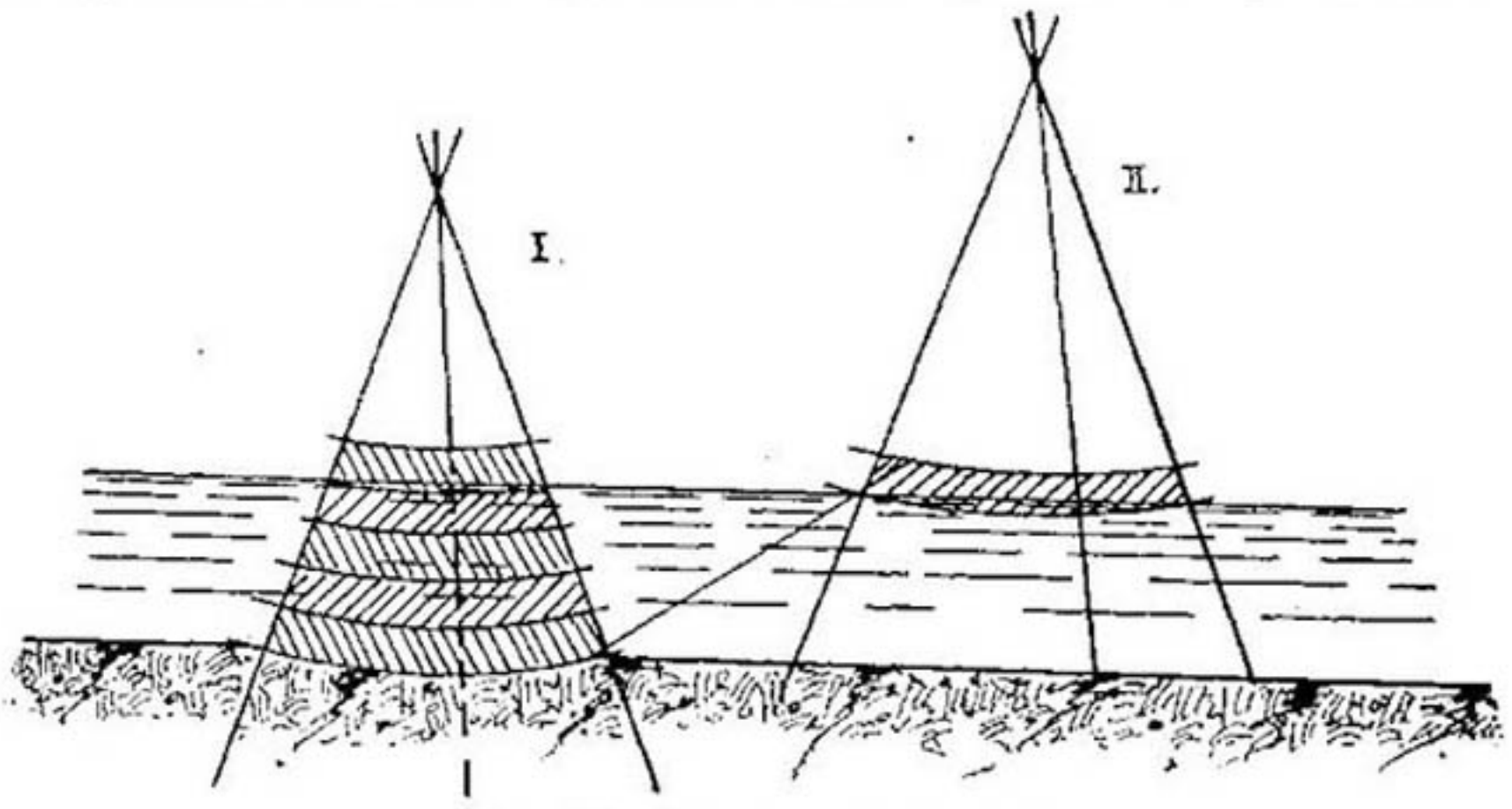


Рис. 120. Установка двух сипаев.

скоростях течения. Она выполняется очень быстро, что имеет большое значение в случаях, когда требуется возвести сооружение в очень короткое время, например при защите размывающегося берега, при запружении рукава реки и т. п. О применении сипайных работ для регуляционных сооружений сказано далее (§ 33).

§ 32. Укрепление берегов.

Берегоукрепительные работы предпринимаются для самых разнообразных целей. Они являются одними из важнейших работ при регулировании рек, в них встречается надобность для сохранения прибрежных ценных земель и для предохранения от разрушения возведенных на берегу строений. Берегоукрепительные устройства входят в состав различных возводимых на реке или на ее берегах сооружений, как то: мостов, плотин, шлюзов и проч.; в местах нагрузки и выгрузки судов требуется укрепить береговые откосы для удобства грузовых операций и т. п. Но, какова бы ни была цель берегоукрепительного устройства, оно должно быть соображено со свойствами русла и течения реки в данном ее месте, а также с условиями, в которых находится укрепляемый берег в отношении очертания его в плане и поперечных профилях, в отношении качеств грунта, из коего состоит берег, в отношении движения грунтовых вод и других обстоятельств, могущих влиять на устойчивость берега.

Мы видели (§ 9), что естественно разработавшееся русло реки имеет в плане извилистую форму и что каждый его берег состоит из сопрягающихся между собою кривых, обыкновенно обратного очертания, так, что вогнутости и выпуклости берега чередуются друг за другом. Стрежень реки приближается к вогнутому берегу и, под влиянием течения, размыву подвергается обыкновенно вогнутый берег, между тем как вдоль выпуклого берега нарастают наносы. Поэтому укреплять приходится преимущественно вогнутые берега, которые, к тому же, имеют более крутые откосы вследствие их подмыва. Разрушение выпуклых берегов случается сравнительно редко: оно происходит главным образом или под влиянием течения высоких вод, если направление последних не совпадает с направлением меженнего течения, или же вследствие сползания слоев высокого берега под влиянием грунтовых вод. Что касается очертания вогнутого берега, то, как выше указывалось, при правильной естественной разработке речного русла очертание его берега представляет собою кривую линию с постепенно меняющимся радиусом кривизны от бесконечного, в местах сопряжения вогнутости с выпуклостью или с прямолинейным соседним участком, до наименьшей величины радиуса в точке вогнутости, находящейся несколько ниже по течению от середины длины вогнутого берега. Такая форма кривой вогнутого берега наблюдается обыкновенно на более устойчивых участках реки и, как естественно выработавшаяся, она более других форм соответствует наилучшим условиям восприятия вогнутым берегом действующих на него сил текущей воды. Поэтому такое очертание в плане нужно придавать и линии искусственно укрепленного берега. Линии, имеющей непрерывное плавное изменение радиусов кривизны, соответствует синусоида, но на практике при вычерчивании на плане проектируемого очертания берега более удобным является нанесение

линии по изгибу упругих линеек, так как форма такой линии тоже отвечает упомянутому условию непрерывного изменения радиусов кривизны. Практически нанесение на план такой линии удобно выполнить следующим способом (рис. 121). Если, например, для участка реки на протяжении смежных вогнутой и выпуклой частей берега заданы направления касательных прямых *ao*, *om* и *nh* в точках (или коротких прямолинейных вставках), где вогнутость берега переходит в выпуклость, и если для вогнутой и для выпуклой частей берега даны еще положения точек *e* и *f*, в которых означенные кривые имеют минимальный радиус кривизны, то закрепивши шпильки в заданных точках *a* и *b*, *c*, *d* и *e*, устанавливают упругую линейку между этими шпильками так, чтобы она свободно опиралась на шпильки, и по линейке вычерчивают ее упругую линию. Засим таким-же способом

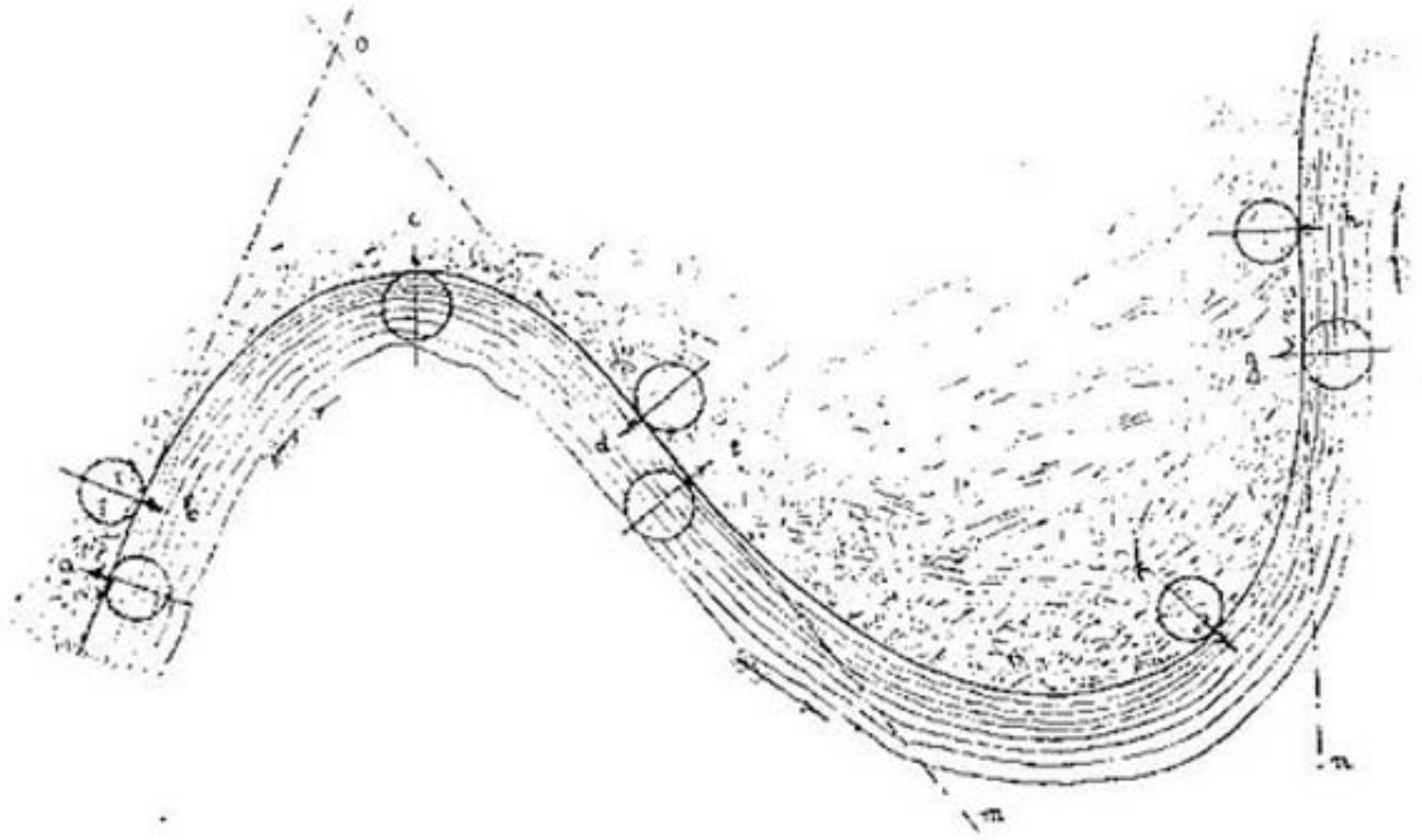


Рис. 121. Начертание линии берега по изгибу упругой линейки.

вычерчивают линию по точкам *d* и *c*, *f*, *g* и *h*. Проведенная линия принимается за очертание берега. В качестве линейки пользуются обыкновенно или китовым усом, или же тонкой и узкой стальной пластинкой, поставленной на ребро.

Размыв берега происходит иногда равномерно с сохранением правильного очертания в плане. В таком случае, чтобы предохранить берег от нежелательного дальнейшего размытия, достаточно лишь закрепить существующее очертание берега помощью соответствующих берегоукрепительных устройств. Чаще, однако, бывает, что размыв сосредоточивается преимущественно в одном месте, обыкновенно на месте наиболее крутой части извилины, или что, вследствие неоднородного качества грунта и по другим причинам, размыв распространяется по берегу вообще неравномерно, так что его очертание принимает неправильную форму с резкими перегибами, впадинами и выступами.

В таких случаях при укреплении берега нужно восстановить правильное очертание его в плане, а потому берегоукрепительные сооружения приходится в некоторых местах выдвигать в реку от существующей линии уреза воды (рис. 122), как бы устраивая искусственный берег помощью уширения сих сооружений, или же устраивая их в виде дамбы с засыпкой промежутка между дамбой и берегом. К подобному же способу возведения берегоукрепительных сооружений приходится прибегать и в тех случаях, когда требуется смягчить крутизну извилины вогнутого берега (рис. 123).

При регулировании реки с целью улучшения судоходных условий берегоукрепительные сооружения входят в состав выправительных сооружений. В таких случаях очертание в плане берегоукрепительных сооружений должно соответствовать выправительной трассе и потому оно находится в зависимости от расположения выправительных сооружений. При этом приходится иногда укреплять и такие участки берега, которые еще не подверглись размыву, но которые нужно

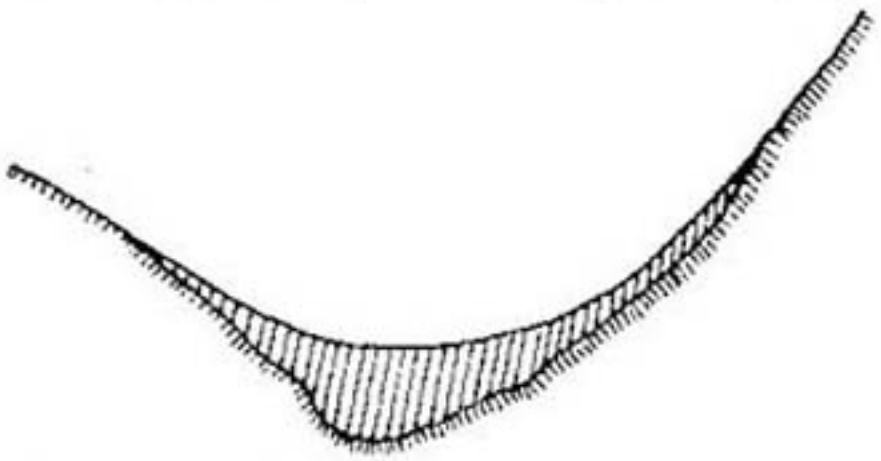


Рис. 122. Исправление неправильного очертания берега помощью выдвинутой в реку берегоукрепительной дамбы с засыпкой земли позади дамбы.

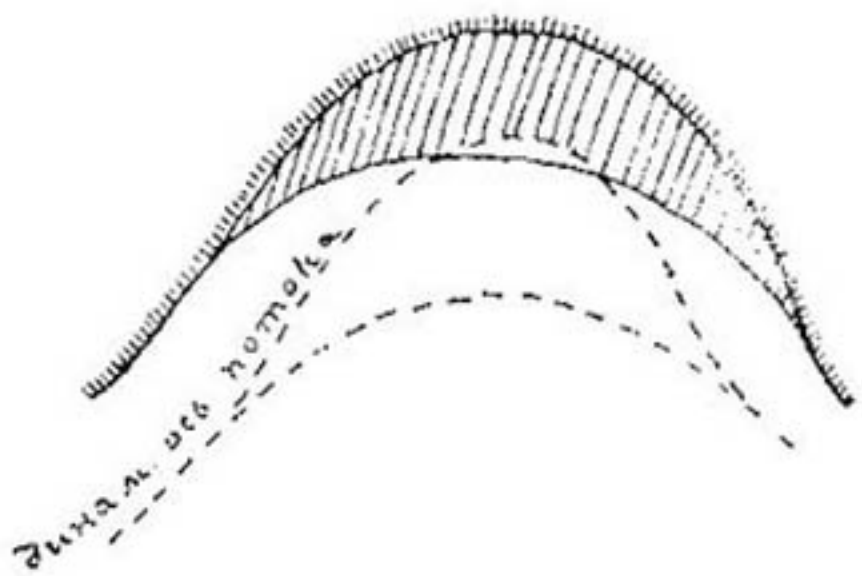


Рис. 123. Смягчение крутой извилины вогнутого берега помощью берегоукрепительных сооружений.

укрепить с целью сохранения существующего их очертания, имея в виду, что под влиянием других регуляционных сооружений изменятся условия действия речного течения на укрепляемый участок берега. Наконец, при регуляционных работах тот или иной участок берега может приобрести и активную роль, в смысле воздействия на направление течения и отклонение динамической оси потока, а потому очертание и прочность берегоукрепительных устройств на сем участке берега должны отвечать новой его роли.

При укреплении размывшегося берега необходимо распространить береговое укрепление на такое протяжение в обе стороны от места происшедшего размыва, чтобы концы берегового укрепления находились в местах, не подверженных размыву. В противном случае берегоукрепительные работы не обеспечат преследуемую ими цель, как бы ни был прочен самый тип берегоукрепительного сооружения. Концы, где берегоукрепительная одежда сопрягается с естественной поверхностью берега, и где, следовательно, речное течение встречает не

одинаково прочную поверхность и не одинаковое сопротивление движению воды, являются местами опасными, в особенности верховой конец укрепления, так как в случае размыва берега в сем месте течение начинает расстраивать береговую одежду и, заходя за нее, может проложить себе путь позади берегоукрепительного сооружения. Поэтому оба конца берегового укрепления должны находиться на более прочных грунтах, а с целью лучшего предохранения от обхода течением концы берегового укрепления полезно обделать в виде корней, достаточно глубоко запущенных в берег (рис. 124).

В поперечном профиле береговые укрепления следует по возможности приспособливать к естественно устойчивым прямолинейным откосам берега. Если в местах размыва берег получил очень крутые откосы, не свойственные естественно устойчивому откосу грунта, из которого состоит берег, то расположенная на таком откосе искусственная береговая одежда не будет иметь надежного основания, так как грунт под нею может сползать. Поэтому в части берега, находящейся

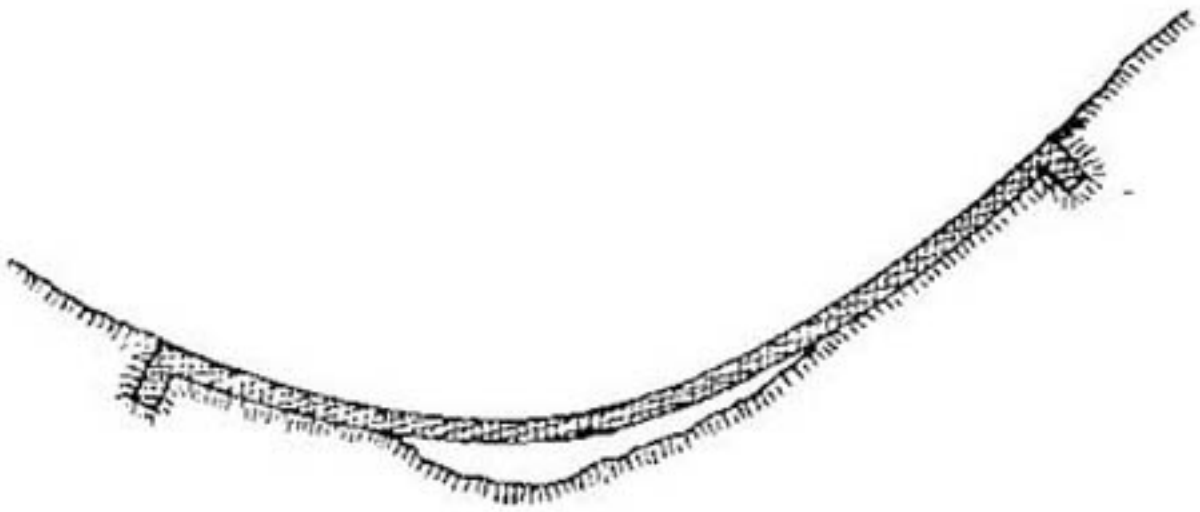


Рис. 124. Корни берегового укрепления.

над уровнем низких вод, размытые береговые откосы следует предварительно устройства здесь береговой одежды спланировать достаточно пологим откосом, крутизна которого в зависимости от качества грунта обыкновенно определяется полуторным или двойным заложением. В подводной же части крутые размывы берега заполняются фашинным, каменным или иным неразмываемым материалом. При этом поверхности подводного берегового укрепления следует придавать более или менее пологие прямолинейные уклоны, чем облегчается конструкция берегоукрепительной одежды и ослабляется размывающее действие течения на дно около подошвы одежды. В зависимости от типа берегового укрепления откос его поверхности делается обыкновенно от одиночного до двойного, а в подводной части иногда еще более пологий. Если требуется укрепить берег на большую высоту над уровнем низких вод, то для придания одежде большей устойчивости полезно делать на уровне нормальных меженних вод узкую (0,5—1,0 м.) горизонтальную или слабо наклоненную берму.

Способы укрепления берега и применяющиеся типы берегоукрепительных устройств находятся в зависимости как от причин разруше-

нпя берега и от назначения берегового укрепления, так и от положения укрепляемого места берега относительно уровня воды в реке. В последнем отношении можно различать три зоны по высоте берега (рис. 125). Нижняя часть, покрытая меженными водами, наиболее длительно подвергается действию течения, причем до уровня низких вод берег всегда находится под водой, а в пределах колебания меженних горизонтов обнажается на короткое время. В этой части берега почва пропитана водой, растительность не может приниматься и берег под действием течения подвергается наибольшим подмывам. В средней части берег затопляется периодически, причем во время затопления вода проникает в почву берега, а после спада горизонта почвенная вода энергично вытекает, вызывая обрушение берегового откоса в местах, где он имеет крутые уклоны. В пределах высоты средней части берега

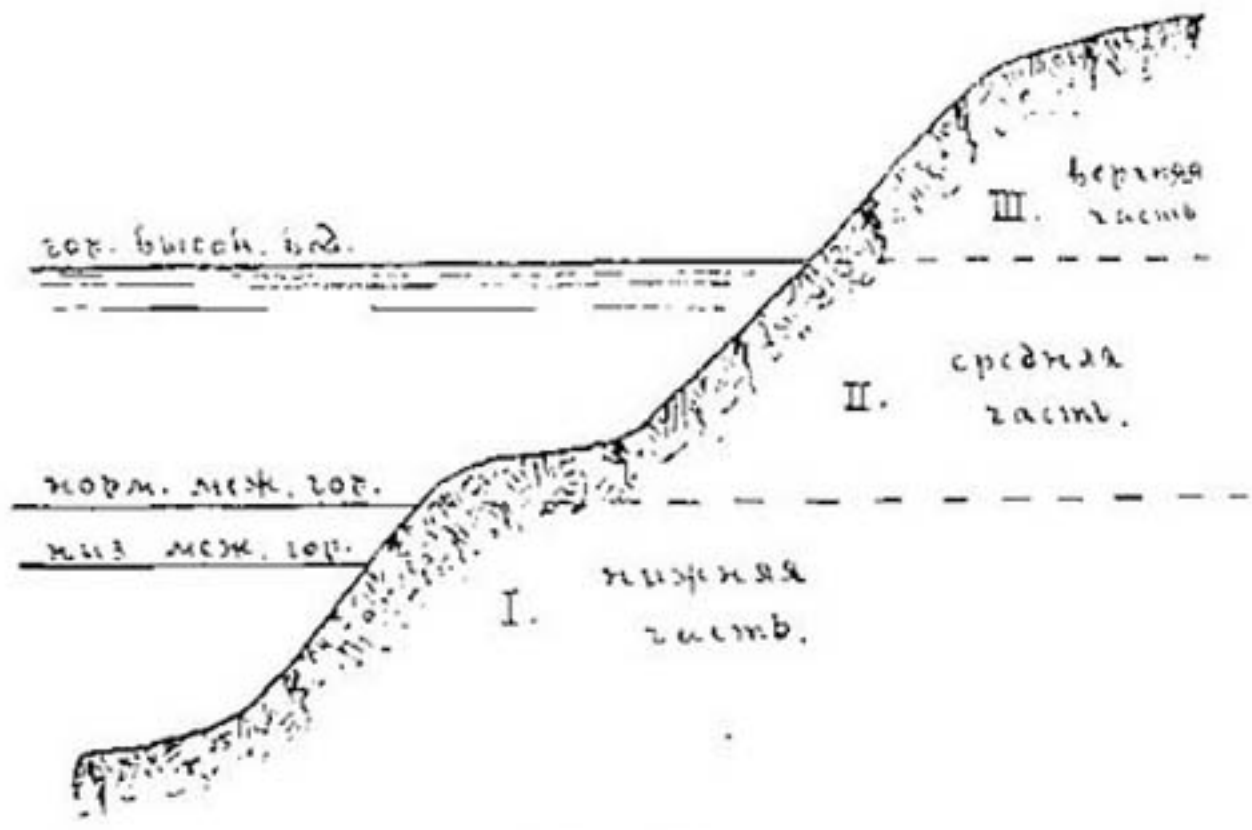


Рис. 125.

происходит на разных уровнях ледоход, который также повреждает берега. Но растительность легко принимается в этой части берега, начиная с уровня („горизонт растительности“) несколько высшего нормального меженнего горизонта, что имеет очень важное значение, так как растительность сообщает поверхности берега большее сопротивление размывающему действию речного течения. Наконец, верхняя часть берега, вовсе не затопляющаяся рекою, находится в обычных условиях естественных сухих земляных откосов. Повреждения берега в этой его части могут происходить под влиянием реки в том случае, если она настолько размыла берег в нижележащих частях, что верхняя часть берегового склона, потерявши свою опору внизу, начнет обрушиваться и сползать. Восстановление и укрепление берега в нижней и в средней частях устранит причину подобных повреждений в верхней части берега. Другие же причины повреждения верхней части берега не имеют прямого отношения к реке и происходят обычно от стока дождевых и снеговых вод, от движения и выхода на поверх-

ность грунтовых вод, под влиянием мороза и других атмосферных факторов, по причине отаптывания откосов животными и людьми и проч. Способы предохранения откоса берега от повреждения по таким причинам не отличаются от способов, обычно применяющихся в подобных случаях, и заключаются, преимущественно, в устройстве нагорных канав для отвода стекающей воды по поверхности откоса в ближайшие впадающие в реку овраги и ручьи, или же в отводе этих вод по укрепленным лоткам на береговом откосе непосредственно в реку, в устройстве дренажа для отвода грунтовых вод, в укреплении поверхности откоса засевом травы и посадкой растений и проч.

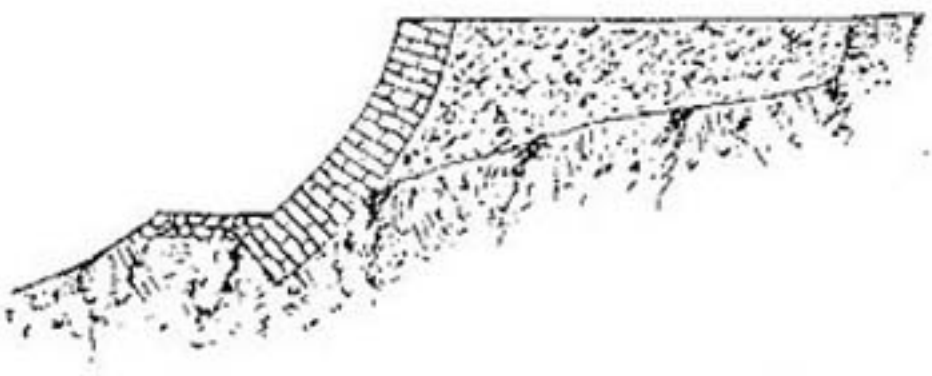


Рис. 126. Укрепление берега правильной каменной кладкой по вогнутой поверхности.

Не останавливаясь, поэтому, на способах укрепления берега в верхней части, обратимся к рассмотрению типов берегоукрепительных устройств в зонах непосредственного действия речного течения.

Конструкция этих устройств состоит преимущественно из каменных и фашинных материалов. Береговые укрепления, построенные только из одного каменного материала, встречаются преимущественно в местностях, где имеется в изобилии подходящий камень и где трудно доставать хворост, пригодный для фашинного материала. Употребление в берегоукрепительных устройствах каменного материала вместе с фашинным представляет во многом значительные удобства и выгоды, почему береговые укрепления такого смешанного типа встречаются наиболее часто. В зависимости от преобладания того или иного материала мы будем, в дальнейшем, относить типы сооружений, составленных из обоих материалов, либо к типу каменных, либо к типу фашинных и хворостяных береговых укреплений.

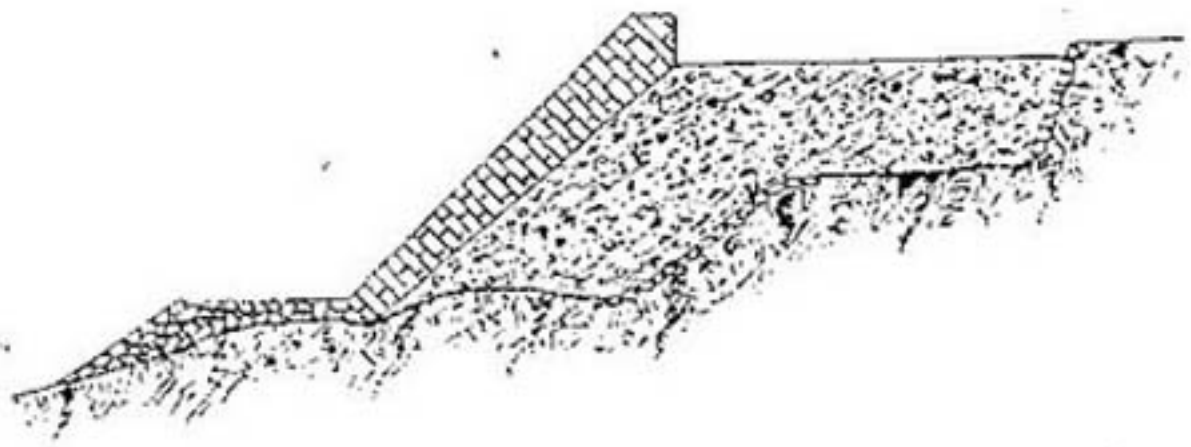


Рис. 127. Укрепление берега правильной каменной кладкой в виде откоса.

Камень употребляется в береговых укреплениях в виде правильной кладки камня, в виде мощения и в виде наброски. Первые два вида употребления камня пригодны только для таких частей укрепления, которые обнажаются при низких уровнях воды в реке, в подводных же частях применяется только набро́ска камня („накидная кладка"). В зависимости от породы камня он теряет в воде бо́льшую или меньшую часть своего веса; так, например, гранитный камень теряет

в воде только 30% своего веса, а известняк около 45—50%. Поэтому для подводных частей предпочтительно употреблять твердые породы камня с большим удельным весом. Наружные части каменной отсыпи, подверженные действию течения и ледохода, следует составлять из крупных камней; напротив, в нижние слои наброски, если они лежат непосредственно на песчаном или земляном грунте, следует употреблять по возможности мелкий камень, чтобы ослабить размывающее действие струй воды, проходящих через тело каменной наброски.

Правильная кладка камней в береговых укреплениях применяется редко, так как она обходится дорого и требует весьма прочного основания под кладку. Такая кладка встречается в укрепленных берегах реки в пределах городов или при устройстве прибрежных мощеных проезжих дорог. На рис. 126 и 127-м показаны такие заливаемые при высоких водах укрепления берега в некоторых местах на р. Рейне.

Переходя к описанию типов береговых укреплений, рассмотрим сначала способы укрепления подводной части берега, а засим в пределах колебания уровня.

Укрепление подводных откосов берега. Простейший тип каменного берегового укрепления показан на рис. 128-м. Он состоит из каменной наброски. В зависимости от скорости течения, глубины воды и крупности камня, подводному откосу каменной наброски придаются уклоны от 1:1 до 1:2. Толщина наброски по верху должна быть не менее 0,5—1,0 *м.* для предохранения от размыва грунта и для надлежащего упора надводной одежды берега. Своевременное выполнение работы по укреплению берега, где начались размывы, имеет большое значение, так как начавшийся размыв может быстро увеличиться и в случае промедления в приступе к работам потребуется значительно увеличить об'ем призмы каменной наброски, чтобы сохранить на требуемом месте береговую линию уреза воды. Ввиду этого обстоятельства на некоторых реках Баварии успешно применялся следующий оригинальный способ, так сказать, автоматического выполнения работы по предохранению от размыва берега далее заранее определенной береговой линии (рис. 129 и 130). Вдоль берега, где можно ожидать сильное развитие размывов, пока еще не дошедших до предельного допустимого профиля берега, изображенного на рисунке пунктирной линией, укладываются штабели камня прямоугольной формы (рис. 129). Расположение и об'ем штабеля определены с таким расчетом, что,

Рис. 128. Укрепление берега призмой каменной наброски.

когда размыв дойдет до него, то штабель обрушится и камень придет в состояние отсыпи, форма которой приблизительно соответствует проектному очертанию теоретического профиля укрепленного берега.

Если каменное береговое укрепление требуется значительно выдвинуть в реку, то для экономии, а именно с целью уменьшить количество камня в наброске, ядро подводной части берегоукрепительного сооружения заполняется мелким камнем, хрящем или гравием, как показано на рисунке 131-м. При исполнении работ прежде всего делается у подошвы предположенного укрепления каменная наброска в виде подводной дамбы треугольной или трапецоидальной формы в поперечном сечении. Под защитой этой дамбы насыпается хрящ или гравий в ядро, которое засим одевается с речной стороны каменной наброской до проектного профиля укрепленного берега. Если глубина воды большая, то постепенно делается несколько. по высоте, защитных призм из каменной наброски, всякий раз с засыпкой хрящем промежутка между призмой каменной наброски и откосом размытого берега так, что береговое укрепление в надводной части принимает вид, изображенный на рис. 132-м.

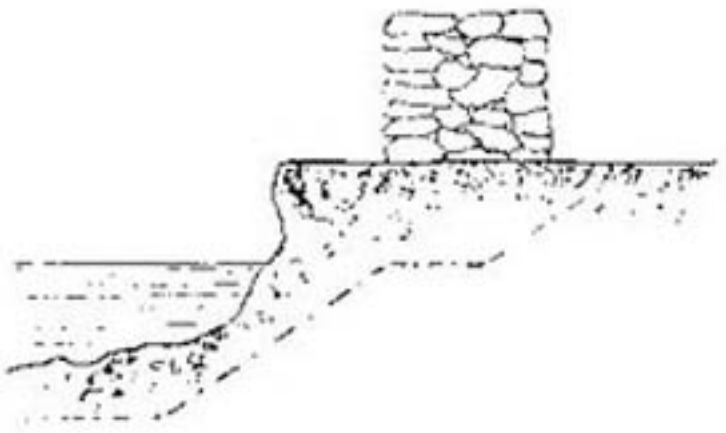


Рис 129.

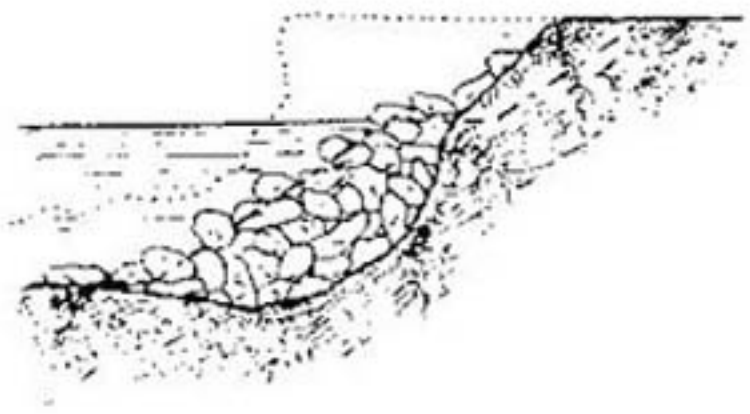


Рис. 130.

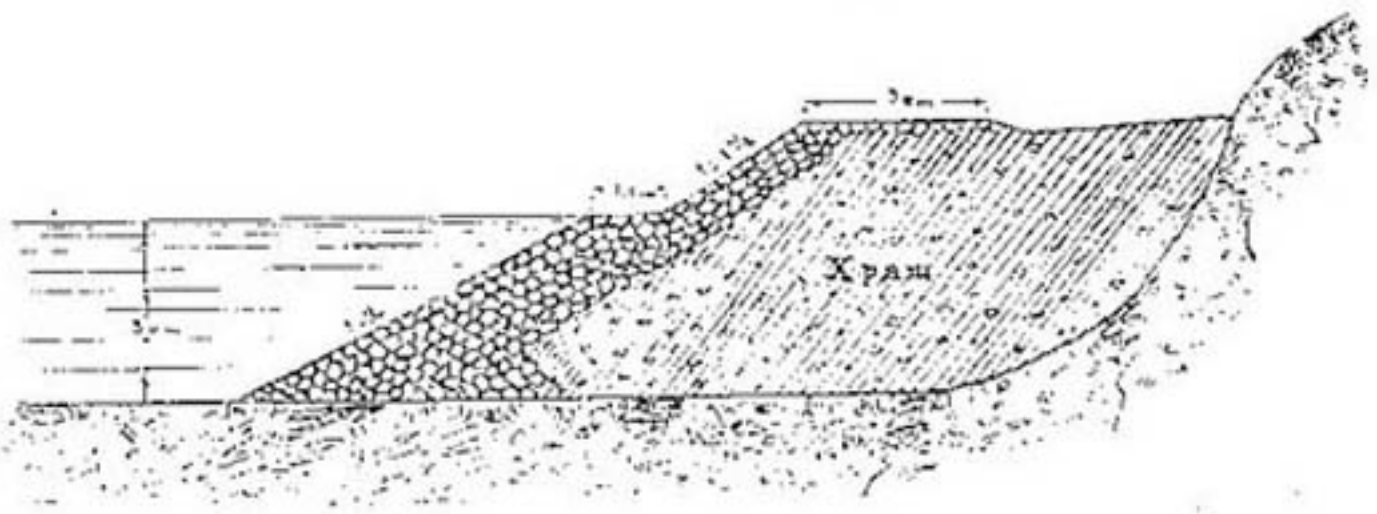


Рис. 131. Укрепление берега каменной наброской с ядром из хряща.

Каменный материал может быть употреблен для береговых укреплений в виде кладки габионов, вышеописанных в § 31-м. Кладка габионов делается в виде ступенчатой стенки с засыпкой за стенкой гравия или иного мелкого материала, причем береговое укрепление получает с лицевой стороны вид, показанный на рис. 133-м, представляющем фотографию берегового укрепления, устроенного таким способом. Нижний ряд кладки делается из низких габионов, широко вы-

ступающих в сторону реки, а так как такой габион может сгибаться, то выступающие части габионной плиты основания в случае подмыва грунта сгибаются, продолжая прикрывать дно и не расстраивая верхней части габионной кладки, как это пояснено схемой, изображенной на рис. 134-м.

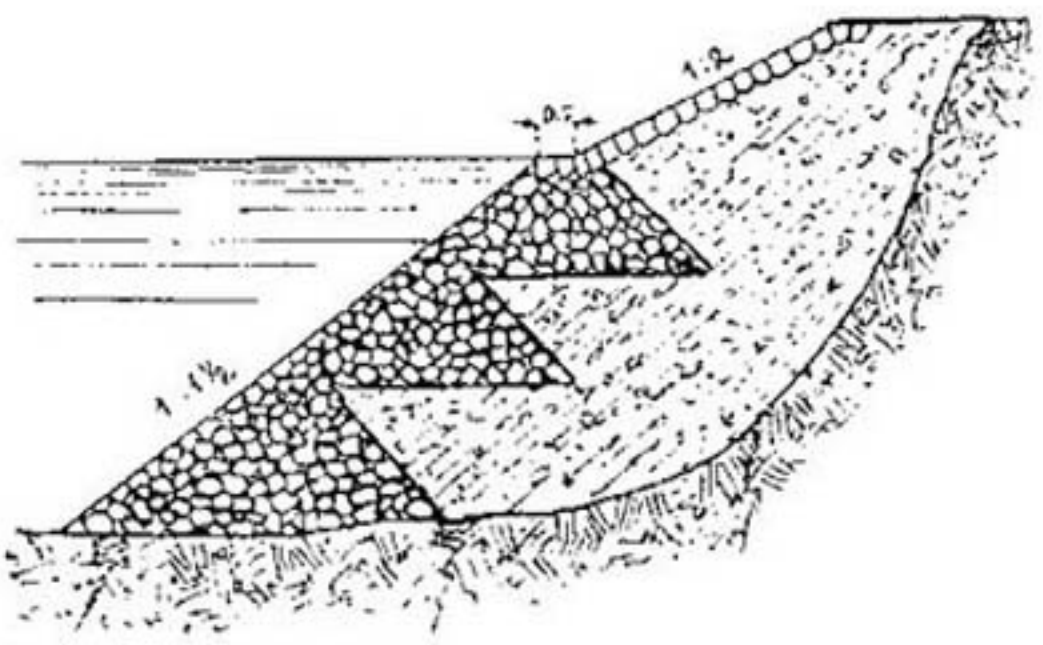


Рис. 132. Укрепление берега призмами каменной наброски с заполнением ядра хрящем.

Если дно реки около укрепляемого берега состоит из мелкопесчаного грунта, легко размываемого течением, или из слабого илистого грунта, то подошва каменной наброски берегового укреп-

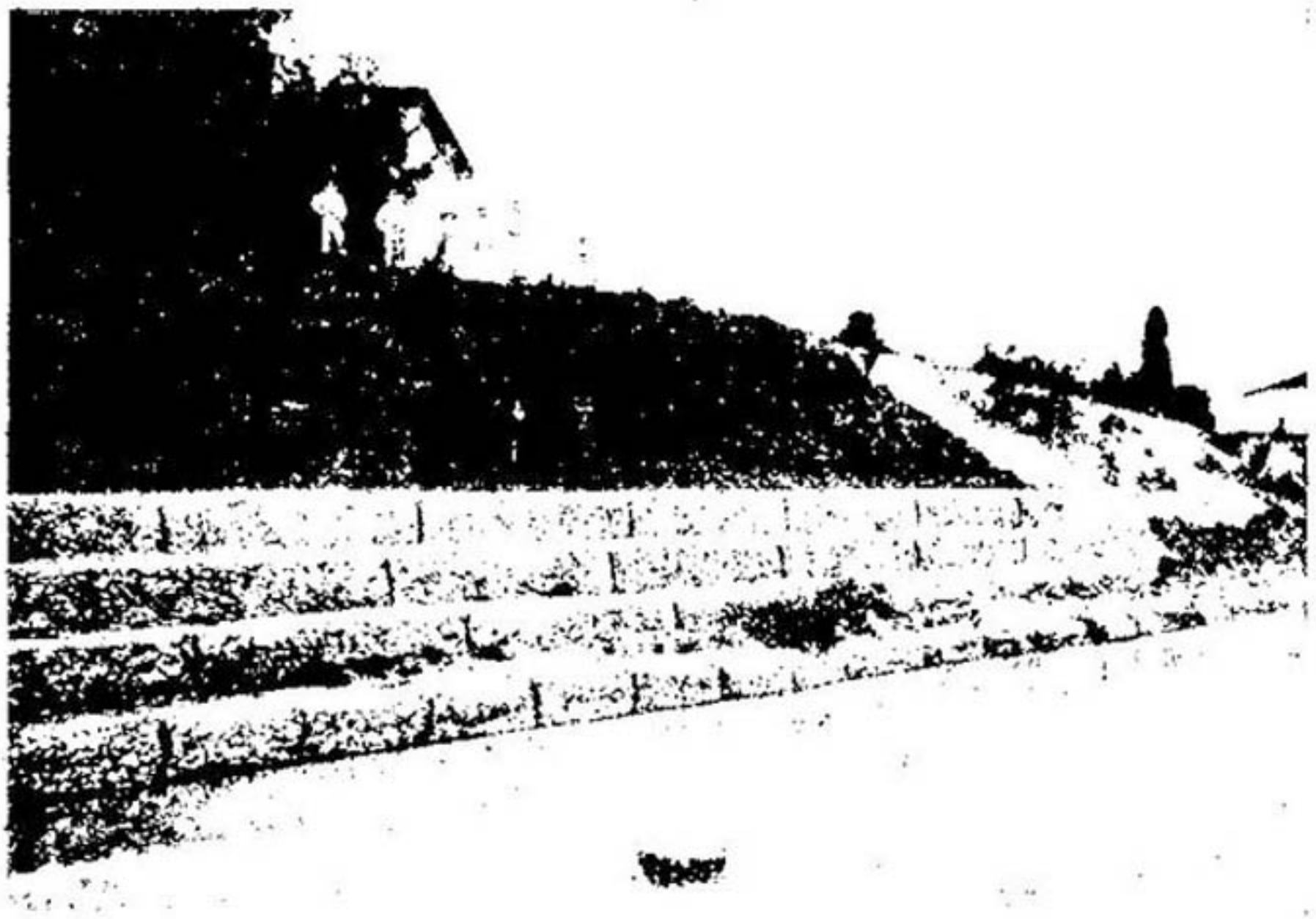


Рис. 133. Береговое укрепление, построенное из кладки габионов.

ления, зарываясь в грунт, осаживается и расстраивает укрепление. В таких случаях полезно, при наличии хвороста, положить под подошву каменной наброски фашинный тюфяк, широко выступающий в сторону реки. На рис. 135-м, изображающем конструкцию одного из береговых

укреплений на р. Днепре, построенных из каменной наброски, показана тюфячная защита подошвы откоса каменной наброски и прилежащей полосы дна река.

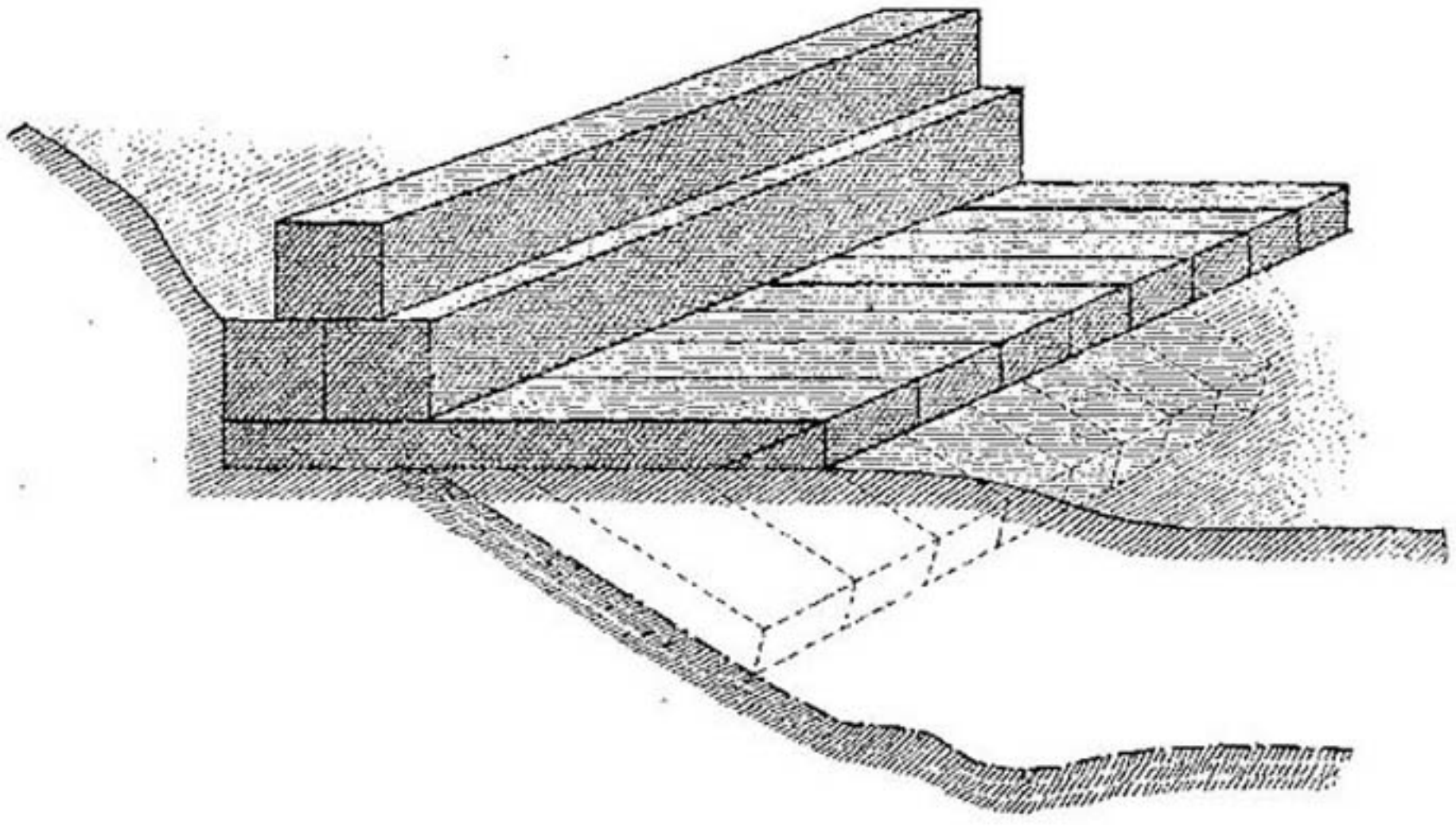


Рис. 134. Кладка из габионов в берегоукрепительных сооружениях.

Фашинные укрепления подводной части берега большею частью представляют собою или вид покрывала откоса фашинными тюфяками, или же вид примкнутой к берегу дамбы, составленной из кладки

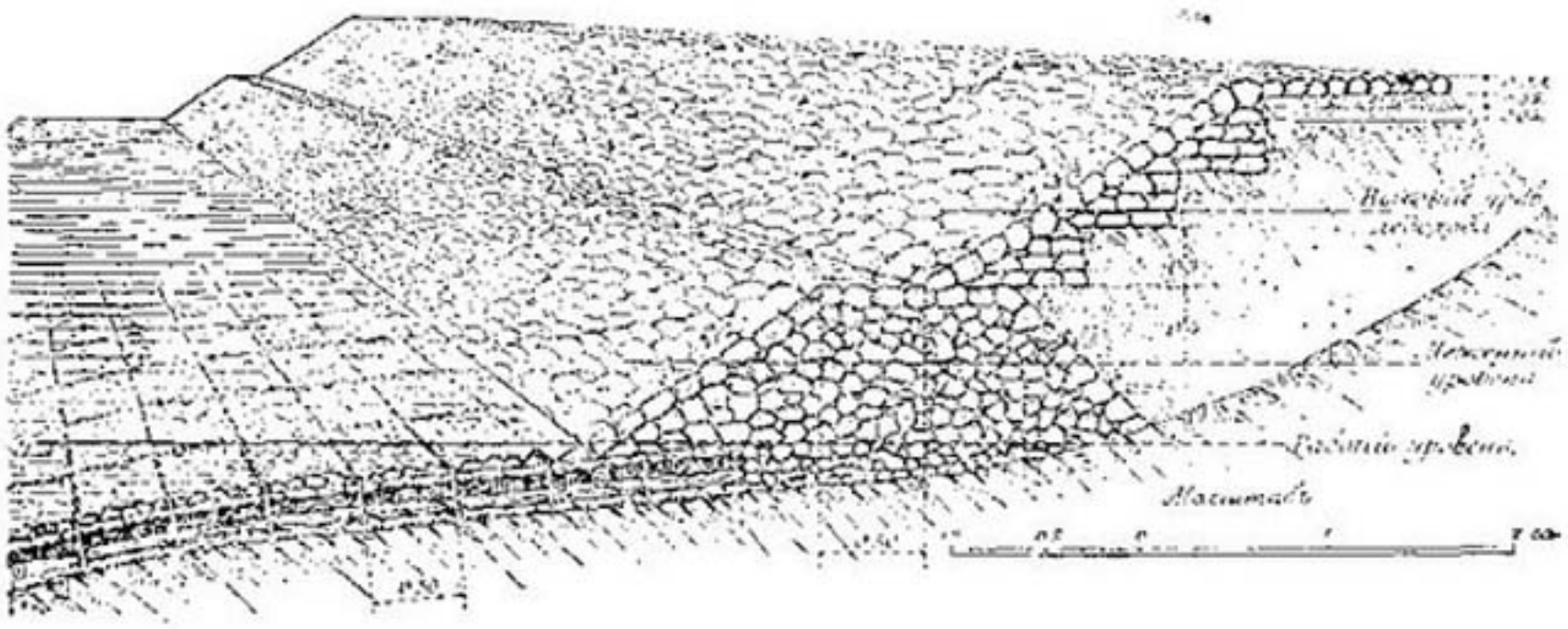


Рис. 135. Укрепление берега призмой каменной наброски с широким фашинным тюфяком в подводной части.

фашинных тюфяков, которую в некоторых местностях у нас принято называть береговой опоясков. Если подводный откос берега ровный, не слишком крутой и сопряжение откоса с дном реки

тоже пологое, то вся подводная площадь откоса до межеиного горизонта и некоторая полоса дна покрываются одним широким фашинным тюфяком (рис. 136 и 137). Такое сплошное покрытие одним тюфяком откоса, его подошвы и полосы дна делается с тою целью, чтобы, в случае подмыва дна в незащищенном тюфяком месте, не происходило сползания и разрыва покрывала. Ввиду сего при широкой площади покрытия предпочтительно укладывать тюфяки длиною их стороною не вдоль берега, а в поперечном направлении. Если же общая ширина покрытия является слишком большой для одного тюфяка, то, по необходимости, кладут два тюфяка, но в этих случаях нужно принять некоторые меры предосторожности в отношении сопряжения смежных тюфяков. Сопряжение не должно находиться около подошвы откоса. Лучше его располагать на дне реки (рис. 138), а не на откосе (рис. 139). Сопряжение делается в нахлестку, как показано на обоих рисунках, для чего при вязке тюфяков соответствующие их края постепенно, на длину около 1½—2 *м*., утончаются. В таком же

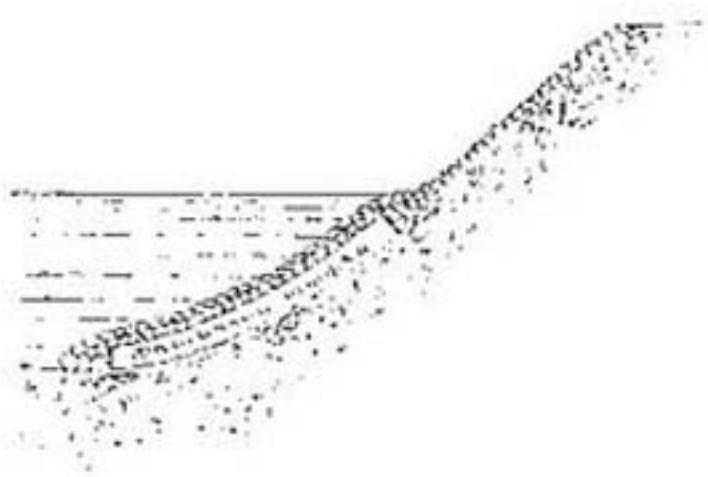


Рис. 136. Укрепление берега фашинным тюфяком.

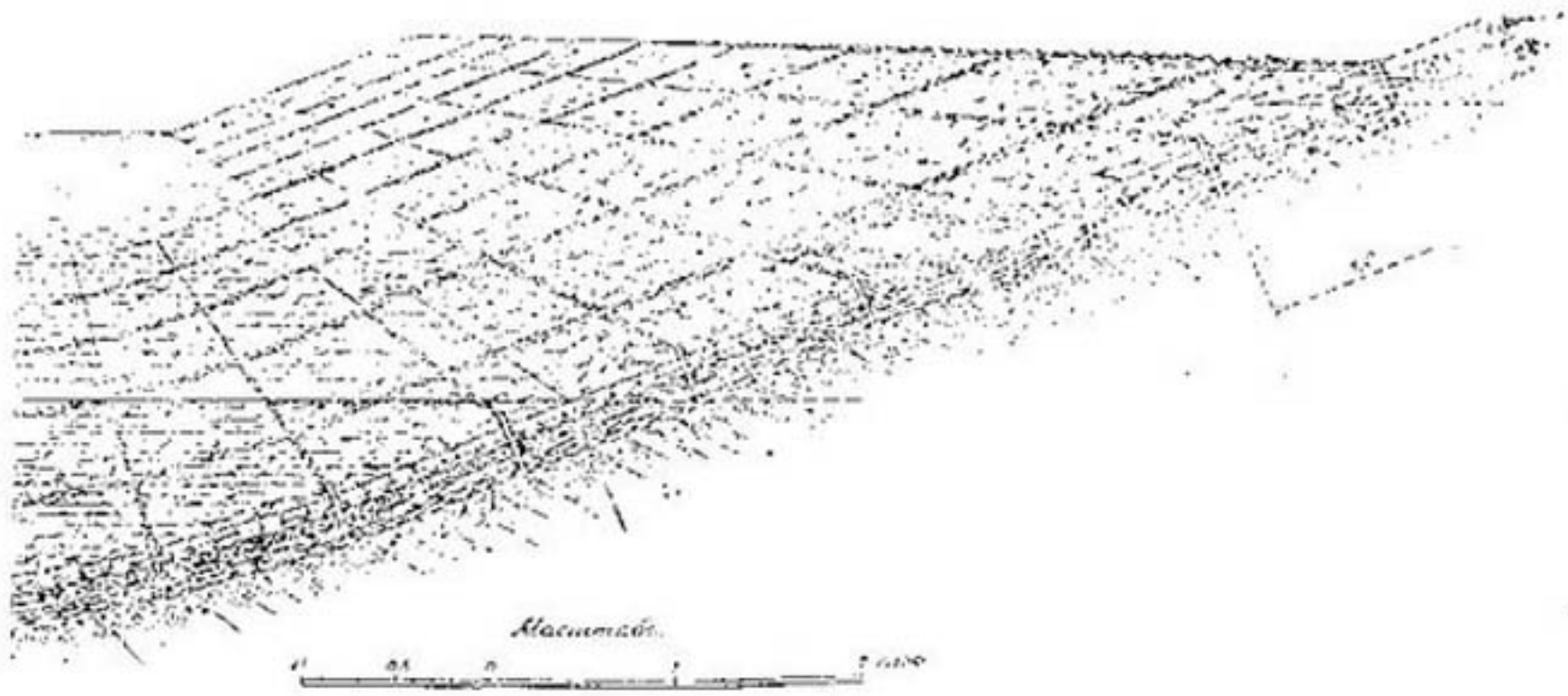


Рис. 137. Укрепление подводного и надводного откоса сплошным фашинным тюфяком.

виде полезно делать сопряжение тюфяков по длине берега, если скорости течения большие; при небольших же скоростях, менее 1,5 *м*. в секунду, можно класть тюфяки в притык. Тюфяки для покрывал делаются обыкновенно по типу тонких тюфяков, если берег не подвержен очень сильному напору речного течения. В некоторых случаях, при слабом течении, для защиты пологих берегов от начинающихся размывов прибегают, по экономическим соображениям, к укладке тю-

фяков не сплошных, а только в виде расставленных на некотором расстоянии тюфячных полос. Такой способ называется ленточным укреплением (рис. 140). Тюфячные ленты делаются шириною от 6 до 15 м.; промежутки между ними следует оставлять шириною, по возможности, не более двойной или тройной ширины ленты. Береговые концы тюфячной ленты возвышаются над уровнем межени и заделываются в грунт. Ленточные укрепления более пригодны для защиты от смыва откосов песчаных отмелей, обнажающихся при низких водах, причем в этих случаях на площадках между лентами делается рассадка лозы.

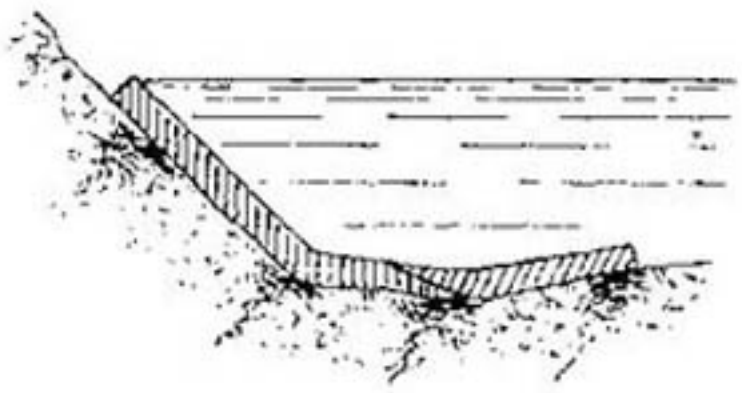


Рис. 138.

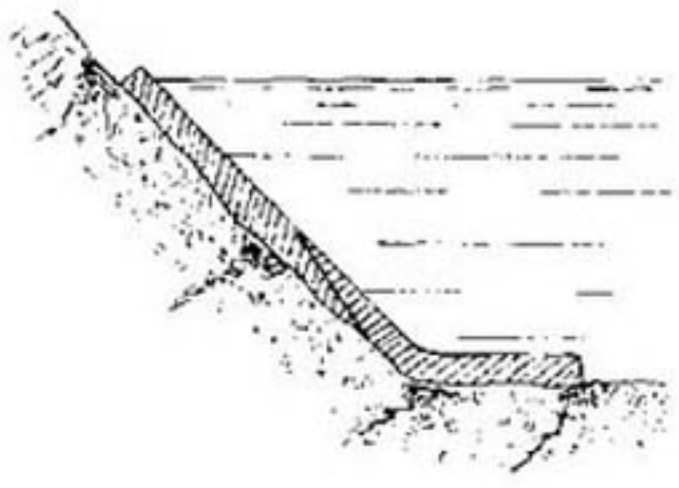


Рис. 139.

Для защиты от размыва пологих широких подводных откосов берега, состоящего из мелко-песчаных и илистых наносов, в Америке на р. Миссисипи применяются вместо фашинных тюфяков легкие плетеные покрывала (маты) в тех случаях, когда скорости течения сравнительно не велики. Устройство таких покрывал показано на рисунках 141 и 142-м. Подобно тому, как при укреплении берега фашинными тюфяками, матами покрывают весь подводный откос и прилежащую полосу дна, выпуская верхний конец на некоторую часть берега выше уреза низких меженних вод. Но мата, вследствие слабой своей конструкции, не может переводиться, как тюфяк, на воде с места изготовления на другое место, а потому вяжется на месте назначения. Мата делается шириною до 40—50 м., а в длину ей может быть дан произвольный размер, так как подобно „бесконечному" тюфяку мата вяжется на наклонном помосте на судне и постепенно спускается на воду на месте погружения ее на подводный откос берега, причем погружение производится посредством наброски на мату камня. Мата плетется в виде сетки из тонких ивовых ветвей, длиною от 3 до 5 и более метров: нижний конец ветки заостряется и на половину длины ветка очищается от листьев и сучьев (рис. 142-*б*). Плетение маты начинается с верхнего ее края, кайму которого составляет длинная постепенно

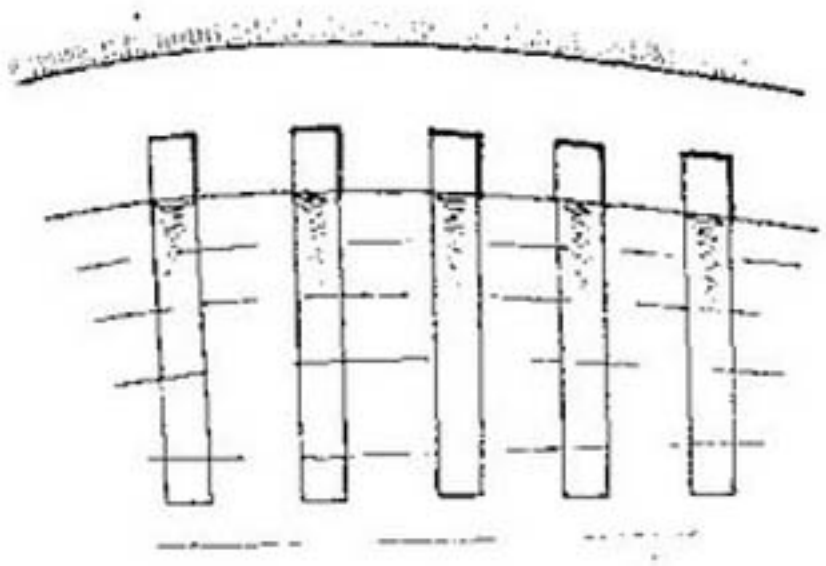


Рис. 140. Ленточное укрепление берега фашинными тюфяками.

наращиваемая фашина, имеющая в диаметре около 30 *см.* (рис. 142-*a*). В эту кайму вплетаются комлями ветви под углом 45° в два ряда,

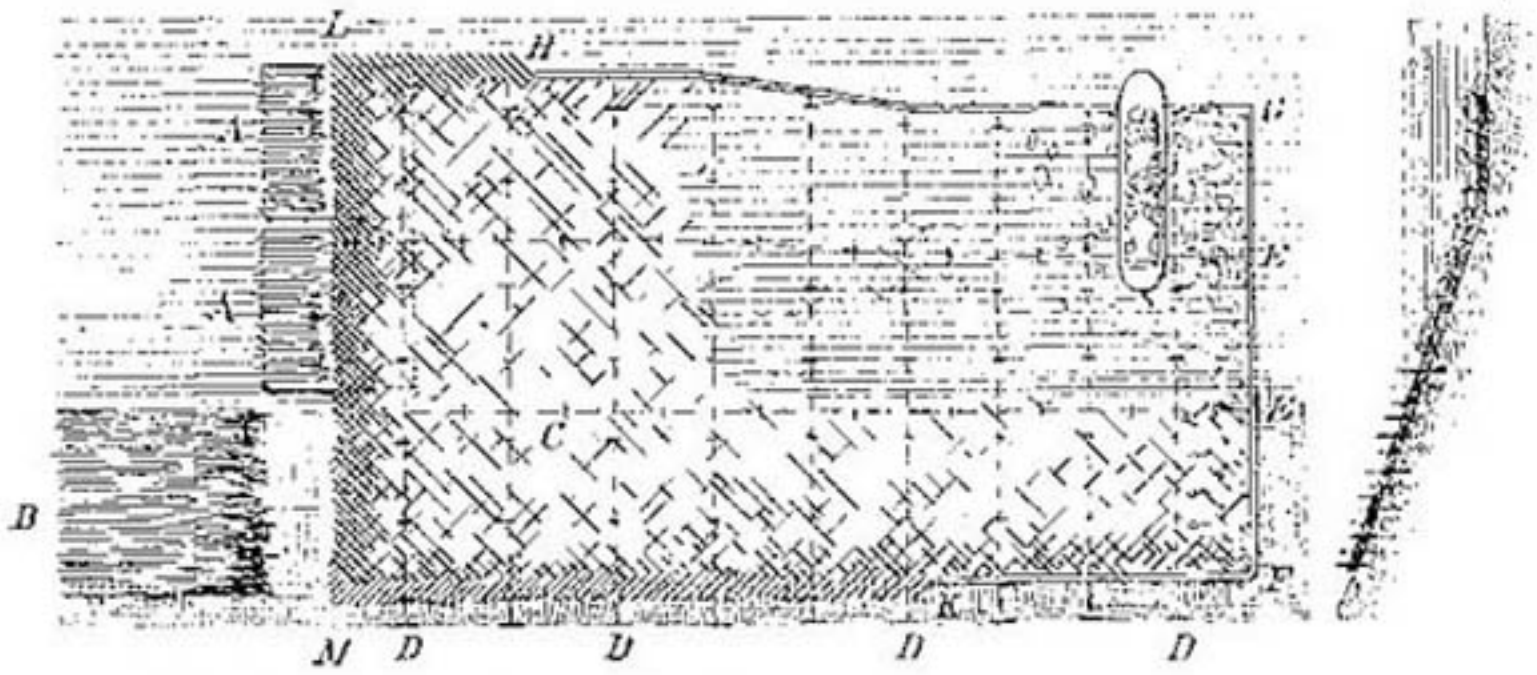


Рис. 141. Укрепление берега реки Миссисипи хворостяными покрывалами.

как показано на рис. 142-*a*. Комли следующих по ширине маты ветвей закрепляются за уже сплетенные ветки согласно рисунка 142-*c*. В результате своего плетения мата принимает вид сетки, по-

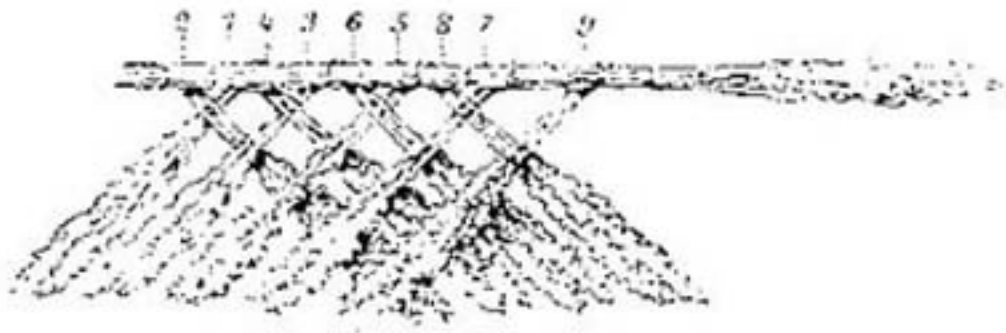


Рис. 142-*a*.

Рис. 142-*b*.

казанной на рис. 142-*d*. Общий ход работы виден на рис. 141-м. Мату нужно уложить на откосе берега, как показано на поперечном разрезе, из коего видно, что надводный конец закрепляется в берег колышками,

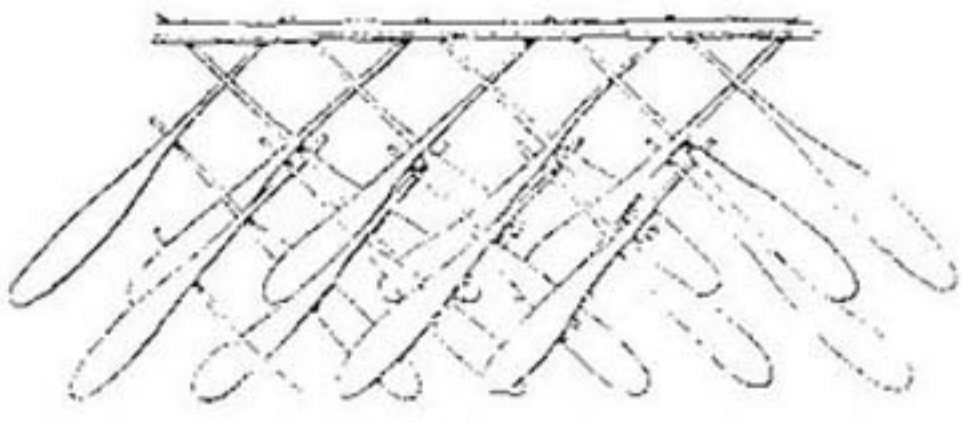


Рис. 142-*c*.

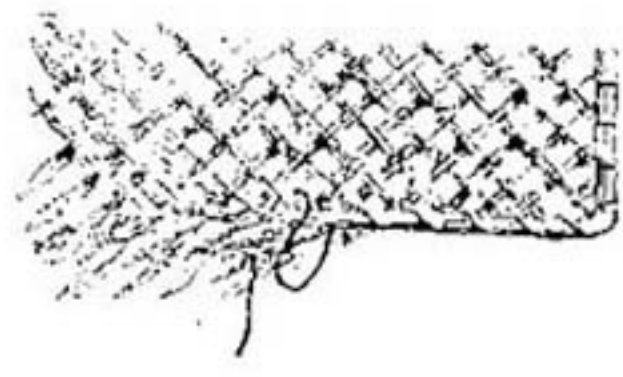


Рис. 142-*d*.

а подводный загружен камнем. Начало маты обозначено буквами *GF*, верхняя кайма в законченном виде обозначена буквами *FK*. Мата вяжется на судне, имеющем наклонный помост (рис. 143), которое постепенно передвигается на якорях вдоль берега. Загрузка камнем делается с баржи, показанной на рис. 141-м. Для укладки маты откос

берега должен быть предварительно спланирован в ровную наклонную плоскость. Эта работа в Америке с успехом производится помощью смыва грунта сильной струей воды, нагнетаемой насосом. На рисунке 144-м показана схема такой работы: паровой насос P поставлен на судне A; от насоса проложены на берег гибкие шланги B с брандсбойтами на концах; рабочий, держа в руках брандсбойт, направляет струю на выступы земли и смывает их вниз, образуя ровную плоскость откоса.

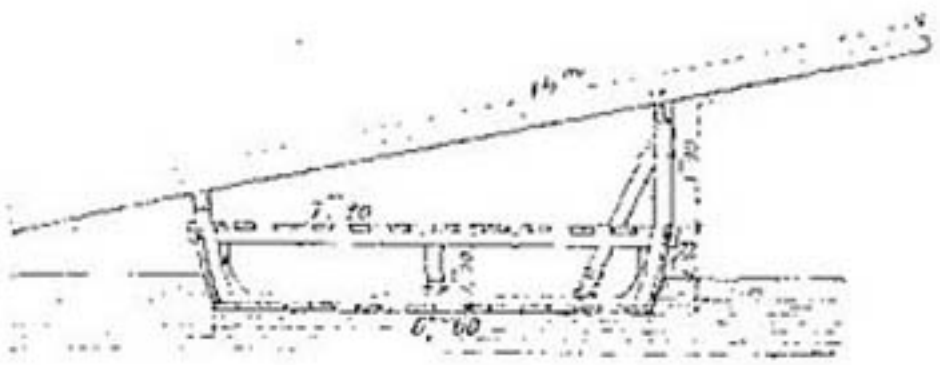


Рис. 143. Судно с платформой для вязки покрывала.

При больших скоростях течения и необходимости укрепить размытый подводный откос, принявший форму неудобную для покрытия откоса фашинными тюфяками, можно применить тяжелые фашины (рис. 145). Тяжелые фашины скатывают с берега по откосу с таким расчетом, чтобы они заполнили вымоины в подошве откоса и покрыли как весь подводный откос, так и полосу дна вдоль подошвы откоса. Для той же цели можно применять и бесконечные тяжелые фашины, о которых уже сказано в § 31-м.

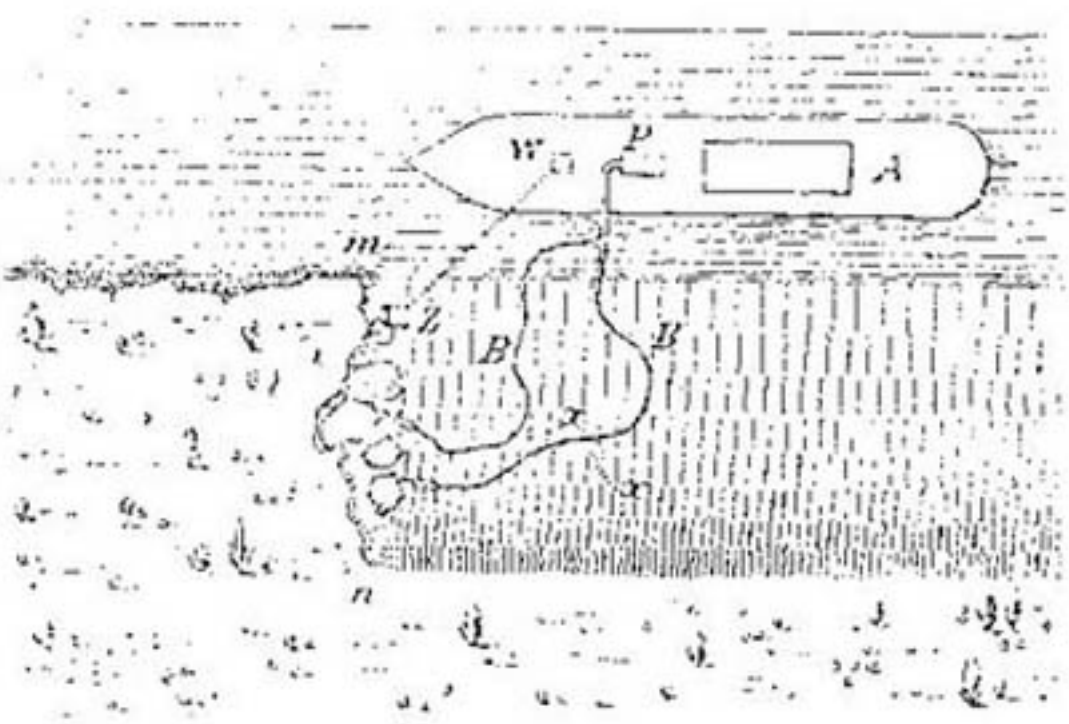


Рис. 144. Планирование откоса берега помощью смыва струей воды из насоса.

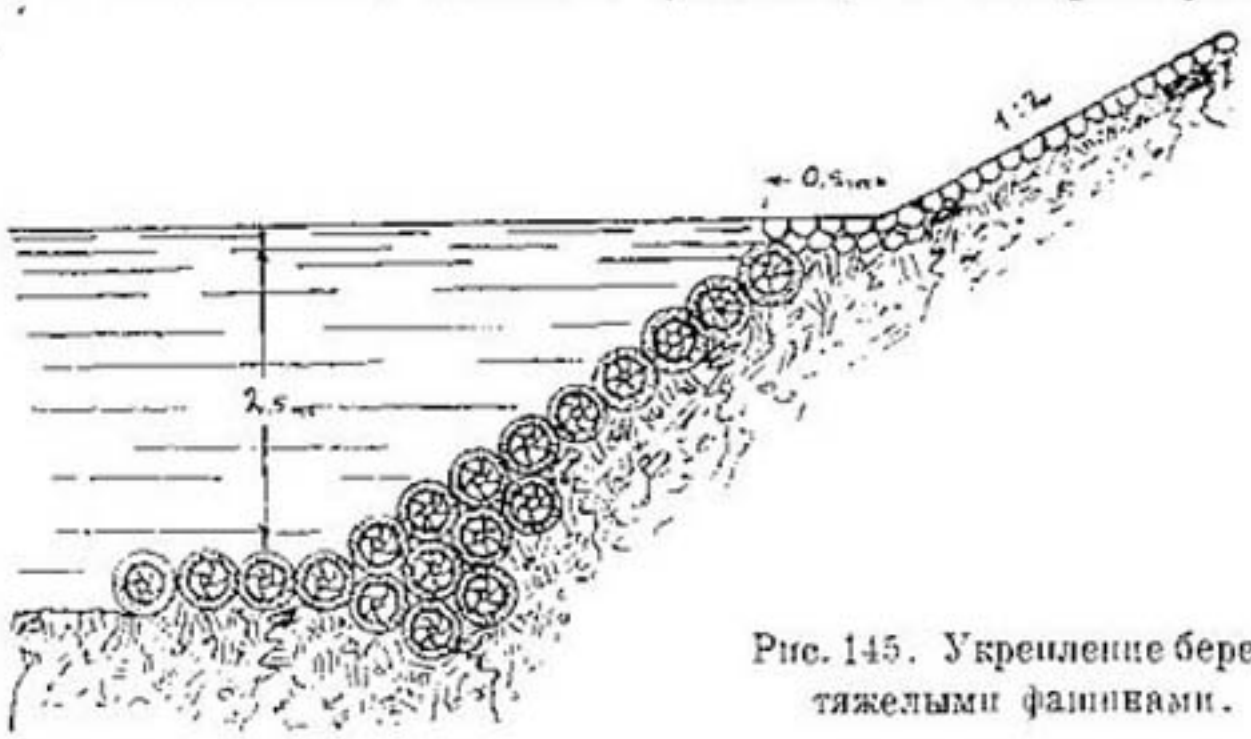


Рис. 145. Укрепление берега тяжелыми фашинами.

Если размытый берег имеет в подводной части очень крутой откос, или когда требуется устроить береговое укрепление значительной

ширины, чтобы оно образовало береговую опояску, выгодно применять тюфячную кладку. Тюфячная кладка (рис. 146) состоит из положенных один на другой фашинных или хворостяных тюфяков. Каждый тюфяк покрывается слоем камня или неразмываемой земли и сквозь несколько положенных один на другой тюфяков забиваются тонкие сваи в нижние части кладки до дна, а при высокой кладке верхние слои пробиваются сваями до нижних слоев кладки. Забивка свай служит для лучшего скрепления тюфяков в одно целое сооружение. Кладка тюфяков делается с уступами так, чтобы с наружной стороны образовался ступенчатый откос кладки, которому, в зависимости от назначения берегового укрепления и от силы течения, дают уклон 1 : 0.5 до 3 : 2, чаще одиночный 1 : 1. По верху, на уровне средне-низких вод, кладка должна иметь горизонтальную площадку, шириною от 1 до

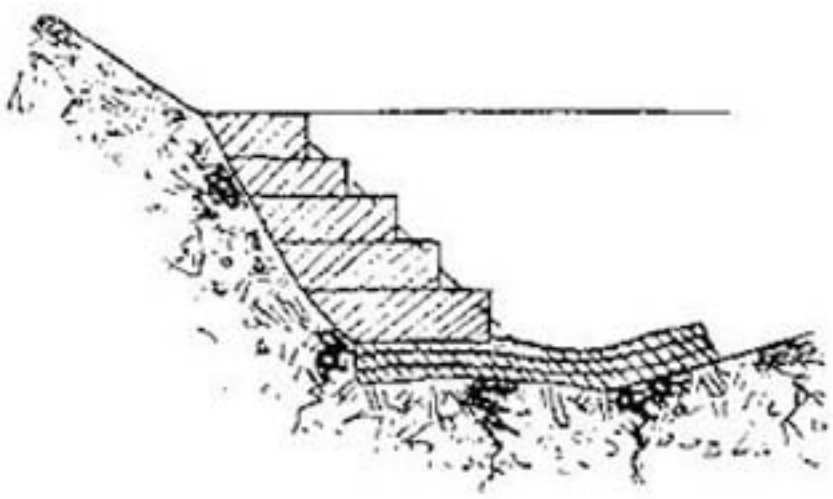


Рис. 146. Укрепление берега тюфячной кладкой.

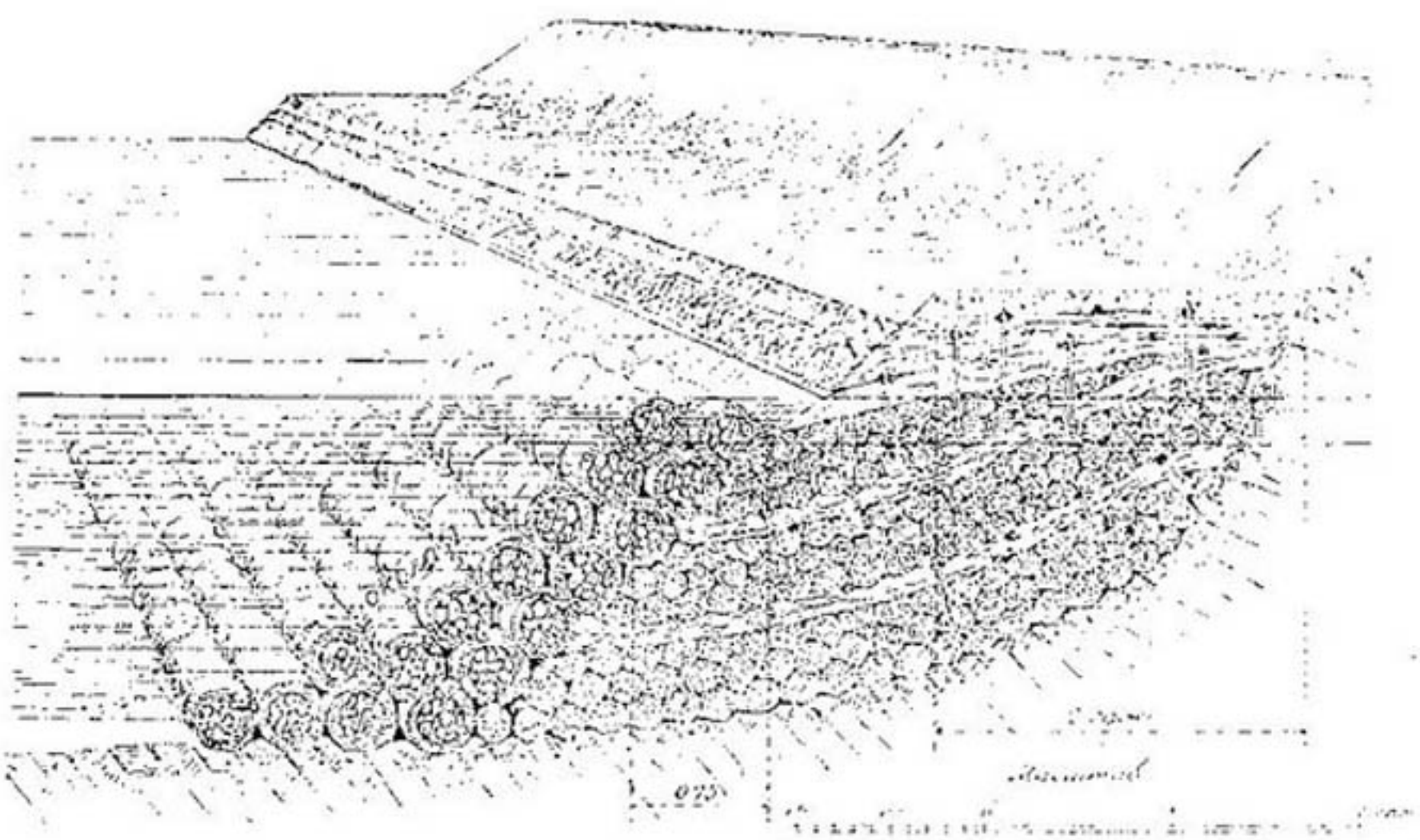


Рис. 147. Фашинная опояска берега на р. Висле.

2 *м*., чтобы дать достаточный упор для надводного берегового укрепления и чтобы дать возможность хворосту кладки прорастать. При устройстве береговых опоясок ширине верхней площадки тюфячной кладки придают бо́льшие размеры—от 2 до 4-х и более *м*. Сторону тюфячной кладки, обращенную к берегу, делают тоже с уступами со-

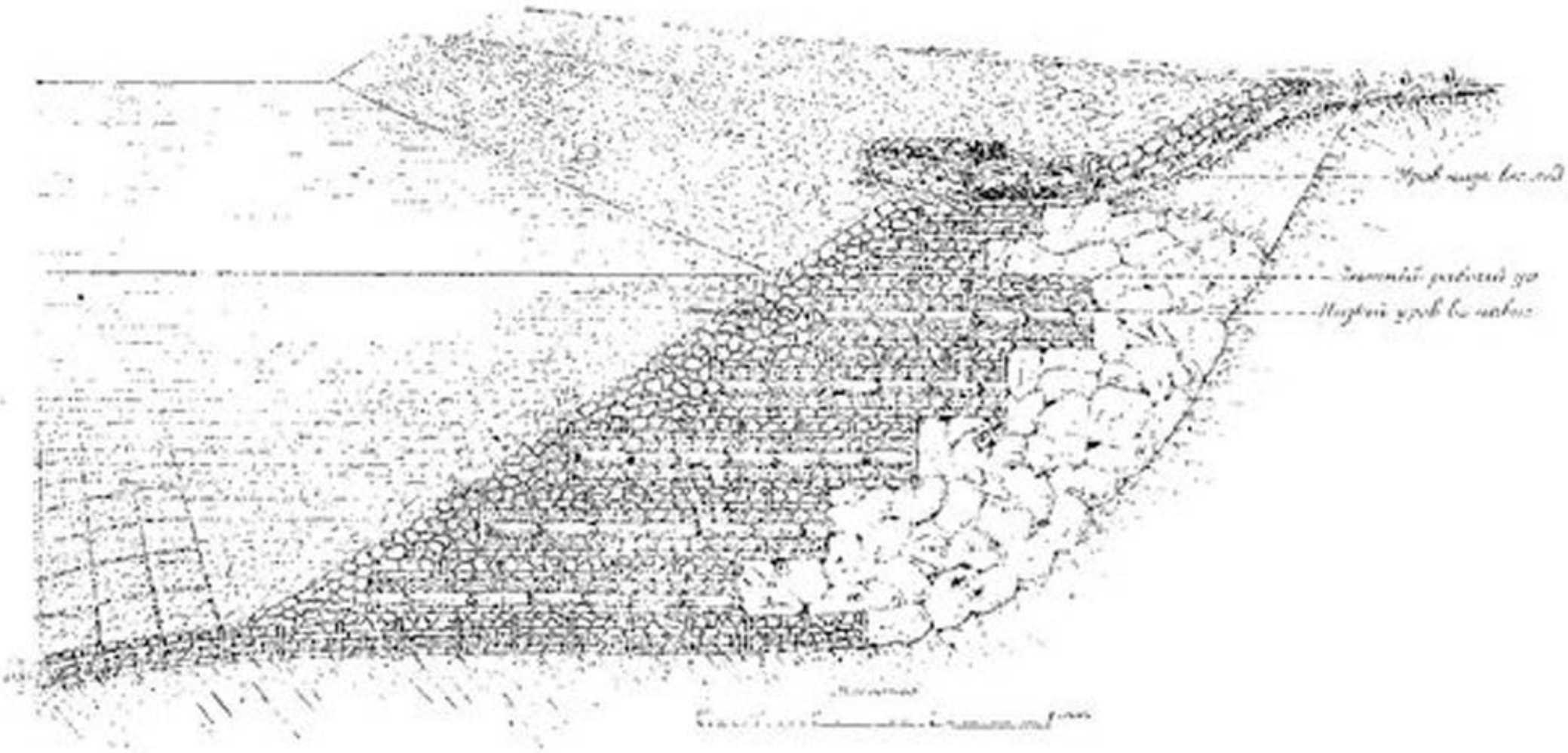


Рис. 148. Укрепление берега, в виде опоясок, из кладки фашинных тюфяков на р. Волге.

ответственно уклону берегового откоса, чтобы между тюфяками и берегом не оказалось пустот; с тою же целью полезно после укладки каждого тюфячного слоя загружать ближайшие к берегу их части землею или каменной наброской (рис. 148).

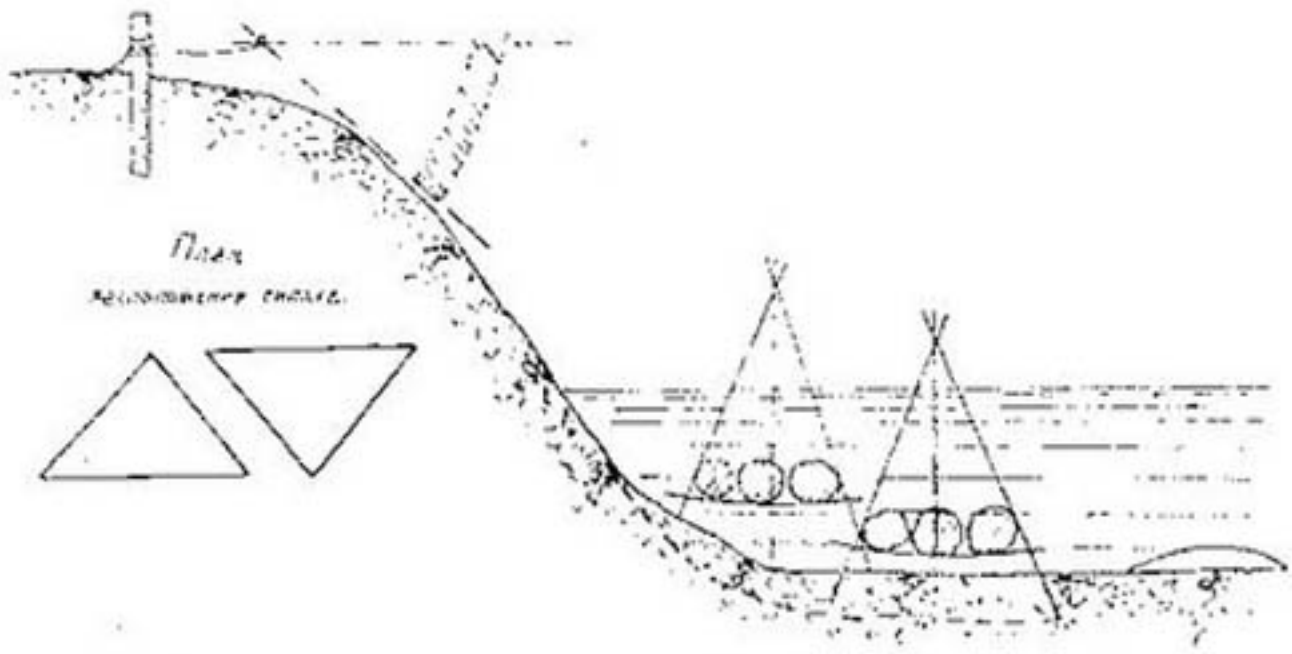


Рис. 149. Сипайное укрепление берега. Установка сипаев.

Вместо тюфячной кладки на некоторых реках применяют для береговых укреплений фашинную погружаемую кладку; на рис. 147-м показана конструкция фашинных опоясок берегов на р. Висле. О способе производства работ по устройству в реке подводной фашинной кладки будет сказано далее при описании применения такой кладки для устройства фашинных полузапруд (§ 33).

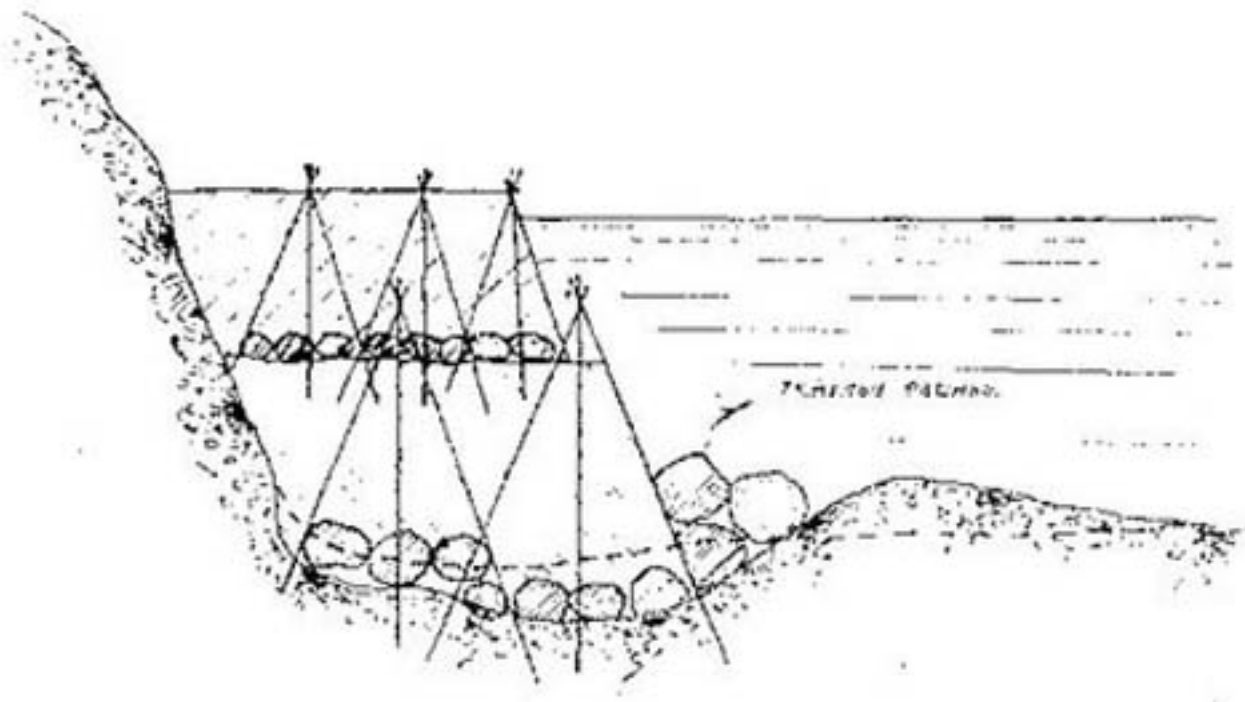


Рис. 150. Укрепление берега сипаями в два яруса.

Применяющиеся на среднеазиатских реках сипайные береговые укрепления показаны на рис. 149 и 150-м. В зависимости от силы течения и глубины дна около берега, сипаи, загруженные сипайной кладкой хвороста, камня и соломы, ставятся по ширине берегового укрепления в один, в два, иногда в три ряда; при большой глубине они делаются двух'ярусными (рис. 150). На рис. 149-м пока-

зана схема установки сипаев для двухрядного одноярусного сипайного укрепления берега.

Берегоукрепительные на реках устройства, имеющие в подводной части вертикальную со стороны реки стенку, встречаются чаще в тех случаях, когда берег устраивается для причала судов и производства грузовых операций. Такие берегоукрепительные устройства следует отнести к типам набережных. Если же сооружение имеет целью только предохранение берега от размыва, то к применению вертикальной стенки, например свайной, нужно отнестись с большою осторожностью, так как вертикальная стенка, выведенная от дна, может способствовать подмыву дна около ее основания, в особенности при значительной глубине и при больших скоростях течения. При слабом же течении и пологом естественном откосе подводной части берега можно ограничиться для поддержания надводного откоса устройством

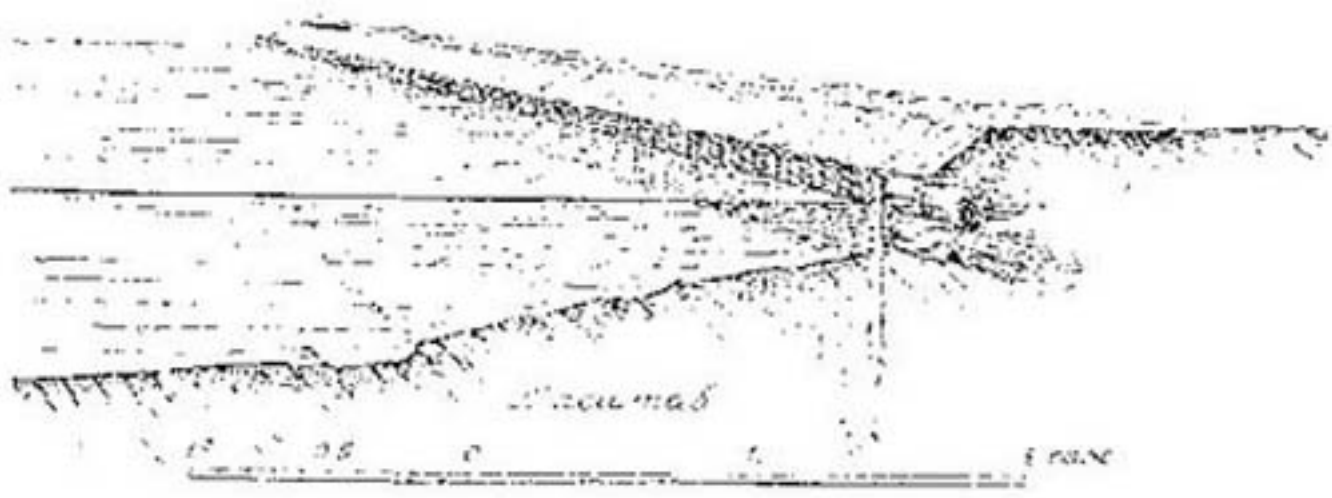


Рис. 151. Плетневые заборы.

простейшей стенки, например, в виде свайного из кольев ряда, заплетенного плетнем (плетневые заборы, см. рис. 151), или же с заборкой пластинами, досчатым шпунтом и т. п. Для предохранения от высасывания грунта через такую стенку прибегают к закладке позади нее хвороста или фашин, показанных на том же рисунке.

Укрепление берега в пределах колебания уровня воды. Непременным условием прочности береговой одежды в этой части берега является устойчивое положение подводной части берега. Поэтому самостоятельное устройство береговой одежды в пределах колебания уровня воды может быть допущено в том только случае, если подводный откос в естественном состоянии вполне устойчив и не подвергается размыву. В противном случае берегоукрепительные устройства в подводной и вышележащей частях берега должны сопрягаться друг с другом в одно целое. В зависимости от силы действия течения, которому подвергается укрепляемый берег, от качеств грунта и крутизны берегового откоса, а также от наличия того или иного материала, которым можно воспользоваться, применяются для этой зоны различные типы берегоукрепительных устройств. При этом нужно заметить следующее. Так как зона берега в пределах колебания

уровня воды благоприятна для растительности. то прививкой последней часто пользуются, как полезным средством для предохранения от размыва и других повреждений как естественной поверхности берега, так и берегоукрепительных сооружений.

Простейший вид берегоукрепительных работ заключается в разведении травы или в посадке лозы, которые укрепляют своими корнями почву, ослабляют течение на ее поверхности и, задерживая несомые в воде илистые и другие твердые частицы, способствуют наращиванию поверхности слоем растительной земли.

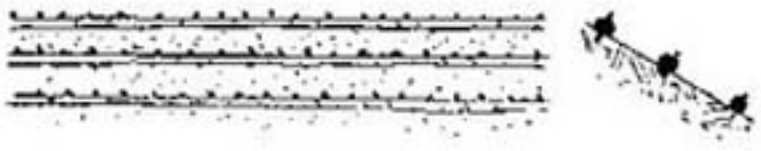


Рис. 152. Укрепление берега лентами дерна или прутяными канатами.

Засев травы на песчаном или глинистом откосе берега требует предварительного покрытия откоса слоем растительной земли. Но, так как такой слой может до прорастания травы размываться течением или сползать по крутому откосу, то его заключают между бордюрами, разделяющими площадь поверхности откоса на узкие полосы. В качестве бордюров могут служить закрепленные колышками ленты из дерна или из тонких прутяных канатов и даже из жердей (рис. 152—153). В отношении расположения бордюров нужно иметь в виду, что при направлении их поперечно течению воды они могут вызывать перепады воды и вымоины. Поэтому их располагают рядами, или параллельными направлению течения (рис. 152), или наклонными (рис. 153). При последнем типе текущая вода, встречая бордюр, несколько отгоняющий ее кверху, ослабляет свою скорость.

Покрытие дерном делается из дерпин, плотно сближенных своими краями, чтобы не имелось широких между ними швов, в особенности швов в направлении течения. Дернины прикрепляются к спланированной поверхности откоса деревянными колышками. Первое время дерновинное покрытие страдает от льда, который, прирастая к дернинам, срывает их при под'еме воды. С течением времени дернины, наращиваясь илистыми частицами, образуют более плотное и устойчивое покрытие. Тем не менее дерновинная одежда, равно как засев травы являются вообще слабым укреплением берега, не достаточно сопротивляющимся большим скоростям течения и действию льда при ледоходе.

Рис. 153.

Рассадка ивняка представляет весьма часто применяющийся и дающий хорошие результаты способ укрепления пологих берегов и поверхности песчаных отмелей. О применении рассадок в том и другом случаях сказано далее в § 34-м.

Хворостяная выстилка откоса представляет собою покрывало, состоящее из слоя хвороста толщиною около 30 сантиметров,

в котором хворост разложен комлями в одну сторону и закреплен на месте поперечными рядами прутяных канатов, сквозь которых и через хворост забиты длинные колышки так, что концы их проходят на некоторую глубину в грунт откоса. Чтобы хворост прорастал и для получения более ровной поверхности выстилки, под последнею делается небольшая выемка в откосе, где помещаются комли хвороста и засыпаются землею. В зависимости от направления, по коему укладываются хворостины, различаются следующие типы хворостяных выстилок: поперечная, продольная и наклонная.

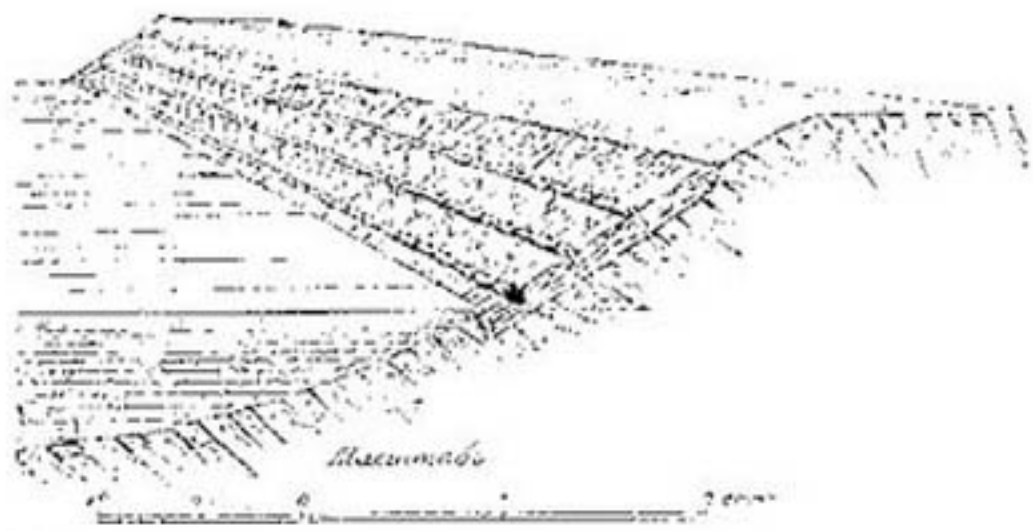


Рис. 154. Укрепление надводного откоса поперечной однорядной хворостяной выстилкой.

Поперечная хворостяная выстилка показана на рисунке 154-м. Хворост кладется перпендикулярно урезу воды комлями вниз, метлами вверх и прикрепляется горизонтальными рядами прутяных канатов. Если откос длинный, то поперечная хворостяная выстилка де-

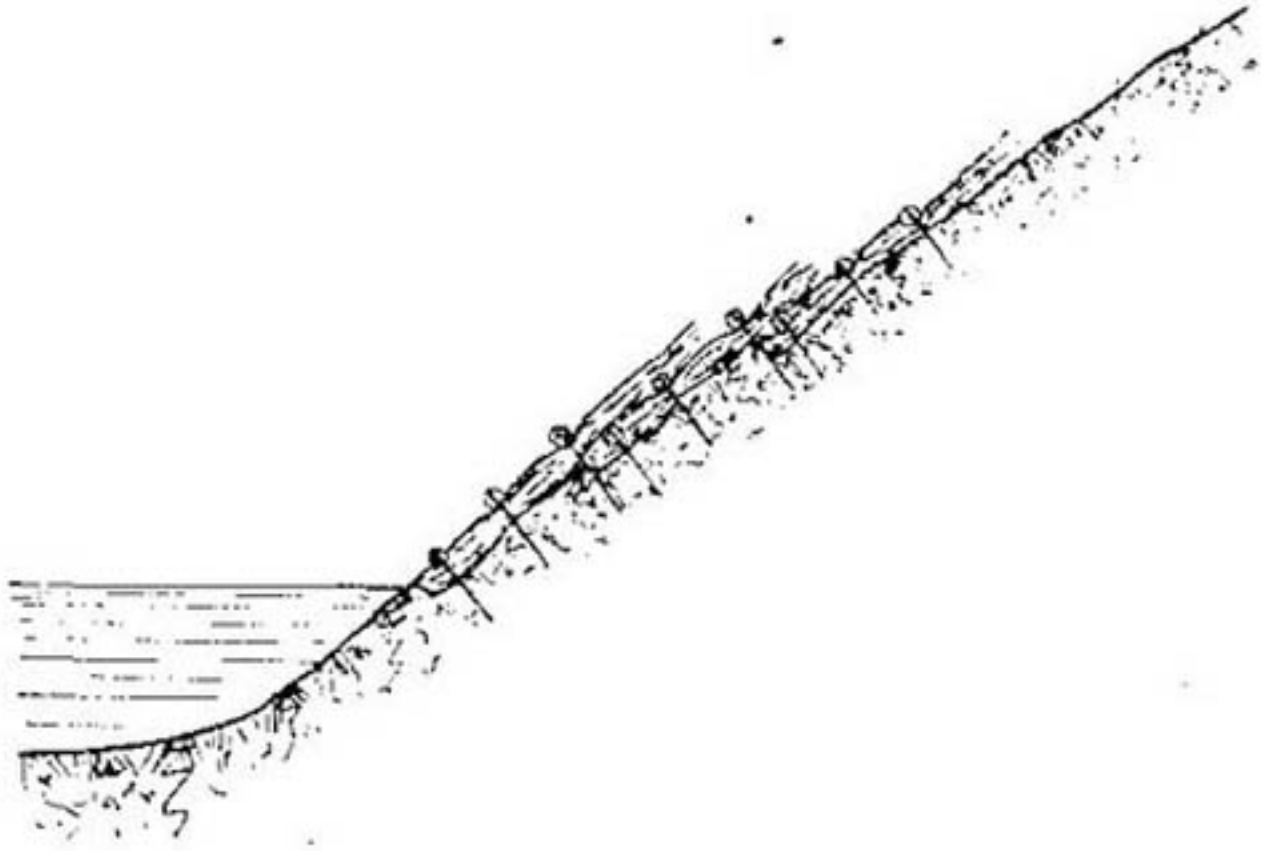


Рис. 155. Поперечная хворостяная выстилка в несколько рядов.

лается в несколько рядов, как показано на рис. 155-м, так что метлы нижнего ряда покрывают комли вышележащего ряда.

Продольная хворостяная выстилка отличается от поперечной тем, что хворостины кладутся параллельно течению, причем метлы направлены вниз по течению и перекрывают комли следующего по течению, ряда хвороста. Этот тип, как менее благоприятный для про-

растания хвороста, встречается редко. На некоторых германских реках предпочитают делать хворостяную выстилку наклонными рядами. На рис. 156-м. показана такая выстилка с лицевой стороны и в поперечном разрезе откоса берега. Хворост уложен наклонно и метлами вниз так, что выступающие внизу метлы прикрывают подошву выстилки от вымытия здесь грунта.

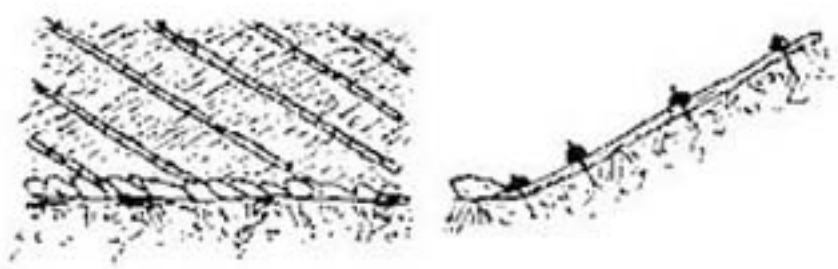


Рис. 156. Хворостяная выстилка наклонными рядами.

Хворостяная кладка в стенку изображена схематически на рис. 157-м. Способ ее устройства заключается в следующем. Для углубления кладки в откос берега делают выемку земли на откосе до пунктирной линии *a b c*, причем дну выемки дается небольшой уклон в сторону берега для сообщения хворостяной кладке большей устойчивости против сползания в реку. На выравненном дне выемки кладется слой хвороста толщиною около 30 сантиметров, метлами наружу, и закрепляется несколькими продольными рядами прутяных канатов, в которые вбиваются колышки такой длины, чтобы они про-

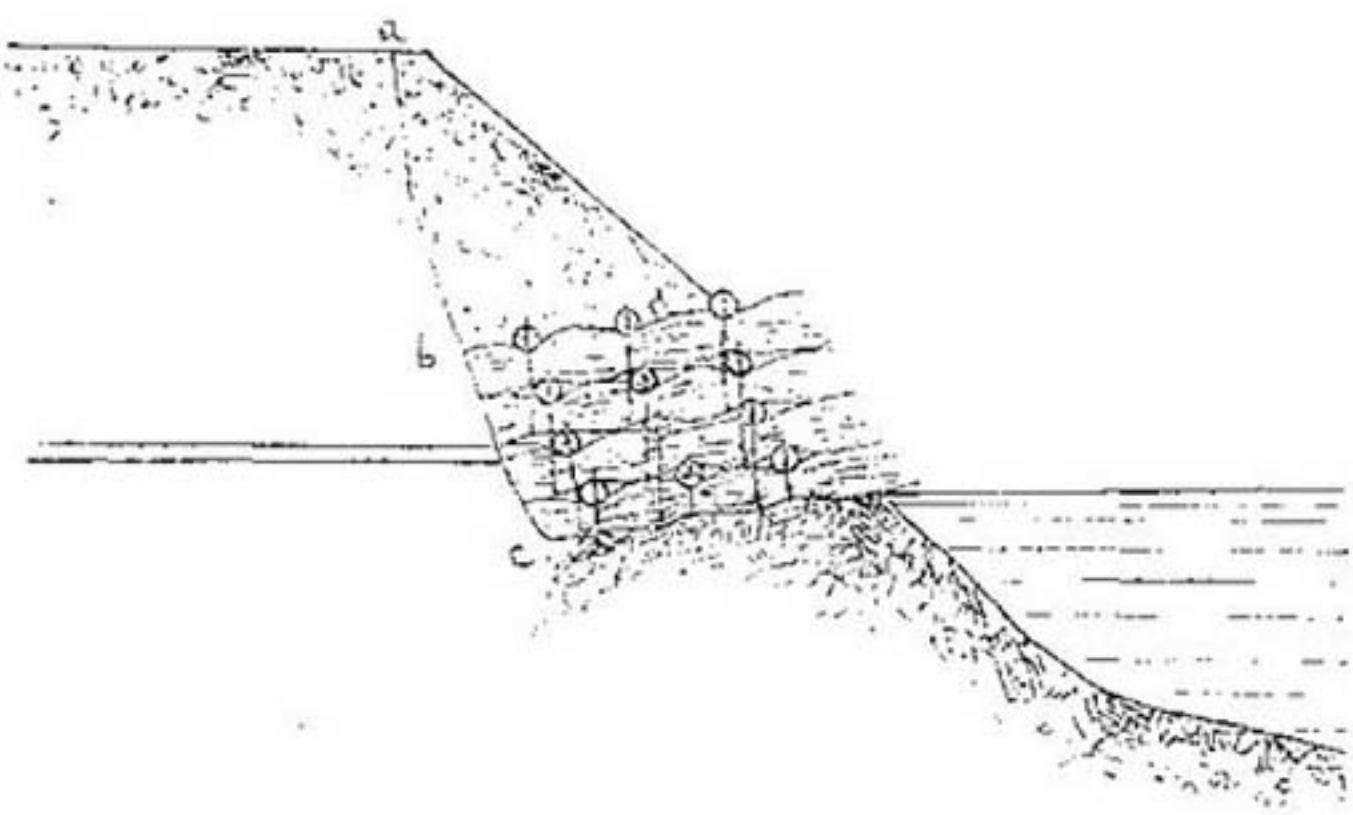


Рис. 157. Хворостяная кладка в стенку.

шли через канат и хворост и углубились в грунт. Хворостяной слой покрывается слоем неразмываемой земли достаточной толщины. Затем кладется второй слой хвороста, тоже закрепленный прутяными канатами с колышками и покрытый слоем земли, и так поступают далее, пока хворостяная стенка не будет выведена на нужную высоту, причем выпуск слоев в сторону реки делается с таким расчетом, чтобы получить желаемый уклон поверхности хворостяной стенки (обыкновенно 1 : 1). Хворостяная стенка сверху засыпается землею. Хворост с течением времени прорастает, усиливая устойчивость берега. Такого рода бере-

говое укрепление применяется в тех случаях, когда в откосе берега имеется слабый, легко размываемый или плывучий грунт в районе *b c*, а также, когда в береге обнаруживаются сдвиги и сползания по водоносному прослойку, находящемуся в этом районе. На рисунке показан прослоек двумя горизонтальными параллельными линиями.

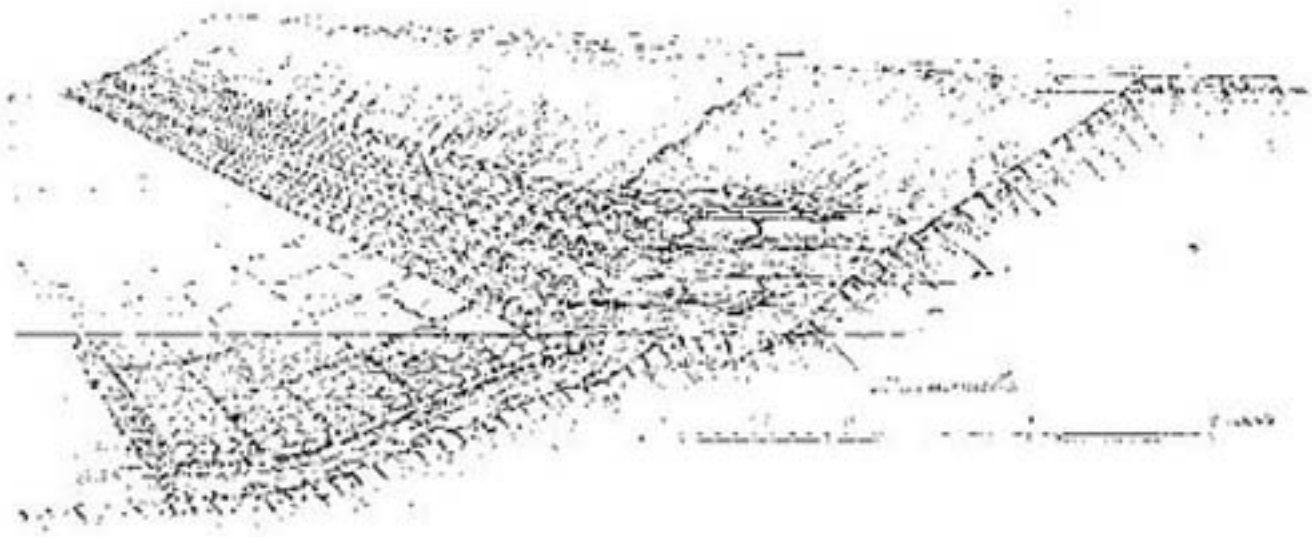


Рис. 158. Берегоукрепительная стенка из фашинной кладки.

Вместо стенки из хворостяной кладки в некоторых береговых укреплениях применялась кладка из фашин. На рис. 158-м показана такая стенка в надводной части берегоукрепительных сооружений на р.р. Припяти, Западном Буге и Немане. На севере, в местностях, обильных лесными материалами, нередко применяется для береговых укреплений кладка из деревянных горбылей (отбросы при распиловке круглого леса на доски или брусья). Рисунок 159-й изображает тип укрепления надводного откоса горбыльною кладкою, встречающийся на р.р. Вытегре и Ковже. Такой же способ укрепления берега, но без устройства свайного ростверка, весьма распространен на северных реках для устройства набережных стенок с вертикальной гранью в подводной части, причем в устьях Северной Двины, Кеми и некоторых других рек набережные подобного типа строятся даже для глубокосидящих морских судов; они носят там название „реечных набережных".

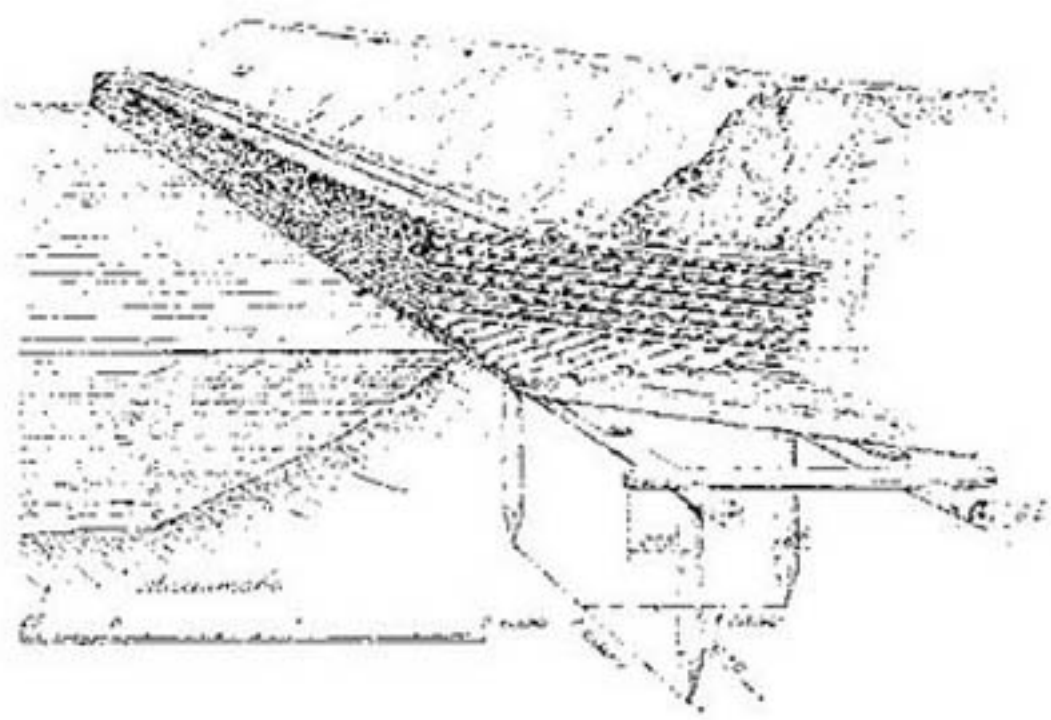


Рис. 159. Укрепление берега горбыльной кладкой.

Камень для одежды надводных береговых откосов употребляется в различных видах, которые могут быть сведены к следующим груп-

пам: а) укладка камня в плетневых клетках, б) замощение, в) наброска в виде призм и г) правильная кладка.

При укреплении откоса плетневыми клетками назначение плетней состоит в том, чтобы они удерживали камни на откосе. Ряды плетней располагаются наклонно, под углом 45°, к урезу воды в двух направлениях так, что от их пересечения образуются квадратные клетки, в которых одна диагональ горизонтальна и параллельна урезу

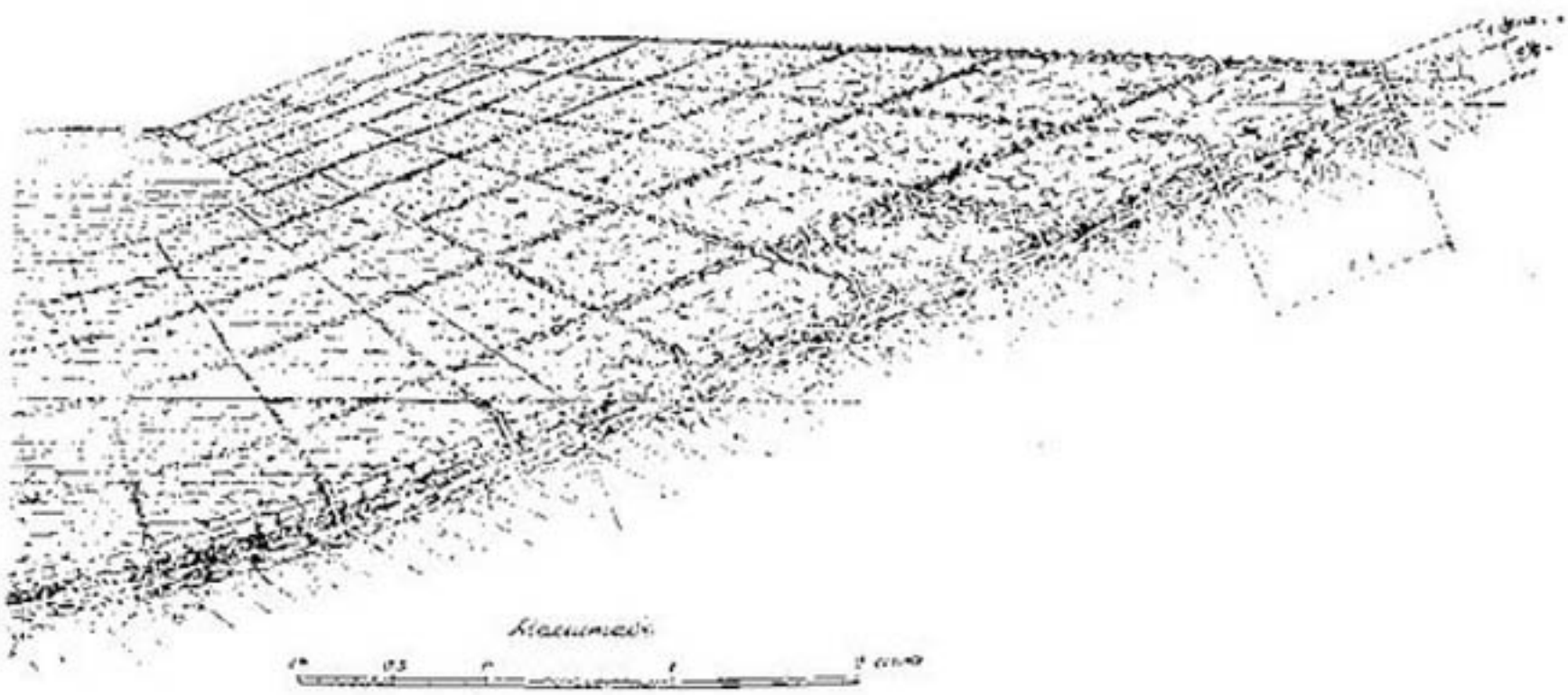


Рис. 160. Плетневые клетки, сделанные на хворостяном тюфяке, покрывающем надводную часть откоса берега.

воды, а другая, наклонная, перпендикулярна к урезу. (Рис. 161). Опыт показал, что при таком расположении плетней камень лучше удерживается в клетках, чем если бы последние были образованы из плетневых рядов, параллельных и нормальных к урезу воды (рис. 160). Плетневые ряды отставляют друг от друга на расстояние от 0,7 до 2 *м.*; высота плетня делается от 0,30 до 0,40 *м.* соответственно толщине каменного заполнения, которая требуется в зависимости от силы действующего на откос течения и ледохода. Хворост для плетня должен быть ивовый, также ивовые должны быть колья плетня, так как необходимо, чтобы хворост и колья прорастали для сохранения клеток и для укрепления почвы откоса, в которую забиваются плетневые колья. Камень для заполнения клеток должен быть крупный. Заполнение клеток камнем делается или плотной его укладкой, или в виде мощения. В зависимости от требуемой толщины такого рода береговой одежды, а также от качеств грунта откоса и от крутизны последнего, плетневые клетки делаются или непосредственно на грунте откоса, или на хворостяной выстилке откоса, или же на уложенном по откосу фашинном или хворостяном тюфяке. В первом случае под слоем камня следует сделать подстилку толщиною 8—12 сантиметров из мха, сена или соломы для предохранения грунта от вымывания из под камня теченнем, проникающим через каменное заполнение. Откос должен быть предварительно спланирован под

уклон не круче полуторного, причем, однако, планировка должна производиться без подсыпок земли, чтобы не происходило сползания грунта. При плотном грунте берега иногда можно допустить крутизну откоса до 1 : 1.

При более сильном течении или при менее плотном грунте плетневые клетки делаются по верху хворостяной выстилки откоса (рис. 161), причем камень кладется непосредственно на эту выстилку. Откос требуется более пологий, от 1 : 1½ до 1 : 2. Если грунт берега мелко песчаный или иной легко размываемый, то нижняя выстилка

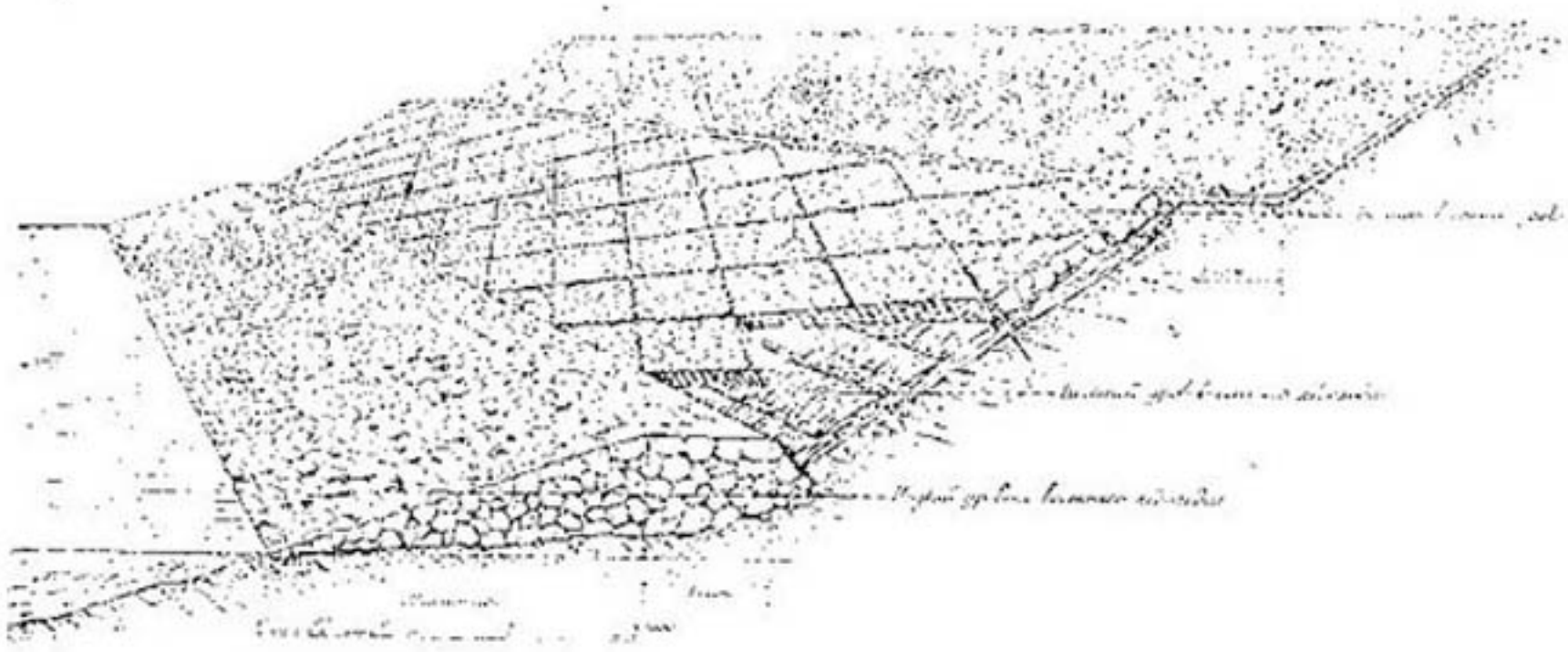


Рис. 161. Укрепление берега плетневыми клетками с хворостяной подстилкой.

требуется более плотная и толстая, каковой служит фашинный или хворостяной тюфяк (рис. 160). В этом случае откос должен быть пологим от 1 : 2 до 1 : 3.

Каково бы ни было плетневое укрепление, эта надводная одежда откоса должна иметь внизу прочную опору, дабы она не сползала по откосу. Если имеется одежда и в подводной части, то обе одежды должны быть сопряжены между собою (рис. 160 и 161); в противном случае нужен специально устроенный упор, примером чего служит рисунок 161-ый.

Плетневые с каменным заполнением одежды береговых надводных откосов принадлежат к числу наиболее распространенных типов береговых укреплений. Они хорошо сопротивляются действию даже сильного течения, но сохраняют долго свои хорошие качества в тех только случаях, когда плетни хорошо прорастают, в противном случае происходит расстройство каменного заполнения. Сильному ледоходу эти одежды могут успешно сопротивляться, если камень крупный и очень тщательно уложен. Повреждения ледоходом такого рода одежд встречаются нередко; расстройство одежды происходит чаще всего по причине смерзания зимою ледяного покрова реки с камнями и плетнями береговой одежды, которые при вскрытии реки выдергиваются из одежды и уносятся льдом.

Сплошное замощение берегового надводного откоса употребляется для защиты его от действия течения при высоких водах, от повреждений стекающей по откосу водой атмосферных осадков, от отаптывания откоса людьми и скотом и т. п. В зависимости от плотности грунта берега и от назначения такого рода береговой одежды, откос планируется под каменную мостовую с большей или меньшей крутизной, от одиночного до двойного и еще более пологого. На рис. 132—135-м показаны укрепления надводных откосов мостовой. Основание мостовой должно состоять из материала, не поддающегося размыву водой, проникающей в промежутки между камнями. Этим требованиям наилучшим образом удовлетворяет основание мостовой из слоя крупного песка, гравия или щебня; означенный слой нужен толщиною не менее наибольших измерений камня мостовой. Для более ответственных мостовых таковые иногда делаются двойными, т. е. основанием мостовой из крупного камня служит мостовая из камня средней величины или мелкого. Для прочности мостовой камни ставятся тычком, т. е. наибольшим измерением нормально к основанию. После выстилки мостовая должна быть плотно утрамбована с защебенкой, т. е. забивкой мелких промежутков между камнями щебенкой.

Если требуется особенно солидная каменная одежда берега, то она составляется из призм каменной наброски, поверхность которой устраивается в виде мостовой из отборных крупных плотно пригнанных друг к другу камней с тщательной расщебенкой промежутков между ними (рис. 135).

Укрепление берега может быть достигнуто также наращиванием около него мелей помощью бун, о чем будет сказано далее, в § 33-м, при описании регуляционных сооружений.

§ 33. Типы выправительных сооружений.

Под общим наименованием выправительных сооружений мы будем здесь разуметь те вышеупоминавшиеся устройства, которые возводятся в русле реки как для образования берегов меженнего русла, так и для регулирования меженнего фарватера.

Выправительные сооружения, в зависимости от их назначения, могут быть сведены в следующие группы:

а) Сооружения, служащие для ограждения меженнего течения воды в пределах регуляционной трассы, т. е. для искусственного образования новых берегов меженнего русла. К ним относятся полузапруды и продольные дамбы. К этой же группе могут быть отнесены некоторые простейшие устройства временного характера, способствующие задержанию наносов на месте требующегося образования новых берегов.

б) Сооружения, служащие для отклонения течения в желаемом направлении,—струенаправляющие дамбы.

в) Сооружения, служащие для воздействия на конфигурацию дна в пределах полосы фарватера с целью привести его в благоприятное для судоходства состояние, а также для предохранения дна от вредных размывов,—донные полузапруды и донные пороги.

г) Сооружения, служащие для закрытия побочных рукавов реки с целью сосредоточить меженнее течение в едином русле,—запруды.

д) Сооружения, служащие для спрямления извилин реки,—прокопы.

а) Полузапруды.

Полузапруды или, как их часто называют, буны представляют собою выведенные от берега в реку дамбы, расставленные на некотором расстоянии друг от друга. Полузапруда одним концом (корнем) сопрягается с берегом, а другой ее конец (голова) доходит до линии, которая должна представлять собою новый берег меженнего русла, т. е. до регуляционной трассы. Направление полузапруд и их взаимное расстояние выбирается с таким расчетом, чтобы пространство между соседними полузапрудами естественно заполнялось речными наносами. Когда эти пространства настолько заполнятся, что образуется новая береговая площадь, границы которой со стороны реки достигнут голов полузапруд, то останется лишь закрепить соответствующим способом всю эту площадь и новую линию берега. Впредь же до такого заполнения пространства между полузапрудами, последние должны защищать берег от размыва течением. Естественное заполнение междуполузапрудных пространств обыкновенно происходит медленно и неравномерно, преимущественно в периоды высоких вод, когда полузапруды затоплены и течение происходит над ними. В более благоприятных условиях находился бы процесс естественного заиления пространства между полузапрудами, если бы они строились в таком порядке, чтобы высота полузапруды поднималась постепенно по мере нарастания наносных отложений. Но, так как гребень полузапруды требуется солидно укреплять для предохранения от повреждений при ледоходе и высоких водах, то упомянутый порядок возведения полузапруд трудно выполним, а потому применяется сравнительно редко. Более действительное средство для ускорения заполнения пространств между полузапрудами представляет свалка в эти пространства грунта, вынутого землечерпанием, а так как при регулировании рек помощью выправительных сооружений землечерпание служит вообще полезным для них содействием и в большинстве случаев оно неизбежно, то вышеуказанная утилизация продуктов землечерпания доставляет значительные выгоды.

Обращаясь к вопросу о расположении полузапруд в плане следует заметить, что в первое время после их возведения текущая вода встречает поочередно то суженное живое сечение между головами противостоящих полузапруд, то расширенное живое сечение в про-

странствах между соседними полузапрудами. Последствием этого являются размывы дна реки около голов полузапруд, причем некоторая часть вымытого грунта под влиянием водоворотных течений, образующихся в пространствах между полузапрудами, уносится в эти пространства и здесь складывается.

Большее или меньшее влияние полузапруд на отложение наносов в междуполузапрудных пространствах зависит от направления

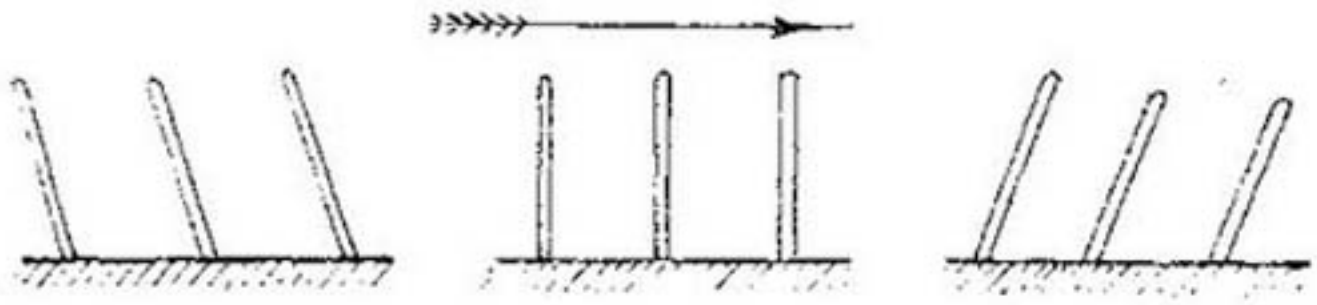


Рис. 162. Типы расположения полузапруд.

полузапруд, от расстояния между ними, от высоты полузапруд и от их формы. Направление полузапруд может быть перпендикулярное к направлению течения или же несколько наклоненное против течения или по течению (рис. 162). Все такие положения полузапруд встречаются на примерах исполненных регуляционных работ, причем, однако, отклонения от перпендикулярного направления делаются небольшие, всего лишь на 5—15 градусов в ту или другую сторону. Специальные опыты, которые производились Гагеном в искус-

Рис. 163. Полузапруды расставлены на равных расстояниях.

ственном канале, указывали, что лучшим направлением полузапруд является несколько наклоненное против течения, так как при таком положении наносы складываются в промежутках между полузапрудами в большем количестве, чем при направлении нормальном к течению или наклоненном в сторону течения. К отрицательным качествам последнего направления относится влияние на размыв берега между полузапрудами: когда уровень воды в реке поднимается выше гребня полузапруды, то вода, переливаясь через гребень, получает направление к берегу и, достигнувши его, производит размывы. Позднейшие опыты, произведенные профессором Энгельсом в Дрезденской гидротехнической лаборатории, подтвердили выводы Гагена о выгодности давать полузапрудам положение несколько наклоненное против течения. Весьма тщательно поставленные лабораторные опыты Энгельса дают ряд и других ценных указаний.

На рис. 163 и 164-м изображены направления водоворотных течений в промежутках между полузапрудами, на рис. 165 и 166 обозначены места образующихся размывов и наносных отложений. Опыты производились при разных положениях уровня воды относительно гребня полузапруд, а именно: 1) когда гребень полузапруды не затоплен водою, что соответствует меженнему состоянию реки, 2) когда через гребень происходит перелив воды невысоким слоем, что отвечает состоянию реки при среднем положении горизонта воды, и 3) когда

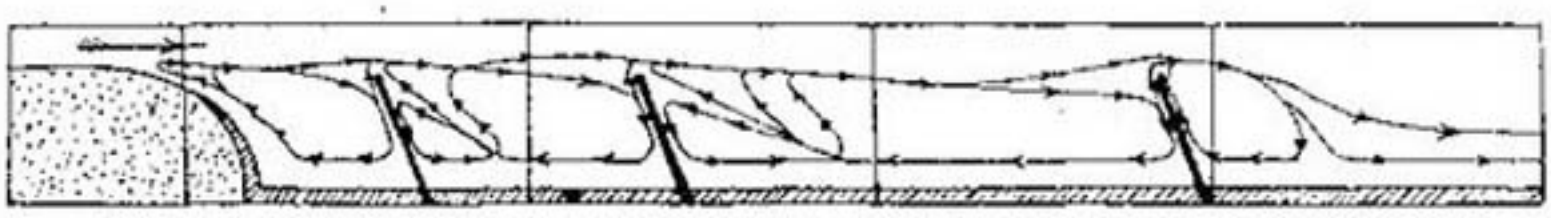


Рис. 164. Последняя полузапруда отставлена на двойное расстояние.

над гребнем течет вода высоким слоем, что соответствует высоким паводкам и половодию. Во всех этих случаях непосредственно около голов полузапруд образуются вымоины дна продолговатой формы, причем, пока горизонт воды ниже гребня полузапруды, образуются непосредственно ниже вымоины отмели разнообразной формы, несколько входящие в между—полузапрудное пространство. Когда уровень воды поднимется выше гребня полузапруд, вымоины начинают удлиняться так, что прежние отдельные вымоины соединяются в одну общую, идущую около голов полузапруд; отмели подвигаются более внутрь

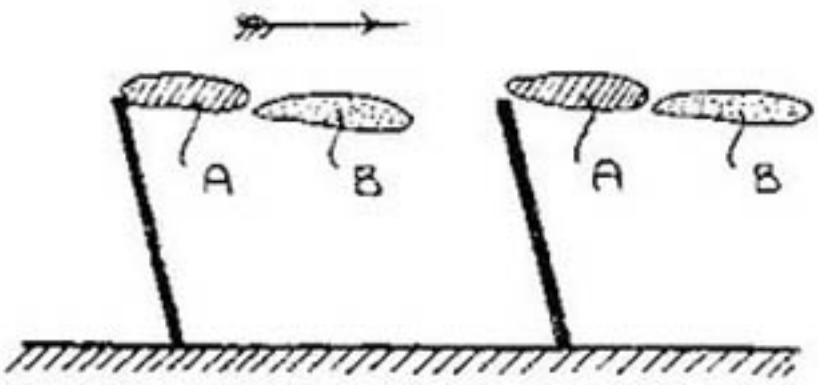


Рис. 165. Образование вымоин и наносов в меженнее время.

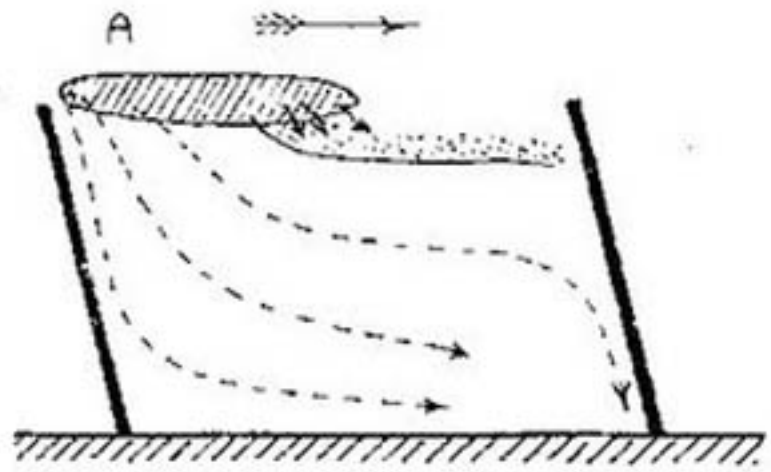


Рис. 166. Развитие вымоин и наносов при высокой воде.

между—полузапрудных пространств и примыкают к верховой стороне соседней полузапруды, а вдоль низовой стороны каждой полузапруды образуются вымоины. При высокой воде наносы входят широкой полосой (рис. 166), границы которой примерно показаны пунктирными линиями; наносы достигают берега, а также заполняют ту полосу вымоины, которая образовалась с низовой стороны полузапруды во время средних вод. Таким образом опыты показывают, что пространство между бунами заполняется наносами в части ближайшей к фар-

ватеру при меженнем состоянии реки, а на остальной площади (до берега) во время высоких вод, когда интенсивность движения наносов вообще достигает наибольшей величины.

Что касается вопроса о наивыгоднейшем расстоянии между полузапрудами, то в этом отношении нельзя установить общие нормы, так как выгоднейшее расстояние зависит от многих местных условий, как то: ширина реки, форма и расположение берегов, сила течения, сбойства грунта и проч. Около вогнутых берегов, где течение более сильное и где выправительная трасса обыкновенно ближе подходит к берегу, полузапруды имеют меньшую длину и должны быть расставлены более густо; напротив, около выпуклых берегов полузапруды нужны длиннее и расходящиеся, причем расстояние между ними может быть значительно бо́льшее. Вообще на практике регуляционных работ расстояние между полузапрудами устанавливается по опытным данным относительно действия существующих полузапруд на других участках реки при сходных естественных условиях. При этом иногда предпочитают расставить первоначально полузапруды на большем расстоянии, имея в виду, что в случае, если опыт их действия укажет на необходимость сближения расстояния, то таковое может быть достигнуто постройкой промежуточных полузапруд. Однако, относительно такого решения следует заметить, что излишнее расстояние между полузапрудами не только препятствует быстрому заносу промежутков между ними, но может послужить причиной размыва естественного берега, недостаточно прикрытого полузапрудами, и вызвать большие затруднения и расходы при дальнейших работах. Энгельс, основываясь на вышеупомянутых лабораторных опытах, указывает, что в прямолинейных участках расстояние между полузапрудами не следует делать более ширины регуляционной трассы при низких водах. Гаген полагал, что на реках небольших, подобных р.р. Мозеру, Везеру и др., расстояние между полузапрудами должно быть делаемо около 3/4 ширины реки, а на реках бо́льшего размера, как например Рейн, оно должно быть около 1/3 ширины реки. Теуберт предлагал руководствоваться условием, что при обычном меженнем горизонте две соседние полузапруды. берег и линия, граничащая регуляционную трассу, должны составлять в плане ромб. При регуляционных работах на р. Волге расстояние между полузапрудами устанавливалось вообще в 5/7 ширины трассы, но со следующими отступлениями от этой нормы: при коротких полузапрудах у вогнутых берегов это расстояние уменьшалось вдвое, а при длинных полузапрудах у выпуклых легко наращивающихся берегов оно увеличивалось в два раза.

Форма полузапруды определяется исходя из следующих соображений. В поперечном сечении полузапруде дается форма трапеции. Необходимость такой формы обусловливается применением фашинного материала и каменной наброски, представляющих материалы,

которые преимущественно и употребляются для регуляционных сооружений. Кроме того, пологие откосы предохраняют полузапруду от подмыва водою, переливающейся через гребень, а также течением, происходящим вдоль запруды. Крутизна откосов и ширина гребня зависят от силы течения, от высоты полузапруды и от материала, из которого она строится. Высота гребня полузапруды устанавливается в соответствии с положением горизонта, принятого в основание проекта регулирования меженнего русла реки. Например, на регулированных участках среднего и нижнего Днепра гребни каменных и фашинных полузапруд расположены на 1,2 — 1,5 *м.* над средне-низким горизонтом реки. Во избежание повреждений гребня полузапруды ледоходом, желательно располагать гребень полузапруд либо ниже, либо выше обычного уровня ледохода, что, конечно, не всегда возможно. В продольном профиле полузапруды ее гребню придают некоторый под'ем к берегу, от 1:100 до 1:200, в зависимости от меньшей или большей длины полузапруды, а также в зависимости от высоты естественного берега, к которому примыкает полузапруда. Продольный уклон гребня полезен, во-первых, для направления переливающейся через него воды в сторону русла, и, во-вторых, для постепенного расширения живого сечения реки при под'еме ее уровня. Если естественный берег низкий, то предпочитают не делать продольного под'ема гребня выше берега, во избежание размыва течением берега позади корня полузапруды; в противном случае необходимо продлить полузапруду по береговой полосе до более высокой части берега. Напротив, при крутом естественном береге продольный под'ем гребня полузапруды делают иногда большим вышеуказанных пределов, чтобы устроить более надежное сопряжение корня полузапруды с берегом.

Особое внимание должно быть обращено на форму головы полузапруды. Сторона головы, обращенная к реке, должна представлять пологий откос, крутизна которого соответствует проектному поперечному профилю меженнего русла в том смысле, что по мере повышения или понижения меженних горизонтов воды ширина профиля должна соответственно увеличиваться или уменьшаться. Поэтому откос головы полузапруды со стороны русла делается обыкновенно с уклоном от 1:3 до 1:5, иногда еще более пологий. Пологий откос и плавное очертание головы в горизонтальных сечениях полезны для ослабления водоворотов, образующихся в этом месте; кроме того, такая форма головы способствует, как показывает опыт, лучшему прониканию наносов в промежутки между полузапрудами. Так как вблизи голов течение разрабатывает глубокие вымоины дна (рис. 165), то, для предохранения от подмыва головы, основание последней значительно уширяется в виде широкой одежды дна вокруг головы. Иногда голове полузапруды придают в плане форму глаголя; при малой длине глаголя полезное его значение сомнительно, при большой длине его действие сходно с продольной дамбой.

Различные типы конструкции полузапруд показаны на рис. 167—176-м. Они строятся из фашинного материала или из камня в виде наброски, в зависимости от преобладания на месте того или другого материала.

Фашинные полузапруды строятся преимущественно из погружаемой фашинной кладки, причем в тех случаях, когда глубина воды значительна или когда можно опасаться размывов дна около подошвы сооружения, фашинная кладка основывается на фашинных тюфяках, положенных на дно в один или несколько по высоте слоев (рис. 167). Если приходится строить полузапруду на глубоком месте, например, пересекая глубокую вымоину или прежний плес, то с целью уменьшения высоты тела полузапруды делают сначала подсыпку грунтом от землечерпания, поверхность ее покрывают фашинным тюфяком и засим на поднятом и выравненном таким образом основании возводится тело полузапруды из погружаемой фашинной кладки.

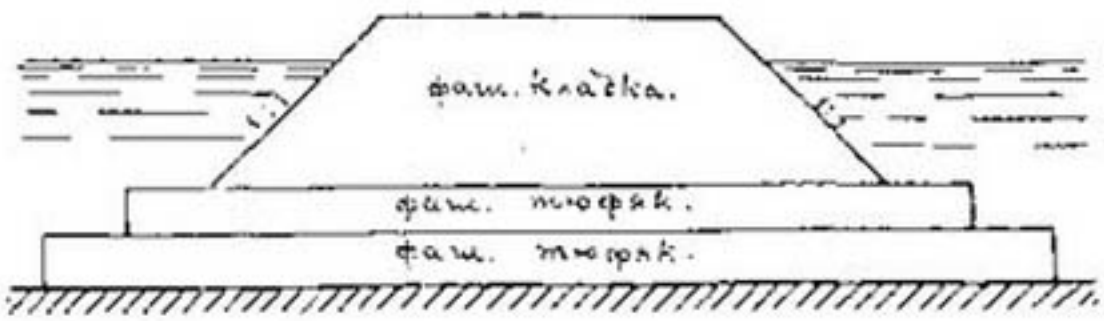
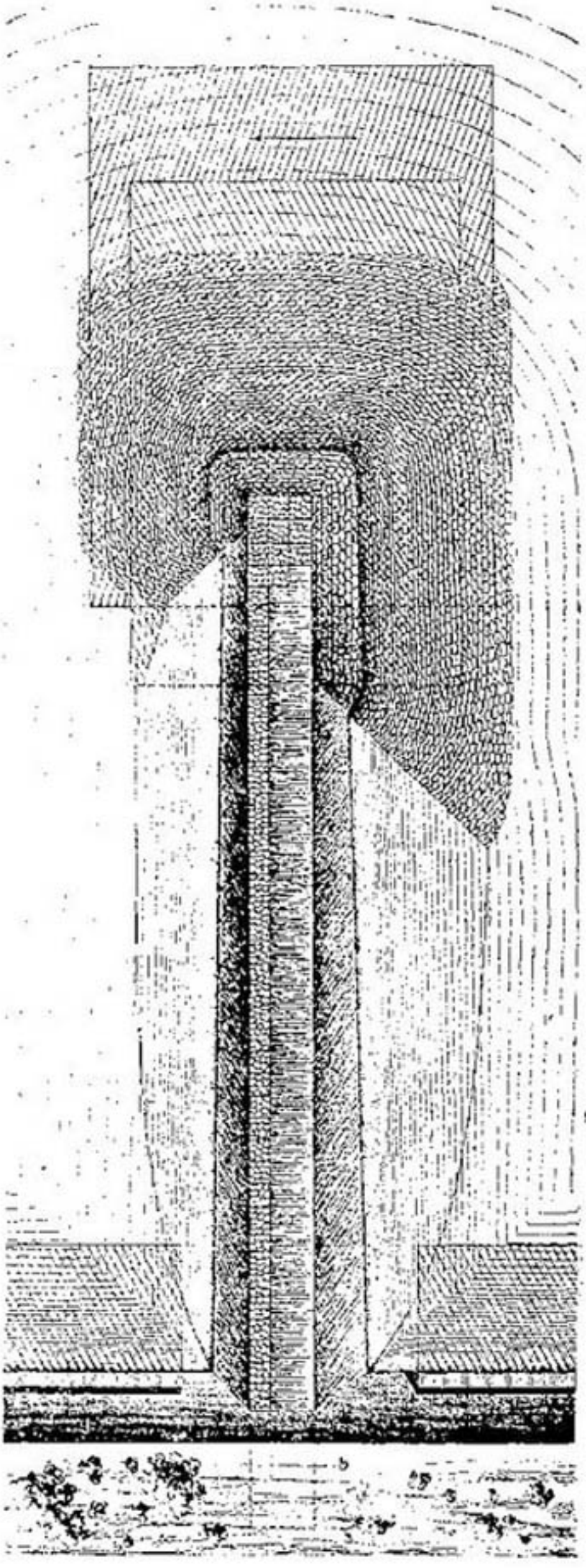


Рис. 167. Тюфячное основание полузапруды.

Фашинным полузапрудам дают по верху ширину от 1 до 3 *м*. Боковые откосы полузапруд из погружаемой фашинной кладки делаются обыкновенно одиночные. Если можно опасаться вредного размывающего действия переливающейся через полузапруду воды при под'еме горизонта, то полезно придать откосу с низовой стороны более пологий уклон, например полуторный, и уложить с этой стороны на дно реки полосу из фашинных тюфяков, покрытых на некоторую ширину откосом фашинной кладки. Подобный же способ можно применить для выравнивания дна, имеющего крутой уклон в поперечном к полузапруде направлении.

Гребень полузапруды необходимо укрепить, в особенности в тех случаях, когда ледоход происходит при низких уровнях. При устройстве полузапруд из погружаемой фашинной кладки укреплением гребня служит венчающий слой из хворостяной выстилки. Если этого по местным условиям недостаточно, то гребень полузапруды и верхнюю часть откосов над уровнем низких вод укрепляют камнем. Иногда делают присыпку камня также и на подводной части откосов фашинной кладки с целью лучшей их защиты. На среднем Днепре, для удержания загрузочного камня, на гребне полузапруд делались плетневые заборы клетками 2×2 *м*. в плане высотою 15 *см*., а в клетки укладывался камень слоем 15 *см*. Подобный же способ укрепления гребня показан на рис. 168 и 169-м, представляющих в плане и продольном разрезе полузапруду на р.Висле. На нижнем течении р. Западной Двины, в пределах города Риги, гребень шириною 10,5 фут. и верхняя часть откосов полузапруд, построенных из погружаемой фашинной кладки,



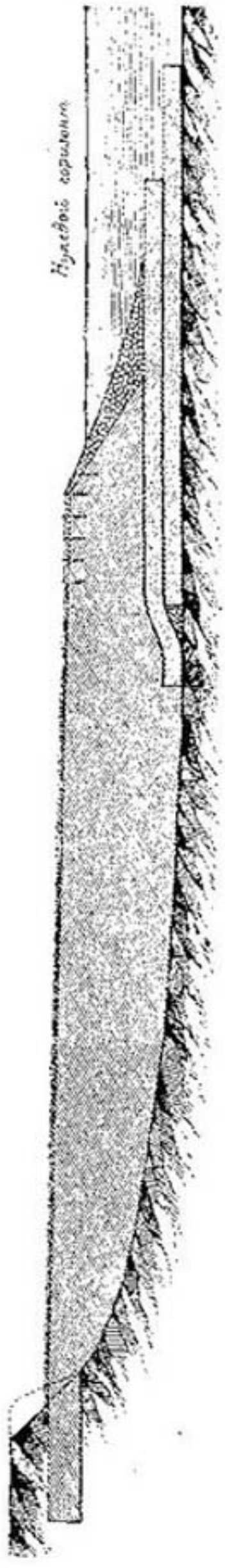


Рис. 168 и 169. Конструкция полузапруд на р. Висле.

покрыты правильно уложенным в плетневых клетках плитным камнем (рис. 170). При замощенном гребне ему иногда придавали несколько выпуклую форму для смягчения ударов льдин при их переползании через гребень.

Каменные полузапруды строятся трапецоидальной формы из каменной наброски (рис. 171). Откосам следует придавать уклон не менее одиночного, лучше полуторный, во избежание сползания камней на откосах. На р. Западной Двине полузапрудам из каменной наброски придавались с обоих сторон одиночные откосы, но ширина гребня доводилась до 2,3 *м*. В нижней части среднего Днепра и на нижнем Днепре полузапруды из каменной наброски делались с одиночным верхним и полуторным нижним, по течению, боковыми откосами, причем поверхность каменной наброски выше средне-низкого горизонта воды грубо облицовывалась подборным камнем с расщебенкой. При большой глубине дна и необходимости сильного профиля полузапруды, каменная полузапруда, с целью экономии камня, делается с ядром из гравия, надводная поверхность которого замощивается плотной каменной мостовой; подобный тип показан на рис. 172-м, представляющем в разрезе полузапруду на р. Рейне.

Голова и корень полузапруды являются частями, наиболее подверженными повреждениям. Голова полузапруды, действуя

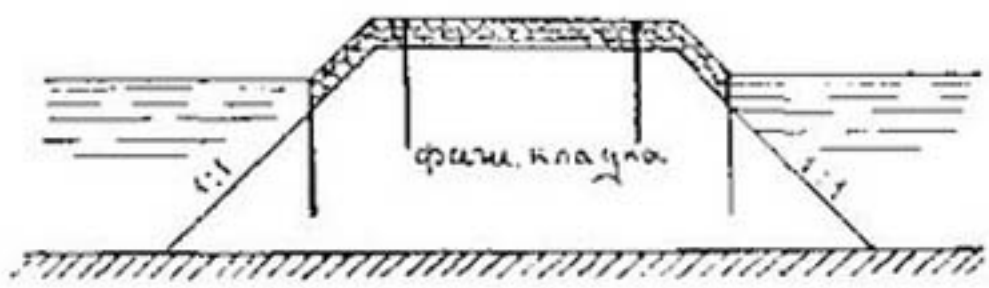


Рис. 170. Укрепление гребня полузапруд на р. Западной Двине.

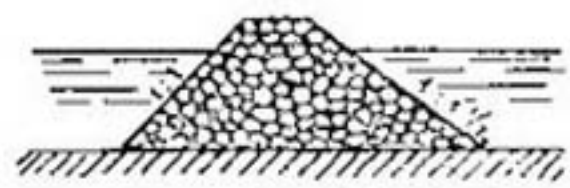


Рис. 171. Полузапруда из каменной наброски.

непосредственно на речной поток, вызывает образование в нем водоворотов, которые могут производить глубокие размывы речного дна возле основания головы; в случаях ледохода при низких уровнях воды головы полузапруд тоже подвергаются более других частей разрушительному действию ударов плывущих льдин. В корневой части полузапруд повреждения происходят чаще всего вследствие размыва берега около угла сопряжения с ним полузапруды. Последствия такого размыва могут быть весьма опасны, так как при высоких водах размывы могут получить столь сильное развитие, что течение разработает себе глубокое русло позади полузапруды. Поэтому в конструкциях голов и корней полузапруд имеются некоторые особенности, которые главным образом заключаются в следующем:

Ранее уже было отмечено, что откос головной части полузапруды должен опускаться со стороны реки полого по всей высоте до дна, чтобы при изменениях уровня воды ширина образованного русла реки равномерно увеличивалась или уменьшалась при увеличении или уменьшении расхода воды. Полезно такой речной откос головы сопрягать с боковыми ее откосами по плавной конической поверхности, без образования плоскостных ребер. При устройстве

фашинных полузапруд трудно образовать из фашинной кладки пологие откосы, а тем более с коническими поверхностями. Поэтому в головах фашинных полузапруд откосы образуются помощью широкой присыпки камня (рис. 173), причем выше уровня низких вод камни на поверхности укладываются в виде плотной мостовой. Образование

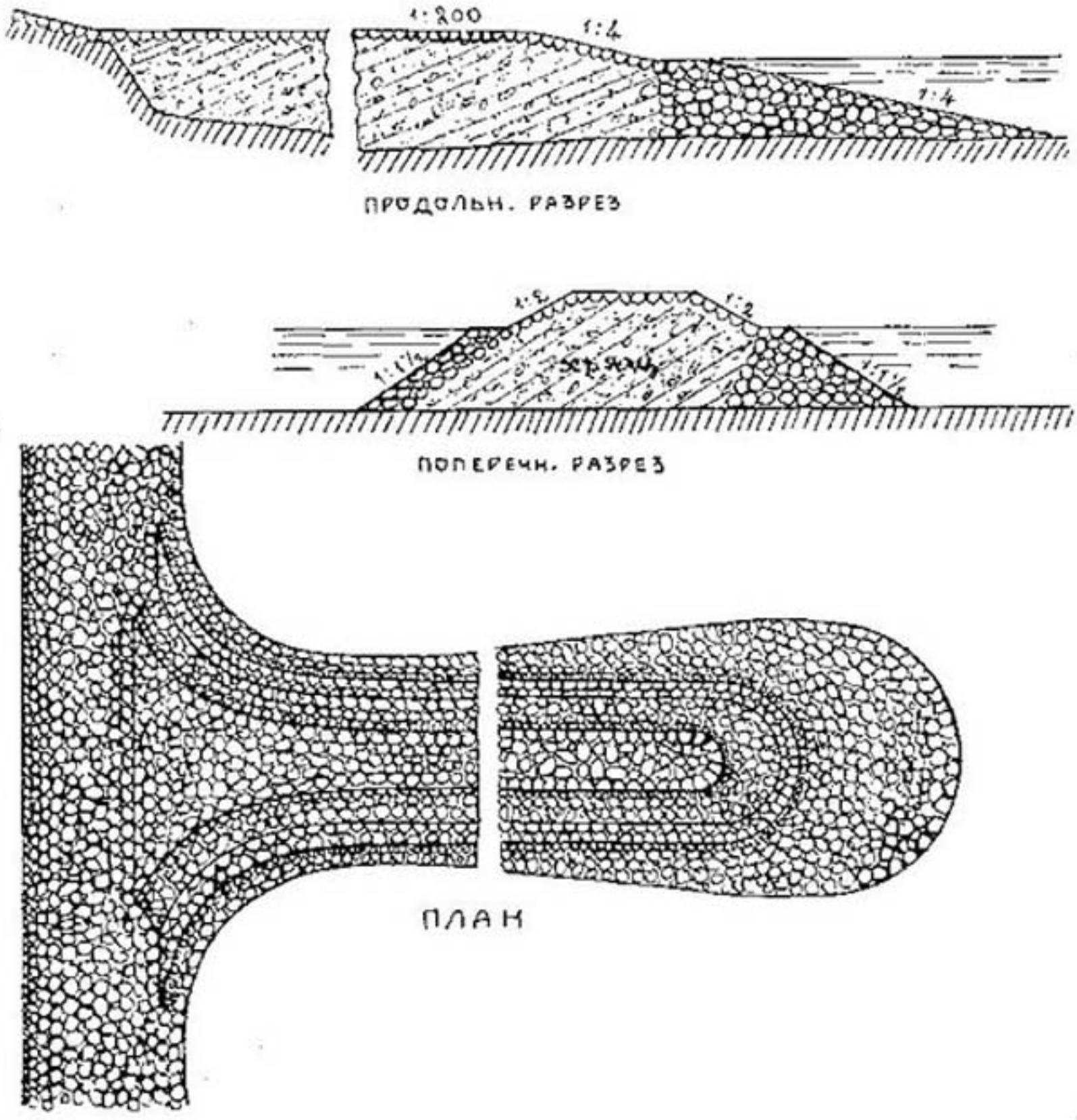


Рис. 172. Конструкция каменной полузапруды на р. Рейне.

откосов головы помощью каменной присыпки важно также с целью укрепления поверхности наброски более тяжелым материалом. При устройстве каменных полузапруд с ядром из более мелкого материала (гравий, хрящ) головная часть тоже делается из накидного камня (рис. 174). Во всех случаях, когда по качествам грунта дна реки можно опасаться его размыва, необходимо надежно укрепить основание головы полузапруды. С этой целью под головную часть полузапруды укладываются в один или два слоя по высоте широкие фашинные тюфяки, выступающие за

пределы откосов каменной наброски так, что образуется широкая фашинная одежда дна вокруг головы. На рис. 168 и 169-м показан

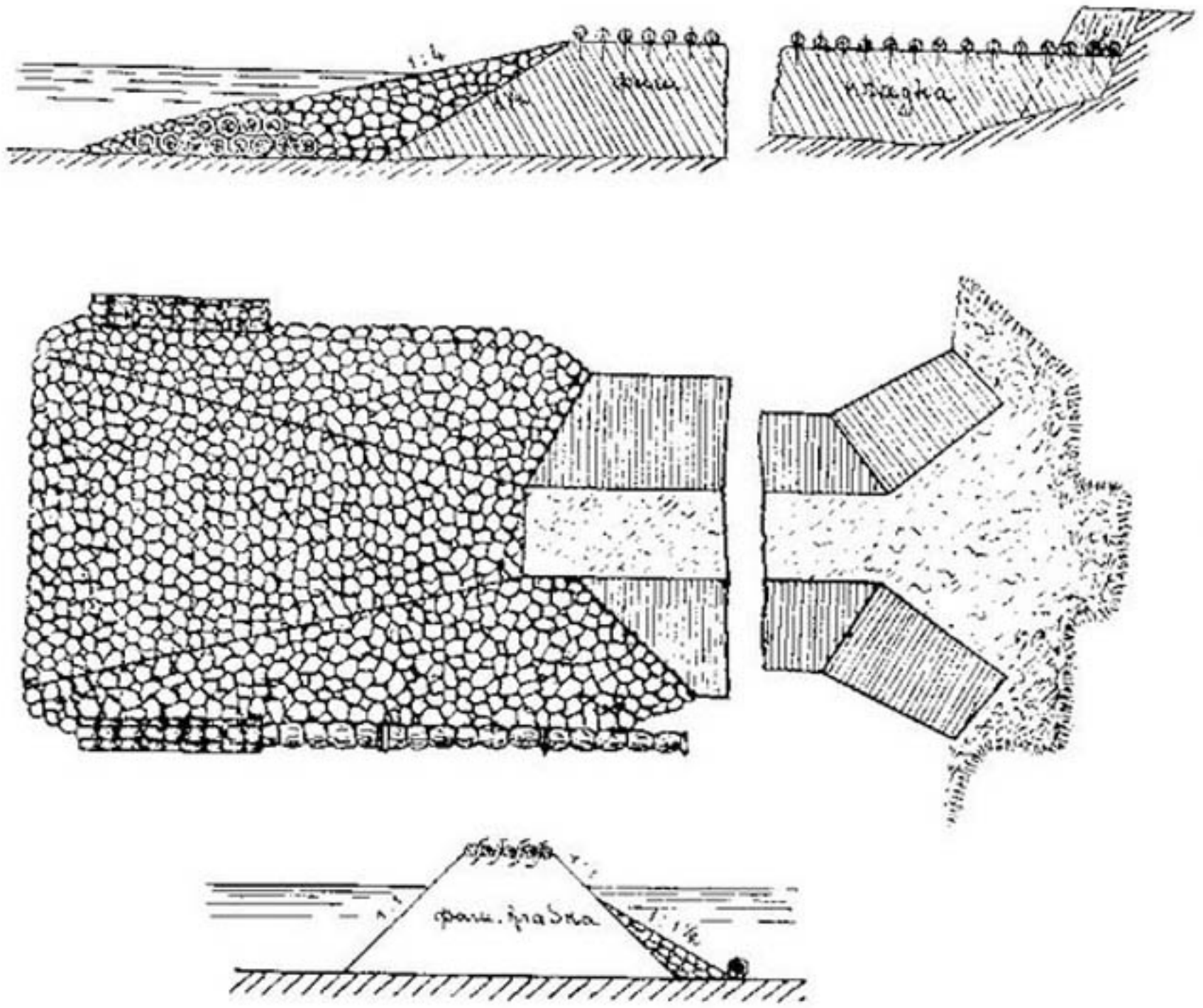


Рис. 173. Устройство из каменной наброски головной части фашинной полузапруды на р. Везере.

тип фашинных полузапруд на р. Висле, по которому основание головной части составлено из двух слоев широких фашинных тюфяков. Рис. 173-й изображает фашинную полузапруду на р. Везере с массивной присыпкой камня пирамидальной формы; подошва откосов укреплена тяжелыми фашинами со стороны реки в виде кладки таких фашин во всю ширину основания и по высоте в два ряда, а с боков в виде каймы вдоль подошвы откоса.

Рис. 174. Разрез головной части полузапруды из каменной наброски с ядром из гравия.

Корень полузапруды должен быть, во избежание обхода его течением, глубоко врезан в откос берега. При мягком или сыпучем грунте берега

необходимо, кроме того, хорошо укрепить берег па некотором протяжении в обе стороны от корня полузапруды. С этой целью корневую часть полузапруды расширяют и поднимают так, что она имеет более крутой уклон по оси полузапруды, чем продольный уклон гребня полузапруды. Рис. 172-й представляет пример корневой части каменной полузапруды

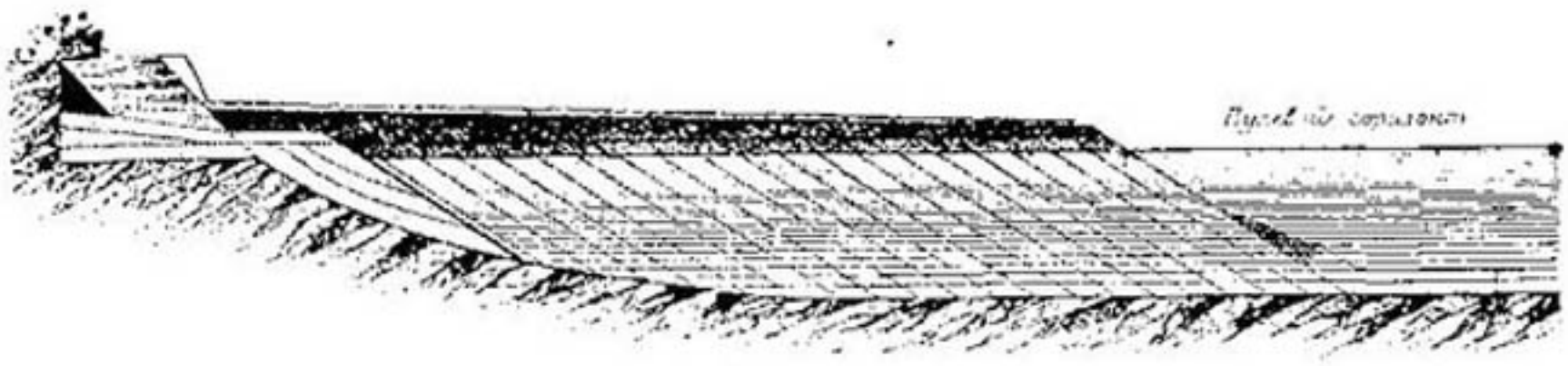


Рис. 175. Продольный разрез.

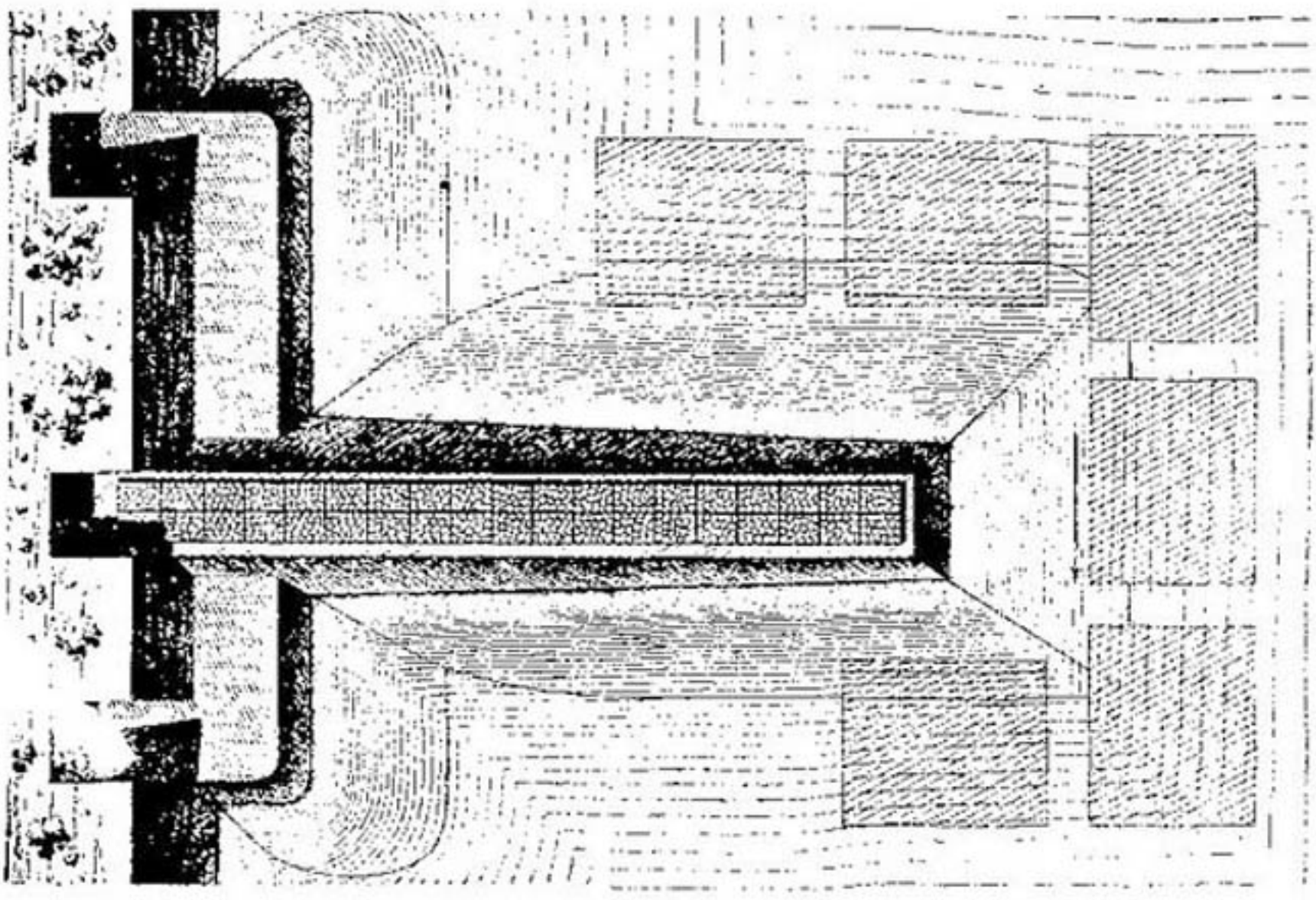


Рис. 176. План.

Рис. 175 и 176. Тип корневой части фашинной полузапруды, применявшийся на р. Висле.

с укреплением прилежащего участка берега каменной мостовой; рис. 173-й показывает корень фашинной полузапруды, сделанный в виде уширения фашинной кладки. Укрепление берега около корня полузапруды делается иногда в виде широкой опояски, концы которой тоже глубоко врезываются в береговой откос. На рисунке 175 и 176-м показана фашинная полузапруда на р. Висле, укрепленная в береге помощью опояски, тоже фашинной.

б) Продольные и струенаправляющие дамбы.

Конструкция продольных и струенаправляющих дамб в общем сходна с конструкцией полузапруд. Они тоже строятся преимущественно из фашинного и каменного материалов. В поперечном профиле их форма тоже приближается к трапецоидальной. Гребню продольной дамбы тоже придают долевой уклон, но он имеет несколько иное значение, чем в полузапрудах. Уклон гребня продольной дамбы соответствует продольному профилю поверхности воды в реке на протяжении длины дамбы. Действительно, представим себе продольную дамбу, примкнутую к берегу в точке *A* (рис. 177). В пространстве между дамбой и берегом уровень воды находится на высоте уровня речной воды возле низового конца дамбы. Если бы гребень дамбы был на всем ее протяжении горизонтальным, то дамба на ближайшем к ее корню участке испытывала бы гидростатическое со стороны реки давление при подпоре $h=iJ$.

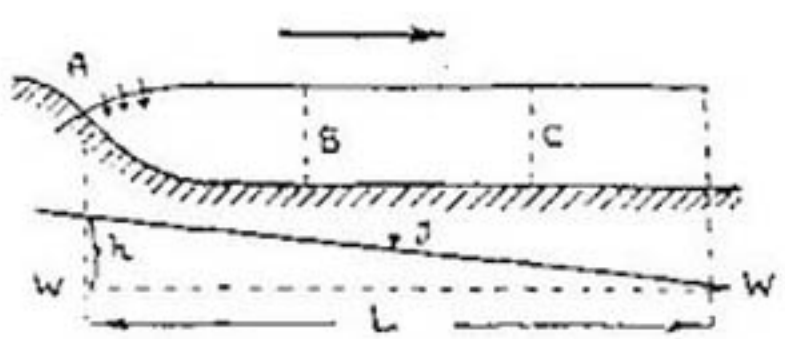


Рис. 177.

При под'еме уровня воды в реке перелив через гребень начался бы ранее около корня дамбы, так как в этом месте уровень речной воды выше на величину h, чем в низовом конце дамбы. Вследствие такой разницы уровней образовывалось бы течение воды позади дамбы, которое могло-бы вызвать размыв тех наносов, накопление которых между дамбой и берегом необходимо. Задержанию наносов способствуют траверсы *B* и *C*, но при горизонтальном гребне продольной дамбы траверсы тоже испытывали бы гидростатическое давление по вышеуказанной причине.

В поперечном сечении форма продольной дамбы несколько отличается от полузапруды в том отношении, что наружный со стороны реки откос дамбы должен быть более пологим (1 : 2 до 1 : 4). Значение пологости наружного откоса продольной дамбы такое же, какое имеет пологий с речной стороны откос головы полузапруды: бо́льшая пологость необходима для того, чтобы при под'еме или понижении уровня речной воды ширина русла реки, образованного между дамбами, тоже равномерно увеличивалась или уменьшалась, соответственно прибыли или убыли речной воды. Пологий наружный откос необходим также для ослабления размывающего действия течения воды на дно реки около подошвы дамбы. С тою же целью часто требуется укреплять широкими фашинными тюфяками дно реки около подошвы наружного откоса дамбы по всему протяжению последней. Внутренний, со стороны берега, откос может быть более крутой (1 : 1 — 1 : 1½), так как он не подвергается действию постоянного течения воды. К тому же с этой стороны и высота дамбы бывает обыкновенно меньшая, вследствие

под'ема дна реки к ее берегам. Если проектная трасса меженнего русла настолько приближается к берегу, что глубина дна с внутренней стороны дамбы становится незначительной, то является более выгодным засыпать пространство между берегом и дамбой до гребня дамбы, и в таком случае продольная дамба приобретает вид опояски или укрепленного берегового откоса. Гребень и откосы фашинных

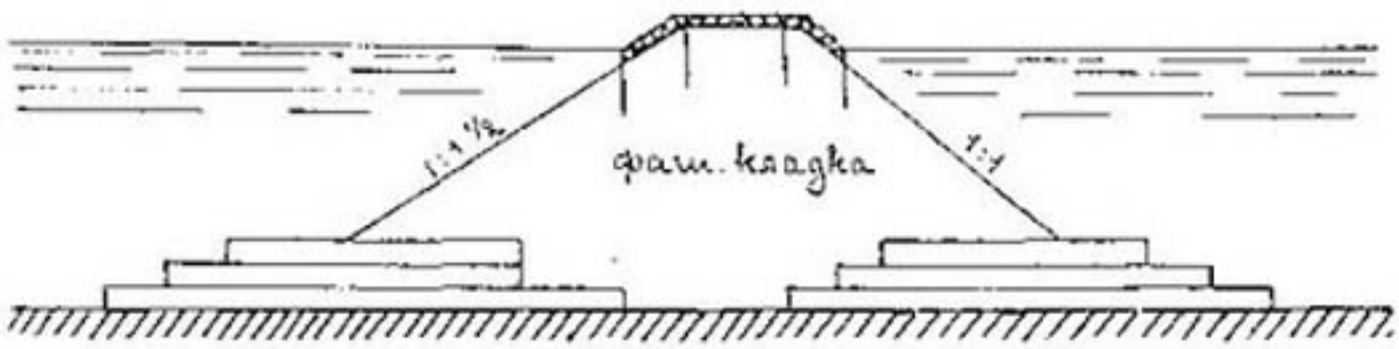


Рис. 178. Тип продольной дамбы на р. Западной Двине.

продольных дамб необходимо укреплять каменной присыпкой, выстилкой или мостовой, причем такие укрепления требуются более сильные, чем в полузапрудах, так как продольные дамбы подвергаются более сильному постоянному действию течения, а при высокой воде происходит перелив воды через гребень, притом на всем протяжении дамбы.

Струенаправляющие дамбы строятся такой же конструкции, как и продольные дамбы, а траверсы—по типам полузапруд.

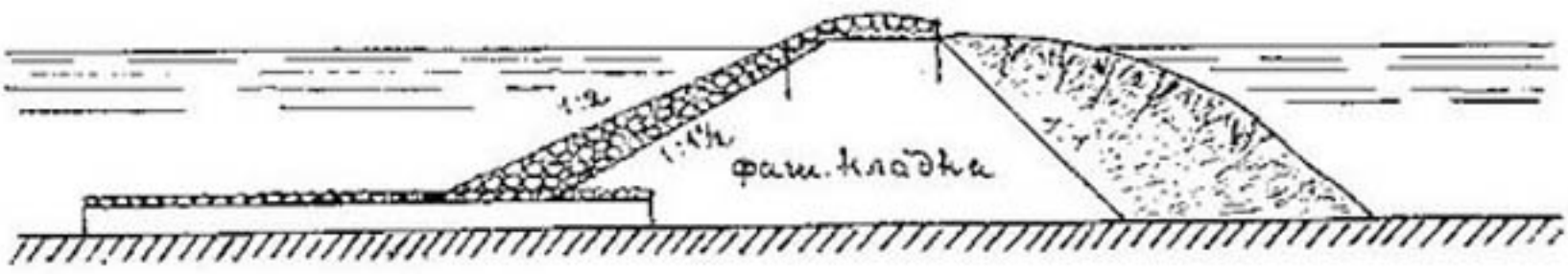


Рис. 179. Тип продольной дамбы на р. Западной Двине.

На рис. 178 и 179-м изображены в разрезе типы фашинных продольных дамб на нижнем участке р. Западной Двины, построенных на значительной глубине. На первом из этих рисунков показана дамба, основание которой укреплено с обоих сторон фашинными тюфяками, уложенными в три слоя; надводная часть откосов и гребень укреплены выстилкой плитного камня в плетнях. Второй рисунок изображает дамбу с сильным укреплением наружного откоса помощью каменной наброски и тюфяка; гребень замощен камнем, а с внутренней стороны сделана широкая присыпка грунтом, вынутым при землечерпании.

На рисунках 180—183-м показаны типы фашинных дамб, применявшихся на р. Висле. Тело дамбы (рис. 180 и 181) состоит из погружаемой фашинной кладки, наружная подошва дамбы выстлана фашинным тюфяком, откосы укреплены каменной присыпкой, которая делается

или только на наружном откосе, или же на обоих откосах (рис. 182). В обоих типах поверхность каменной подсыпки в надводной части (выше нулевого горизонта) выравнена плотной укладкой отборных камней

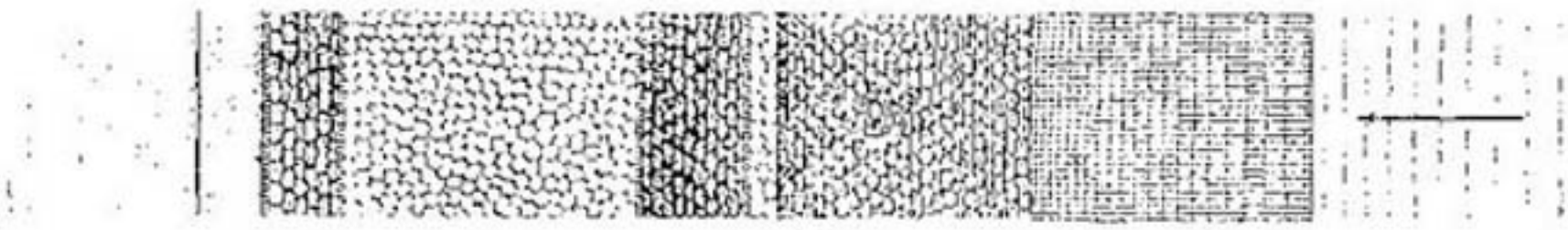


Рис. 180. Вид сверху.

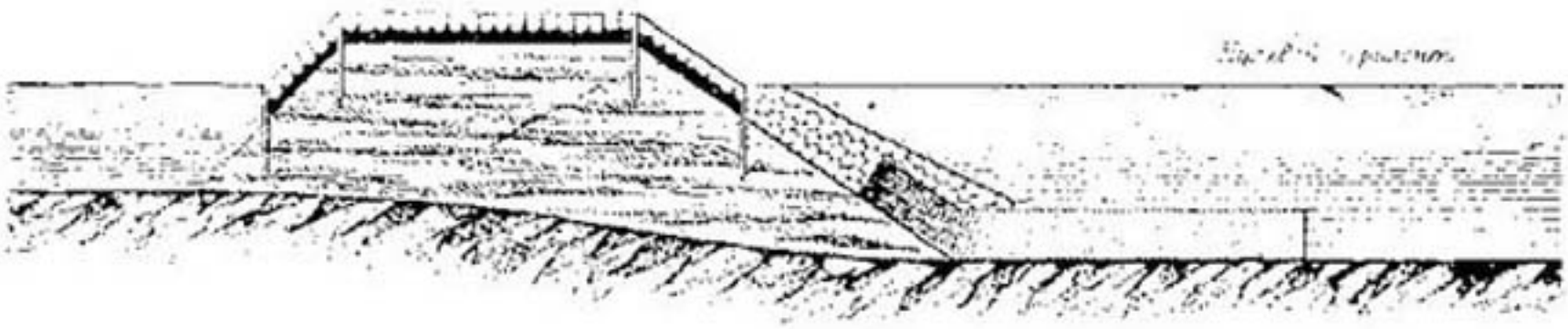


Рис. 181. Поперечный разрез.

Рис. 180 и 181. Тип продольной дамбы на р. Висле.

с расщебенкой. Гребень откоса, а иногда и надводные части откосов замощены крупным камнем между плетнями. Гребню придавалась обыкновенно выпуклая форма, но применялась также и вогнутая

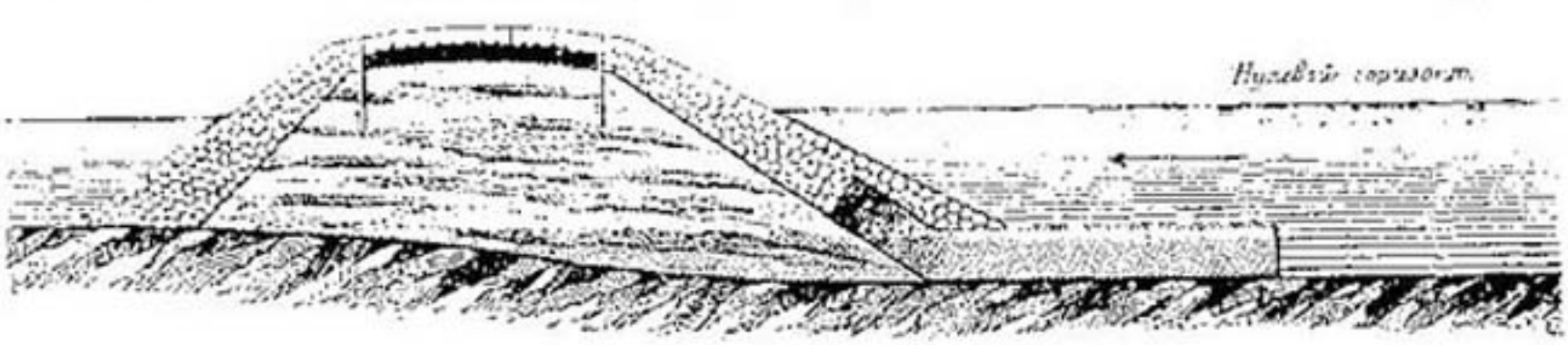


Рис. 182. Продольная дамба с укрепленными каменной забросной откосами по обоим сторонам.

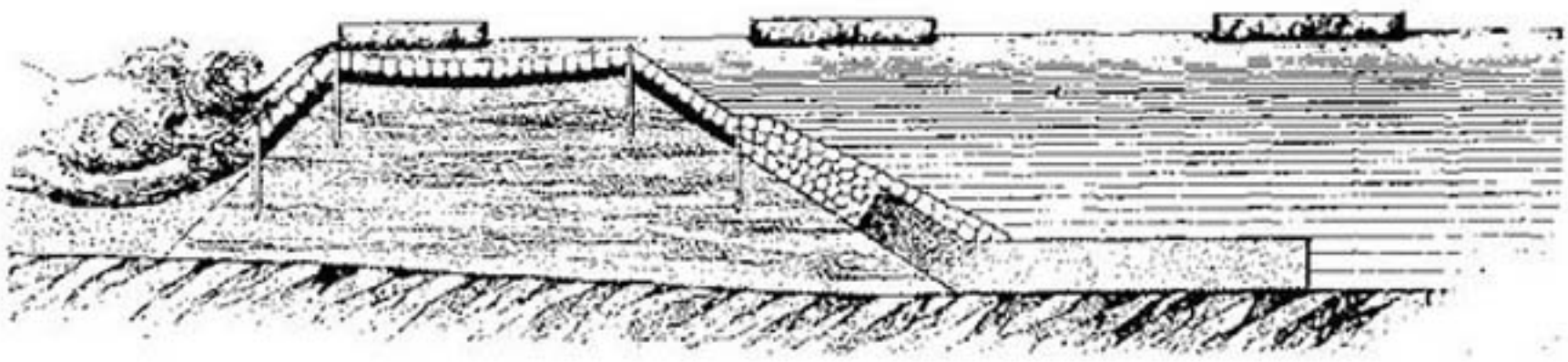


Рис. 183. Продольная дамба с вогнутым гребнем.

форма, за которой признавались некоторые преимущества в отношении облегчения прохода льдин, а именно, чтобы они не нагромождались около гребня.

На рис. 184 показана в поперечном профиле фашинная продольная дамба в тех случаях, когда она направлена вдоль берега по линии уреза низкого горизонта; подошва снаружи укрепляется лентой фашинных тюфяков; в случае надобности откос этот может быть еще усилен каменной присыпкой. Если дамба расположена вплотную около более возвышенного берега, то она обращается в опояску берега, являясь береговым укреплением; рисунки 185 и 186-й изображают такую опояску с корневой ее частью, причем в плане показана фашинная кладка, уже покрытая в корневой части венчающим слоем хвороста, а сама опояска показана в периоде ее постройки, а именно во время погрузки веерных фашинных слоев.

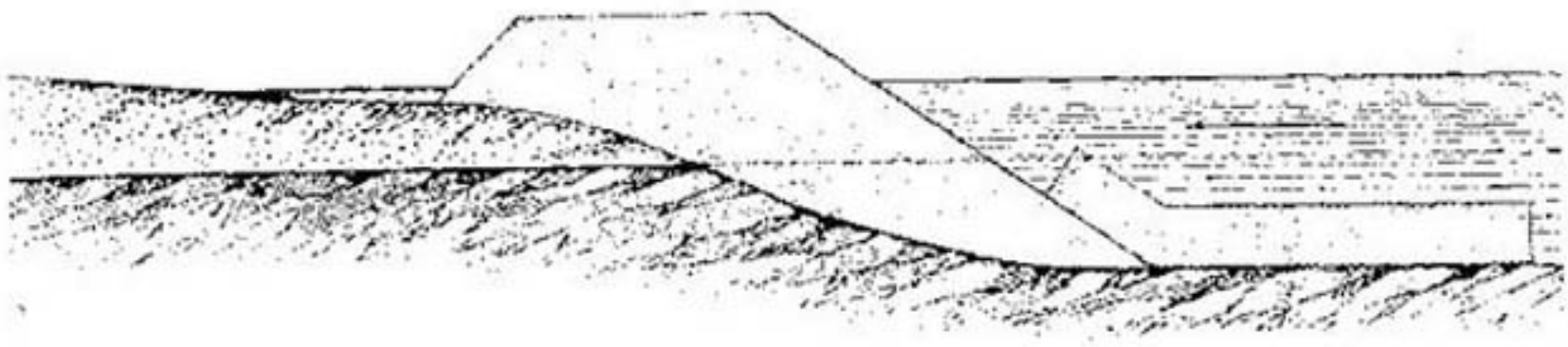


Рис. 184. Продольная дамба, расположенная вблизи берега.

Продольная дамба, построенная из каменной наброски, показана на рис. 187-м. С целью экономии камня, она составлена из отдельных по высоте призм каменной наброски с засыпкой гравета позади призмы. Постройка такой дамбы производится постепенно, начиная с отсыпки нижней призмы.

Каменная продольная дамба с ядром из гравия показана в разрезе на рис. 188-м. Рисунок этот представляет тип продольной дамбы, в котором трапецоидальный поперечный профиль заменен округленной формой по кривой, вписанной в трапецию. В местах, где такая дамба близко подходит к берегу, обращаясь в береговое укрепление или опояску, она принимает вид, показанный на рис. 189-м и 190-м.

Корневые и головные части продольных дамб как фашинных, так и каменных строятся с соблюдением тех же правил, какие выше указаны для корневых и головных частей полузапруд.

Указанный в § 31-м сипайный способ устройства хворостяных сооружений на реках Туркестанского Края удобоприменим для устройства плотин, служащих в качестве продольных дамб и полузапруд для регулирования реки. Тело дамбы или полузапруды составляется из отдельных сипаев, установленных в один или два ряда. Сипаи устанавливаются своими основаниями вплотную один к другому. Для однорядной дамбы трехножные сипаи ставятся рядом, как показано на рис. 191-м, а четырехножные согласно рис. 192-го. Сипаи соединяются между собою особыми бревнами толщиною 2½—4 вершка, накладываемыми с каждой стороны и скрепляемыми с горизонталь-

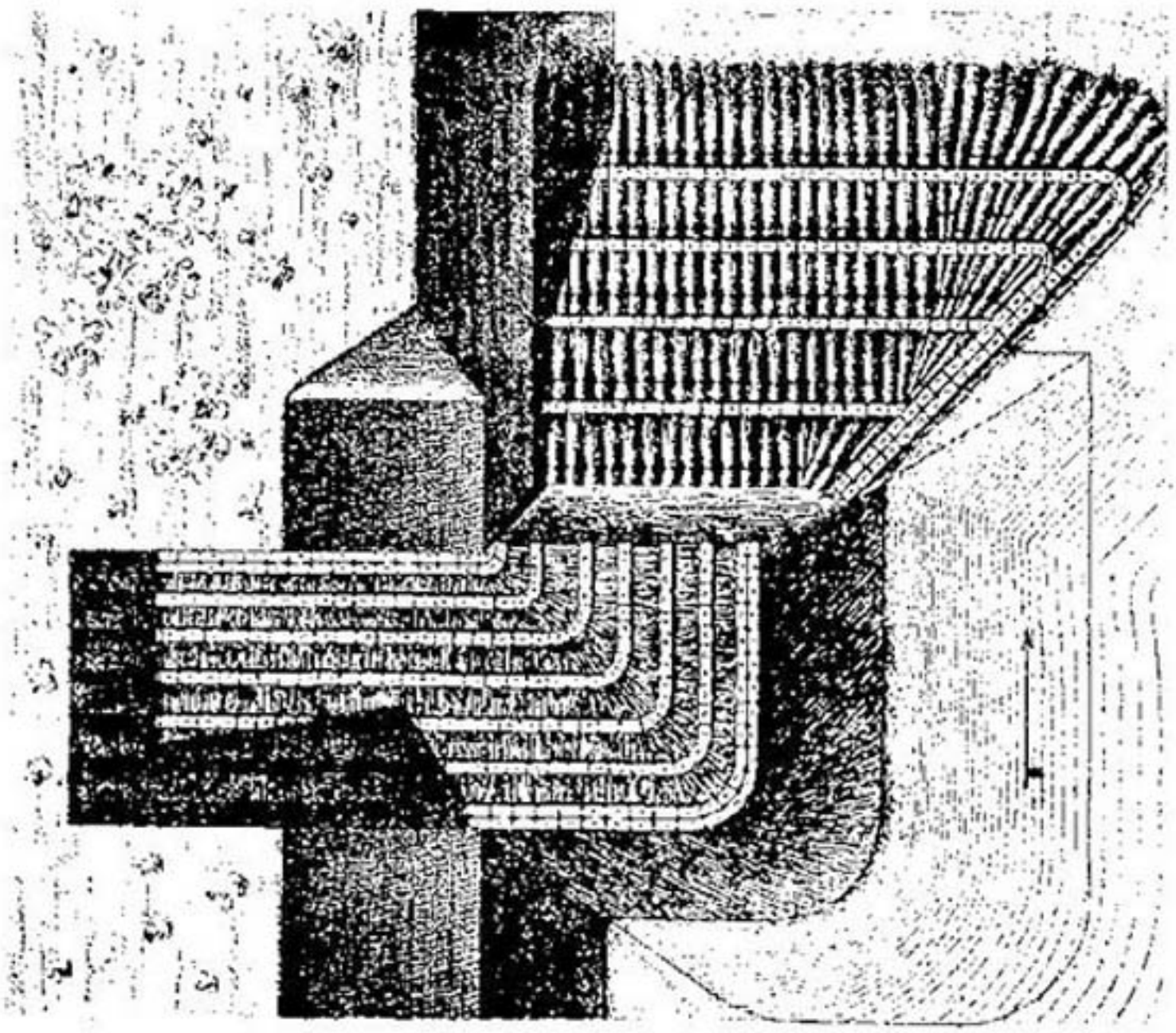


Рис. 185. Вид сверху.

Рис. 185 и 186. Продольная дамба в виде береговой опояски.

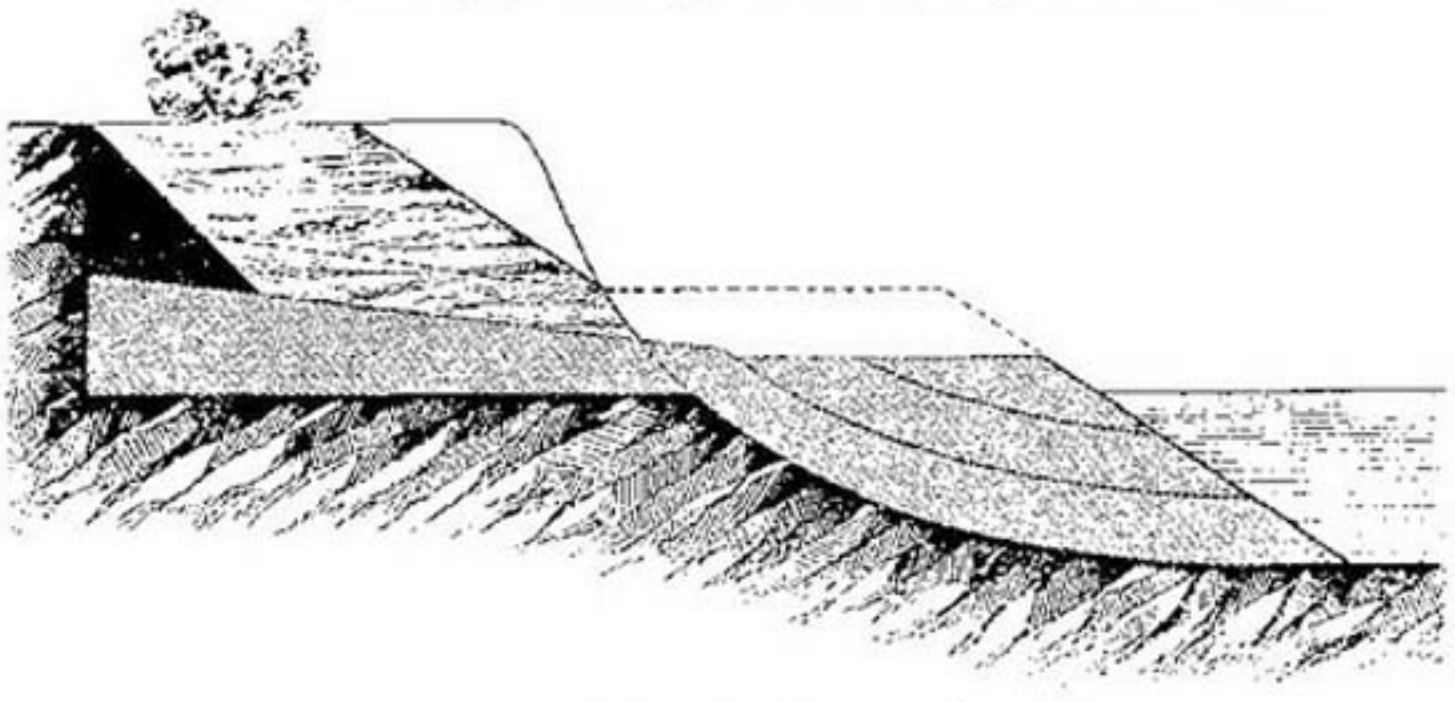


Рис. 186. Разрез.

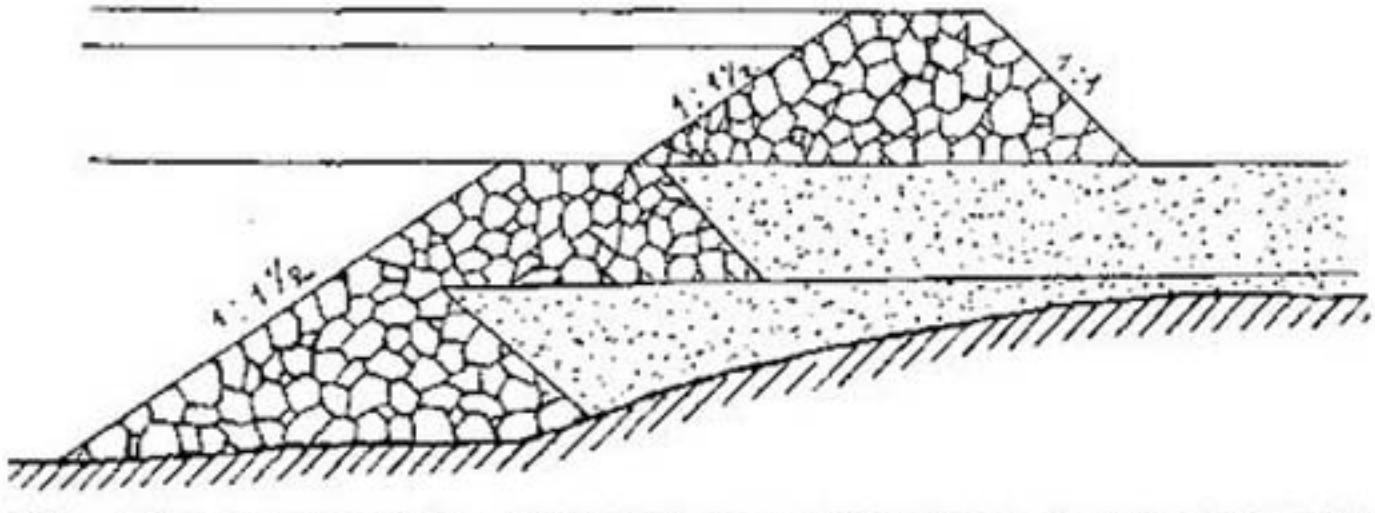


Рис. 187. Продольная дамба, построенная в виде призм из каменной наброски.

ными обвязками сипая помощью проволоки или скоб. В однорядных сипайных дамбах, для придания им большей прочности и для пре-

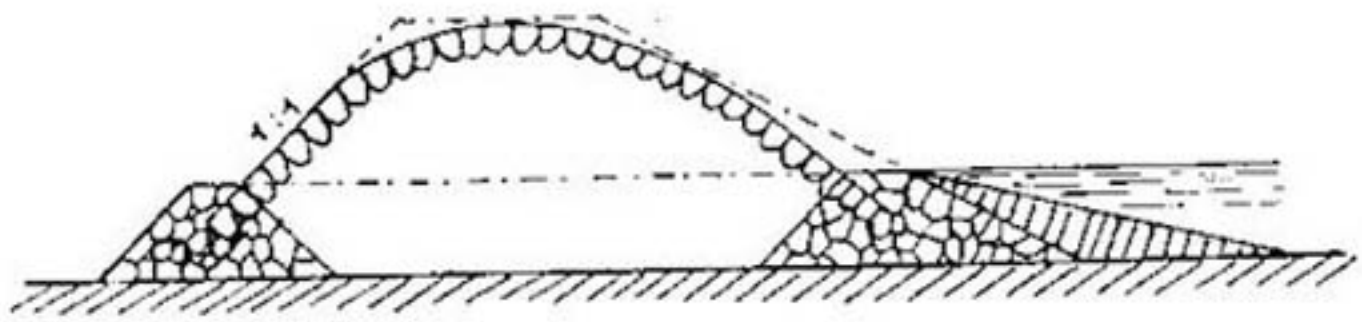


Рис. 188. Продольная дамба, ядро которой сделано из гравия.

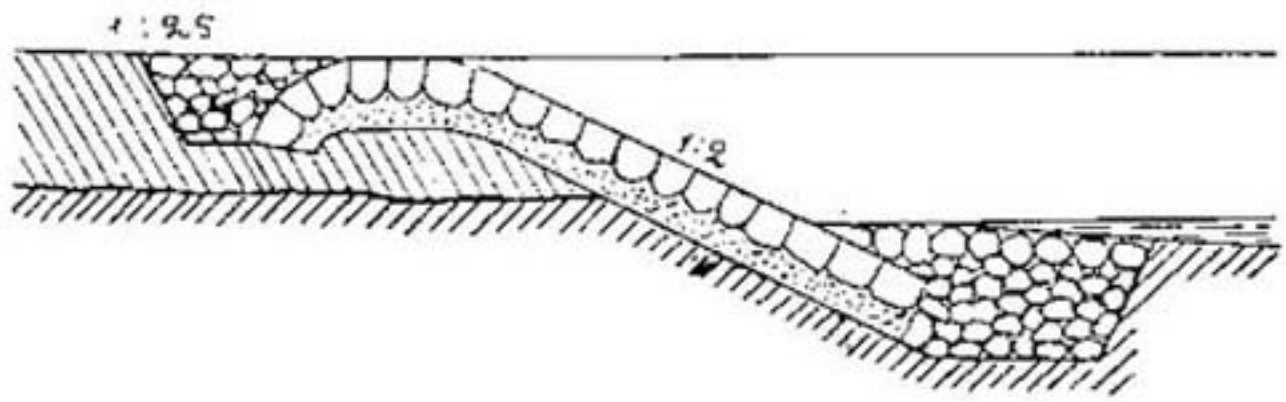


Рис. 189. Каменная продольная дамба в виде береговой опояски.

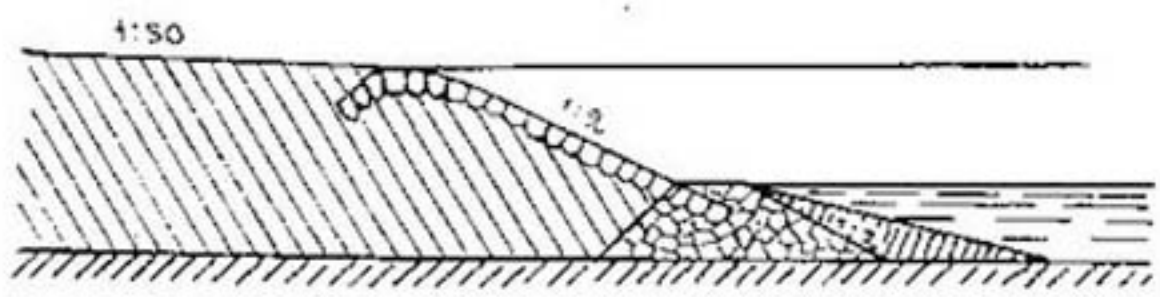


Рис. 190. Каменная продольная дамба в виде береговой опояски.

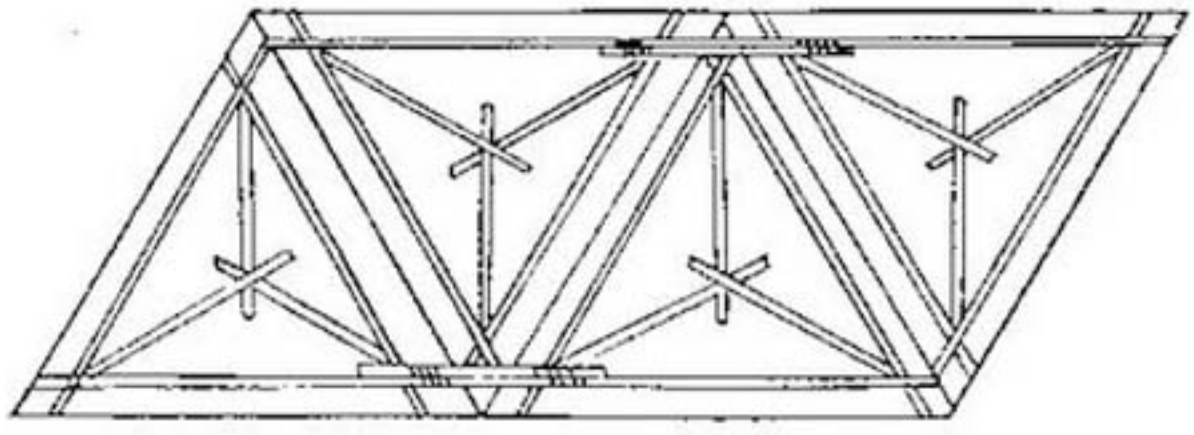


Рис. 191. Сопряжение между собой трехножных сипаев.

дохранения от размыва дна продольным вдоль дамбы течением, устанавливаются на некотором расстоянии друг от друга отдельные сипаи, в виде контрфорсов, которые тоже связываются с сипаями дамбы помощью бревенчатых накладок. Головная часть дамбы или полузапруды уширяется установкой здесь четырех сипаев более крупного размера, поставленных в два ряда и скрепленных бревенчатыми накладками в одну общую конструкцию.

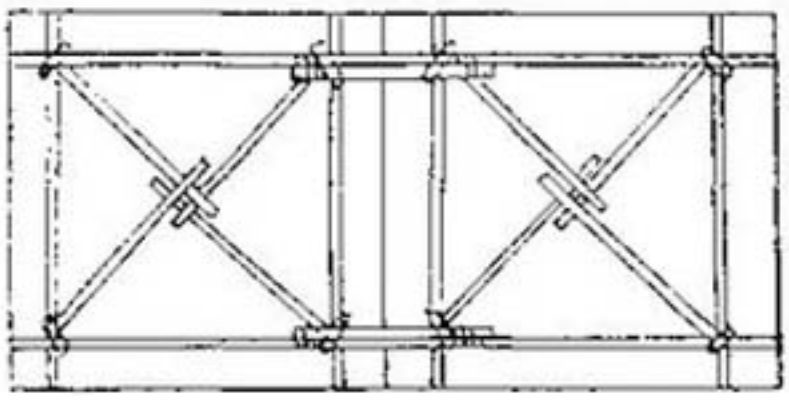


Рис. 192. Сопряжение между собой четырехвожных сипаев.

Полузапруды и продольные дамбы могут быть построены также из габионов, описанных в § 31-м. Сделанный в 1923—24 год. опыт устройства габионной полузапруды на р. Аму-Дарье дает основание предполагать возможность развития габионных сооружений в разных видах регуляционных речных сооружений.

в) Донные полузапруды и донные пороги.

Как об'яснено в § 22-м, донные полузапруды и донные пороги служат для воздействия на конфигурацию дна в некоторых местах регулируемого меженнего русла реки с целью привести эту конфигурацию в удобный для фарватера вид. Вместе с тем названные сооружения являются одним из средств для защиты продольных дамб и голов полузапруд от подмыва их течением. Помощью донных порогов можно, кроме того, прекратить развитие глубоких вымоин в дне реки, достигнуть естественного заполнения этих вымоин наносами, а в случае надобности можно помощью порогов наращивать дно и тем воздействовать на распределение поверхностных уклонов речного потока. Донные полузапруды и пороги являются подводными сооружениями, так как по всей длине порога и в большей части длины

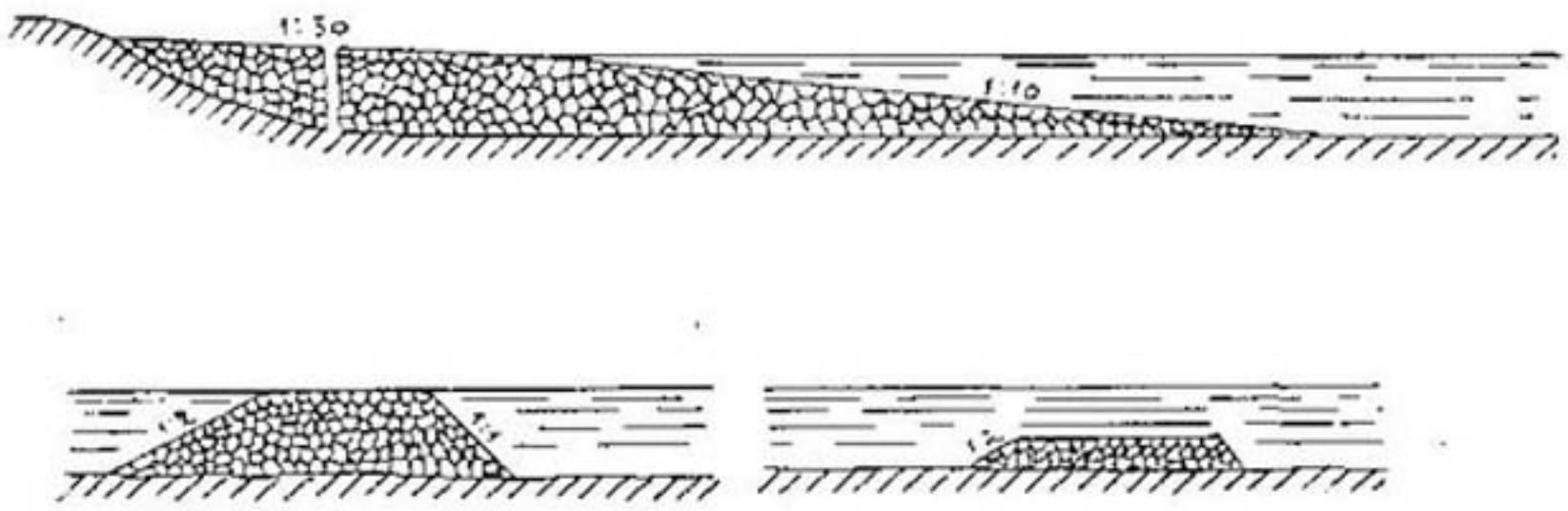


Рис. 193. Донная полузапруда, выведенная от берега.

донной полузапруды гребень этих сооружений находится ниже низкого меженнего горизонта. Это обстоятельство в значительной степени влияет на их конструкцию и на способ их возведения.

Донная полузапруда, примыкая к откосу головы полузапруды или к откосу продольной дамбы, или же к укрепленному берегу, полого спускается своим гребнем от горизонта низких вод до дна реки. Нередко требуется сопрягать ее на дне с донным порогом.

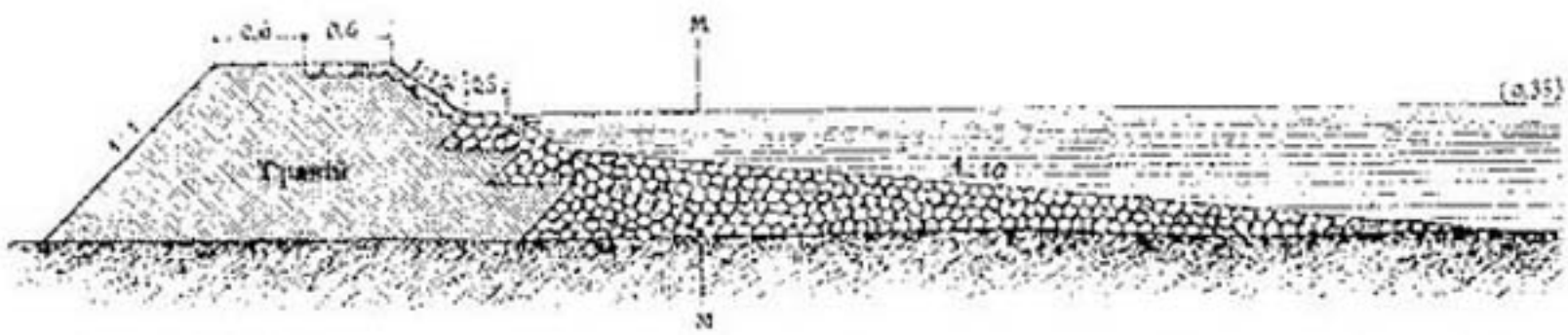


Рис. 194. Каменная донная полузапруда, примкнутая к продольной дамбе.

Пологость наклона донной полузапруды, в зависимости от проектного поперечного профиля русла, доводят до $^1/_3 - ^1/_{10}$; иногда делают ее с постепенным уменьшением уклона так, что вблизи дна уклон уменьшается до $^1/_{20}$ и даже до $^1/_{30}$. В поперечном профиле донная полузапруда имеет трапецоидальную форму, причем откос с верховой, по течению, стороны может быть более крутым (1 : 1 — 1 : 1½), а с низовой стороны его нужно делать пологим (1 : 1½ — 1 : 3) для ослабления вредного действия переливающейся воды. Донные полузапруды делаются обыкновенно из каменной наброски, а если применяется фашинный материал, то в виде кладки тонких фашинных тюфяков или тяжелых фашин, причем часто фашинное тело составляет лишь ядро сооружения, покрытое каменной наброской. На рис. 193-м приведен пример каменной донной полузапруды на р. Везере, примкнутой к берегу; верхний рисунок изображает продольный профиль по оси донной полузапруды, нижний левый рисунок - поперечный ее разрез около уреза меженней воды, а правый — вблизи дна. Рисунки 194 и 195-й изображают донную полузапруду на той же реке, примкнутую к продольной дамбе, причем донная полузапруда построена из каменной наброски с ядром из гравия. На рис. 196-м представлена в плане и разрезах донная полузапруда на р. Одере, построенная из фашинных тюфяков, примкнутая к голове фашинной полузапруды, а рис. 197-й изображает донную полузапруду на р. Эльбе, построенную из кладки тяжелых фашин, причем донная полузапруда тоже примкнута к голове полузапруды, выведенной из фашинной погружаемой кладки.

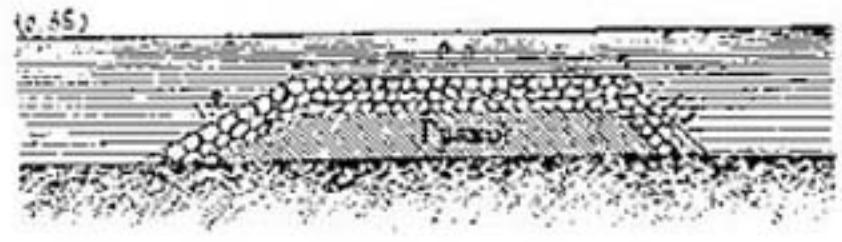


Рис. 195. Поперечный разрез донной полузапруды.

Донные пороги имеют в поперечном сечении трапецоидальную форму. Откосу с верхней, по течению, стороны придают уклон 1 : 1 до

1 : 1½, а с нижней стороны пологие откосы 1 : 2 до 1 : 3. Пересекая поперек реки размытую течением рытвину в речном дне, порог имеет не одинаковую по длине высоту, почему в плане его откосы расширяются на больших глубинах в донной рытвине и суживаются к ее краям (рис. 198-*a*,

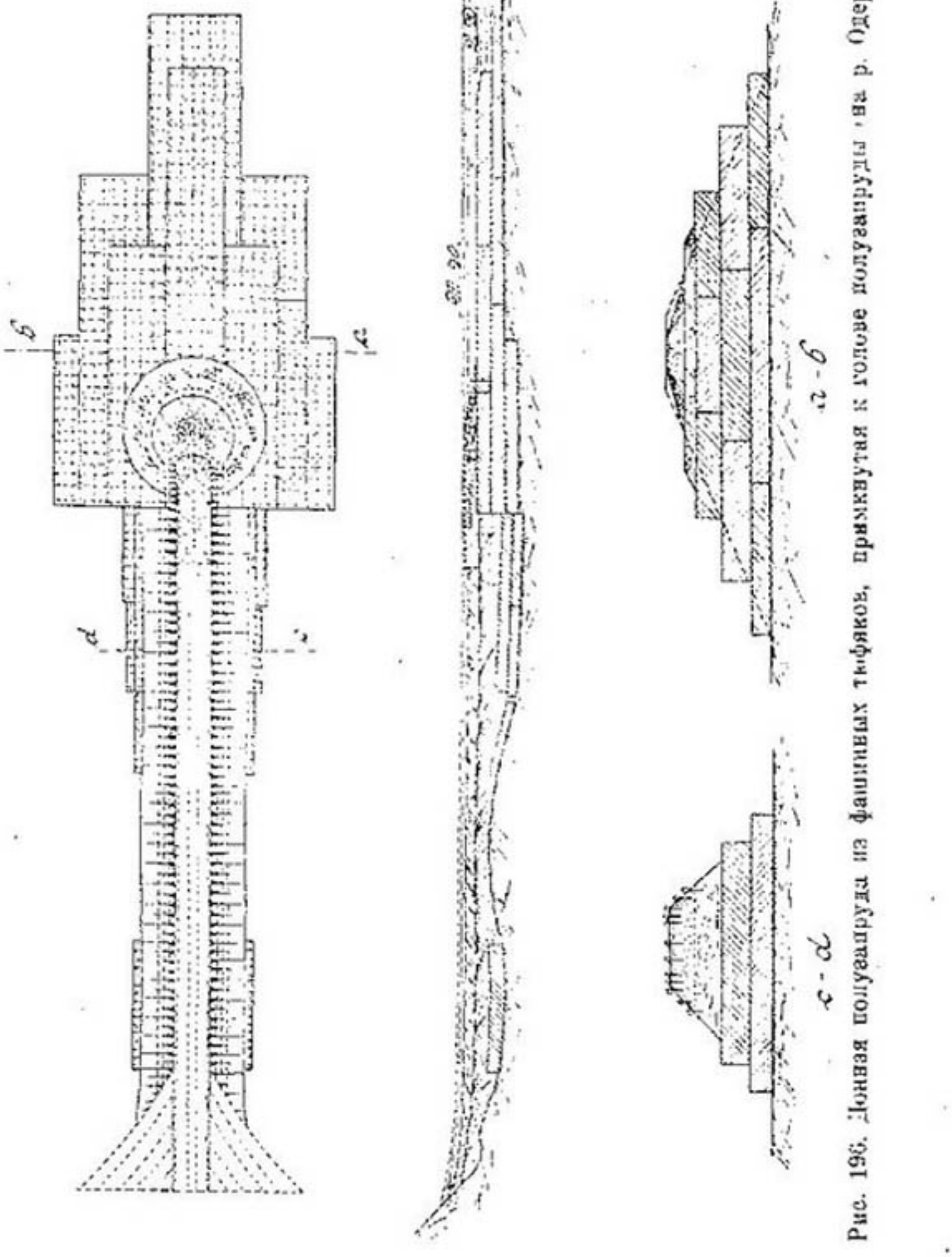


Рис. 196. Донная полушпруга из фашинных тюфяков, прикрытая и полностью погруженная в дно реки.

b, *c*, *d*). Пороги строятся или только из каменной наброски (рис. 199), или с фашинным телом, гребень и откосы которого покрыты слоем каменной наброски для предохранения порога от размыва течением. Фашинное тело может быть устроено из кладки в несколько слоев тяжелых фашин или фашинных тюфяков, как это изображено на рис. 198-м, на

котором показаны на плане порога: левая по чертежу часть построенной из тяжелых фашин, а правая часть—из тюфяков. Высота, на которой располагается гребень порога, определяется в зависимости от высоты, до которой требуется заполнить рытвину или поднять дно

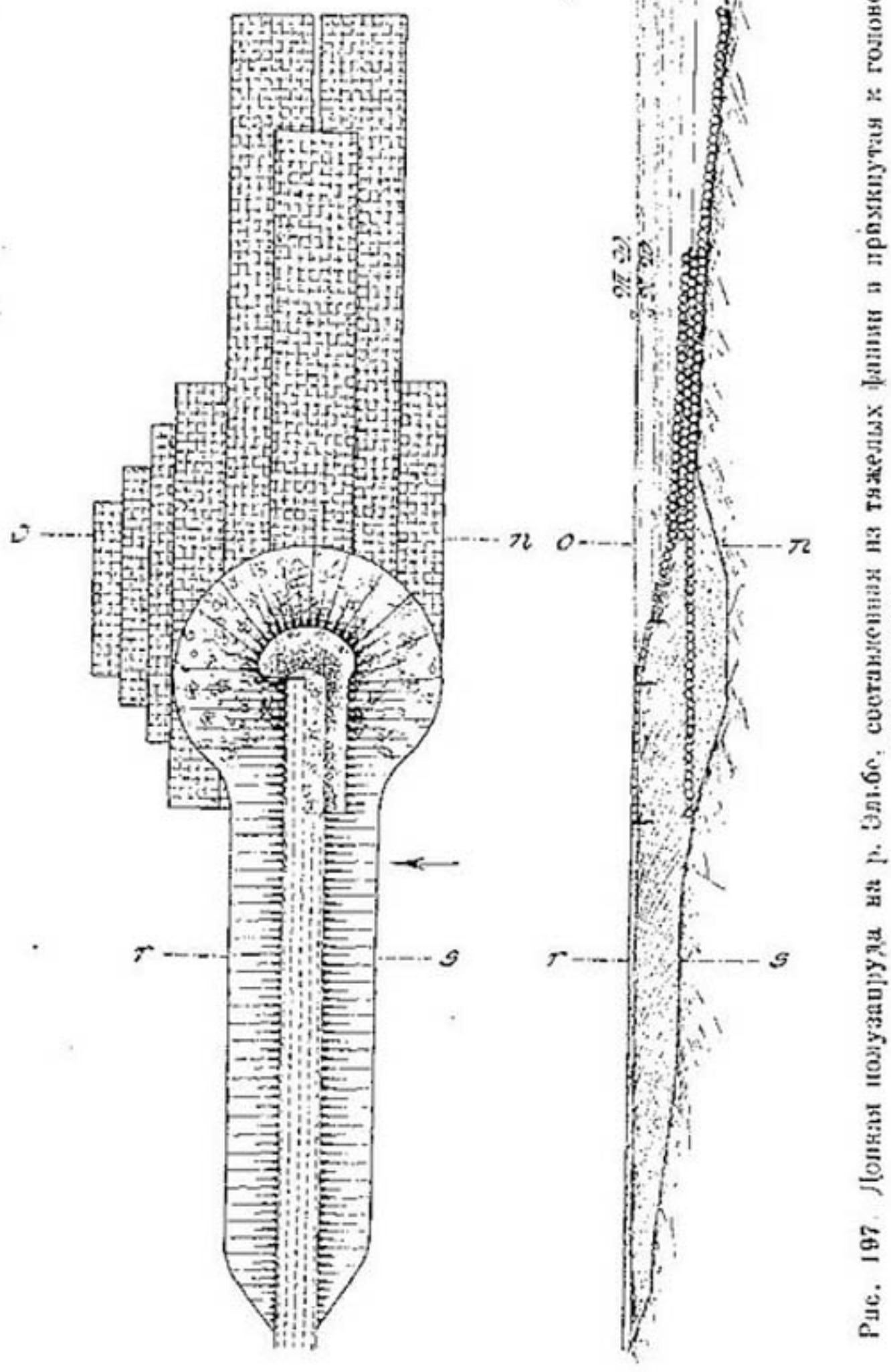


Рис. 197. Донная полузапруда на р. Эльбе, составленная из тяжелых фашин и прямящаяся к голове полузапруды.

реки по всей ширине проектного русла. В последнем случае концы порога доводят до берегов ,русла и сопрягают с донными полузапрудами. Расстояние по длине русла, на котором расставляют пороги друг от друга, зависит как от свойств реки (скорости течения, каче-

ства грунта дна, глубины рытвин и проч.), так и в зависимости от того, предполагается ли предоставить самой реке заполнить своими наносами промежутки между порогами, или же таковые заполняются

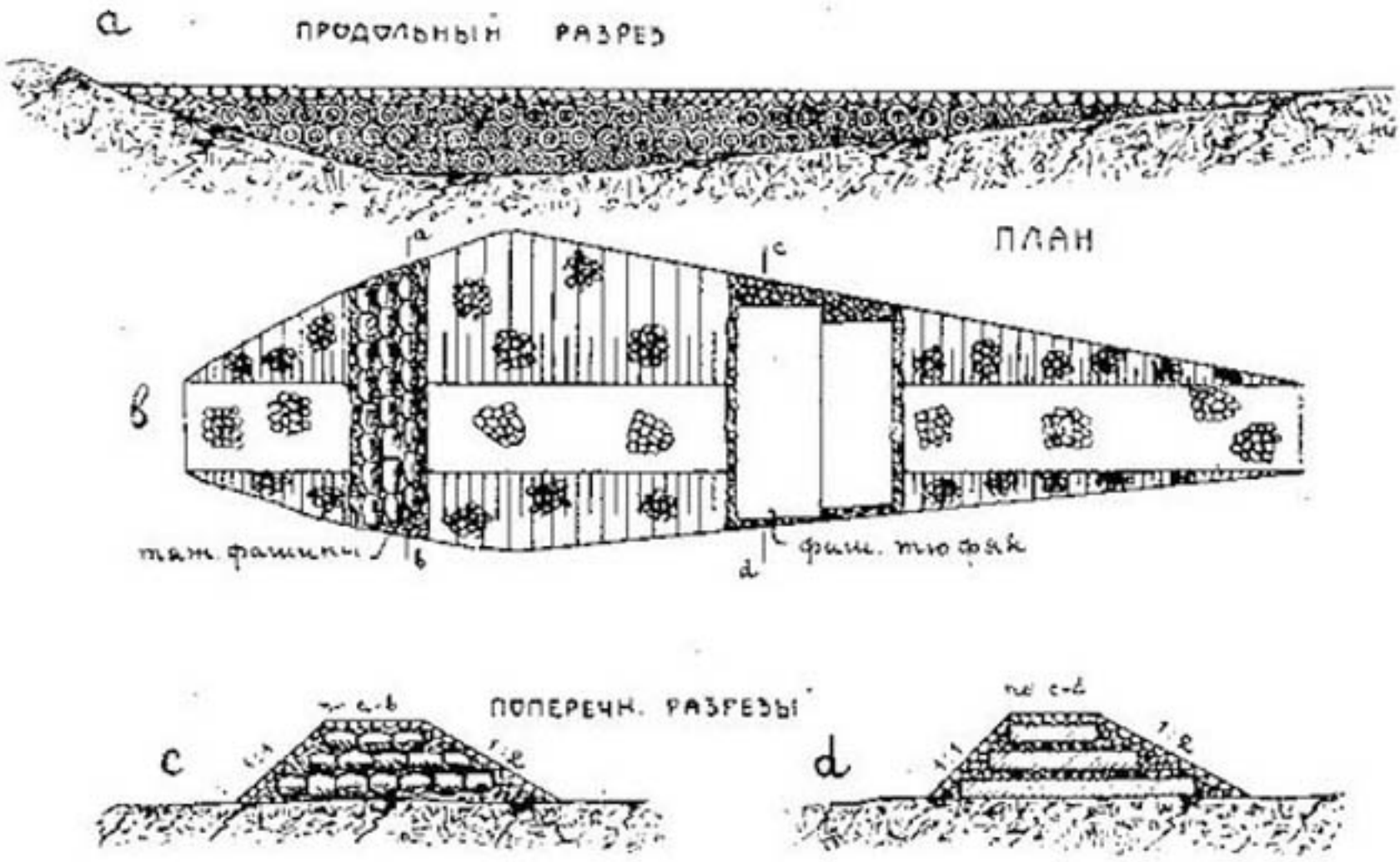


Рис. 198. Донный порог, устроенный из фашин.

искусственно, засыпая их гравием или крупным песком, добытым при землечерпании или взятым с берега. В первом случае для естественного заноса пространств между порогами требуется последние сильно сближать, что увеличивает стоимость работ. Во втором случае для уменьшения материала и работ по устройству высоких порогов иногда применялся следующий порядок работ, схематически изображенный на рис. 200 и 201-м. Основные пороги, делавшиеся из каменной наброски, расставлялись на значительном расстоянии, до 100 *м.* друг от друга (рис. 200), причем первоначально они возводились (1) высотою около 80 *см.* После сего пространство между порогами засыпалось на ту же высоту гравием или хрящем. Засим основные пороги досыпались до полной их высоты (1—3), а в промежутках между ними (4) строилось на засыпанном грунте

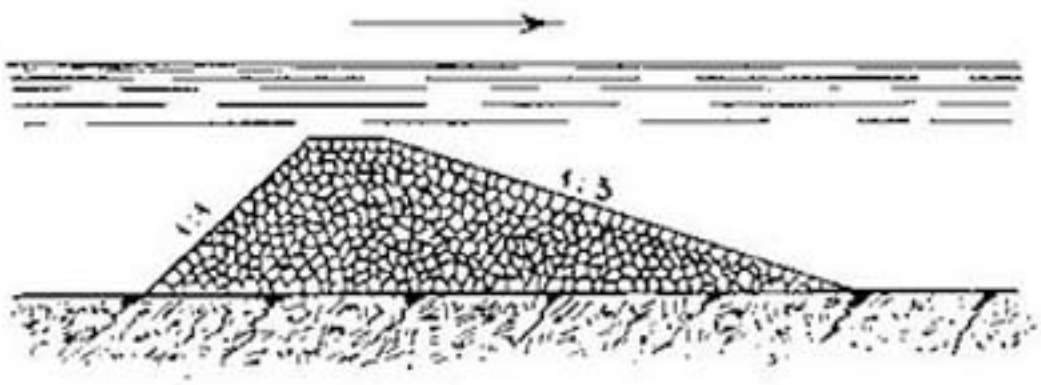


Рис. 199. Донный порог, построенный из каменной наброски.

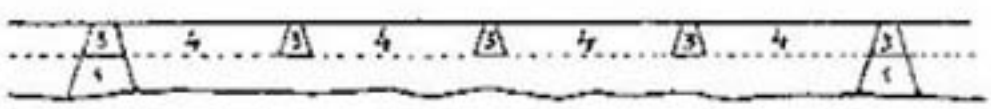


Рис. 200. Схема работ постепенного устройства порогов.

несколько промежуточных порогов (3), и, если промежутки между ними плохо заносились естественно, то делался второй слой (4) граветовой засыпки, заполняющий промежутки. В окончепном виде порог изображен на рис. 201-м.

Рис. 201.

г) Запруды.

Под наименованием запруд разумеются сооружения, которые служат для загражденія побочных рукавов реки с целью сосредоточить меженнее теченне в едином русле. Надобность в подобных сооружениях встречается также при устройстве прокопов, служащих для спрямления русла в крутых извилинах реки. Действие запруды, перегораживающей русло рукава от одного берега до другого, подобно действию плотины, выдерживающей некоторый подпор воды. Подпорное действие запруды возникает при меженних водах, причем величина подпора соответствует величине падения участка реки на протяженни от истока рукава до его устья. При под'еме уровня речной воды выше гребня запруды вода переливается через гребень запруды, как на водосливе.

Конструкция запруд сходна с конструкцией продольных дамб и полузапруд. Запруды из наброски камня встречаются редко; преимущественно они строятся фашинные: из погружаемой фашинной кладки, или из уложенных в несколько слоев фашинных тюфяков, или же из кладки тяжелых фашин.

Вышеотмеченные условия действия запруды пред'являют некоторые специальные требования к ее конструкции. Сохраняя в поперечном профиле обычную для прочих регуляционных сооружений трапецоидальную форму, запруда нуждается в пологом откосе с низовой стороны для смягчения перепадов воды. Верховой откос делается с уклоном от 1 : 1 до 1 : 2, а низовой от 1 : 1½ до 1 : 4, причем этот откос укрепляют, в нужных случаях, каменной отсыпью. Ширина гребня делается более значительной, до 2—4 *м.*, и гребень солидно укрепляется. Ввиду наличия подпора необходимо принимать меры к тому, чтобы фильтрующая в основании дамбы вода не произвела размыва дна под дамбой. Поэтому в основание полузапруды укладываются широкие фашинные тюфяки, выступающие на значительную ширину за нижние бровки откосов. С целью уменьшить фильтрацию через тело запруды делают широкую присыпку к верховому откосу гравия или тяжелого грунта. Сопряжение запруды с берегом требует особого внимания. Для избежания прорыва воды

с боков запруды сопряжение делается в виде корней, запущенных в выемки на обоих берегах загораживаемого рукава, причем в корневых частях гребень запруды повышается уклоном, чтобы отклонять

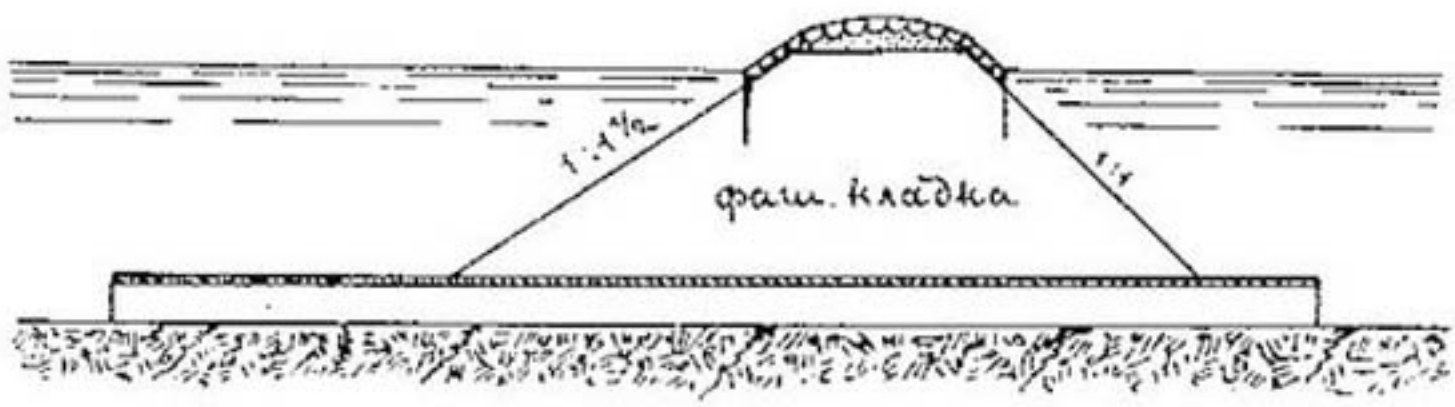


Рис. 202. Запруда из фашинной кладки на фашинном тюфяке.

течение к средней части длины гребня. С целью уменьшить подпор обычно при заграждении рукава строится в нем не одна, а две или несколько запруд, расставленных на некотором расстоянии друг от

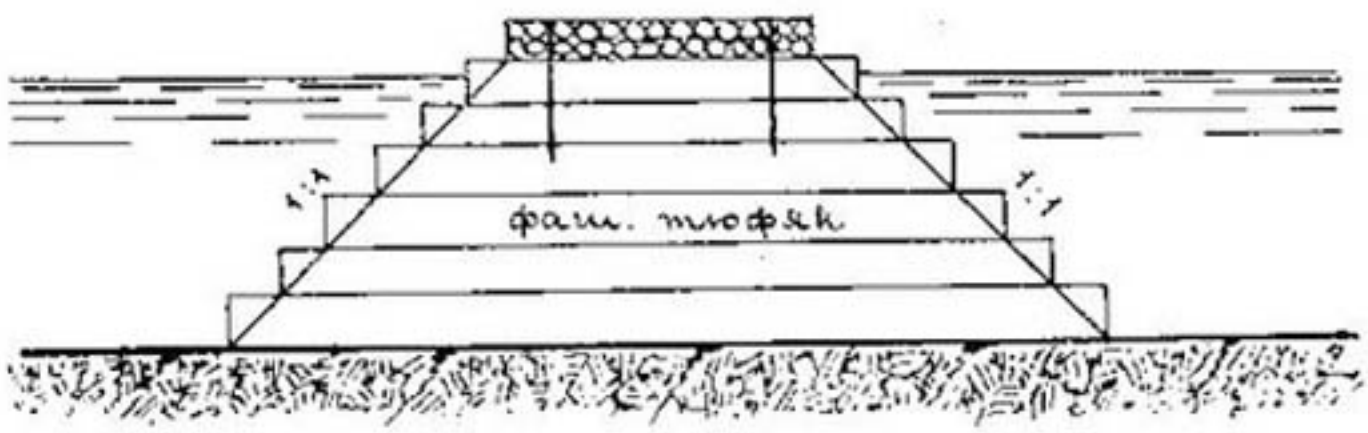


Рис. 203. Запруда из нескольких слоев фашинных тюфяков.

друга, благодаря чему общее падение рукава распределяется на несколько запруд. Разделение рукава несколькими запрудами способствует, кроме того, скорейшему заполнению рукава наносами.

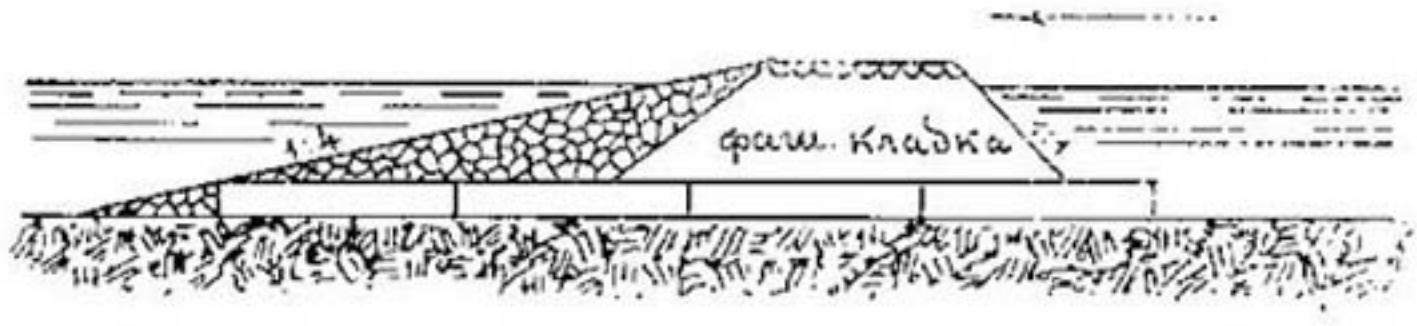


Рис. 204. Укрепление низового откоса запруды каменной наброской.

На рисунках 202 и 203-м показаны в поперечных разрезах типы фашинных запруд, применявшихся при регулировании р. Западной Двины в пределах гор. Риги; из них первый рисунок изображает запруду из погружаемой фашинной кладки на широком фашинном тюфяке, а второй—из кладки фашинных тюфяков. На рисунке 204-м показана запруда, построенная из фашинной кладки с широкой присыпкой к низовому

откосу накидного камня на тюфячной подстилке. Рисунок 205-й изображает запруду, нижняя часть которой состоит из двух слоев фашинных тюфяков, а верхняя из погружаемой фашинной кладки; на уступах тюфячной кладки положены тяжелые фашины, низовой откос укреплен пологой каменной наброской, к верховому откосу сделана земляная присыпка, внизу тоже укрепленная каменной наброской, а гребень одет каменной мостовой по выпуклой поверхности.

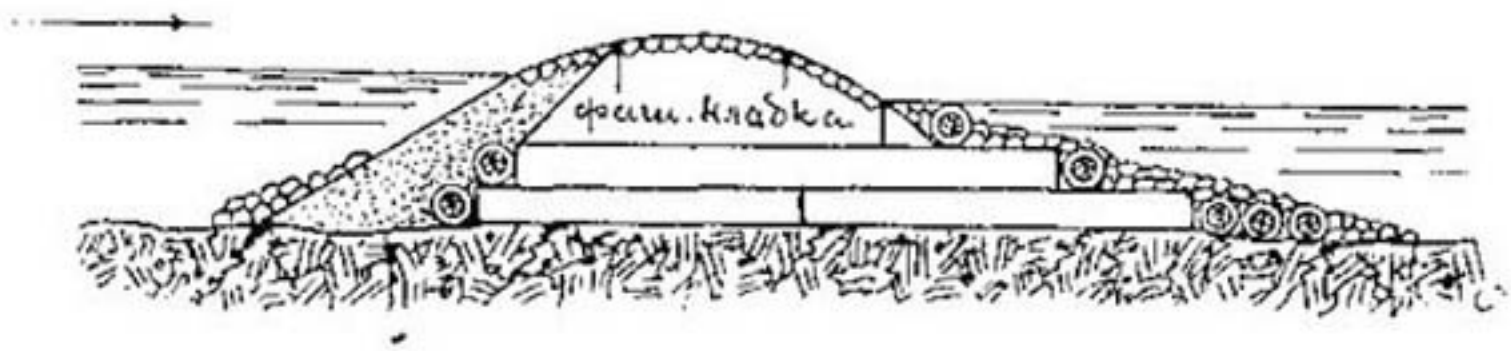


Рис. 205. Укрепление откосов запруды тяжелыми фашинами.

Производство работ при постройке запруд сопряжено с значительными трудностями и требует большой осторожности, так как по мере закрывания русла рукава образуются большие скорости течения в остающейся части живого сечения, могущие производить сильные размывы дна и повреждать исполненную часть работ. Для избежания опасных размывов всего лучше установить, если это возможно, такой порядок работ, чтобы ранее приступа к устройству самого тела запруды был уложен на дне рукава, во всю ширину его русла, фашинный тюфяк в виде покрывала дна в основании будущей запруды. Однако, толщина тюфяка должна быть определена с расчетом, чтобы она не вызвала большого стеснения живого сечения рукава, дабы не образовались в нем сильные быстротоки. Поэтому предварительная погрузка тюфяка может быть рекомендована только при достаточной глубине загражданемого рукава. Во всяком случае к устройству запруды на загражданемом рукаве можно приступить лишь после того, когда оставляемый рукав настолько углублен, что он способен принять в себя весь расход воды без образования большого подпора на строющейся запруде в загражданемом рукаве. При невозможности предварительной загрузки фашинных тюфяков основание запруды подготовляется погрузкой тяжелых фашин.

Дальнейшие меры предосторожности зависят от материалов, из которых строится запруда.

При постройке запруды из погружаемой фашинной кладки можно, после подготовки основания, вести кладку одновременно от обоих берегов (рис. 206). Однако, нужно предварительно сообразить, чтобы слои этой кладки, расстилаемые на поверхности воды и постепенно погружаемые наклонно, не встретились бы между собою в таком виде, что образуется показанное на рисунке треугольное пространство *ABC*, не занятое слоями кладки и трудно заполнимое впоследствии, так как

через него протекает вода с большими скоростями. Поэтому лучше вести кладку от одного берега, предварительно уложивши донный тюфяк и укрепивши противоположный берег, как показано на рис. 207-м, где обозначены: B — донный тюфяк, ADE — исполненная часть кладки, а DF — погружаемый слой кладки.

С целью облегчить и удешевить работу можно возводить запруду постепенно, не доводя сразу до проектной высоты. На рис. 208-м показана запруда, возведенная таким образом. Порядок работ заключается в следующем. Первоначально укладывается только один, по высоте, ряд фашинных тюфяков и устраиваются корни запруды с укреплением прилежащих участков берега. Засим работы приостанавливаются до того времени, когда с верховой стороны тюфяка дно рукава естественно нарастится наносами до высоты тюфяка. После этого укладывается второй слой тюфяков и вновь выжидается естественное нарастание дна до поверхности этого слоя. Так поступают и далее, пока запруда не будет поднята на столько, что постройка сразу всей верхней ее части не встретит затруднений. Однако, подобный способ работ, требующий весьма продолжительного времени, не всегда может быть допущен.

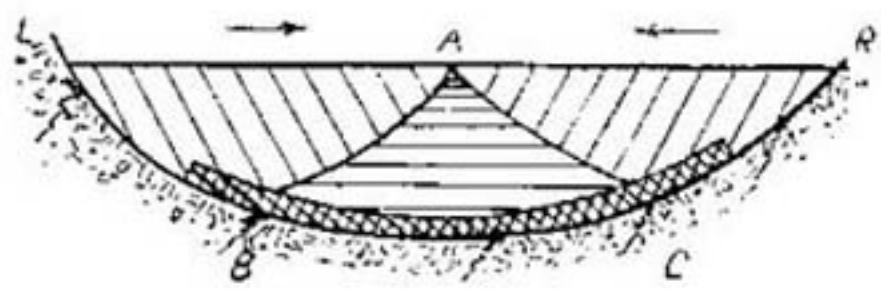


Рис. 206. Заграждение рукава одновременным производством фашинной кладки от обоих берегов.

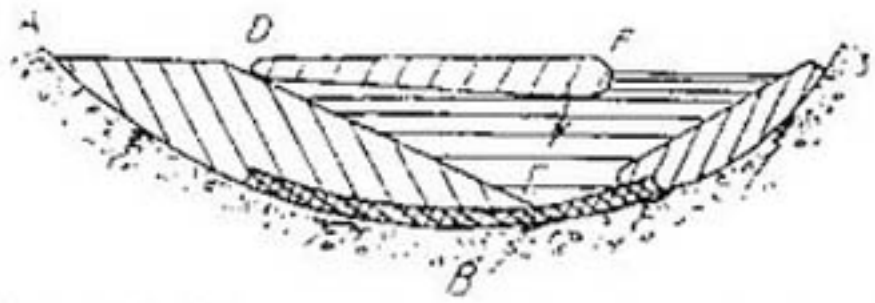


Рис. 207. Заграждение рукава, ведя фашинную кладку от одного из берегов.

При возведении запруды из каменной наброски, в нижней ее части набрасываются более тяжелые камни на достаточной ширине,

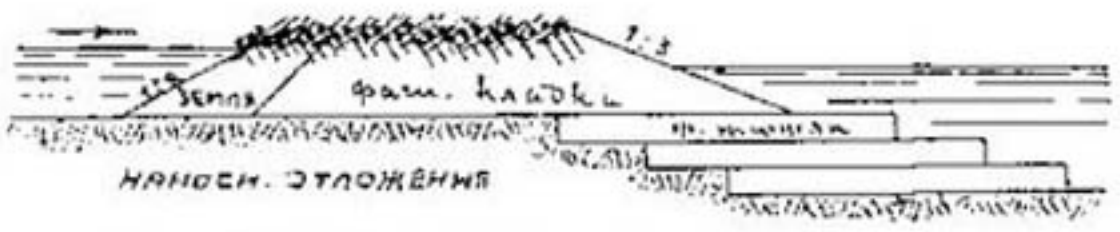


Рис. 208. Постепенное устройство запруды.

чтобы образовать устойчивое против размывов основание. Засим, на подготовленном, таким образом, основании возводится тело плотины из наброски обыкновенного камня и по выходе сооружения из воды поверхность его укрепляется размосткой камня. Будучи в первое время сильно водопроницаемой, каменная наброска впоследствии естественно заиливает и уплотняется наносами, которые вода несет во взвешенном состоянии и оставляет в порах каменной наброски.

Для устройства запруд вполне применим вышеописанный сплавный способ работ, который специально приспособлен для устройства плотин в быстротекущем потоке. Применение этого способа требует, впрочем, большого опыта по установке и загрузке сплавов.

д) Прокопы.

Прокопы (рис. 209) приходится делать в тех случаях, когда регуляционная трасса требует спрямления слишком крутых извилин меженного русла. При этом иногда необходимо делать на извилистом участке реки несколько прокопов один за другим с тем, чтобы они вошли, как составные части общей длины урегулированного участка реки. На реках несудоходных требуется иногда делать прокопы в извилинах реки, с целью увеличить уклон реки, чтобы понизить уровень воды на вышележащем участке и тем предохранить от наводнения или заболачивания прибрежные местности. Общие основания, которые служат для проектирования профилей прокопов и выяснения влияния их на соседние участки реки, изложены выше в § 25-м.

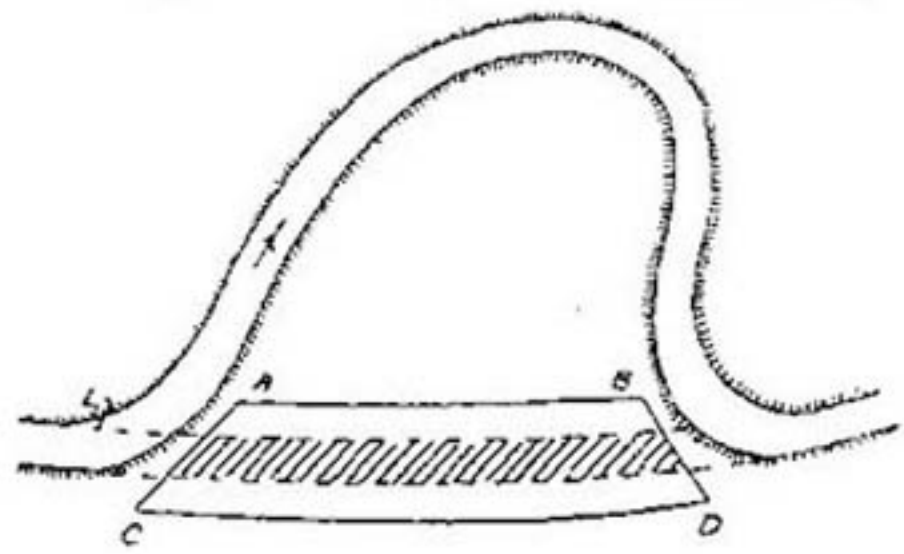


Рис. 209. Устройство прокопа искусственной выемкой земли.

Способы производства работ по устройству прокопов сводятся к двум основным: а) прокоп может быть вырыт искусственно. во всю величину требующегося поперечного его профиля, и б) образование прокопа может быть достигнуто путем самостоятельного размыва речной водой, для чего по линии прокопа устраивается лишь канава, по которой направляется течение воды из реки. Оба эти способа имеют свои положительные и отрицательные качества, влияющие на выбор того или иного способа в каждом частном случае. При искусственном вырытии прокопа ему может быть придан проектный профиль в поперечном сечении и точное проектное расположение в плане; могут быть еще до впуска воды устроены укрепления берегов прокопа, не прибегая к подводным работам; до окончания устройства прокопа и впуска в него воды работы по устройству прокопа не изменяют режима течения в спрямляемом участке реки и не влияют на обмеление прежнего русла, что имеет важное значение на судоходных реках. С другой стороны, искусственное вырытие русла вызывает значительные землекопные работы и высокую их стоимость. При самостоятельном-же размыве прокопа стоимость работ сводится к минимуму, но применение такого способа возможно в том случае, если, во 1-ых, прокоп располагается на невысокой местности и качества грунта благоприятны для размыва течением: во 2-х.

если вынос размытого грунта в нижележащий участок реки не грозит ухудшением качеств этого участка, и, в 3-х, если отвлечение из реки части расхода воды, необходимой для размыва прокопа, не может в продолжение времени, нужного для образования прокопа, вредно влиять на использование спрямляемого участка для судоходства или для иных целей. По этим причинам способ естественного образования прокопа применяется редко на реках судоходных; он более пригоден для небольших речек, преимущественно там, где падения реки большие, позволяющие пускать воду в прокопе с большими скоростями и облегчающие на нижележащих участках реки безвредное для них прохождение продуктов размыва, поступающих из прокопа. В подходящих случаях может быть применен смешанный способ, а именно: искусственная выемка в прокопе делается не на полную проектную ширину и глубину с тем расчетом, чтобы по впуске воды через прокоп профиль последнего достиг своих проектных размеров помощью естественного размыва потоком воды.

Направление берегов прокопа устанавливается согласно регуляционной трассы с таким расчетом, чтобы берег прокопа примкнул по касательной к вогнутому берегу реки, а противоположный берег прокопа сомкнулся с выпуклым берегом реки помощью устраиваемой для этой цели струенаправляющей дамбы.

Если прокоп устраивается искусственной выемкой земли (рис. 209), то таковая производится по направлению от нижнего конца прокопа к верхнему. Земляные работы делаются в сухую до уровня низких вод, причем около верхнего конца прокопа оставляется перешеек, не допускающий входа воды в неоконченную выемку прокопа в случаях повышения горизонта речной воды. Если прокоп расположен на низкой и ровной местности то, пользуясь вынутым грунтом, устраиваются из него по сторонам прокопа продольные земляные валы AB и CD, причем их соединяют поперечным валом CA на верховом перешейке; а если желательно продолжить производство земляных работ в сухую до дна прокопа, то делают соединительный вал BD также и в низовом конце, чтобы оградить работы со всех четырех сторон. Продольные валы AB и CD могут составить, если то требуется, искусственные берега прокопа для высоких вод, соответственно чему назначается расстояние между этими валами. Дноуглубительные работы ниже горизонта низких вод производятся или землечерпательными снарядами, открывая для них вход с низовой стороны, или же в сухую с водоотливом при огражденном низовом конце. Дну прокопа придается проектный продольный уклон. Когда выемка готова и сделаны, где нужно, укрепления берегов прокопа, то в него впускают воду, причем в случае полного ограждения сначала разбирается низовой вал и прокапывается низовой выход. Засим приступают к открытию верхнего входа для направления течения реки через прокоп; открытие приурочивается ко времени возможно низкого положения уровня воды в реке. Для впуска воды

прорывают через верхний перешеек канаву, которая засим естественно размывается течением. Благодаря тому, что уклон по направлению прокопа больше, чем уклон по старому руслу в извилине (вследствие большей ее длины), течение устремляется в прокоп. Если-же нужно усилить течение через прокоп, то строится струенаправляющая дамба от выпуклого берега реки по направлению к соответствующему берегу прокопа. На рис. 209-м точка начала струенаправляющей дамбы от выпуклого берега реки обозначена буквой *L*. Однако, весьма важно не прекращать на первое время течение и по старому руслу, а только ослабить его, чтобы старое русло по возможности заплилось естественно речными наносами. Иногда для этой цели делают при входе в прокоп временный донный порог, чтобы направлять наносы в старое русло. Впоследствии струенаправляющую дамбу продолжают на соединение с берегом прокопа и, таким образом, совершенно заграждают старое русло, как показано на рисунке пунктиром.

Если устройство прокопа производится путем самостоятельного размыва его течением, то первоначально делается выемка до уровня меженних вод на проектную ширину прокопа. Засим по дну этой выемки прорывается, начиная с низового конца, продольная канава, в которую впускается вода из реки. Впуск воды производится при средних уровнях воды в реке. С целью усилить течение по канаве устраивается струенаправляющая дамба, о которой упоминалось выше, а чтобы предохранить от излишнего размыва берегов реки во входном конце прокопа устраивается, против струенаправляющей дамбы, береговое укрепление в виде широкой короткой полузапруды. На противоположной стороне реки полезно, для той же цели, сделать укрепление берега в месте сопряжения прокопа с берегом. Оставленное между струенаправляющей дамбой и полузапрудой отверстие служит для поддержания небольшого течения в старом русле, которое полезно для заполнения старого русла наносами в период времени, пока не размоется весь прокоп до проектного профиля. Тем же отверстием может временно пользоваться судоходство. Чтобы ограничить самостоятельный размыв русла прокопа до проектной его ширины и укрепить будущие его берега, может быть применен один из тех способов берегоукрепительных работ, при которых происходит, так сказать, автоматическое укрепление берегового откоса по мере приближения к нему размыва русла. На стр. 205 описан один из таких способов укрепления берега каменной наброской, практикующейся на реках Баварии. На рис. 210, 211 и 212-м показан подобный же способ укрепления тяжелыми фашинами, применяющийся на немецких реках для укрепления берегов прокопов в период образования последних помощью самостоятельного размыва. Верхний рисунок показывает выемку прокопа до впуска воды и уложенные около откосов выемки тяжелые фашины; пунктирная линия изображает проектный профиль берега прокопа. После некоторого размыва дна тяжелые фашины сползают по откосу,

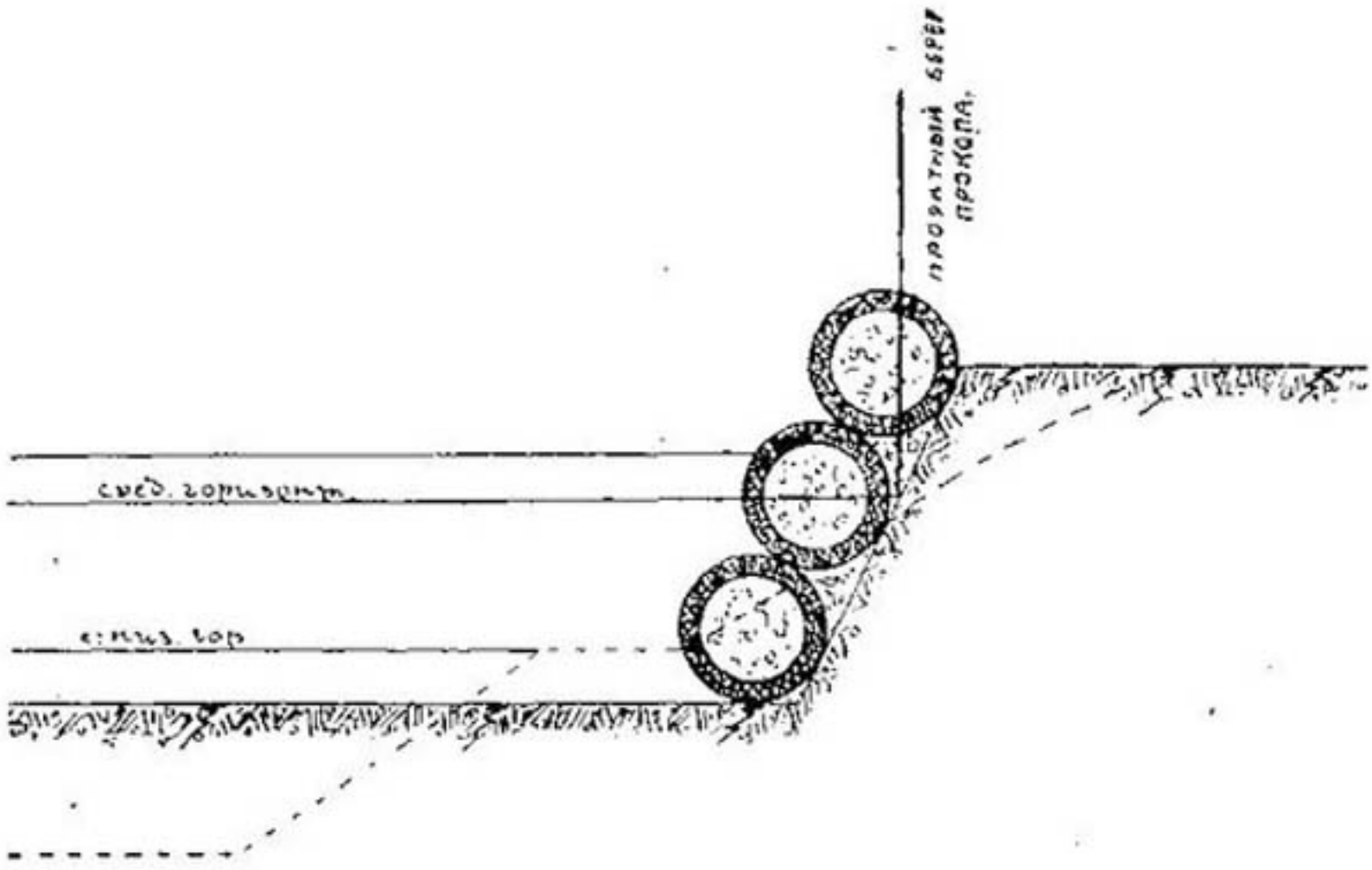


Рис. 210.

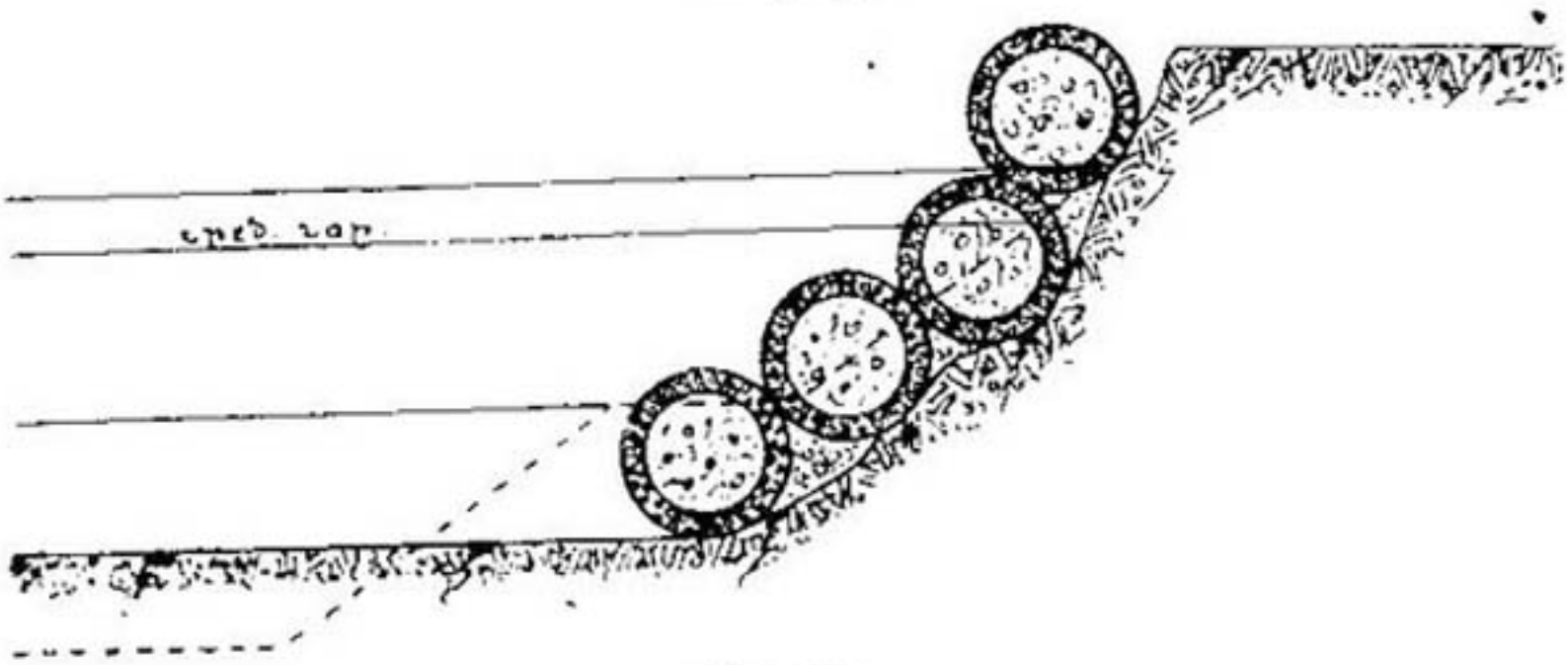


Рис. 211.

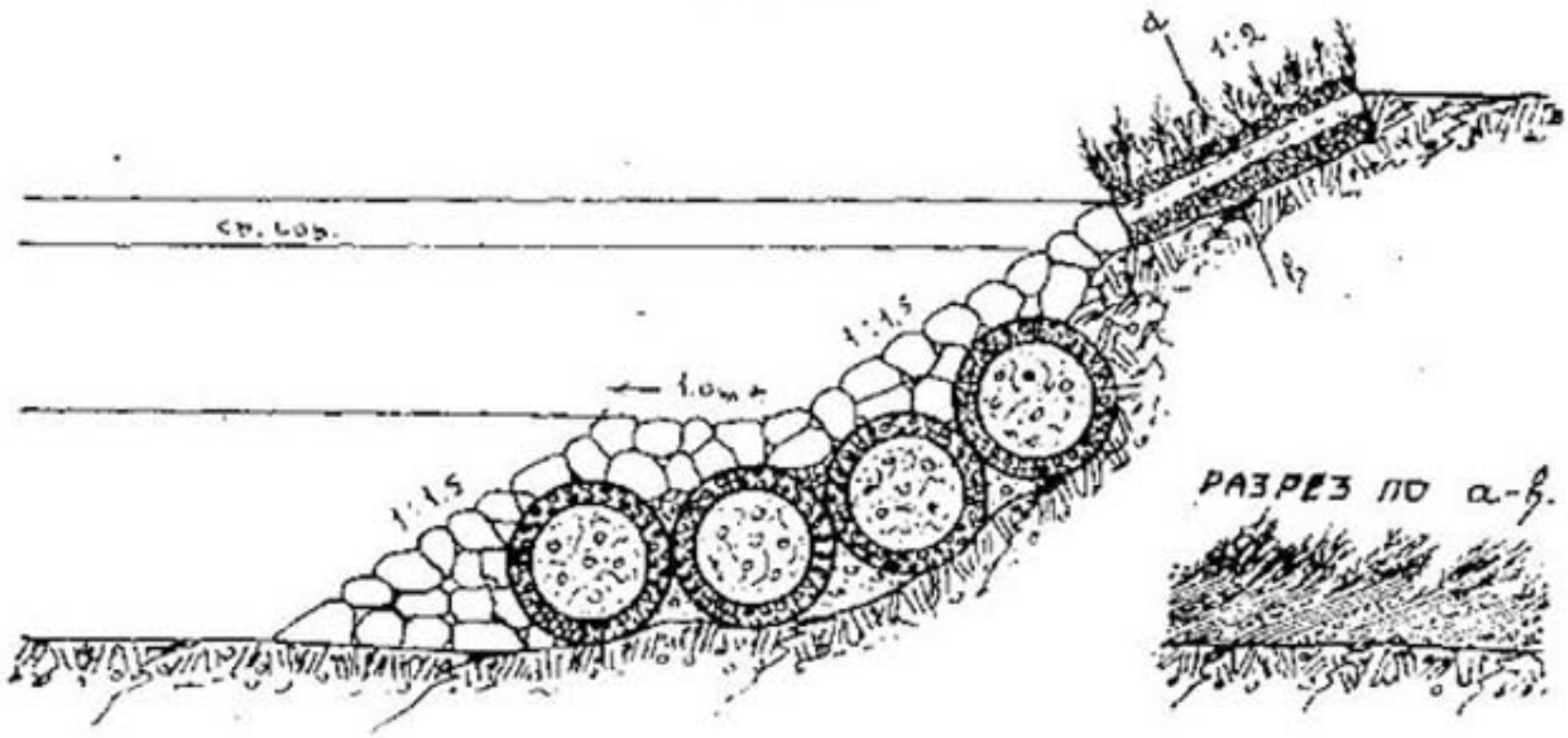


Рис. 212.

Рис. 210—212. Применение тяжелых фашин для самостоятельного образования берегоукрепительной одежды при размыве прокопа.

принимая положение, изображенное на среднем рисунке. Нижний рисунок изображает положение фашин при размыве дна, дошедшем до проектной глубины, после чего фашины закрепляются каменной выстилкой, а верхняя часть откоса укрепляется хворостяной выстилкой. После окончания образования прокопа и если уже произошло достаточное заиление старого русла, приступают к закрытию отверстия, оставленного при входе в старое русло, для чего делается запруда в этом отверстии. При значительных скоростях течения в отверстии предпочитают устраивать основание запруды помощью погружения тяжелых

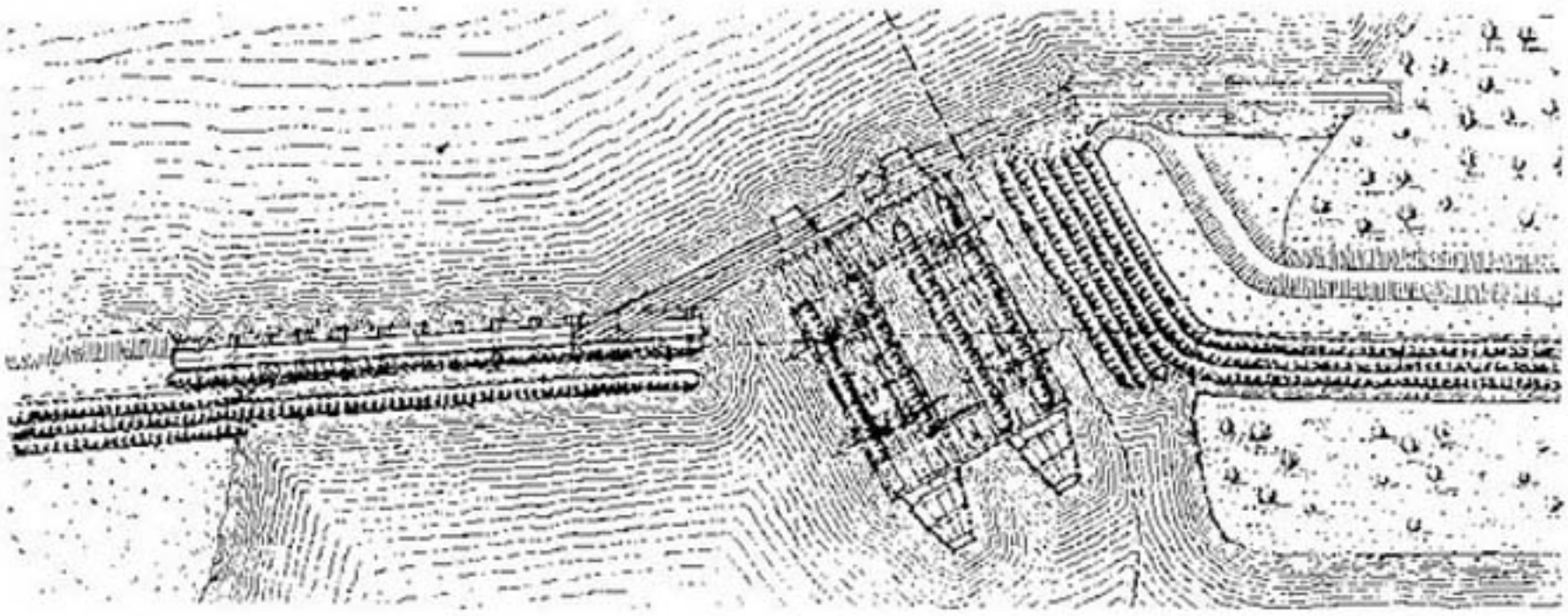


Рис. 213. Замкнутие отверстия во входе в старое русло помощью погрузки тяжелых фашин с плавучих подмостей.

фашин. Фашины кладутся на дне вдоль течения в виде рядов. в один или несколько слоев по высоте. Погрузка может производаться либо с подмостей на забитых сваях, либо с особого плавучего помоста, устроенного на спаренных судах. Рис. 213-й изображает применение последнего способа при устройстве прокопов на р. Изар.

§ 34. Вспомогательные и другие простейшие регуляционные сооружения.

Конструкции берегоукрепительных и других регуляционных устройств, описанные в §§ 32 и 33-м, являются типами постоянных сооружений, расчитанных на долгий срок их существования и на разного рода обстоятельства, которые могут создавать неблагоприятные для их прочности условия. Такого рода сооружения необходимы при коренном улучшении реки на более или менее значительных протяжениях, а также и в отдельных случаях, когда требуется для каких либо капитальных речных сооружений привести на определенном участке реки ее берега или все русло в надежное устойчивое состояние, соответствующее цели предпринятых работ. Возведение таких регуляционных устройств требует, однако, длительного времени и сопряжено с крупными денежными затратами на заготовку огромного количества строи-

тельных материалов и на производство самих работ, тем более, что в общей системе регуляционных сооружений протяжение их бывает обыкновенно весьма велико. Но нередко встречаются случаи, когда надо достигнуть на определенных участках реки хотя бы некоторого частичного улучшения с минимальными затратами на сооружения, несмотря на паллиативное значение таких работ или на возможность лишь временного действия регуляционных сооружений. Надобность в регуляционных работах такого характера нередко встречается на реках небольших и неимеющих крупного судоходного значения, где довольствуются мелкосидящими судами и где затраты на регуляционные сооружения постоянного типа не могут окупиться достигаемыми выгодами.

Нужно заметить, что и при капитальном регулировании реки весьма часто встречается надобность, наряду с возведением крупных постоянных сооружений, делать легкие дешевые устройства. Некоторые из них имеют значение вспомогательное, например для скорейшего нарастания наносов в местах, где это требуется, или, напротив, для способствования естественному размыву дна; другие служат в качестве более дешевых средств для укрепления обширных площадей естественных или искусственно образованных песчаных отмелей и т. п.

В нижеследующем приведено краткое обозрение некоторых устройств, более часто применяющихся для упомянутых целей.

а) Плетневые заграждения.

Плетневые заграждения применимы вообще лишь в том случае, когда они строятся на небольших глубинах и если ледоход происходит на таких горизонтах, что плывущие льдины проходят достаточно высоко над заграждением. Они имеют вид обыкновенного плетня, сделанного из тонких гибких прутьев или ветвей по забитым в ряд кольям или сваям, расставленным друг от друга на расстоянии от 0,3 до 0,6 метр., в зависимости от толщины употребляемого хвороста и от требуемой прочности плетня (рис. 214 и 215). При плетении хвороста каждые 2—3 венца осаживаются легкой колотушкой, чтобы опустить нижние венцы до дна и придать необходимую плотность плетню. Хворост для плетня употребляется свежесрубленный преимущественно из ивовых пород; в особенности это нужно для верхних венцов плетня, чтобы хворост легко прорастал. Колья или сваи употребляются сосновые, еловые, березовые и иных крепких пород дерева. Их очищают от коры и заостряют. Длина кольев и свай определяется с таким расчетом, чтобы, после забивки в грунт и заплетения хвороста на требуемую высоту плетня, оставался наверху некоторый запас (0,3—1,0 метр.). Запас необходим потому, что при заплетении хвороста может произойти размыв дна под плетнем, причем потребуется допол-

нительная забивка кольев, осаживание венцов и добавка сверху новых венцов плетня до требуемой высоты последнего.

Действие плетня, на которое рассчитывается, заключается в том, что будучи расположен поперек течения воды, плетень уменьшает скорость течения, вследствие чего происходит отложение наносов. Поэтому

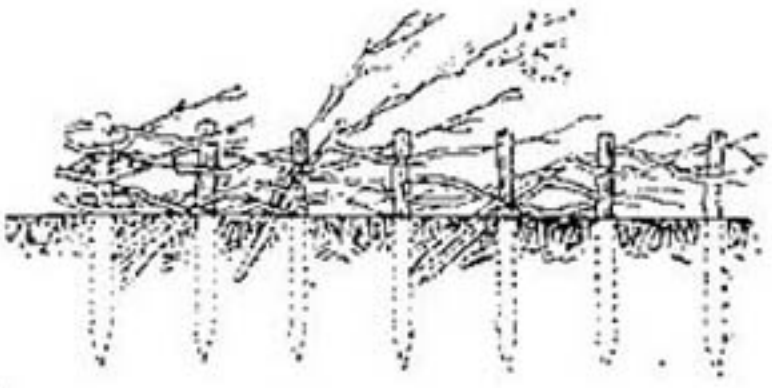


Рис. 214. Изготовление плетня.

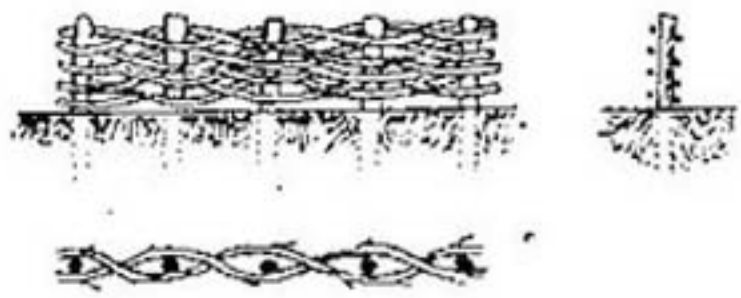


Рис. 215. Плетень в готовом виде.

при регулировании реки помощью сооружений постоянного типа плетневые заграждения могут служить так называемыми илоудержателями, т. е. вспомогательными устройствами для задержания наносов в пространствах между сооружениями, где требуется образовать береговые площади. Так, например, плетни могут приносить

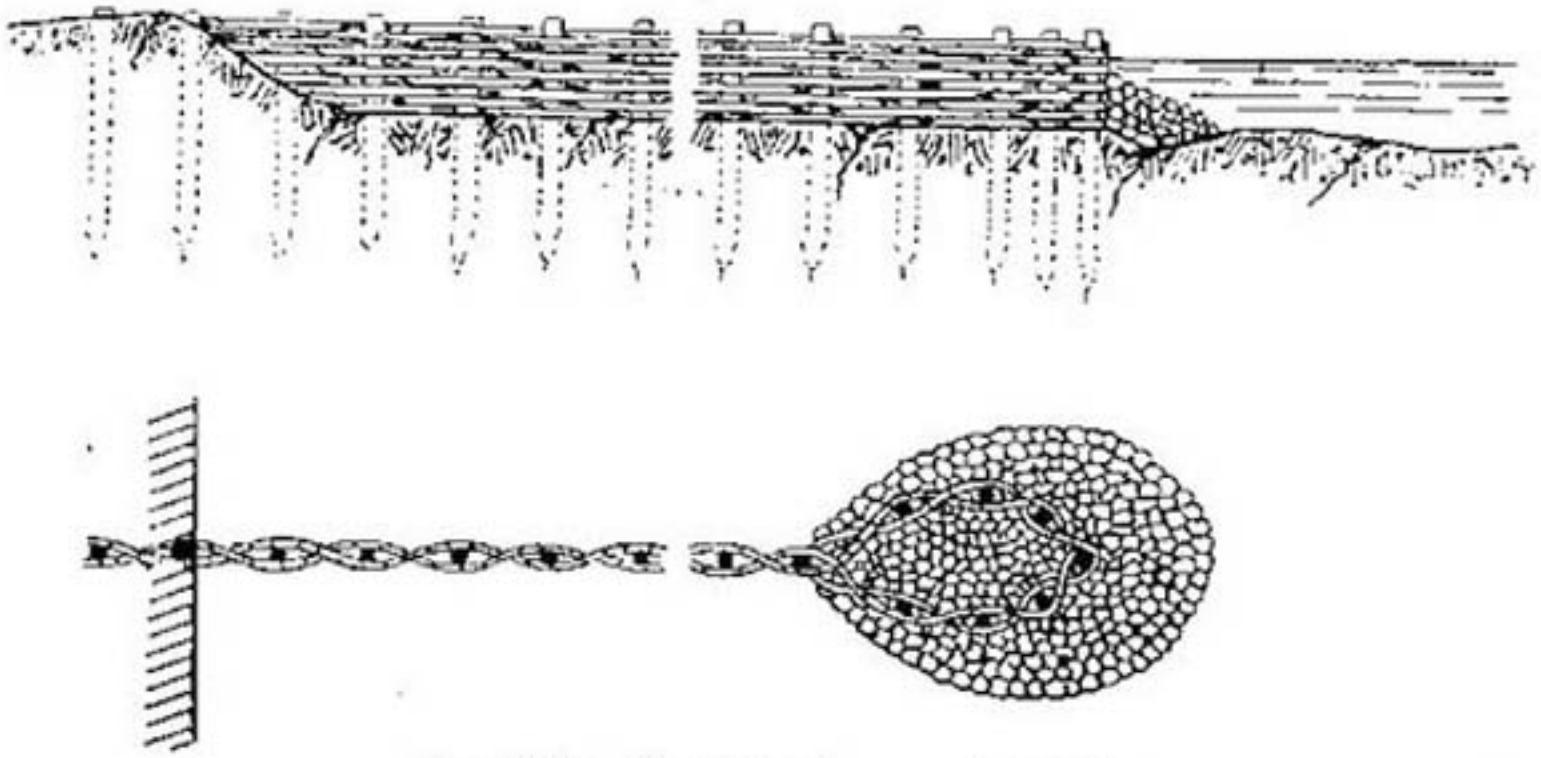


Рис. 216. Плетневой илоудержатель.

существенную пользу для достижения более интенсивного отложения наносов в пространствах между полузапрудами, для чего устраиваются в этих пространствах плетни в виде небольших бун, примкнутых к берегу. С тою же целью устраиваются иногда плетневые заграждения в пространствах между берегом и продольной дамбой, в виде траверсов. Рис. 216-ый изображает плетневой илоудержатель, устраиваемый в междуполузапрудных пространствах. Корневая часть заделана в откосе берега, а головная часть уширена и усплена конусообразной каменной наброской, чтобы придать ей бо́льшую прочность и чтобы она, наряду с головами полузапруд, могла принимать уча-

стне в направлении речного течения. В зависимости от расстояния между полузапрудами, иногда устраивается несколько плетневых бун и. таким способом, в некоторых случаях удается обойтись меньшим числом капитальных полузапруд за счет увеличения расстояния между ними. Рис. 217-й изображает применявшиеся при регуляционных работах на реке Висле траверсы между продольной дамбой и берегом, построенные тоже в виде плетневых заграждений, но более сильного типа: по сваям, забитым в ряд на расстоянии одного метра друг от друга, навивается плетень из прутяных канатов; для предохранения такого заграждения от подмыва дна со стороны, обращенной к течению, укладывается вдоль подошвы плетня длинная фашина.

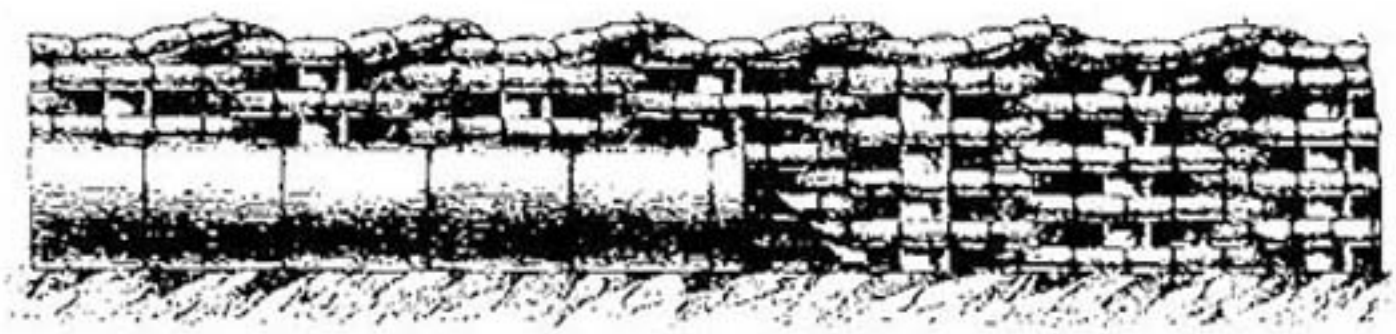


Рис. 217-*a*.

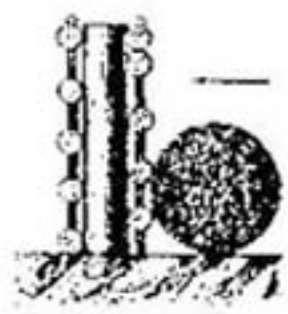


Рис. 217-*b*.

Рис. 217-*a* и *b*. Плетневой траверс.

На реках мелководных, если дно их состоит из легко размываемого грунта, плетневые заграждения могут применяться и в качестве активных регуляционных сооружений, заменяя собою полузапруды капитального типа. В таких случаях плетневые заграждения располагаются соответственно регуляционной трассы, причем плетни, а в особенности их головные части требуются более сильной конструкции. Плетневые заграждения такого назначения получили, между прочим, широкое применение при регуляционных работах в верхней части р. Днепра, где на протяжении реки более 300 верст (до гор. Лоева) плетни, построенные в виде полузапруд, являются основной частью в общей системе регуляционных работ. Типы днепровских плетневых полузапруд изображены на рис. 218 и 219-м. Полузапруда в части ее между берегом и головой состоит из двух параллельных, расставленных на 2,14 метр. (1 с.) друг от друга продольных плетней. Если ожидается сильный подмыв полузапруды, то в ее основание кладется фашинный тюфяк, через который забиваются колья в дно реки. При небольших подмывах ограничивались более глубокой забивкой кольев и плотным у самого дна осаживанием хворостяного заплетения; выше делается менее плотное заплетение, чтобы дать возможность наносам проникать

через плетень на другую сторону и складываться. На месте сопряжения полузапруды с берегом плетни врезываются в берег на 0,5—0,6 метр., чтобы предохранить полузапруду от обхода ее течением около берега. В головной части полузапруды плетень делается свайный, подково-

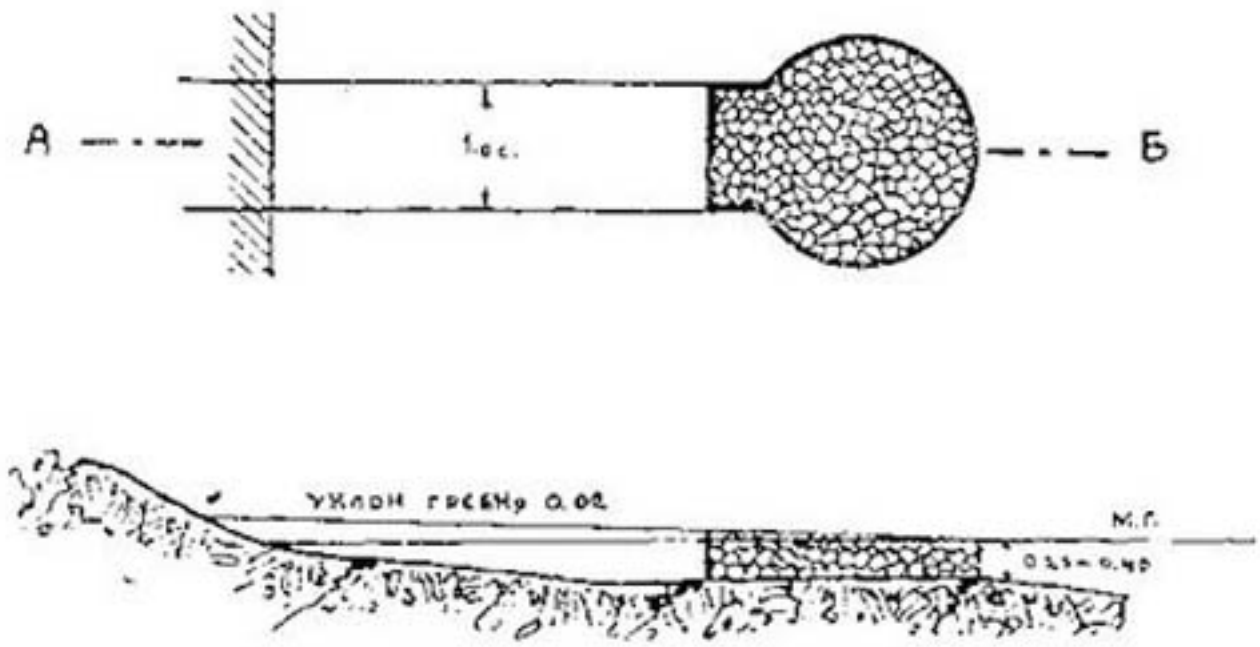


Рис. 218. Плетневые полузапруды на р. Днепре. Устройство головной части.

образной формы, а в сопряжении с плетнями остальной части полузапруды голова перегораживается поперечным плетнем. Внутреннее пространство головы загружается до верху булыжным камнем. Для предупреждения голов от подмыва или делалась каменная наброска

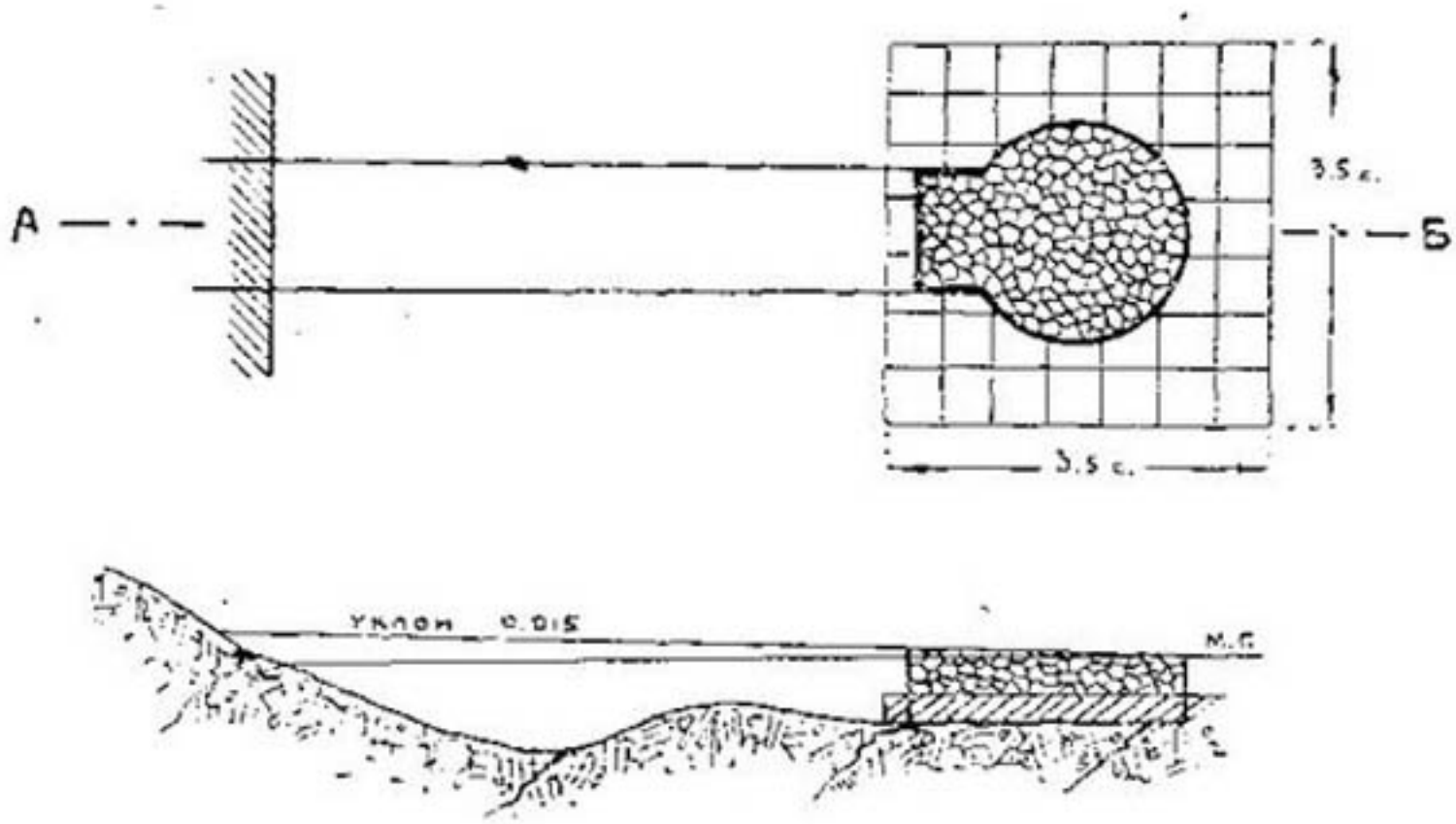


Рис. 219. Плетневые полузапруды на р. Днепре. Усиление головной части помощью фашинных тюфяков

вокруг плетня, или же устраивалось тюфячное основание, через которое забивались сваи головного плетня (рис. 219). Регуляционные сооружения на верхнем Днепре имели своею целью воздействовать на речной поток, главным образом, в период низких и меженних вод.

В соответствии с этим, а также для удобства постройки и ремонта полузапруд, головы полузапруд подняты на 0,2—0,5 метр. выше среднемеженнего горизонта. По направлению от головы к корню гребень полузапруд делался с под'емом по прямой линии, причем наибольшее возвышение гребня сообразовалось с таким расчетом, чтобы гребень не повреждался льдом во время весеннего ледохода. Чаще всего придавался гребню уклон от 0,01 до 0,015. Плетневые заграждения применялись и для устройства запруд при заграждении мелководных рукавов. Применение плетневых регуляционных сооружений дало на верхнем Днепре в общем удовлетворительные результаты при сравнительно небольших денежных затратах на эти работы.

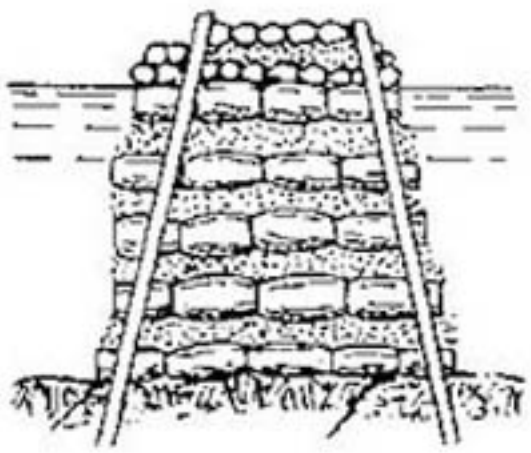


Рис. 220. Буна-илоудержатель, построенная из коротких фашин.

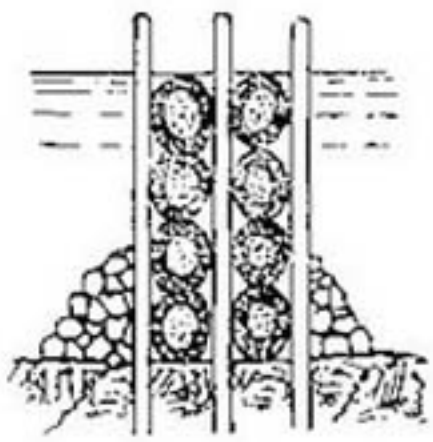


Рис. 221. Буна-илоудержатель, построенная из длинных фашин.

б) Фашинные заграждения—илоудержатели.

Для задержания и скорейшего накопления наносов в пространствах между полузапрудами, а также между продольными дамбами и берегом

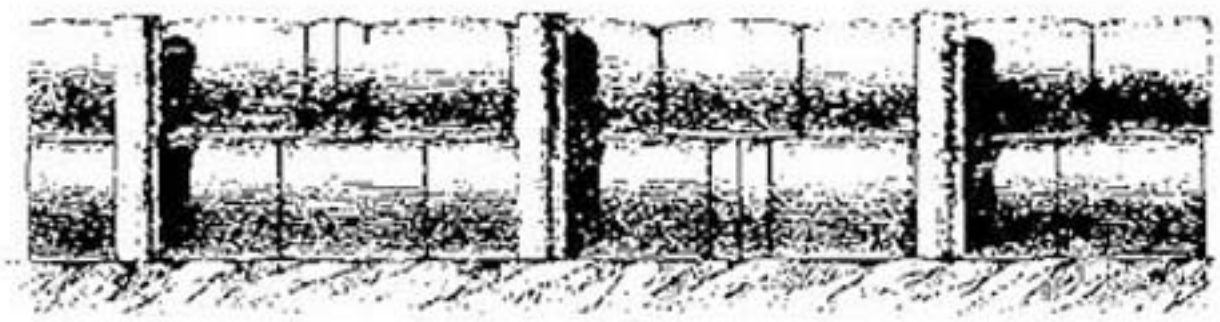


Рис. 222-*a*.

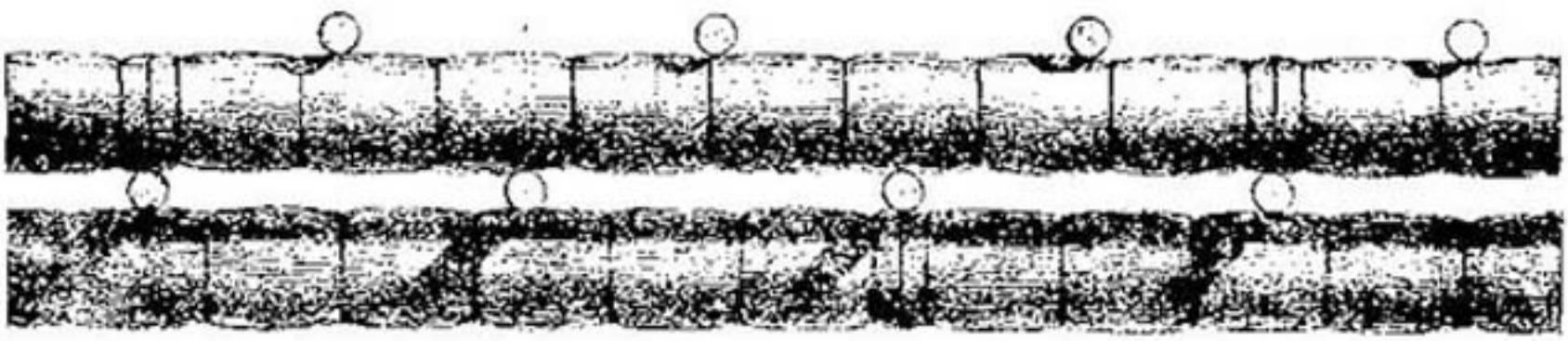


Рис. 222-*b*.

Рис. 222 *a* и *b*. Фашинные траверсы-илоудержатели на р. Висле.

нередко применяются заграждения, устроенные из заполненных камнем фашин, а также в виде низких фашинных дамб, покрытых хворостом. В между-полузапрудных пространствах такие заграждения располагаются

в виде ряда бун, выведенных от берега. Если же подобные заграждения служат для заиления пространств позади продольных дамб, то они являются траверсами между дамбой и берегом, причем их гребни возвышаются на 20—25 см. выше уровня продольной дамбы. При устройстве нескольких траверсов высота их гребней и расстояние между тра-

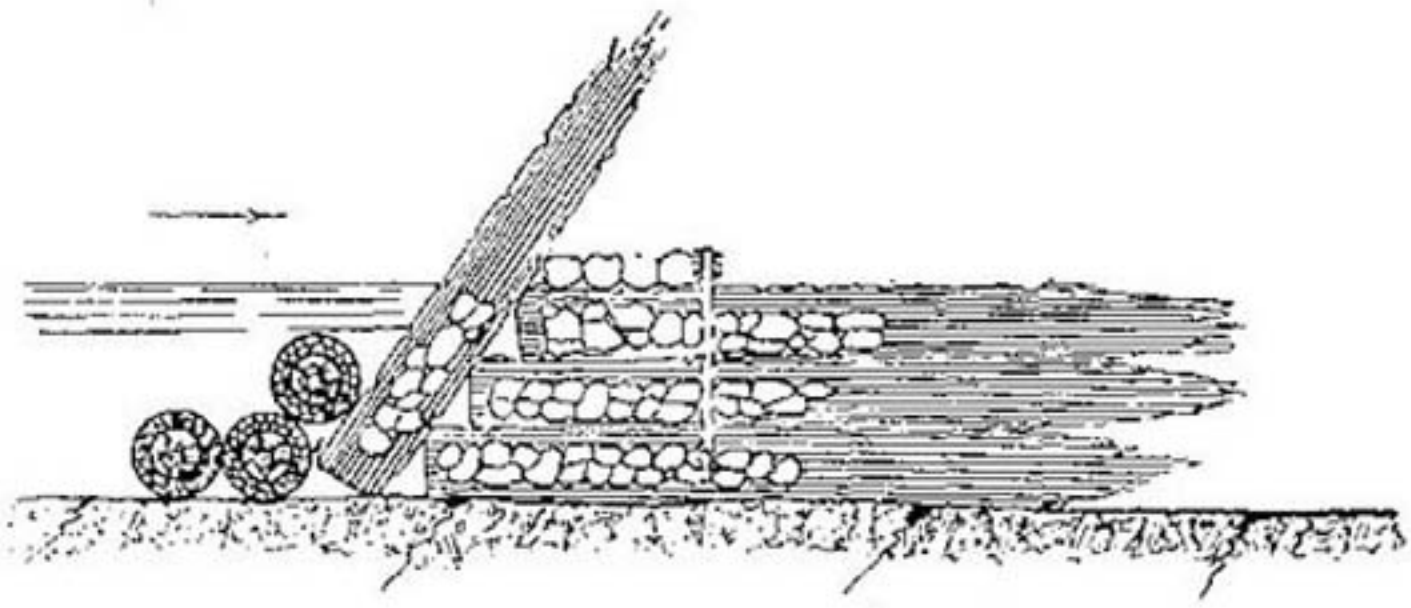


Рис. 223. Фашинные буны-илоудержатели на р. Дунае.

версами должны быть назначены соответственно уклону поверхности воды, а именно с таким расчетом, чтобы высота слоя переливающейся через них воды была одинакова на гребнях всех траверсов. На рис. 220 и 221-м изображены типы высоких бун-илоудержателей в пространствах между полузапрудами. По обоим типам буна строится из

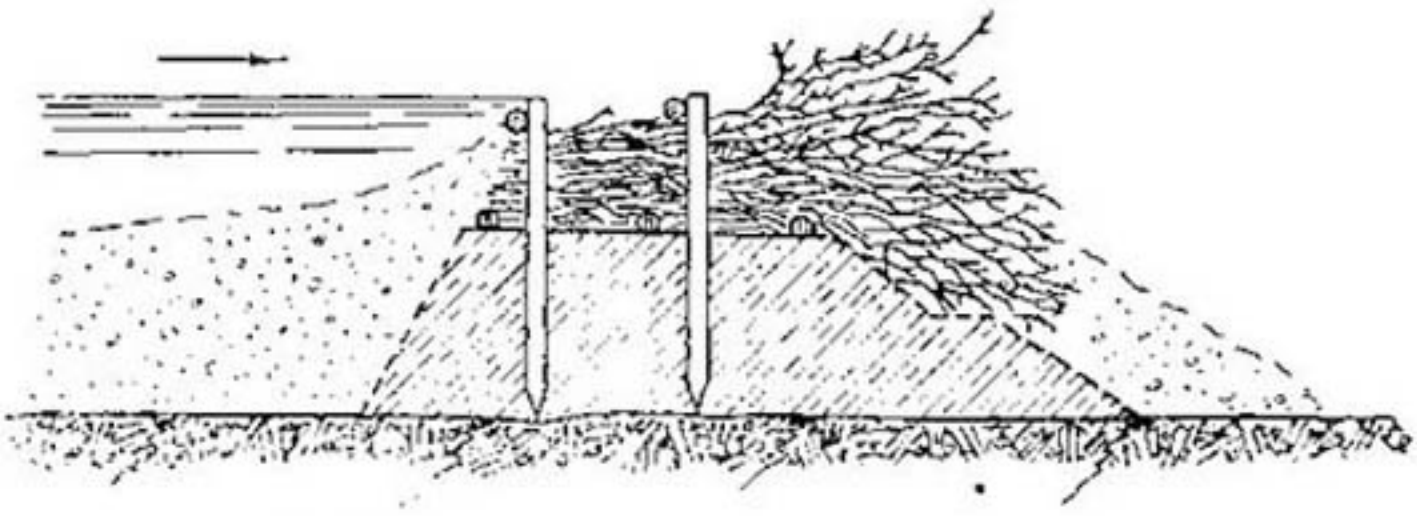


Рис. 224. Фашинные траверсы-илоудержатели на р. Инне.

тяжелых фашин, закрепленных между рядами забитых свай, но по первому типу фашины короткие, положенные поперек сооружения, а во втором типе применены длинные фашины, положенные вдоль сооружения.

Рис. 222-й изображает тип траверсов из длинных тяжелых фашин, применявшихся при регуляционных работах на р. Висле. Рис. 223-й представляет тип илоудержательных бун и траверсов, применявшихся на средней части р. Дунай. Тело сооружения составлено из кладки коротких тяжелых фашин, внутри заполненных камнем. Когда кладка фашин доведена до горизонта низ-

ихк вод. забиваются через фашины колья, на выступающих концах которых делается плетень, удерживающий каменную нагрузку. Чтобы создать шероховатое сопротивление течению воды над телом заграждения, устанавливаются наклонные фашины, которые удерживаются в этом положении несколькими тяжелыми фашинами, уложенными вдоль подошвы сооружения. Рис. 224-й изображает тип траверсов плоудержателей, примененный на нижнем участке р. Инна. Нижняя часть траверса составлена из фашинной кладки, гребень покрыт толстым слоем хвороста, удерживаемого продольными схватками на сваях, забитых через хворост и фашинную кладку. В данном случае слой хвороста играет тоже роль шероховатого сопротивления течению воды с целью способствовать отложению из нее наносов с обоих сторон сооружения.

в) Подвесные щиты Вольфа.

Под этим наименованием мы разумеем изобретенные баварским инженером Вольфом и впервые примененные им в довольно большом масштабе на р. Изаре приспособления, помощью которых можно искусственно производить нужные при регулировании реки углубления дна и образование отмелей, пользуясь для этого силою текущей в реке воды. Принцип Вольфовского приспособления основан на том, давно уже известном явлении, что, если поместить в реке какое-либо недоходящее до самого дна заграждение, например щит, то под ним скорость течения увеличивается, происходит размыв дна, причем вымытый грунт складывается позади щита. На наших реках этим явлением сыздавна пользовались судоходцы для проводки судов через мели на перекатах: судно при ходе против течения, ставшее на слабую землистую мель, в непродолжительное время освобождается вследствие подмыва мели течением под судном, и, подвигаясь понемножку вперед, может пройти мель, если она не высока, а течение сильно. При недостаточной силе течения размыв мели в подобных обстоятельствах может быть ускорен постановкой судна у мели боком, постановкой у нее нескольких судов рядом, пропуском вперед над мелью судов меньшей осадки и т. п. приемами. На том же принципе были основаны употреблявшиеся на р. Волге в половине прошлого века так называемые передвижные плотины, изобретенные инженером В. К. Янковским. Сущность этого приспособления заключается в том, что с плавучей платформы, составленной из двух плотов, опускается в промежутке между плотами подвешенный к ним деревянный щит, длиною около 10 метров, а шириною около 6 метр.; ускоренное под щитом течение размывает дно. Такого рода приспособления назначались, однако, только в качестве воспособления для временного углубления судового хода на перекатах и вышли засим из употребления после появления землечерпательных машин. Особенность же Вольфовского приспособления заключается в том, что оно служит не только для размыва

дна, но и для одновременного создания новых берегов регулируемого русла или же для образования постоянных дамб и других регуляционных сооружений.

В простейшем виде упомянутое приспособление Вольфа состоит из щитового на сваях ограждения, показанного в разрезе на рис. 225-м. Сваи расставляются через $1^1/_2$—2 метр. друг от друга и к ним прибиваются доски или кругляки в виде щита, нижний край которого опущен на некоторую глубину ниже горизонта меженних вод, определяя эту глубину опытным путем. Действие заграждения выражается в том, что, если оно расположено в реке на некотором расстоянии от берега под некоторым углом к течению и даже параллельно ему, причем глубина дна позади щита несколько меньше, чем перед ним, то вследствие образующегося небольшого подпора происходит под щитом усиленное течение, показанное на рисунке стрелкой. Поэтому, перед загражденнем происходит размыв дна и продукты размыва, пройдя под щитом, складываются в виде валика по другую сторону загра-

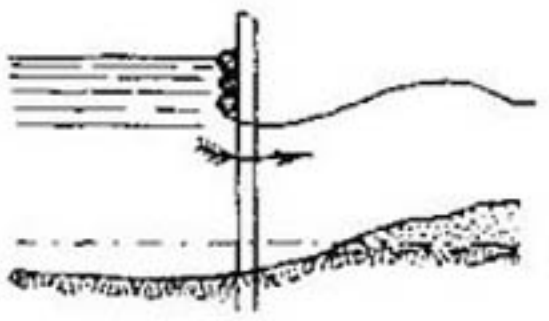


Рис. 225. Неподвижный щит системы Вольфа.

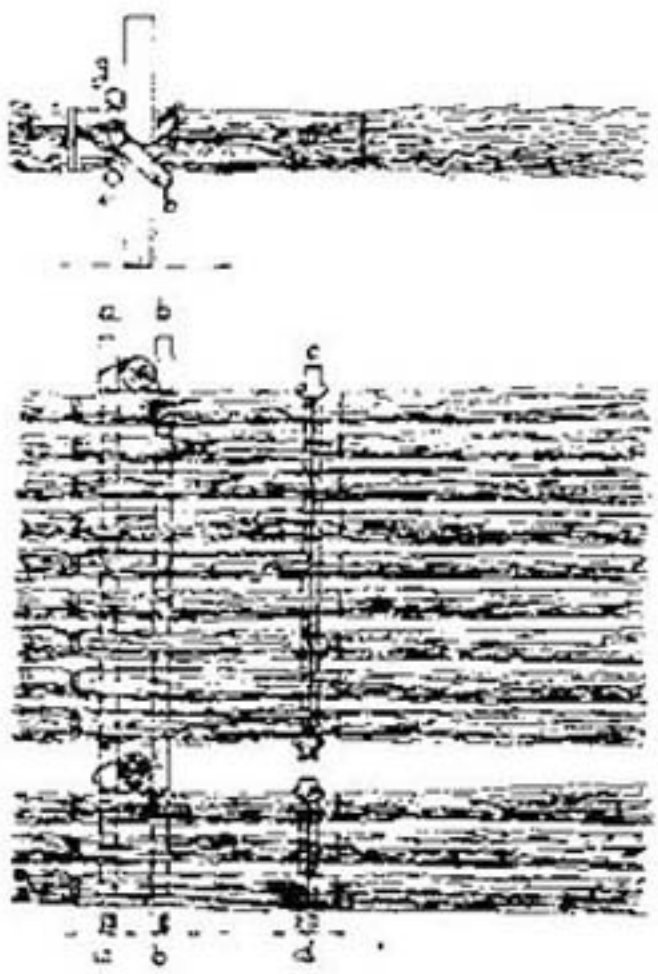


Рис. 226. Подвижной щит Вольфа. Тип щита для слабого течения.

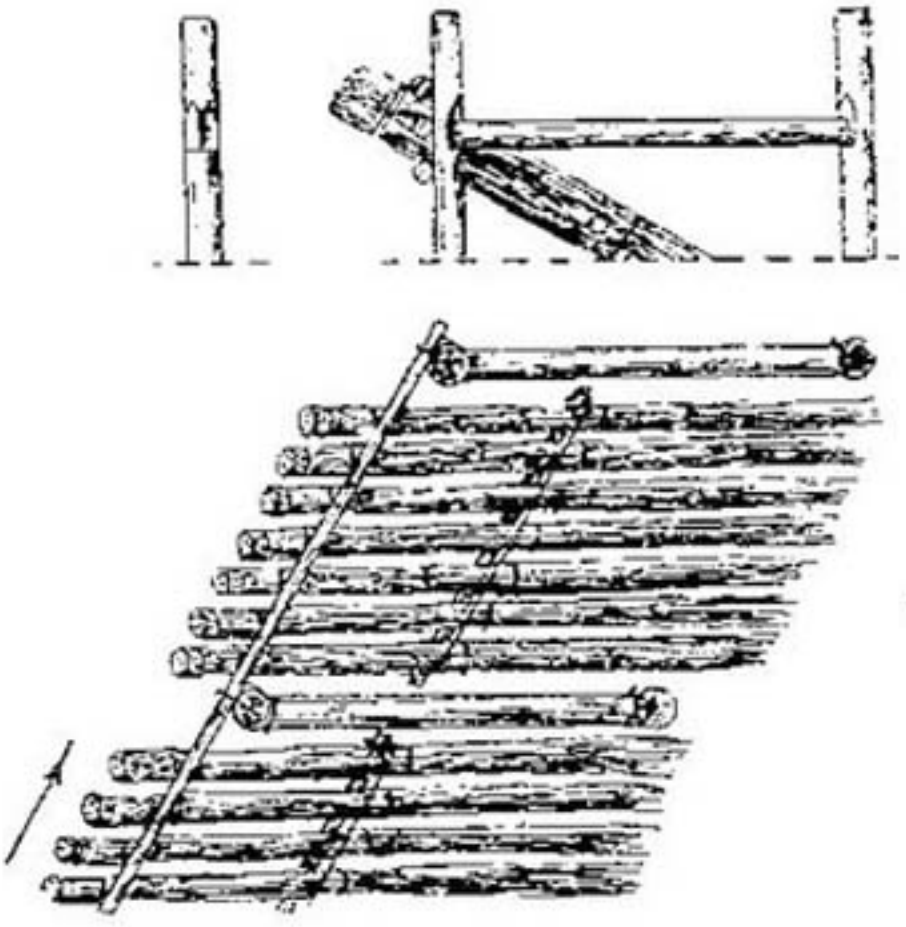


Рис. 227. Подвижной щит Вольфа. Тип щита для быстрого течения.

жденнн. В зависимости от направления линии заграждения и глубины щита, размыв дна и образование наносного бугра происходит с большей или меньшей интенсивностью и в той или иной форме.

Чтобы облегчить регулирование действия такого заграждения Вольф заменил неподвижный щит подвесным фашинным щитом, конструкция которого показана на рис. 226 и 227-м. Свайный ряд заби-

вается по границе регулируемой полосы, где требуется углубить дно с речной стороны и образовать береговой откос с другой стороны границы. Сван забиваются на расстоянии 2,5 метра друг от друга. Между сваями помещаются щиты, составленные из нескольких фашин и прикрепленные к сваям, как показано на рис. 226-м, изображающем конструкцию, которая применяется при слабом течении. Чтобы скрепить фашины в форму плоского щита, служит прибитая к сваям полусхватка a—a, которая пронизывает комлевые концы фашин, и штанга c—d, которой пронизываются фашины щита по середине, где они связываются кроме того проволокой. Прибитые к сваям полусхватки g, f, и b служат для поддержания щита в горизонтальном или слабо наклонном положении. Если течение сильное, то вместо одного ряда свай забивается два ряда (рис. 227), причем противоположные сваи обоих рядов скрепляются между собою распоркой для большей устойчивости заграждения; фашинные щиты укрепляются с крутым уклоном вниз, чтобы уменьшить зазор между щитом и дном. В обоих случаях нет надобности ставить щиты непременно в каждом пролете между сваями; напротив, иногда полезно делать закрытие щитами не сплошное по всей длине заграждение, а оставляя несколько пролетов без щитов вперемежку со щитовыми закрытиями.

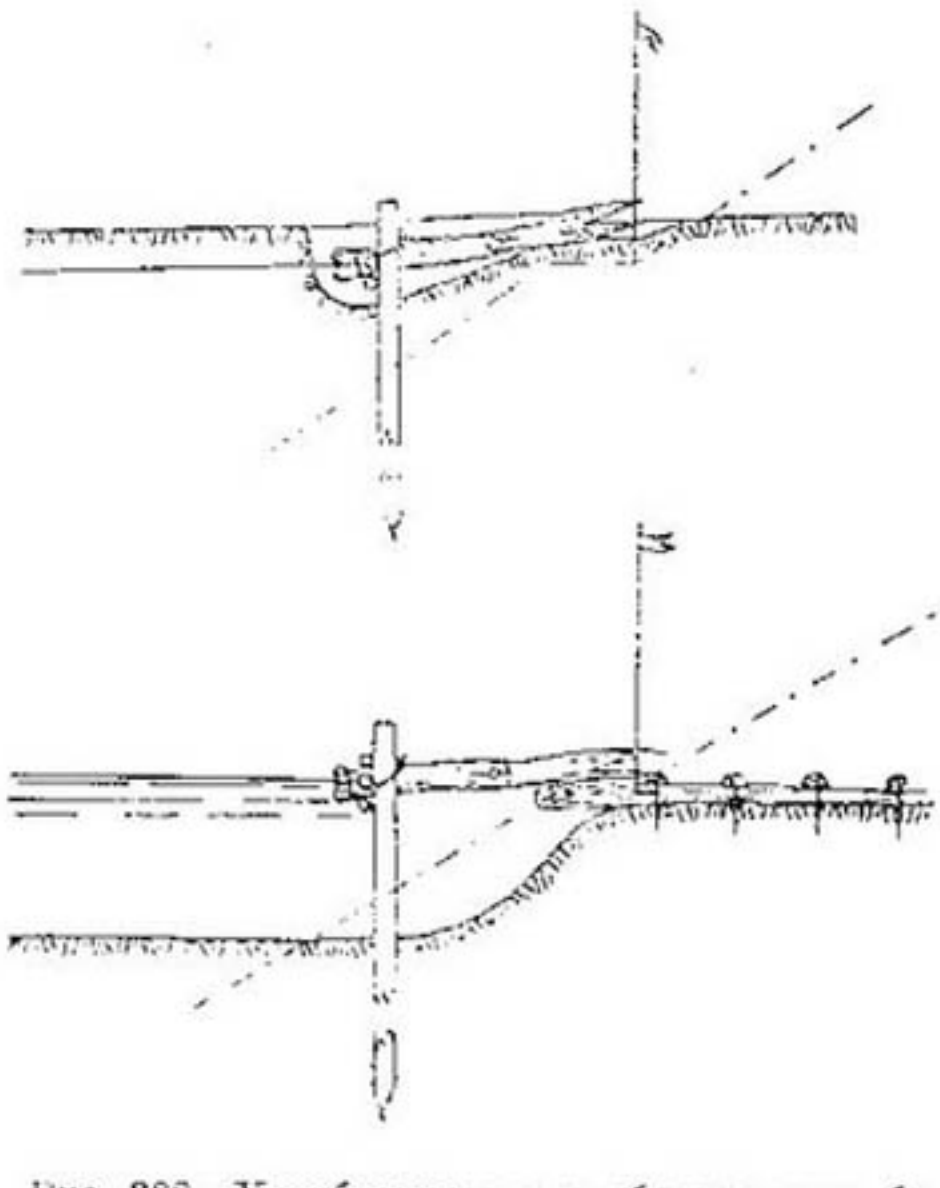


Рис. 228. Углубление дна с образованием берега помощью горизонтальных щитов Вольфа.

Работы Вольфа на р. Изаре показали, что его подвесными щитами можно достигать весьма полезных результатов при малых денежных издержках: удавалось предохранить берега от размывов, засыпать наносами вымоины русла, образовать новые борега, отклонить русло от вредного направления и проч. Большой выгодой действия этого приспособления для регуляционных работ является то обстоятельство, что продукты размыва можно складывать на недалеком расстоянии и в желаемом месте.

Рис. 228, 229 и 230-й показывают, каким образом можно помощью щитовых заграждений Вольфа последовательно достигнуть углубления русла и образовать вдоль него возвышенный берег с последующим укреплением берегового откоса. Но, в отношении применения щитов

Вольфа при регуляционных работах, следует заметить, вообще, что для достижения хороших результатов требуется большой опыт и искусное обращение с упомянутыми приспособлениями, как это выяснилось на практике применения щитовых заграждений Вольфа в других случаях, когда не удавалось получить желаемых результатов работы.

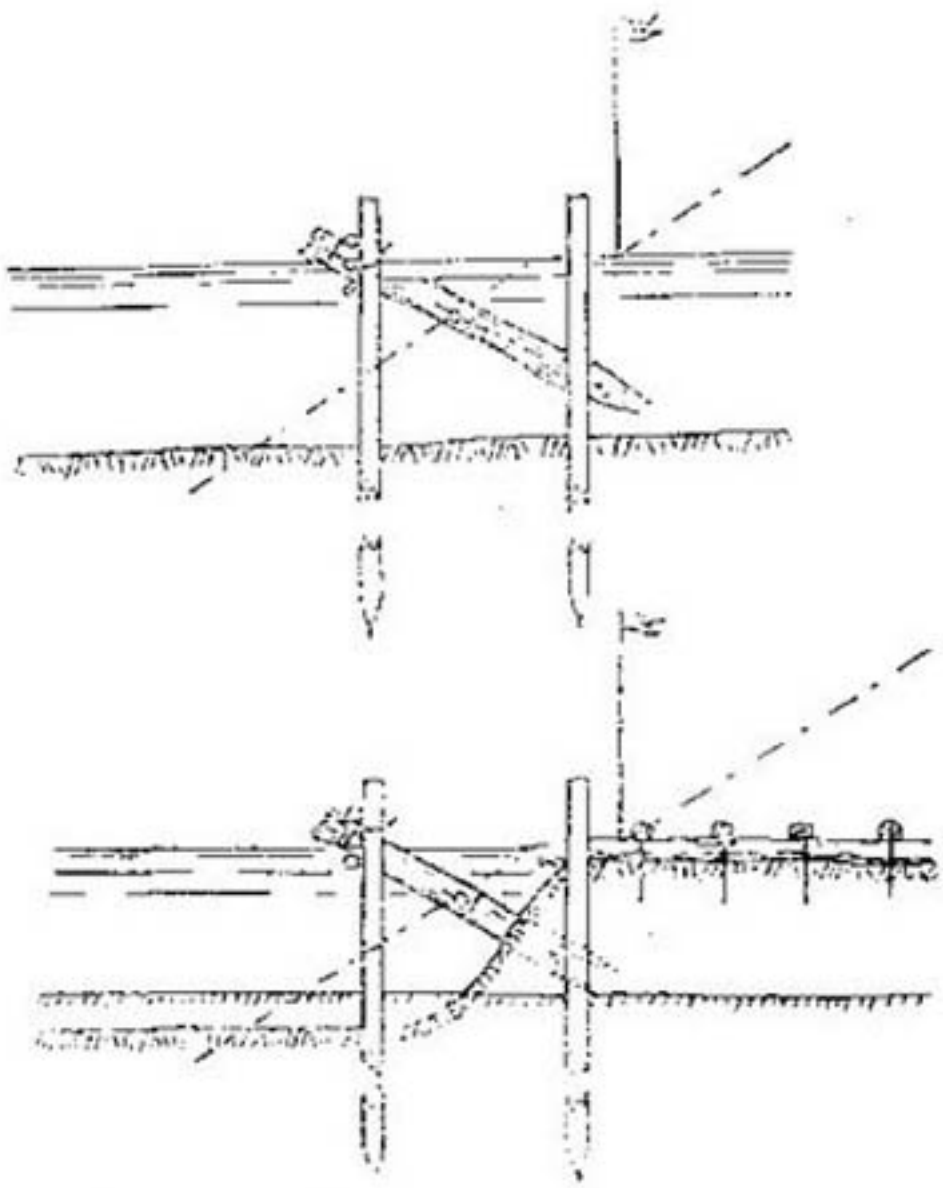


Рис. 229. Углубление дна с образованием берега помощью наклонных щитов Вольфа.

г) Древесные плоудержатели.

В практике регуляционных работ имеются примеры удачного применения целых деревьев, срубленных и не очищенных от ветвей. Более часто они употребляются в горных местностях при регулировании горных потоков, о чем изложено в главе VII-й. Но и на больших реках, несущих во взвешенном состоянии большое количество мелких земли-стых частиц, встречаются случаи, когда в качестве плоудержателей употребляются целые ветвистые деревья, опущенные в воду. Подобно другим видам сквозных заграждений, как плетни, щиты, хворостяные покрытия, рассадка кустов и проч., действие густо ветвистого дерева заключается в том, что оно, представляя местное сопротивление течению, уменьшает скорость течения и способствует осаждению наносов на дно.

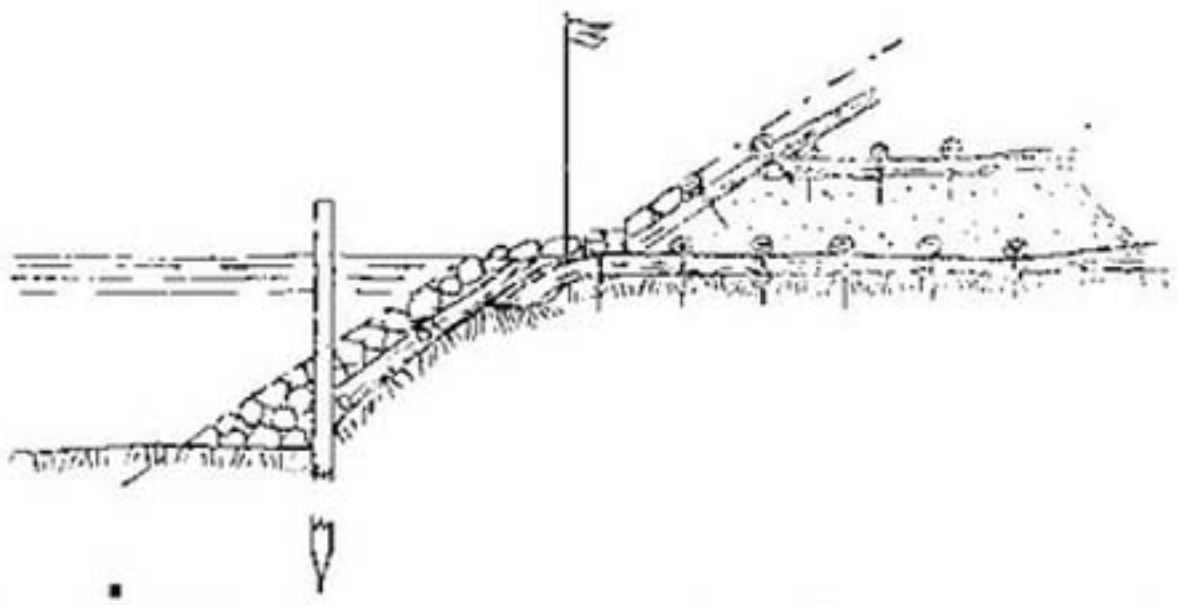


Рис. 230. Закрепление результатов действия щитов Вольфа.

Поэтому срубленные деревья с ветвями, очищенными только от листьев, могут служить плоудержательными бунами для нарастания наносов в промежутках между регуляционными полузапрудами. Для этого дерево помещается под водою в горизонтальном положении возле забитых свай, к которым привязывается ствол дерева, как показано на рис. 231-м.

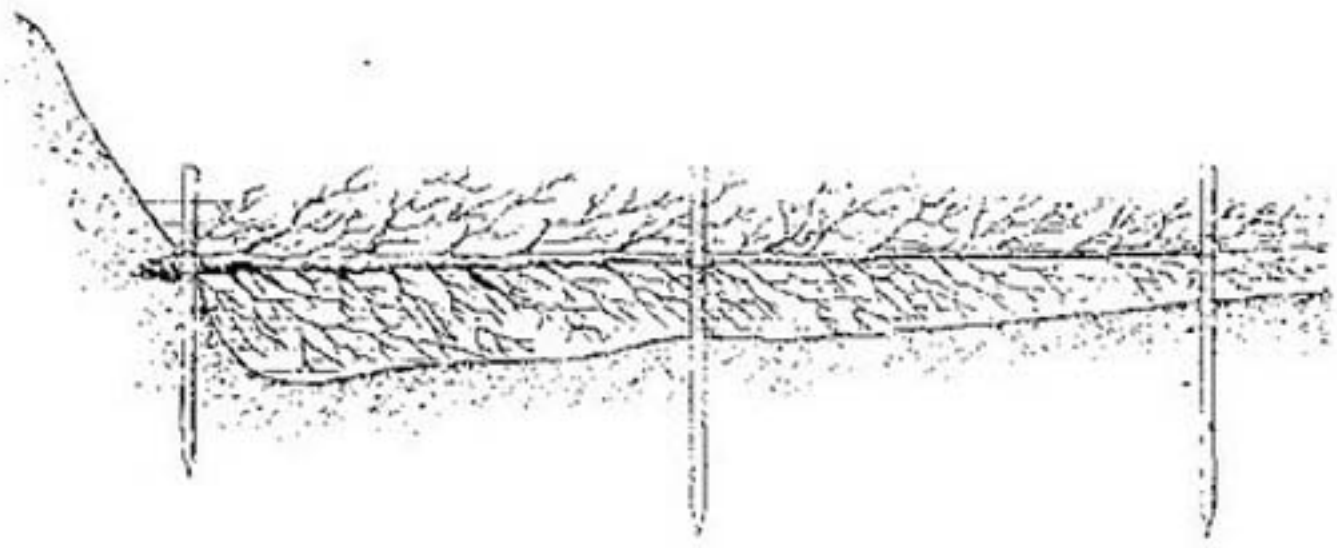


Рис. 231. Буна-плоудержатель, сделанная из ветвистого дерева.

Погружаемые в воду ветвистые деревья служат иногда средством для заполнения наносами настолько глубоких вымоин в русле реки, что употребление для этого донных порогов или не достигает своей цели, или вовсе невозможно. Применение для этой цели деревьев возможно, однако, только на таких реках, которые несут в воде огромное количество мелких илистых и землистых частиц. Густо ветвистые деревья погружаются рядами в воду вертикально, срубом вниз

Рис. 232. Перевозка на плоту.

Рис. 233. Погружение на дно.

Применение деревьев-плоудержателей на р. Тиссе.

и удерживаются в таком положении каким-либо тяжелым предметом, опущенным на дно в качестве якоря. Такими предметами служили тяжелые фашины, мельничные камни, бетонные массивы и т. п. Примеры подобных способов борьбы с глубокими размывами речного русла встречаются на нескольких реках—Дунае, Тиссе, Драве, Миссури, на Ост-индских реках и некоторых других.

Рис. 232 и 233-й изображают способ погружения деревьев, применявшийся на р. Тиссе. Якорем служила тяжелая фашина, внутри заполненная гравием. Дерево, скрепленное с таким якорем, укладывалось

на платформе B между двумя плотами A и C. Платформа имеет на верху козлы N, на которых удерживается фашина с деревом при буксировке на место погружения. Платформа B устроена следующим способом: в одном конце она шарнирно прикреплена к плоту C, а на другом конце она скреплена с плотом A помощью крюка, который может быть поднят. Плоты подводятся к месту погружения дерева и точно устанавли-

Рис. 234.

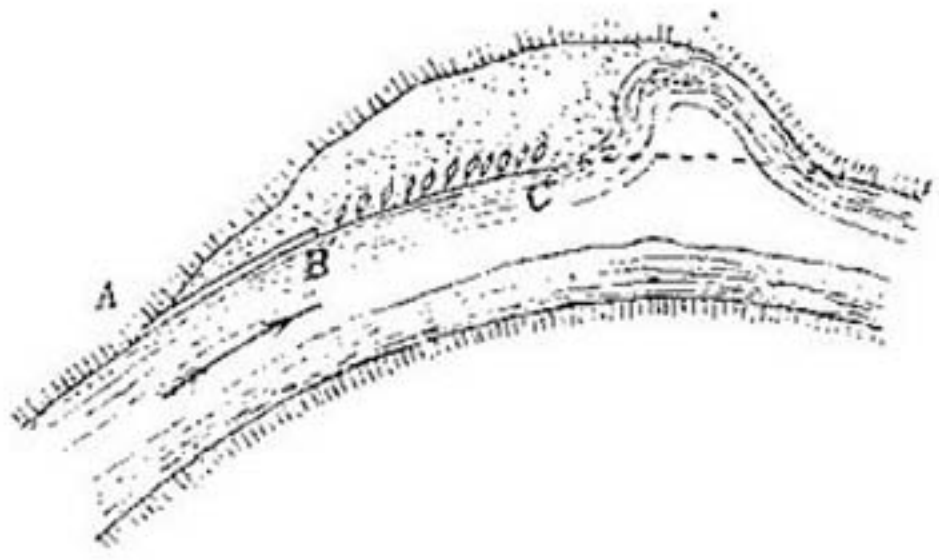


Рис. 235.

Применение деревьев-плоудержателей на р. Дунае.

ваются помощью якорей и якорной лебедки W. Засим удерживающий крюк H открывается, плот A под влиянием течения несколько удаляется от плота C, насколько это позволяет цепь K, платформа под тяжестью лежащей на ней фашины опускается вниз, а вместе с тем падает на дно фашина с деревом.

Рис. 234-й и 235 изображает результаты применения деревьев для заноса глубокой вымоины на р. Дунае ниже г. Пассау. Здесь в крутой излучине реки (рис. 235), которую пытались смягчить помощью струенаправляющей дамбы AB, образовалась настолько глубокая вымоина около левого берега, что продлить дамбу не представилось возможным. Помощью ряда погруженных деревьев по линии BC удалось получить столь сильное обмеление дна позади этой линии, что глубина уменьшилась с 9 до 4 метров. В качестве якорей служили бетонные массивы (рис. 234).

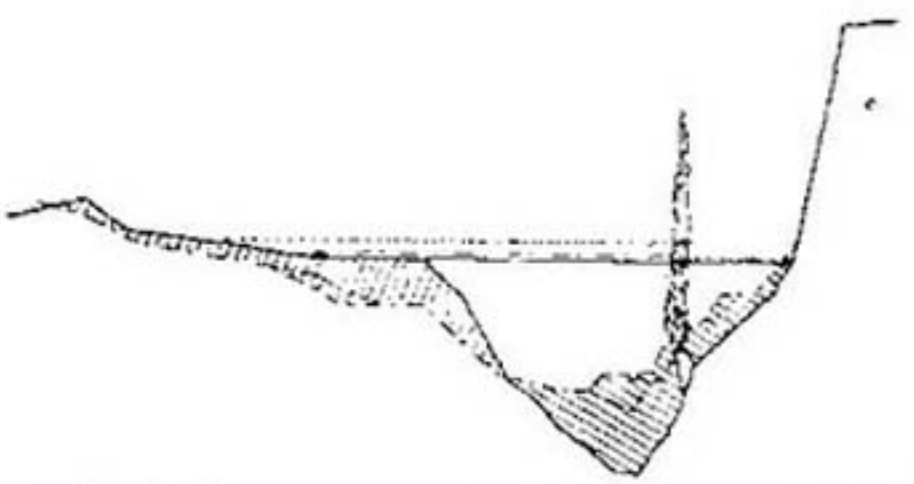


Рис. 236. Применение деревьева-плоудержателей на р. Драве.

Рис. 236-й показывает разультаты, достигнутые помощью погруженных деревьев на одном из участков р. Дравы. Поперечный профиль реки до погружения деревьев представлял глубокую, до 7 метров, вы-

мопну дна, очертание которой показано на рисунке сплошной линией. После погружения деревьев (елок высотою 8—10 метр.), поставленных в ряд на расстоянии около 2 метр. друг от друга, вымонна у вогнутого берега в течение менее, чем одного года, была значительно занесена, а у противоположного берега дно несколько размылось, благодаря чему форма дна в поперечном профиле приняла более плавные очертания, показанные на рисунке пунктирной линией.

При быстром течении трудно удержать на месте погруженное в воду ветвистое дерево. В таких случаях можно взамен деревьев применять канаты с густо привязанными к нему ветвями, хворостом и т. п., как это делалось при регуляционных работах на ост-индских реках (рис. 237). Канат, толщиною около 2 см., прикреплялся к якорю, а другой его конец к буйку в виде бочки, плавающей на поверхности воды. По всей длине каната привязывались к нему легкие древесные ветви. Такие канаты с якорями расставлялись на расстоянии 3—4 метра друг от друга по проектной линии предполагаемого образования нового берега.

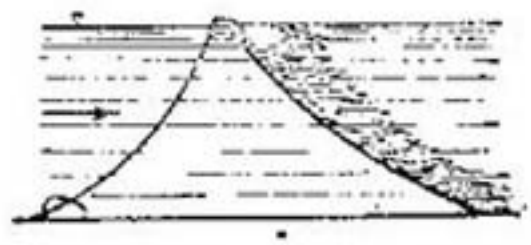


Рис. 237. Канатные плоудержатели.

д) Рассадка растений.

Образованные, при регуляционных работах, из наносных отложений обширные береговые площади между полузапрудами и позади продольных дамб могут быть размыты весенними водами, а потому требуется соответствующее укрепление их поверхности. Нередко требуется также укреплять естественно образовавшиеся песчаные отмели и косы, если их положение благоприятно для поддержания удобного фарватера. Также приходится иногда укреплять поверхности пологих откосов берега, затопляемых высокими водами. Обширность таких площадей исключает возможность применять для их укрепления дорого стоющие одежды. Между тем растительность укрепляет поверхность своими корнями; если же растения достаточно высоки, то, представляя некоторое сопротивление течению воды, они тем самым вызывают отложение наносов, несомых в воде в периоды, когда такие поверхности заливаются высокими водами, особенно богатыми наносами. Наносные илистые отложения в свою очередь способствуют развитию растительности, давая ей нужное питание. Поэтому одним из наиболее распространенных способов укрепления упомянутых поверхностей является рассадка на них ивняка, как растения легко прививающегося на почве, периодически затопляемой водою. Ивняк должен быть хорошо приживающийся и не боящийся морозов; лучшими сортами для этой цели является кустарниковая ива (белотал, верболоз). Рассадка производится осенью или весною после спада весенних вод. Для рассадок употребляют так называемые черенки, т. е. отрезки

побегов и ветвей, длиною около 0,3—0,4 метр., толщиною около 1½—3 см. в диаметре. Черенки должны быть срезаны из свежесрубленного хвороста, они должны быть с глазками, не менее трех на черенке.

Рассадка производится одним из следующих способов: рядами, гнездами и бороздами.

При рассадке рядами черенки рассаживаются по параллельным рядам, отстоящим друг от друга на 0,5 метр, причем черенок от черенка сажается на расстоянии, обыкновенно, около 0,2 метр; иногда требуется еще более плотная рассадка. На песчаных же почвах следует сажать черенки менее плотно: ряд от ряда на 0,6—1,0 м., а, в ряду, черенок от черенка на 0,4—0,5 м. Если рассадка делается на откосе, то таковой должен быть с уклоном не менее двойного. Ряды располагаются наклонно под углом от 30 до 45 градусов к урезу воды, причем ряды предпочтительно делать восходящими от уреза воды, а не нисходящими к нему, что имеет значение для лучшего задержания наносов (рис. 238). Внизу и наверху располагаются горизонтальные ряды в виде бордюров. Черенки сажаются в ямки (лунки), пробитые острым орудием (лом, пешня, сверло), диаметр которого раза в полтора более диаметра черенка: это необходимо, чтобы не содрать кожу при погружении черенка в землю. Лунки делаются глубиною равной длине черенка, чтобы после посадки в лунку и ее затоптании черенок своим верхним концом не выступал из поверхности земли.

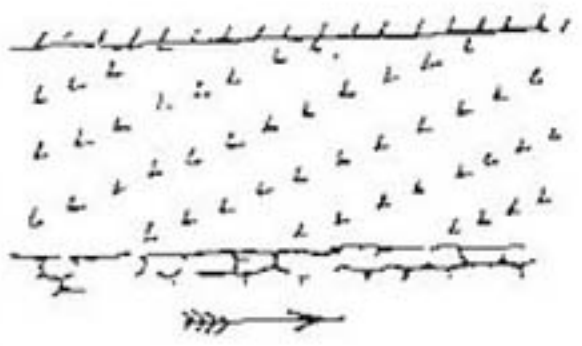


Рис. 238. Рассадка ивняка наклонными рядами.

Рис. 239. Рассадка ивняка гнездами.

Рассадка гнездами (рис. 239) производится такими же наклонными параллельными рядами, но черенки сажаются целыми группами, по 6—10 и даже до 20 штук в одной ямке. Поэтому ямы роются широкие, около 0,3 м. в диаметре по дну, черенки расставляются по окружности, после чего ямы засыпаются землей с легкой трамбовкой. При рассадке гнездами ряды ям расставляют между собою на 1—1½ метр. и на таком же расстоянии в каждом ряду.

Рассадка бороздами или в лежку состоит в том, что по откосу берега наклонно к течению, на 45—60 градусов, прокапывают ряды борозд, глубиною около 15 см., расставленных на 0,6—0,8 м. друг от друга, и в эти борозды укладываются длинные (до 2 и более метров) черенки и засыпаются землею с легким утрамбованием.

На рисунках 240 и 241-м показана в плане отмель с рассадкой, а также конструкция сверла для сделания лунок при рассадке рядами. На рисунке изображена рассадка нисходящими рядами, применявшаяся на р. Висле.

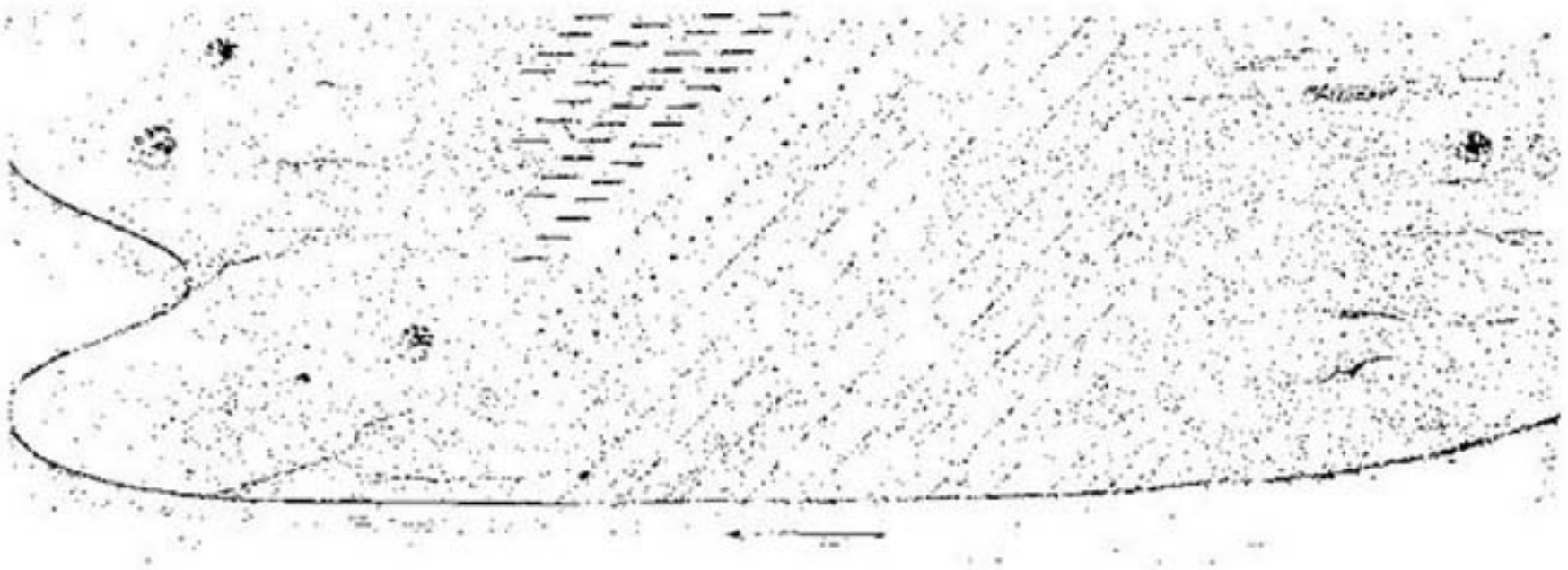


Рис. 240. Рассадка ивняка нисходящими рядами.

Рассадку следует производить во влажную почву и, если она делается в сухое время, то после посадки полезно поливать. В первое время нужно следить, чтобы рассадки не заглушались травой и не заносились наносами. Через два три года, когда саженцы дадут уже прочные ростки, нужно периодически расчищать их, чтобы выросшие кусты не заглушали друг друга. Расчистку следует делать осенью после спада листьев; удаляемые ростки следует не ломать, а осторожно срезать ножем, чтобы не происходило усыхание растения.

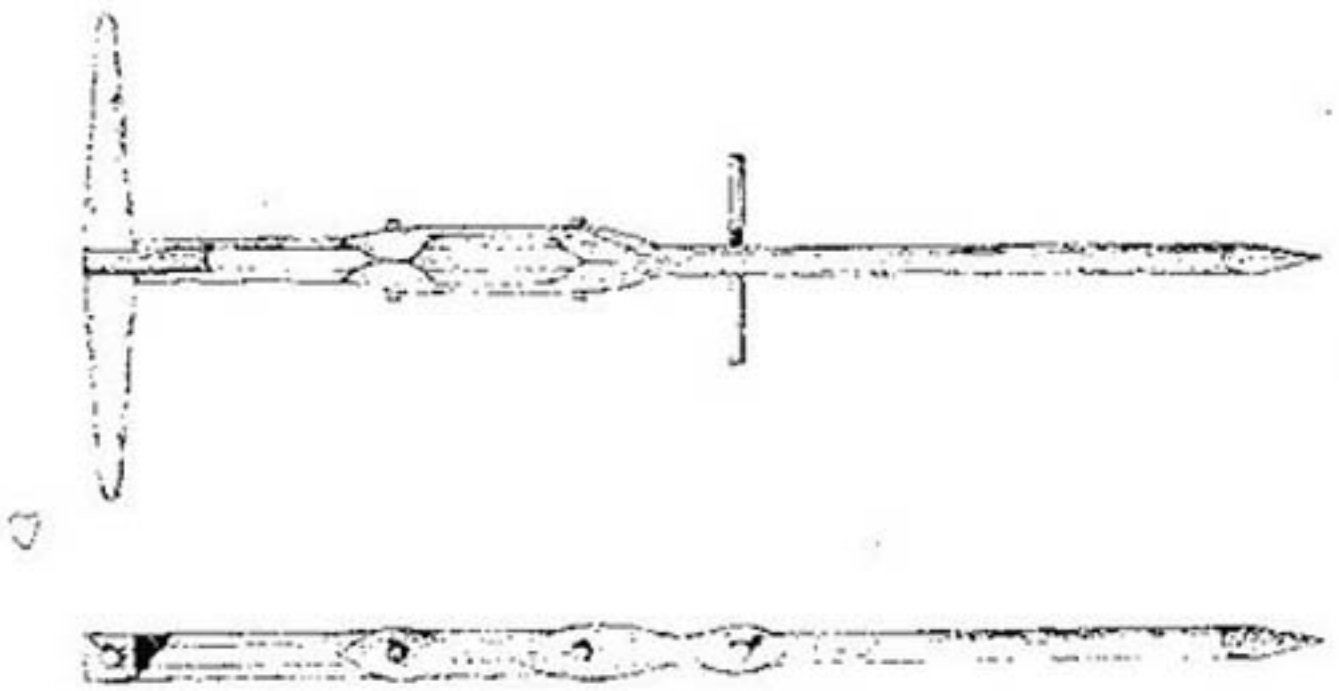


Рис. 241. Сверло для делания лунок при посадке черенков ивняка.

ГЛАВА VII.

Регулирование горных потоков.

§ 35. Свойства горных потоков.

Горные реки, питаясь главным образом водами дождей, выпадающих в горах, и водами тающих снегов и ледников на вершинах гор, получают эти воды весьма неравномерно. Их сток происходит по склонам, по ложбинам и разного рода складкам горной местности. Крутые склоны поверхности земли в горах способствуют быстрому стеканию воды в эти пониженные места; большие падения, свойственные тальвегам горных ложбин, обусловливают быстроту течения образующихся в них ручьев. Поэтому горные реки вообще отличаются весьма непостоянным характером своего течения. После сильного дождя, в особенности после ливней, происходящих в горах с особой силой, река быстро обогащается водою, величина ее расхода иногда в течение нескольких часов увеличивается во много раз, уровень воды сильно поднимается, скорости течения тоже растут, а засим, спустя некоторое время по миновании дождя, начинается хотя и менее резкий, но тоже очень скорый спад воды до возвращения реки в прежнее состояние. По тем же горным ложбинам сплою текущей воды сносятся в реку продукты разрушения и смыва горных пород, отягощающие реку наносами. Обилие последних и крупность частиц, из которых они состоят, препятствуют правильной разработке речного русла и сообщают ему крайнюю неустойчивость.

Многие горные ручьи обладают особенно опасными свойствами, приносящими огромный вред как рекам, в которые они впадают, так и местности, где они располагаются. Нередко в горных областях имеются такие ручьи, которые в обыкновенное время выражаются едва заметной струей или даже совершенно пересыхают, а после сильного ливня в горах внезапно в ложбине ручья сосредоточиваются огромные массы воды, которые низвергаются вниз по ложбине чрезвычайно стремительным потоком, могущим сносить всякого рода встречающиеся по пути сооружения или иные препятствия течению. Если поток обра-

зуется в складках горы, состоящей из очень твердых скалистых пород, не поддающихся разрушению, то упомянутые внезапные потоки выражаются движением только масс воды. Такие потоки называются горными бурными потоками (в Альпах их называют Wildbäche, Giessbäche, torrents). В других случаях потоки несут, кроме воды, большие количества обломков скал, камней, щебня, мелких частиц продуктов разрушения горных пород, и вся эта разжиженная водою масса приобретает иногда вид грязевого потока, который называют у нас на Кавказе и в Туркестане Селевым потоком. В Тироле такие потоки называют мурами (Mur, Murgänge, Murbrüche), в Швейцарии—руфами (Ruff), во французских Альпах—nants sauvages. При благоприятных условиях разрушение горных пород происходит весьма энергично. Поверхность обнаженных скал под влиянием атмосферных агентов выветривается и рыхлые продукты выветривания смываются дождевыми водами к пониженным местам. Если почва на поверхности склонов поддается размыву, то образуются борозды и рытвины, в которых собираются стекающие воды. Направляясь по ним вода быстро размывает рытвины в глубину и ширину, развивая их с течением времени в глубокие, круто спускающиеся горные ложбины. Всякого рода горные тропы и неукрепленные дороги, давая путь стекающим водам, благоприятствуют образованию подобных рытвин. На крутых склонах гор и на откосах ложбин разрыхленные породы образуют осыпи, т. е. сползание рыхлого грунта, в особенности при насыщении его водою. Твердые скалистые породы на склонах ложбин более устойчиво сохраняют свое положение, принимая крутые, иногда почти вертикальные откосы; но с течением времени они тоже теряют равновесие, обрушиваясь в ложбину, вследствие образующихся трещин в скале, или сползая по наклонным прослойкам водопроницаемых грунтов. В том и другом случаях глыбы скалы, падая в ложбину, раздробляются на более мелкие куски. Силою течения больших масс воды все упомянутые продукты разрушения уносятся вниз по тальвегу ложбины. Ложбина в области разрушения пород углубляется и расширяется, принимая форму полуворонки или даже более чем полуворонки (чашки); от новых разрушений она постепенно отступает вверх в гору. В области разрушения в большую рытвину впадают с боков меньшие рытвины второго порядка, которые в своем верху тоже разветвляются. Во всех этих боковых рытвинах происходят подобные же процессы размыва. Горный поток постепенно удлиняется, отступая в сторону горы, как показано на рисунках 242 и 243, причем продукты размыва, передвигаясь вниз по ложбине, образуют при выходе из нее обширные наносные отложения.

Передвижение по тальвегу потока продуктов разрушения горных пород происходит различно и неравномерно. При небольшом количестве этих материалов, по сравнению со стекающими массами воды, и при менее крутом падении тальвега потока движение упомянутых

материалов происходит силой течения воды. При этом более легкие частицы уносятся скорее и, таким образом, движущийся материал как бы сортируется по пути. Тем не менее и в таких случаях происходят опасные явления чрезвычайно порывистого стока воды и передвижения твердых материалов. По разным причинам, например вследствие местного сужения русла потока, нагромождения тяжелых обломков скал и проч., происходят засорения тальвега, преграждающие путь для свободного стока воды во время дождей и ливней. Тем самым образуются высокие подпоры и большие скопления воды. Под влиянием растущего подпора заграждение внезапно разрушается и тогда вся масса скопившейся воды устремляется вниз, а с нею лавинообразно сдвигаются вниз по тальвегу массы камней, песка и грязи. Они приостанавливаются после прохода водяного вала, до наступления новых ливней и повторения подобных же явлений. Таким образом, упомянутые нагромождения твердого материала (сели) передвигаются по горному потоку периодически, как бы толчками, вниз, пока не достигнут своего выхода на широкую долину или в реку. Однако, движение сели может происходить не только непосредственным влечением их водяным потоком, но и под действием силы своей тяжести при влиянии воды на их консистенцию. Рыхлая масса твердых частиц имеет неодинаковый коэффициент трения в сухом виде или при насыщении водою. По мере насыщения водою коэффициент трения уменьшается. Поэтому при крутых

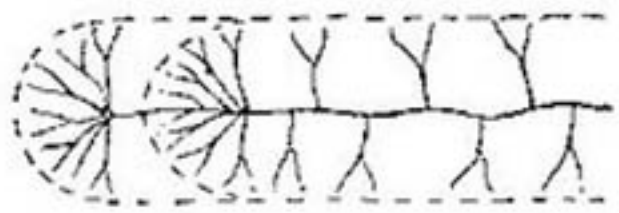


Рис. 242. Образование и развитие ложбины горного потока (план).

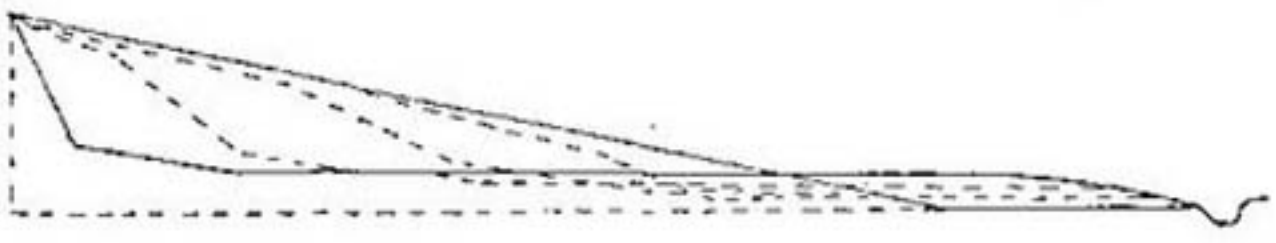


Рис. 243. Образование и развитие ложбины горного потока (продольный разрез).

падениях ложбины селевого потока скопившаяся масса продуктов разрушения горных пород нередко движется не только при сильных дождях и ливнях, но и в обыкновенное время в зависимости от обстоятельств, благоприятствующих насыщению ее водою, причем движение сели и в сем случае происходит периодически, иногда порывистыми толчками.

На месте выхода сели в широкую долину она расползается и расплывается веерообразно, образуя конусообразные насыпи, носящие название конических наносов или конусов выпыпок. В зависимости от силы селей и от их повторяемости, а также от рельефа поверхности долины, конические наносы покрывают долину

на более или менее значительной площади более или менее высоким слоем. Расширяясь в сторону реки, коническая насыпь достигает берега и входит в русло реки.

Как было уже упомянуто, описанные свойства горных потоков как селевых, так и бурных нередко отражаются весьма вредно на реках, в которые они впадают. Они вызывают в реке внезапные чрезвычайно сильные паводки, служат причиной наводнений, размывов берегов реки и проч. Селевые потоки влекут в реку огромные количества наносов, часто состоящих из крупных камней, засоряющих русло реки. Конусы высыпок в реку иногда внезапно загораживают реку, отклоняют ее течение, вызывают подпор воды в реке и заболачивают речную долину на вышележащем протяжении реки. На рисунке 244-м показана коническая высыпка из горного потока в альпийскую горную реку Эйсак; выносы из потока отодвинули русло реки и засыпали железную дорогу и шоссе, расположенные на правом берегу реки.

Размывы русла горных потоков, образование и движение селей нередко служат причиною бедствий населения. При обрушении склонов горных лощин погибают возделываемые земли, строения и проч. Сели при своем движении способны производить огромные разрушения, снося постройки, дороги, мосты и проч. Под конусами высыпок селевых потоков иногда погибают плодородные земли горной долины и даже целые селения. Особенно частые и сильные бедствия приносили такие потоки в населенных местностях Альп, где целый ряд катастроф, вызванных мурами в восьмидесятых годах прошлого века в Южном Тироле, в Каранти и в области Венецианских Альп, сопровождавшихся гибелью многих людей и больших убытков, побудил предпринять разнообразные технические меры для борьбы с такими грозными явлениями.

У нас на Кавказе, в Туркестане и в других горных областях сели достигали размеров грозного бедствия реже, чем муры в Альпах. Но не менее пагубные последствия, помимо прямых разрушений, оказывают у нас бурные потоки резкими колебаниями расхода воды в реках и постоянными изменениями в направлениях речных русел, что вредно отзывается на организации и производстве искусственного орошения земель, составляющего здесь основу сельского хозяйства. Медленная, но неуклонная работа селей, например, по южному склону Кавказского хребта и во многих местностях Туркестана, выражается опустошением культурных земель, превращением садов и полей в пространства, покрытые камнями или плотной грязью, и отклонением рек, причем происходит отложение гальки на полях и нарушение всей системы орошения. Многие бедствия приносили бурные и селевые потоки также нашим железным и обыкновенным дорогам в горных областях.

Ввиду таких обстоятельств борьба с вредными явлениями на горных потоках является нередко одним из необходимейших условий

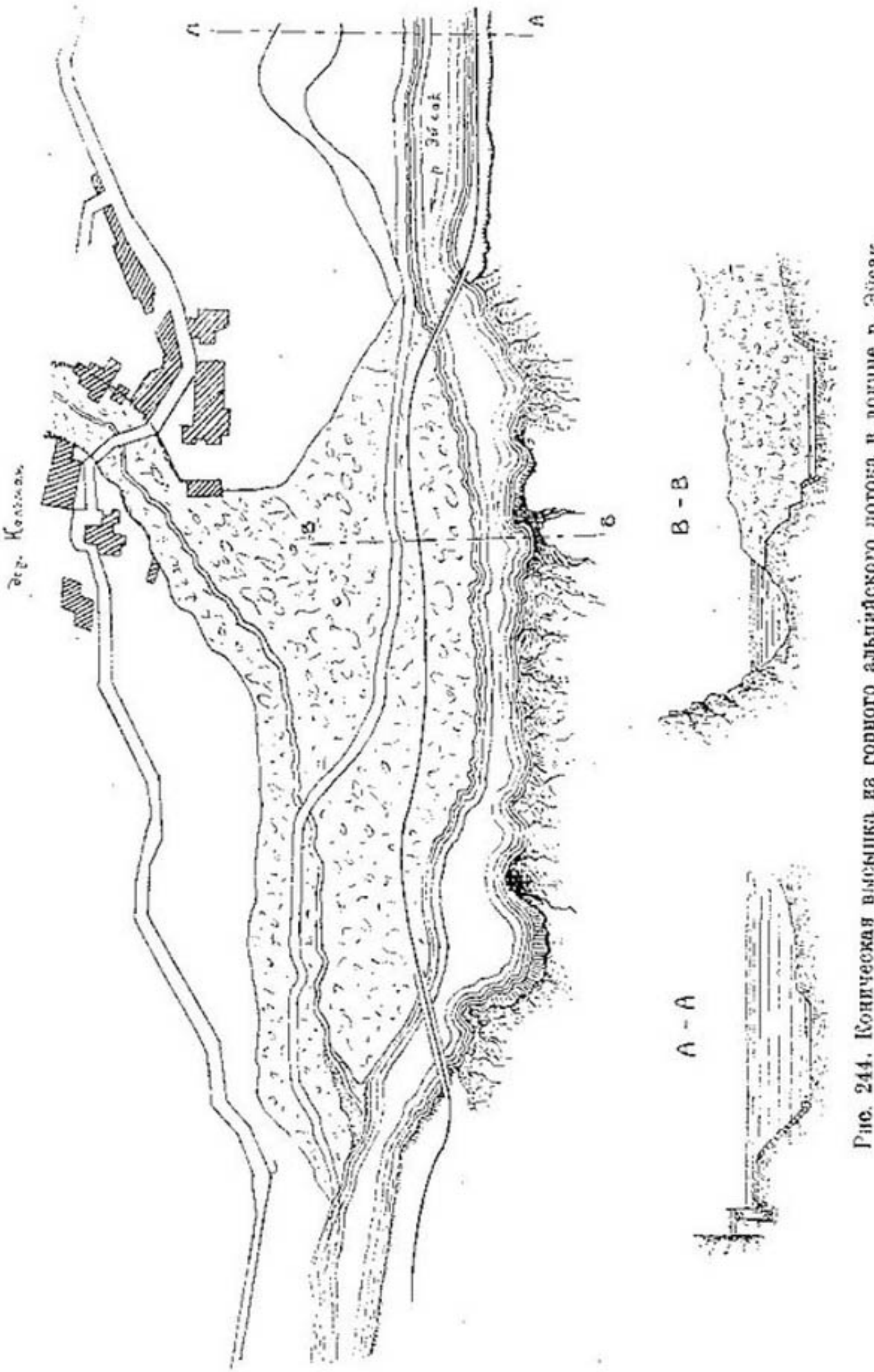


Рис. 244. Коническая вышка из горного аллювиального потока в долине р. Эйсак.

как для улучшения горных рек, так и для разных культурных начинаний в горной местности. Выбор способа борьбы должен быть основан прежде всего на тщательном изучении местности и причин вредных явлений. Сама борьба должна, нередко, заключаться в целом

ряде технических мер, распространенных по всему протяжению горного потока и строго между собою согласованных. Как видно из нижеприведеных описаний технических мер, они клонятся к искусственному улучшению быта горного потока, а потому могут быть, во всей своей совокупности, названы регулированием горного потока.

В каждом горном потоке можно различать три, по его длине, части (рис. 245):

1) Сборный бассейн („чашка") — верхняя воронкообразная часть потока, составляющая начало его. Он находится в районе наибольших разрушений горных пород, осыпей и обрушения скалистых склонов. В этой части горного потока скопляется главная масса стекающих вод и продуктов разрушения горы для дальнейшего движения их по потоку.

2) Канал („горло") — средняя часть горного потока, служащая как бы проточным каналом для выноса из верхней части воды и продуктов горных разрушений. Здесь происходит во время дождей стремительное течение воды и передвижение масс упомянутых продуктов. Разработка этой части горной лощины происходит не столько в глубину, сколько в ширину. Дно покрыто массой наносов; поток воды устремляется то к правому, то к левому склону, производит размывы подошвы склонов и тем самым вызывает обрушение крутых откосов. Такое же действие на откосы оказывает движение наносов, которые способны истирать в подошве откосов даже очень твердые породы. Таким образом, в средней части горного потока прибавляется к той массе наносов, которая следует из сборного бассейна, еще некоторое количество, полученное от разработки скал в средней части потока. В этой именно части и происходят те заторы и нагромождения селевых наносов, вызывающие подпор воды и толчкообразное передвижение селей, о которых уже упоминалось выше.

3) Высыпка—нижняя часть горного потока, составляющая его выход на широкую долину или в реку. Здесь движение тяжелых камней и глыб скалы, влекомых потоком, останавливается, более легкие части проносятся еще несколько далее и в стороны и, таким образом, образуется конус высыпки. Потоки воды при следующих ливнях прорывают на поверхности конуса новые русла, образующие как бы дельту горного потока. Илистые частицы, приносимые потоком из горных лугов и возделанных полей, обогащают поверхность конуса растительной почвой. Поэтому нередко встречаются такие культурные хозяйства и даже большие населенные пункты, которые обосновались на поверхности старых конусов высыпки. Их существование находится под угрозой образования новых высыпок, если разработка горного потока не прекратилась естественно или если не приняты соответствующие меры искусственного регулирования горного потока.

Надобность в регуляционных работах на горном потоке бывает либо только местная, либо более общего значения. В первом случае

она заключается, главным образом, в предохранении от вреда, который приносит поток непосредственно в районе местности, где он расположен. При этом сами работы должны быть исполнены в надлежащей полноте, чтобы избавить местность, прилегающую к потоку от разного рода вредных для нее явлений, вызываемых потоком. В других же случаях приходится прибегать к регуляционным работам на горных потоках для устранения или ослабления только тех явлений, которые находят себе вредное отражение в более отдаленных местах. Так, например, если к регулированию горного потока приходится прибегнуть с целью ослабить внезапные паводки на реке, происходящие от быстрого стока воды по горному потоку во время ливней в горах, или

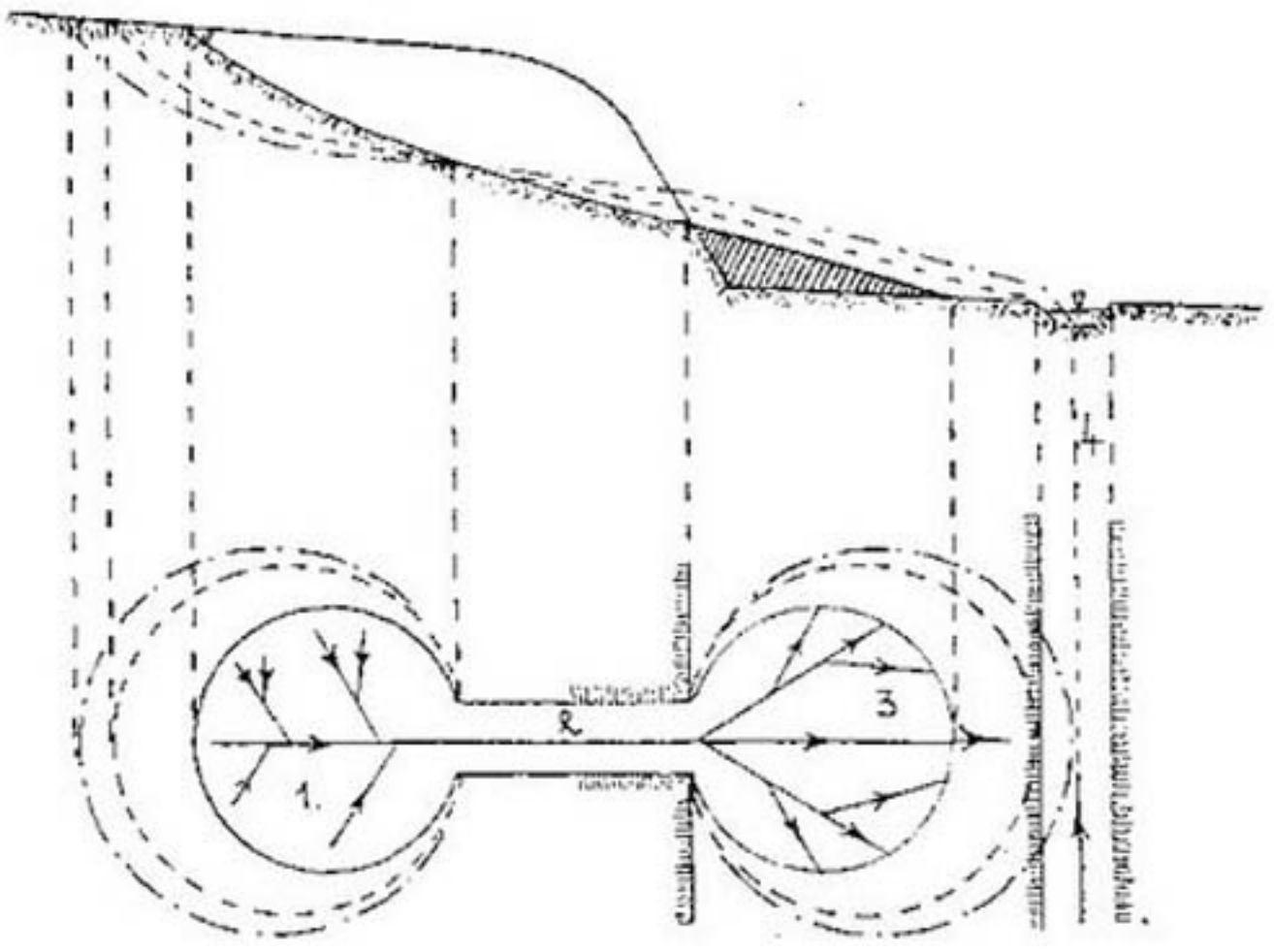


Рис. 245. Схема частей горного потока: 1) сборный бассейн, 2) канал, 3) высыпка.

уменьшить количество селевых выносов в реку или на долину, то задача регулирования горного потока может в подобных случаях состоять не столько в предохранении местности в районе самого потока, сколько в принятии таких мер, которые способствовали бы задержанию вод в потоке и более равномерному их стоку, или же к укреплению склонов ложбины потока только в некоторых местах, где их сползание в русло потока дает реке наибольшее количество наносов.

§ 36. Способы регулирования горных потоков.

Вышеописанные явления, характеризующие сток воды, образование и движение наносов в горном потоке, указывают, что целью регуляционных работ вообще является:

1) достижение более умеренного и насколько возможно равномерного стока дождевых вод в ложбину горного потока;

2) ослабление смыва в горный поток продуктов выветривания поверхности горных пород в местностях, имеющих скаты к ложбине потока;

3) предохранение крутых откосов от обрушения и сползания, в чем встречается надобность, главным образом, в верхнем районе горного потока (сборном бассейне), а иногда и на протяжении средней его части (горла);

4) уменьшение на среднем участке горного потока (в горле) крутых уклонов его русла, предохранение русла от размывов в глубину и от размывов подошвы его склонов;

5) образование на конусе высыпок устойчивого русла для стока вод, приносимых горным потоком.

Для целей, указанных в первых двух пунктах, наиболее действительным средством является разведение растительности: травы, кустарников и, в особенности, лесов. Нужно заметить, что сели редко встречаются в лесной зоне гор. Обыкновенно они бывают или в верхних безлесных зонах, к тому же часто совершенно обнаженных от какой-либо растительности, или же ниже лесной зоны даже в том случае, если здесь поверхность земли покрыта травой. Вследствие сего даже установилось два вида селевых потоков: „верхних", т. е. расположенных выше лесной зоны, и „нижних", — находящихся ниже этой зоны.

Растительность, в особенности густые леса с их почвой, испещренной многочисленными корнями деревьев и покрытой сущью и перегноем ветвей, хвои и листвы, поглощают и задерживают много влаги, препятствуют быстрому течению дождевых вод по наклонной поверхности земли и, что составляет самое главное достоинство растительности, она предохраняет почву на крутых скатах от смыва и от образования рытвин, служащих началом развития глубоких лощин и образования селевых наносов. Ощутительное действие лесов на задержание стекающих вод проявляется, главным образом, только при коротких ливнях, которые, однако, в горах бывают чаще, а также при таянии снегов, так как лес, защищая от действия солнечных лучей, несколько задерживает таяние снега. При длительных дождях задерживающее действие лесов мало заметно. Что же касается смыва стекающими водами частиц грунта с поверхности земли и образования рытвин, то в этом отношении предохраняющее влияние леса весьма значительно. Столь же полезное значение имеют густо растущие деревья на крутых откосах ложбины горного потока. Поэтому искусственное разведение в горах лесов и других видов растительности полезно как для умерения опасных явлений при бурных и селевых потоках, так и в отношении предохранения от дальнейшего развития таких потоков на склонах гор.

К числу мер, принимаемых для задержания ливневых вод на крутых склонах горных ложбин относится также устройство ярусных канав. На рисунке 246-м показано в плане и в профиле устройство этих канав. Канавы делаются небольшой длины и горизонтальными, чтобы собирающаяся в них дождевая вода не развивала больших скоростей течения в канаве. В поперечном сечении канава имеет в глубину и ширину тоже небольшие размеры. Канавы служат для того, чтобы собрать в них такое количество ливневой воды, которое предполагается задержать на склонах. Задержанная в канавах вода, оставаясь в них по миновании дождя, постепенно частью испаряется в воздух, частью просачивается в грунт. В соответствии с сим и принимая в расчет уклон местности, а также силу дождя, определяется

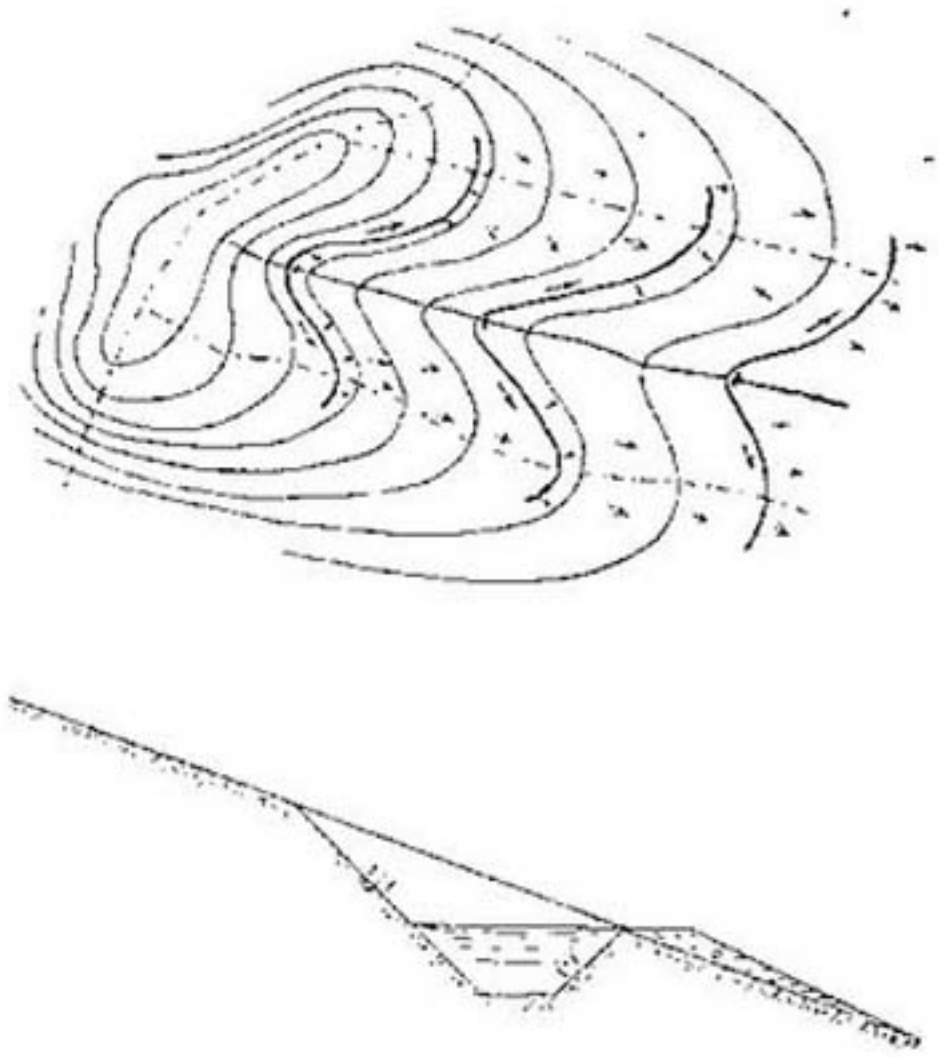


Рис. 246. Ярусные канавы.

расстояние между канавами (рис. 247), их поперечные профиля и их протяженпе. Само собою разумеется, что применение такого способа целесообразно лишь в том случае, когда бассейн, питающий горный поток ливневыми водами, сравнительно невелик и находится невдалеке от потока. Кроме вырытия ярусных канав, служащих для умерения стока ливневых вод в горный поток, необходимо принять меры и по регулированию русла потока в нижележащей его части. Нужно заметить, что ярусные канавы, подобные вышеописанным, нередко применяются для облегчения разведения лесов в тех горных местностях, где требуется увлажнение почвы; в таких случаях они имеют косвенно полезное значение и для регулирования горных потоков.

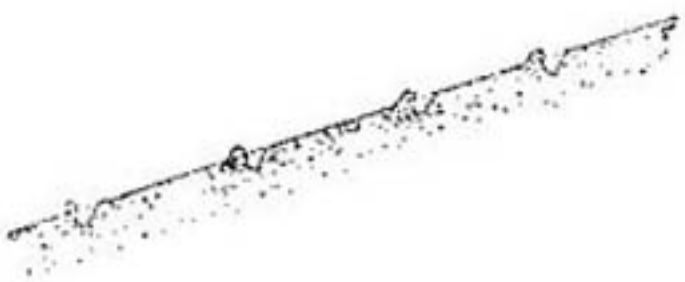


Рис. 247.

Устройство ярусных канав применялось в южной Тюренгии, в Пфальцграфстве в бассейне горной речки Гиммельдин около Нейштадта, во Франции в связи с работами Полонсо по предохранению от наводнений, и в некоторых других местностях. У нас в Туркестане был сделан опыт применения подобного способа инж. Раунером. Он применил для регулирования одного потока в Туркестане систему

горизонтальных канав по склонам в области питания, поставивши себе задачей разбить количество тающей или выпадающей в виде дождя воды на отдельные части, причем результаты опыта получились благоприятные. Необходимо, однако, заметить, что применение ярусных канав для регулирования селевых потоков требует большой осторожности. Искусственное впитывание масс воды в почву вблизи места возможных обрушений и осыпей может, как показал опыт иностранных работ, ускорить и усилить эти обрушения, тогда как именно в этих местах требуется для укрепления сползающих или обрушающихся откосов не увлажнение почвы, а, наоборот, удаление воды из почвы во всех случаях, когда грунтовые воды могут нарушить равновесие грунта на откосе.

В сборном бассейне задача сводится к укреплению страдающих откосов воронки. Вполне обеспечить устойчивое состояние этих откосов можно, однако, только в том случае, если путем регулирования средней части (горла) потока будут устранены размывы русла в месте выхода из воронки в канал. В противном случае размывы распространяются вверх в пределы воронки, где подмывается подошва крутых откосов последней. Способ укрепительных работ на откосах воронки зависит от причин, вызывающих их осыпи и обрушения. Чаще всего они происходят под влиянием грунтовых вод. Если грунт более или менее рыхлый и равновесие на откосах нарушается вследствие насыщения грунта водою, то единственным средством является отвод воды дренажем, причем дренаж должен быть доведен до глубины залегания водонепроницаемого грунта. Если последний залегает так глубоко, что заложить на нем дрены невозможно, а таковые приходится располагать в рыхлом грунте, то нужно иметь в виду, что жесткие дренажные трубы (керамиковые, бетонные, деревянные и пр.), равно как и дрены, состоящие из камней, легко расстраиваются при сдвигах и осадке рыхлого грунта. В практике работ на горных потоках в Баварии наиболее удачное применение при таких условиях нашли себе упругие жердяные дрены (рис. 248), которые закладывались на глубину 1 — 1,5 *м*. Дрена состоит из четырех деревянных жердей, расставленных друг от друга помощью коротких крестообразно расположенных колышков и обернутых снаружи слоем хвороста. Если причиной обвалов на откосах служат трещины в твердых скалистых породах, постепенно увеличивающиеся от замерзания попадающей в них воды, то и в этом случае лучшим средством укрепления откосов будут меры, принятые для устранения застоев воды в трещинах, т. е. расчистка и дренаж трещин. В случае же

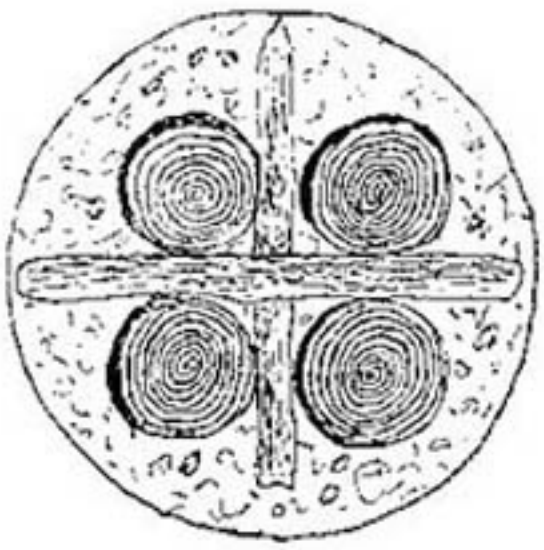


Рис. 248. Жердяные дрены (разрез).

затруднительности дренажа нужно стремиться отвести от трещиноватого места воду, стекающую по поверхности, направивши ее по деревянным лоткам. Если осыпи сухого рыхлого грунта происходят по причине слишком большой крутизны откоса воронки, то лучшим средством укрепления откоса служит засадка откоса живой растительностью, если это возможно; в противном случае прибегают, в качестве палнатива, для удержания от сползания поверхностных слоев, к устройству на откосах низких горизонтальных идущих по откосу плетней в несколько ярусов по высоте откоса. Для устройства плетней забивают колья толщиною 6—10 *см.*, длиною 1—2 *м.* на такую глубину, чтобы их концы возвышались над поверхностью земли не более, как на 0,5 *м.* Колья расставляют на 0,5 — 1,0 *м.* друг от друга и заплетают лозой, способной прорастать. Плетение кольев иногда заменяют укладкой вдоль кольев с нагорной стороны фашин. Плетни по склону расставляют через 1—2 *м.* Тоже хорошим средством в таких случаях является обделка откосов террасами, что, однако, не всегда возможно и сопряжено с большими земляными работами.

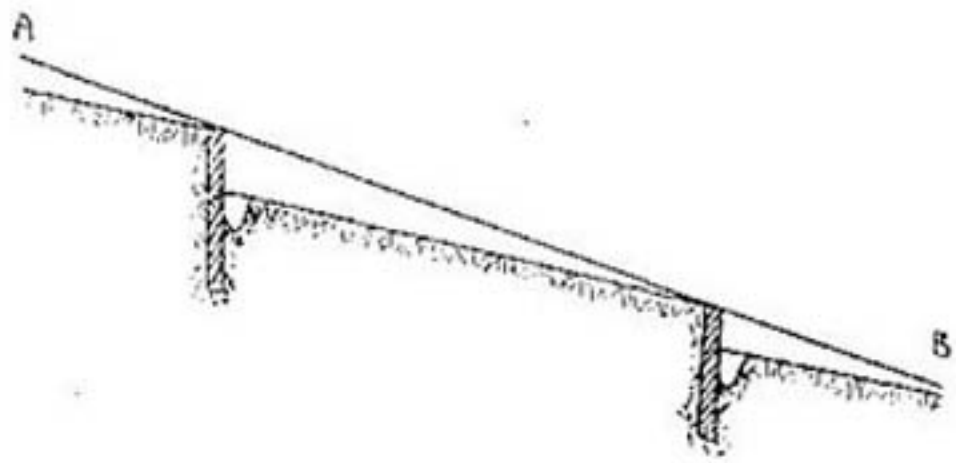


Рис. 249. Порог.

В средней части горного потока, в его горле, задачей регуляционных работ является обеспечение устойчивого русла, притом такого, которое смягчало бы стремительное течение воды и движение селей. По характеру своему эти работы могут быть названы выправительными. Естественная разработка русла на этом протяжении горного потока заключается в том, что в верхней своей части оно размывается в глубину, а в нижней части продукты размыва откладываются, наращивая дно русла. При этом в верхней части образуются глубокие рытвины по средине ширины русла, а в нижней части размывы происходят чаще у подошвы откосов, в особенности у вогнутых берегов русла, где размывающее действие течения обладает большей силой. В том и другом случаях наиболее действительным средством для предотвращения размывов русла и регулирования течения воды и движения селей является обращение круто спускающегося русла в ступенчатый вид. Это достигается устройством в русле потока поперечных заграждений в виде порогов и запруд. Порогом называется заградительная стенка, опущенная в грунт русла на всю свою высоту (рис. 249). Запрудой называем стенку, несколько возвышающуюся над дном (рис. 250). Для той же цели иногда прибегают к устройству водоудержательных плотин, заграждающих ложбину потока на большую высоту и образующих в вышележащей части глубокие и широкие водоемы.

Влияние порогов и запруд показано на рисунках. Запруды (рис. 250) подпирают текущую воду, которая переливается через гребень стенки; влекомые наносы задерживаются стенкой, заполняя промежуток между соседними запрудами. Влияние порогов (рис. 249) выражается в том, что более легкие частицы грунта русла вымываются и уносятся течением, крупные же частицы и камни остаются между порогами. Поэтому запруды применяются преимущественно в тех случаях, когда требуется наращивание русла в высоту. В результате действия как запруд, так и порогов, крутой уклон дна русла AB (рис. 249) обращается в ступенчатый с более пологими уклонами дна в промежутках между заградительными стенками. В обоих случаях требуются прочные заградительные стенки, достаточно опущенные в дно русла. Пороги являются менее дорогими устройствами и они менее подвержены повреждениям, чем запруды. Запруды необходимо поднимать на такую высоту, чтобы наносный слой достигал вышележащей запруды и покрывал ее подошву. Переливающаяся через стенку вода как в запрудах, так и в порогах стремится размыть грунт у подошвы стенки, но размывы у запруды происходят сильнее, чем у порога, так как у первой грунт наносный, а у второй естественный и состоящий из более крупных частиц, оставшихся после выноса течением мелких частиц. Поэтому стенки запруд должны быть вообще и выше, и прочнее. При одинаковой же высоте стенки пороги могут быть расположены на большем расстоянии друг от друга, чем запруды. Обращение, помощью запруд или порогов, русла горного потока в ступенчатый вид оказывает выгодное влияние на движение масс воды и наносов. Пологий уклон дна между заградительными стенками умеряет скорость течения воды и движения сели. С возвышением дна между запрудами дно русла увеличивается в ширину, поэтому глубина текущей воды уменьшается, что еще более способствует уменьшению скоростей течения. Уменьшение же скоростей течения воды благоприятно в смысле достижения более устойчивого состояния русла потока. Движение селевых наносов не прекращается; они идут через пороги и запруды, но их движение по более пологому руслу теряет прежний стремительный лавинообразный характер. Прекращение разработки в глубину русла горного потока, равно как уменьшение скорости течения воды в нем благоприятно отражается и на устойчивости откосов воронки в сборном бассейне горного потока, так как приостанавливается разработка воронки в глубину. Тем самым уменьшается количество селевых выносов. Установление целесообразной высоты и глубины заложения

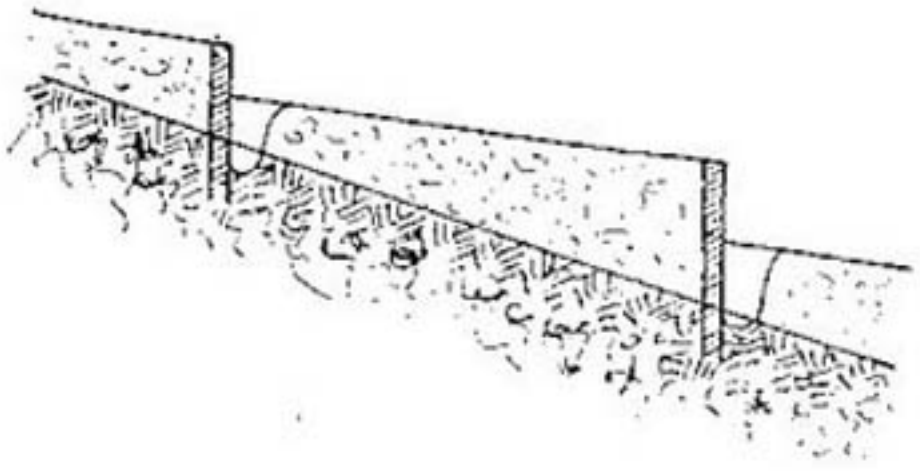


Рис. 250. Запруда.

стенок запруд или порогов и расстояния между стенками, а следовательно проектного уклона в регулированном русле, зависит от местных условий. В этом отношении следует руководствоваться примерами таких участков данного горного потока или соседних сходных с ним потоков, которые сохраняют благоприятные качества русла в естественном своем состоянии. Чем выше запруды, тем при одинаковом уклоне могут быть они дальше расставлены друг от друга; следовательно, к решению вопроса надо подходить и с экономической его стороны.

Если в русле горного потока происходят глубокие размывы вдоль подошвы откоса ложбины (рис. 251—*a* и *b*), то для предохранения откоса от обрушения прибегают к устройству продольной наклонной примкнутой к откосу и прочно с ним скрепленной стенки (на рисунке она показана

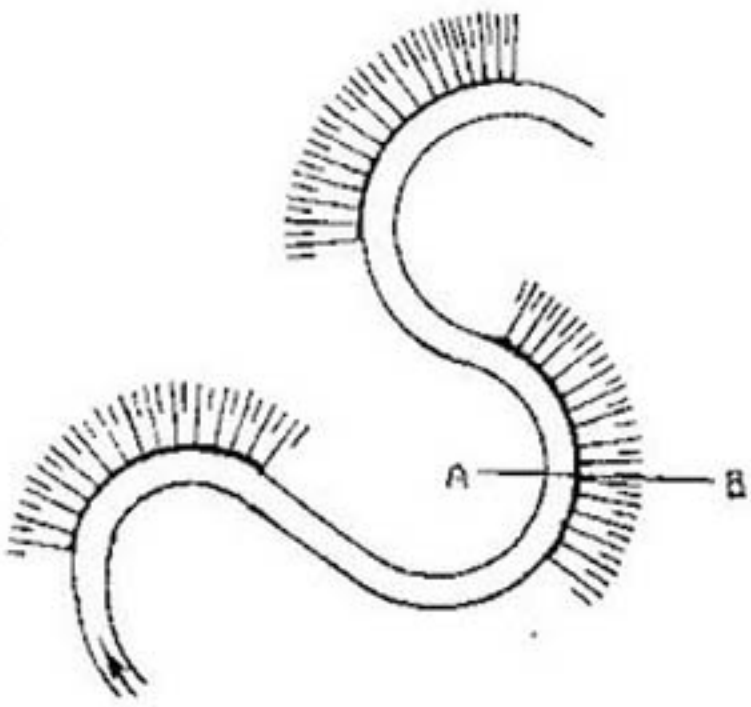


Рис. 251-*a*. Укрепление откосов ложбины потока (план).

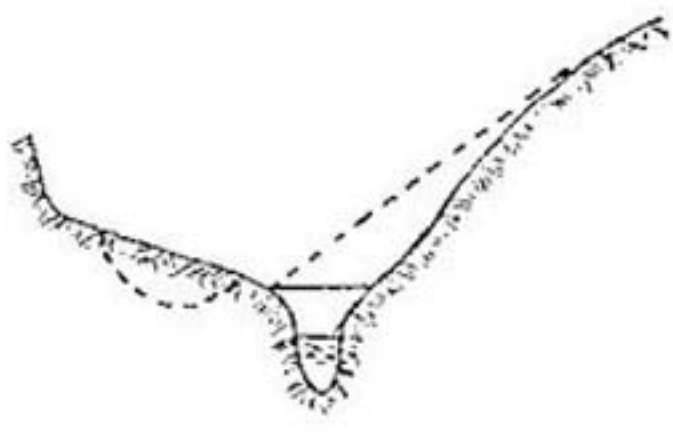


Рис. 251-*b*. Укрепление откосов ложбины потока (поперечный разрез).

пунктиром), заполняющей в своем основании образовавшуюся рытвину на всю глубину последней. Целью устройства такой стенки является отклонение потока от подмытого откоса с тем, чтобы заставить поток разрабатывать свое русло по середине дна ложбины. Такие стенки делаются или непрерывными вдоль всей размываемой части русла, или же с перерывами в виде контрфорсов. Нужно заметить, что при устройстве запруд и порогов весьма важно принять меры к тому, чтобы поток не обошел поперечное заграждение сбоку его, размывши откос русла в месте сопряжения с ним упомянутого заграждения. Поэтому концы порога или запруды требуется углублять в откос. При ненадежности такого сопряжения поперечную заградительную стенку порога или запруды снабжают с обоих концов крыльями в виде продольных берегоукрепительных стенок (рис. 252).

Регулирующее действие на горный поток оказывают устроенные в ложбине потока водоудержательные плотины. Под этим названием разумеются высокие плотины, образующие в ложбине глу-

бокие большие водоемы. Их влияние на горный поток в значительной степени разнится от запруд и порогов. Большая емкость водоема перед плотиной позволяет во время ливней скоплять весьма значительный об'ем стекающей воды: избыток воды проходит на водосливах плотины или через сделанные в ней специальные отверстия. Поэтому, если на горном потоке имеется водоудержательная плотина, а в особенности если их имеется несколько, расставленных на достаточном расстоянии друг от друга, так что они образуют как бы цепь больших прудов, то задержание ливневых вод происходит в значительных количествах, чем достигается более полное регулирование стока воды по горному потоку. Водоудержательная плотина вовсе преграждает путь для движения наносов. Ее действие на селевой горный поток заключается в следующем. Во время сильных дождей вода, наполнивши до верха водоем, имеет в пределах водоема сравнительно слабое течение, поэтому размывов русла потока на протяжении, занятом водоемом, не происходит; наносы, поступившие извне, осаждаются на дно водоема в верхнем его конце и медленно подвигаются к плотине, где задерживаются, благодаря чему дно горного потока постепенно наращивается наносами. Последнее обстоятельство благоприятно отражается на сборном бассейне селевого потока, уменьшая обвалы откосов воронки. В конечном результате отложения наносов водоем может оказаться весь заполненным наносами до верха плотины, после чего плотина утрачивает свою прежнюю роль в смысле непосредственного задержания как наносов, так и воды. Но умеряющее действие плотины на движение масс воды и наносов продолжается, так как после заноса водоема дно ложбины принимает террасообразный вид с перепадом на плотине, а высоко поднятое дно приобретает кроме того большую ширину. То и другое обстоятельство сильно влияет на движение воды и новых наносов, значительно уменьшая их скорости. С целью увеличить об'ем водоема и сократить длину водоудержательной плотины, для ее устройства выбирают наиболее суженные места горного потока, выше которых имеются значительные расширения ложбины. Высокие водоудержательные плотины принадлежат к числу дорогих сооружений. Поэтому специально для улучшения селевых потоков они строятся редко. На горных потоках высокие водоудержательные плотины чаще применяются в связи с необходимостью устройства больших водохра-

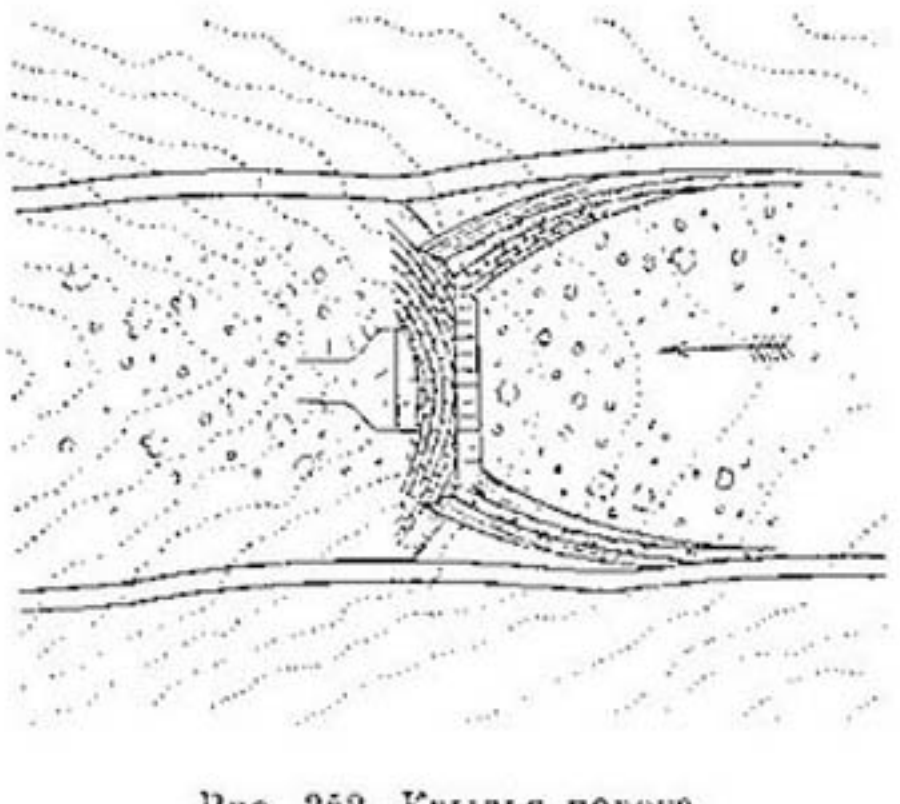


Рис. 252. Крылья порога.

нилищ, служащих для регулирования расхода воды в реках, в чем встречается надобность при устройстве гидравлических силовых установок, или как одно из средств для предохранения местностей от наводнений. О регулирующем действии водохранилищ на сток воды сказано далее в главе VIII-й.

§ 37. Типы и конструкции горных регуляционных сооружений.

Конструкция запруд и порогов на горных потоках зависит от местных условий и от наличности того или иного строительного материала. По роду материалов их можно разделить на каменные, деревянные и смешанной конструкции. Нужно заметить, что оказывая сопротивление стремительно движущимся массам воды и наносов упомянутые заграждения подвергаются большим усилиям и ударам. Поэтому они должны быть массивными и вместе с тем должны иметь надежную опору как на своем основании, так и в откосах русла, которое ими преграждается. Ввиду этого каменные конструкции запруд и порогов являются более надежными, чем деревянные. К последним прибегают в тех случаях, когда подходящего каменного материала недостаточно, а имеются деревянные материалы, или же когда по условиям течения воды и движения селей можно обойтись более легкими конструкциями.

Каменным запрудам и *порогам* придают в плане форму опрокинутого свода, пяты которого прочно заделаны в откосы ложбины. Каменная стенка делается из сухой кладки отборных более или менее крупных камней подходящей формы, или же из кладки на растворе—цементном или трассовом. Водопроницаемость сухой кладки в стенке запруды не имеет вредного значения, так как при стоке ливневых вод фильтрация стенки недостаточна, чтобы препятствовать образованию подпора воды на вышележащем участке потока и необходимому уменьшению скоростей течения. Наносы, задержанные стенкой запруды, вскоре образуют накопления с верховой стороны стенки, еще более удерживающие воду. Некоторая водопроницаемость стенки запруды даже полезна в том отношении, что способствует после прохода ливневых вод осушению разжиженных масс наносов, скопляющихся перед стенкой. Поэтому каменные стенки запруд делаются преимущественно из сухой кладки; кладку же на растворе применяют в тех случаях, когда нельзя располагать крупными камнями, необходимыми для прочной сухой кладки.

Сводчатая стенка запруды должна быть достаточной толщины, чтобы сопротивляться приходящемуся на нее усилию как от гидростатического давления воды, пока не сложились около стенки наносы, так и от распора последних после их образования.

Для сообщения стенке большей массивности ее делают обыкновенно одинаковой толщины по всей высоте.

Для устройства каменной запруды выбирают, по возможности, такое место, где берега и дно русла скалистые, или, по крайней мере, где имеются на месте крупные камни, причем следует выбирать места наиболее суженного русла, что желательно как в отношении прочности стенки, так и для уменьшения стоимости работ. Если берега не скалистые, то в них закладываются каменные контрфорсы для упора сводчатой стенки. При возведении стенки из сухой каменной кладки, необходимо соблюдать тщательную перевязку швов, причем с целью увеличения прочности гребня стенки, наиболее подверженного истиранию и сдвигу наносами, верхние слои кладки следует делать из наиболее крупных камней такой, по возможности, длины, чтобы клинья свода составляли по длине своей

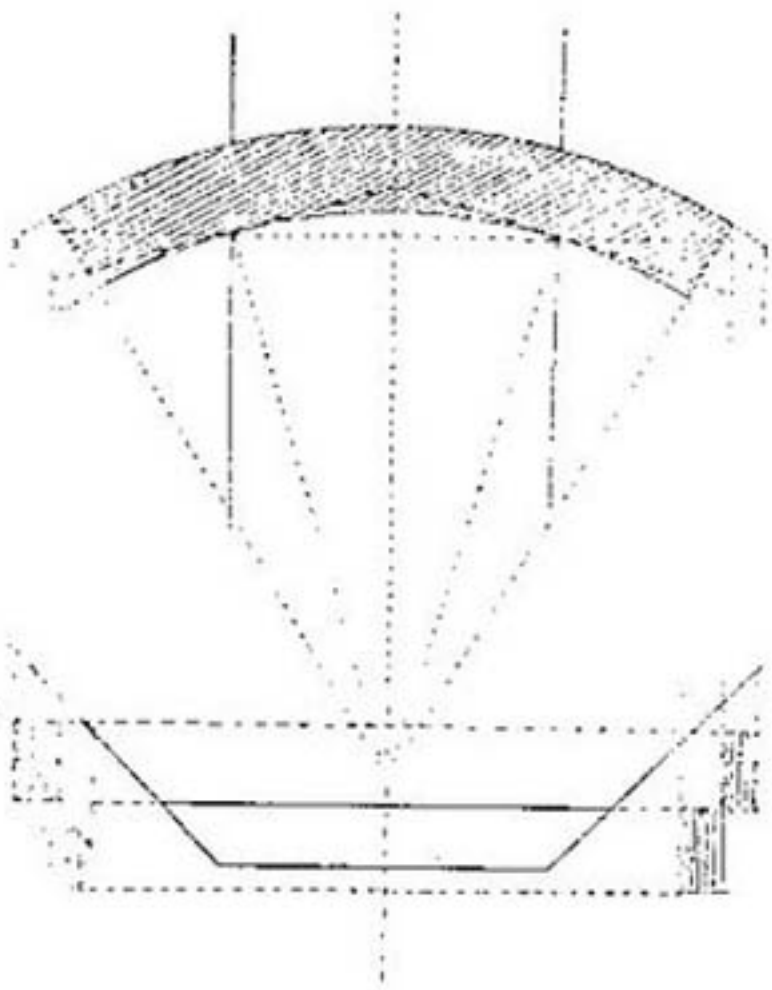


Рис. 253. Заделка в откос скалы пят каждого слоя каменной кладки сводчатого порога.

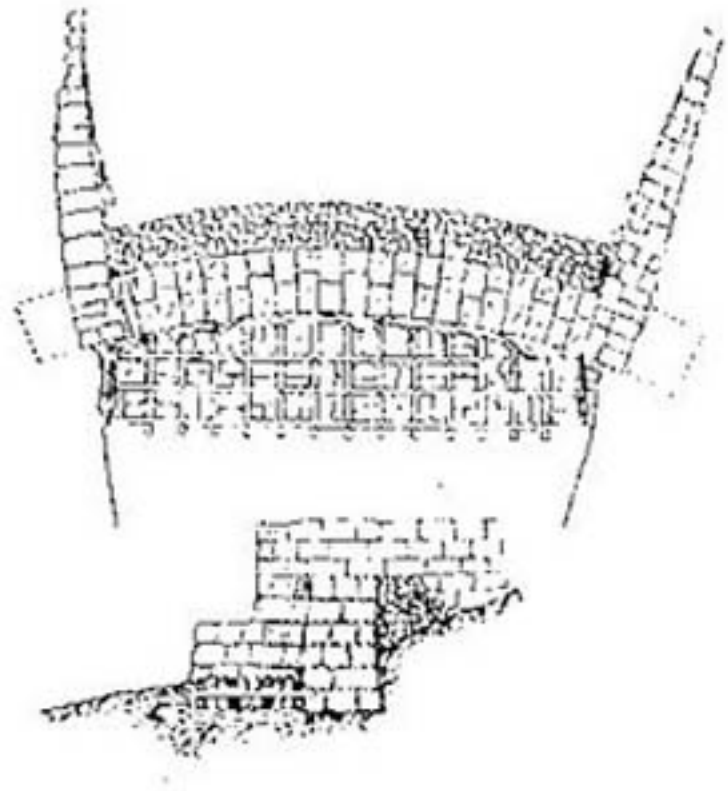


Рис. 254. Водобойный пол каменного порога, сделанный из выстилки крупного камня в жердяной клети.

полную толщину свода. Пяты сводчатой стенки должны непосредственно упираться в скалу откоса, что необходимо соблюдать и в тех случаях, когда стенка сопрягается с боковыми крыльями. Для упора сводчатой стенки в скалистый откос приходится в каждом вышележащем слое кладки давать несколько большую длину дуги, чтобы заделать пяту каждого слоя в скалу откоса, как показано на рисунке 253. Стенку запруды при первоначальном ее устройстве не следует делать на всю предполагаемую высоту, а, по возможности, возводить ее частями не более 1 метра в высоту, причем полезно при самом ее устройстве сделать с верховой ее стороны отсыпь из каменной наброски или из крупно-зернистой земли. Такая отсыпь предохраняет стенку от ударов при движении селей и отдельных

камней. В особенности важное значение имеет прочное укрепление дна русла и подошвы стенки с низовой ее стороны, где происходит падение воды, переливающейся через гребень стенки. Это укрепление, которое по аналогии с водопод'емными плотинами можно назвать

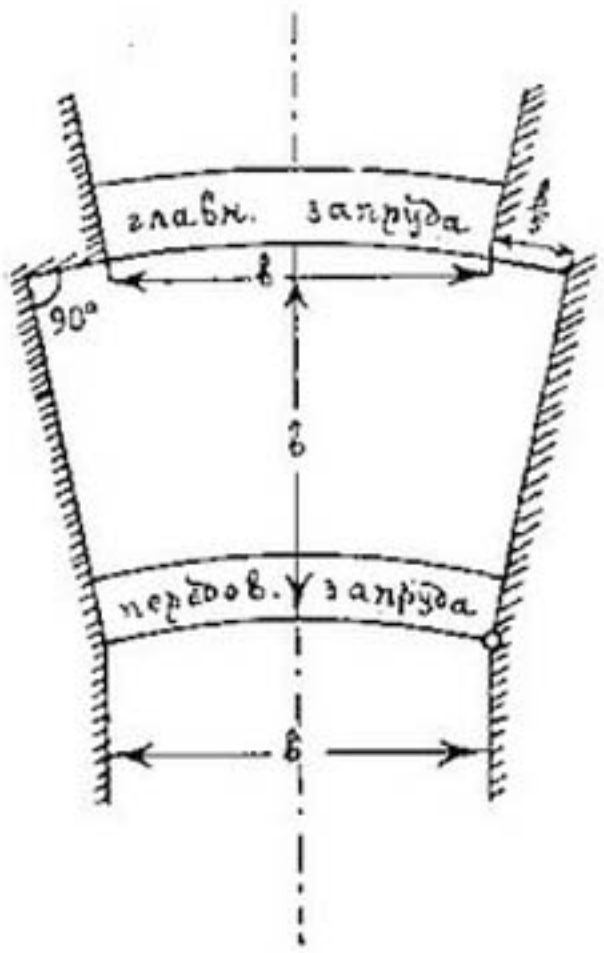


Рис. 255. Схема расположения передового порога запруды.

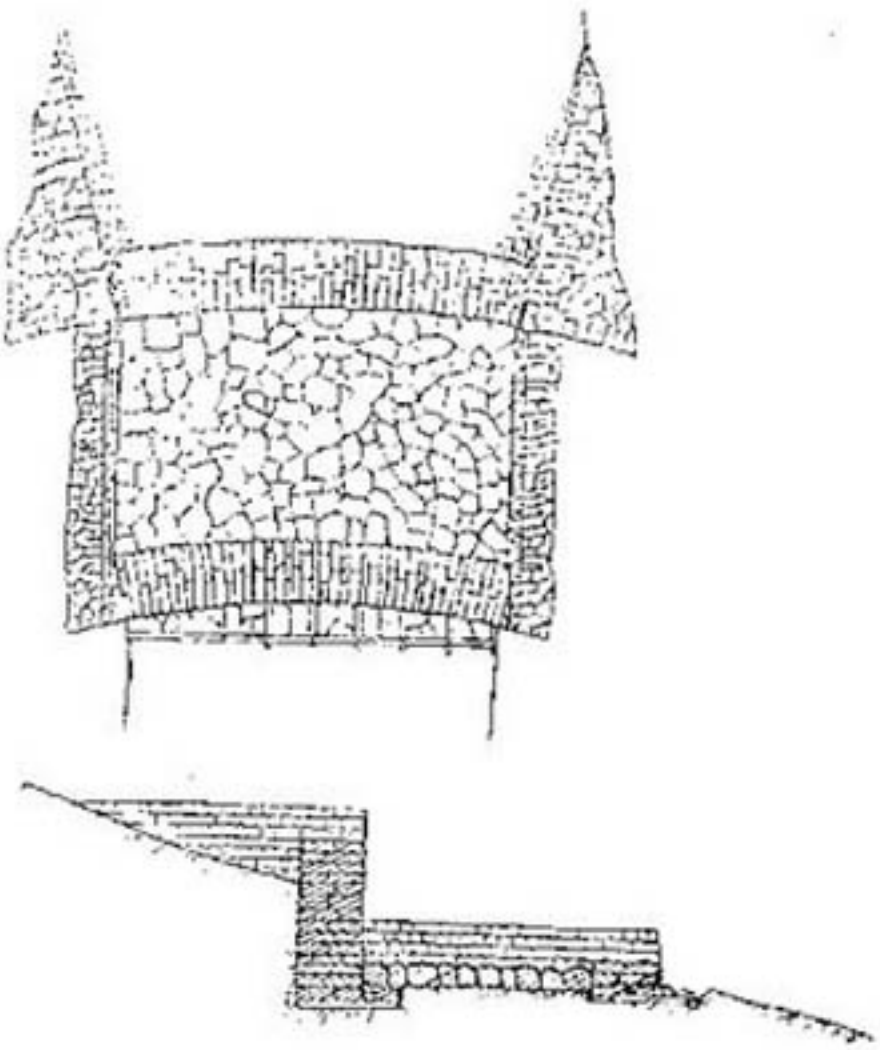


Рис. 256. Конструкция водобойного пола запруды с передовым порогом.

водобойным полом, обычно устраивается в виде выстилки крупными камнями. Чтобы такая выстилка не растраивалась и не отделялась от подошвы стены, в некоторых случаях применялось устройство клети из жердей или кругляков (рис. 254), причем под мостовую, для предохранения ее от просадок, кладется хворостяная постель; концы кругляков и хвороста закрепляются в стенку.

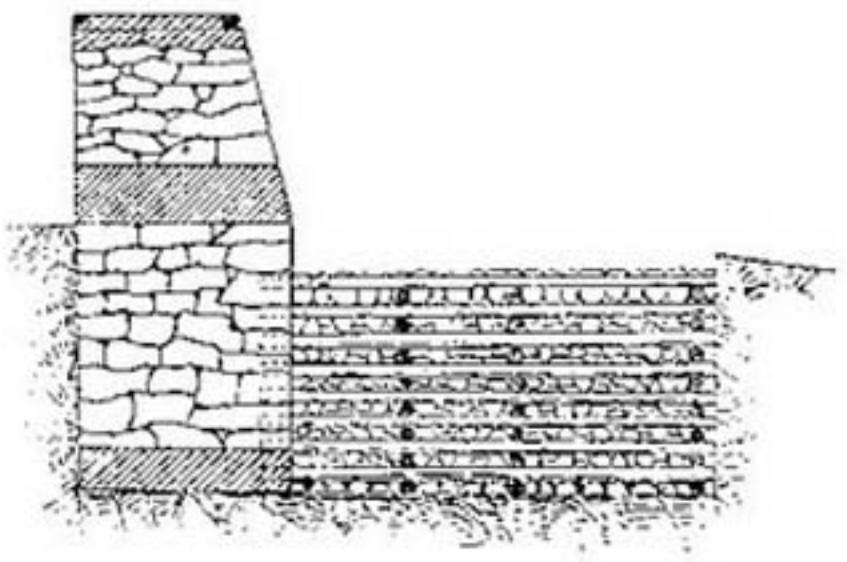
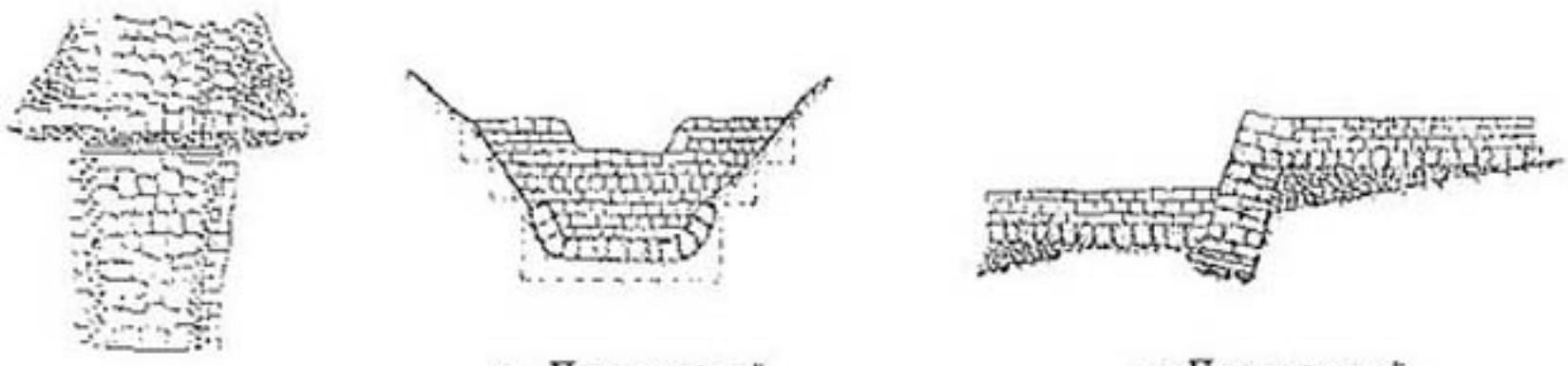


Рис. 257. Ряжевый водобойный пол запруды.

Более надежной конструкцией водобойного пола запруды является устройство с нижней его стороны, стенки каменного порога, отставленного на некоторое расстояние от подошвы стенки запруды, причем каменная выстилка ограждена со всех сторон. На рисунке 255-м показана схема взаимного расположения стенки и передового порога, а на чертеже 256-м конструкция устройства стенки водобойного пола запруды.

Если грунт русла недостаточно твердый, то нужно заложить основание как самой стенки, так и водобойного пола на значительную глубину. В этих случаях иногда применяли в Тироле смешанную конструкцию, показанную на рисунке 257-м; под каменную стенку и водобой роется котлован; водобоем служит заполненный камнем ряж, причем концы бревен ряжа запущены в каменную кладку стены для большей связи стены с водобоем.

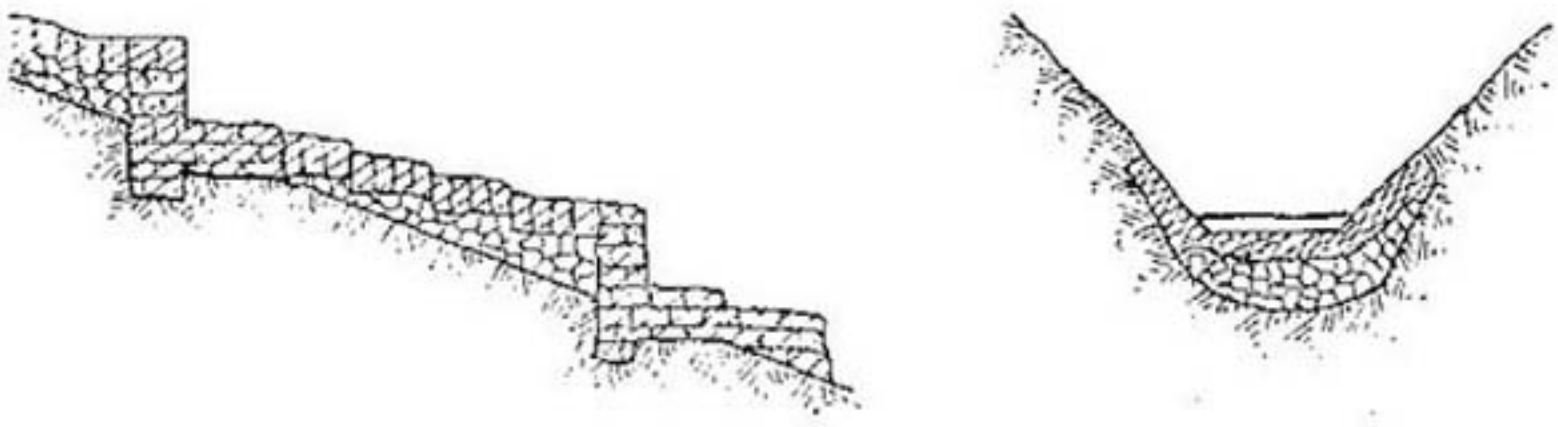
При очень крутом уклоне дна прибегают, во избежание слишком высокой стенки запруды, к устройству ступенчатой каменной обделки



b. План. *a*. Поперечный разрез. *c*. Продольный разрез.

Рис. 258. Ступенчатая обделка русла.

русла, подобно показанному на рисунках 258-*a*, *b*, *c*, и рис. 259. Общее падение распределяется на несколько перепадов, между которыми дно укреплено выстилкой крупных камней. Поверхность выстилки делается возможно шероховатого вида для оказания большего сопротивления течению с целью уменьшить его скорость. Иногда самую стенку запруды делают ступенчатой формы (рис. 260); такая форма сообщает стенке бо́льшую устойчивость, облегчает заделку пят сводчатых



a. Продольный разрез. *b*. Поперечный разрез.

Рис. 259. Ступенчатая обделка с шероховатой поверхностью.

слоев стенки в откосы русла, и, кроме того, ступенчатая поверхность умеряет удары падающей воды и частиц наносов и, таким образом, как бы заменяет собою водобойный пол.

Деревянные запруды, являясь простейшими и более дешевыми конструкциями, во многих случаях приносили существенную пользу. Как выше пояснено, роль запруд при регулировании горных потоков имеет временный характер: когда за стенкой запруды образовались

наносные отложения до ее верха и таким образом дно русла нарощено и обратилось в ступенчатый вид, тогда запруда уже исполнила свое назначение. Поэтому, если означенная цель может быть достигнута хотя бы и

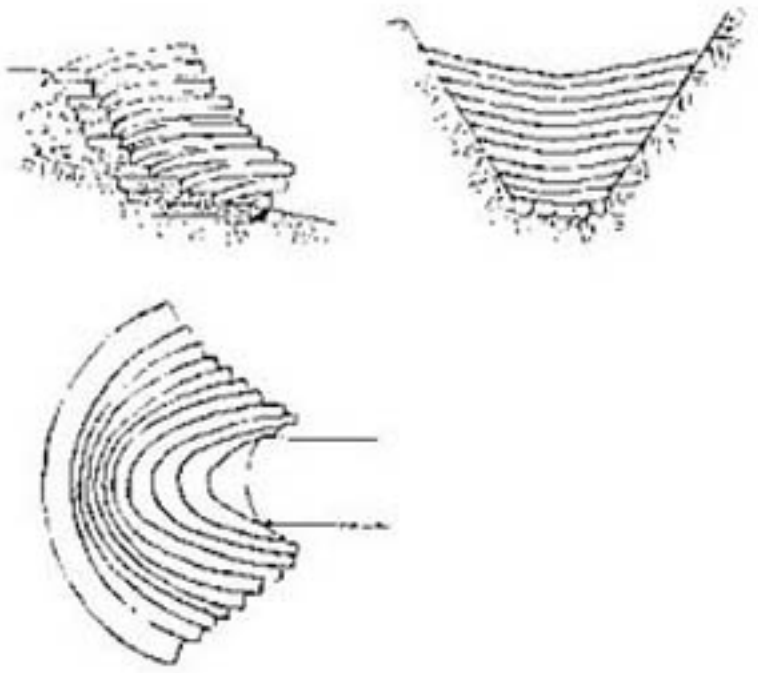


Рис. 260. Ступенчатая сводчатая стенка запруды.

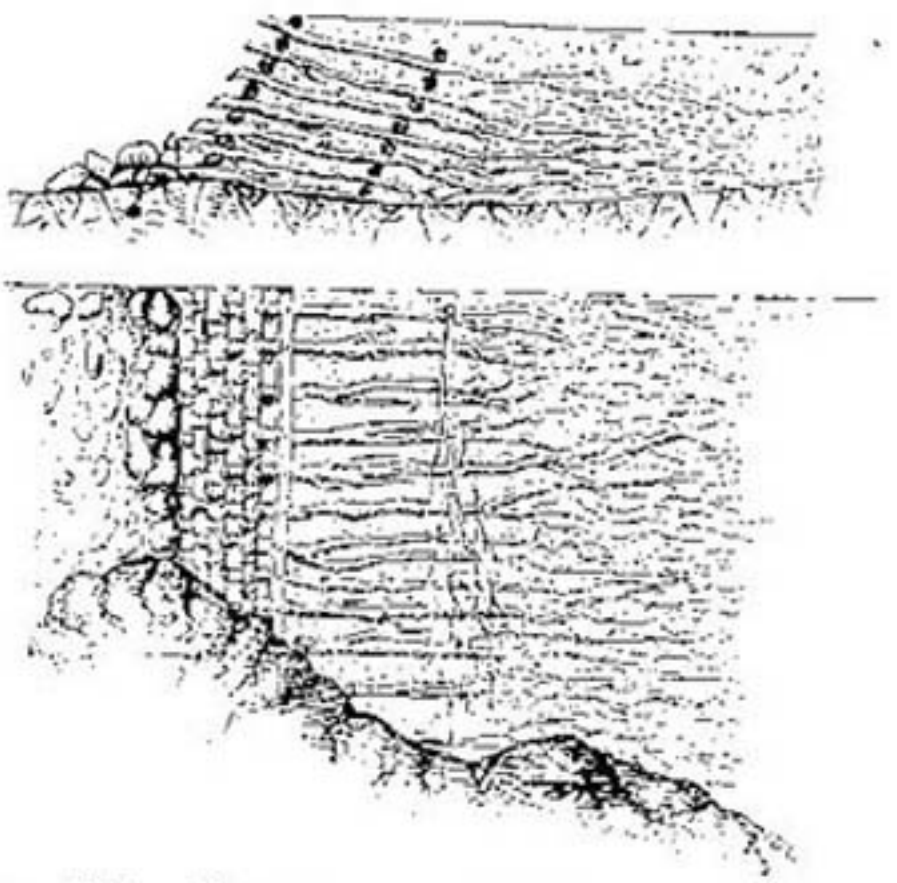


Рис. 261. Запруда из кладки древесных ветвей.

менее долговечной конструкцией запруды, то ее следует предпочесть по экономическим соображениям. В Тироле, в Баварии и в некоторых других горных местностях деревянные запруды горных потоков давно применялись и продолжают с успехом применяться в позднейшее время.

На рисунке 261-м показан способ устройства запруды из срубленных, но не очищенных от ветвей небольших деревьев. Способ этот был впервые применен Дюилем еще в начале XIX века. Как видно из чертежа, для образования запруды укладываются деревья с ветвями сплошными рядами вдоль русла так, что комли деревьев расположены в низовой стороне запруды. Предварительно дно расчищается от камней и неровностей. Под нижний сплошной ряд деревьев укладываются поперечины, концы которых заделываются в откосы (рис. 262). Засим все последующие продольные ряды деревьев также перекладываются поперечинами, заделанными в откосы, причем стволы деревьев скрепляются с поперечинами нагелями. Ветви деревьев несколько обрубают в нижней и верхней плоскостях ряда, чтобы получить более плотное тело запруды. Комли выступают на 30—50 *см.* за наружный ряд поперечин. В первое время после устройства такой запруды

Рис. 262. Заделка жердей (поперечин) в откосы.

текущая в потоке вода легко проникает через заграждение, но по мере его заполнения наносами все строение уплотняется и служит засим преградой для движения наносов, которые и наращивают дно потока.

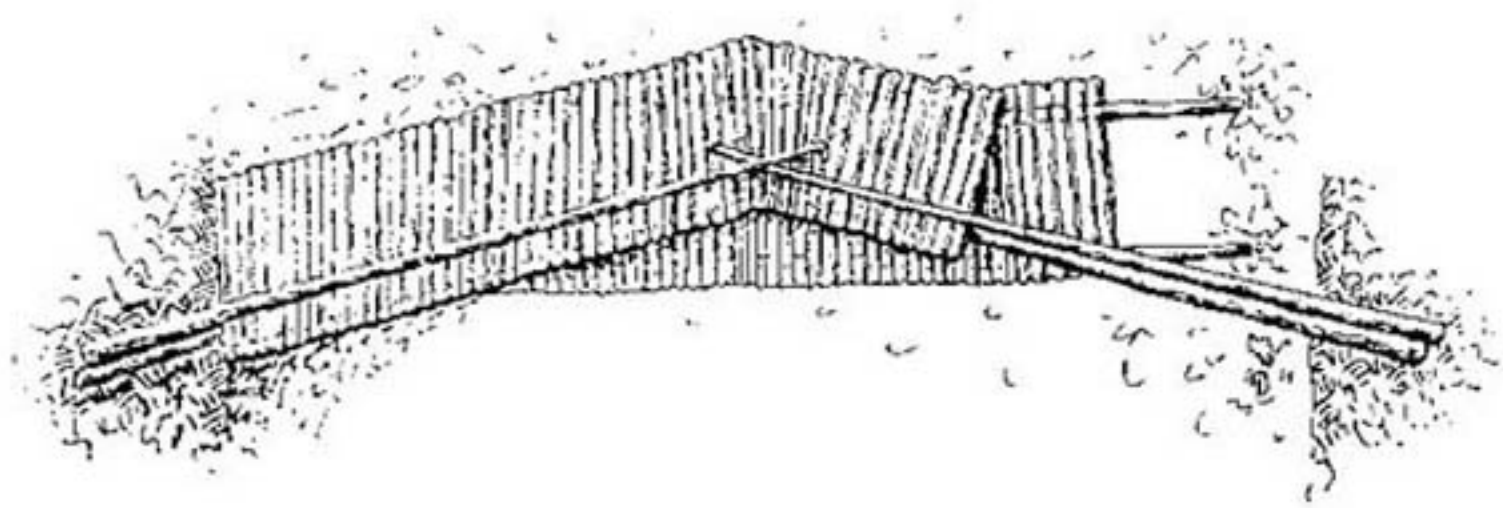


Рис. 263-*a*. План.

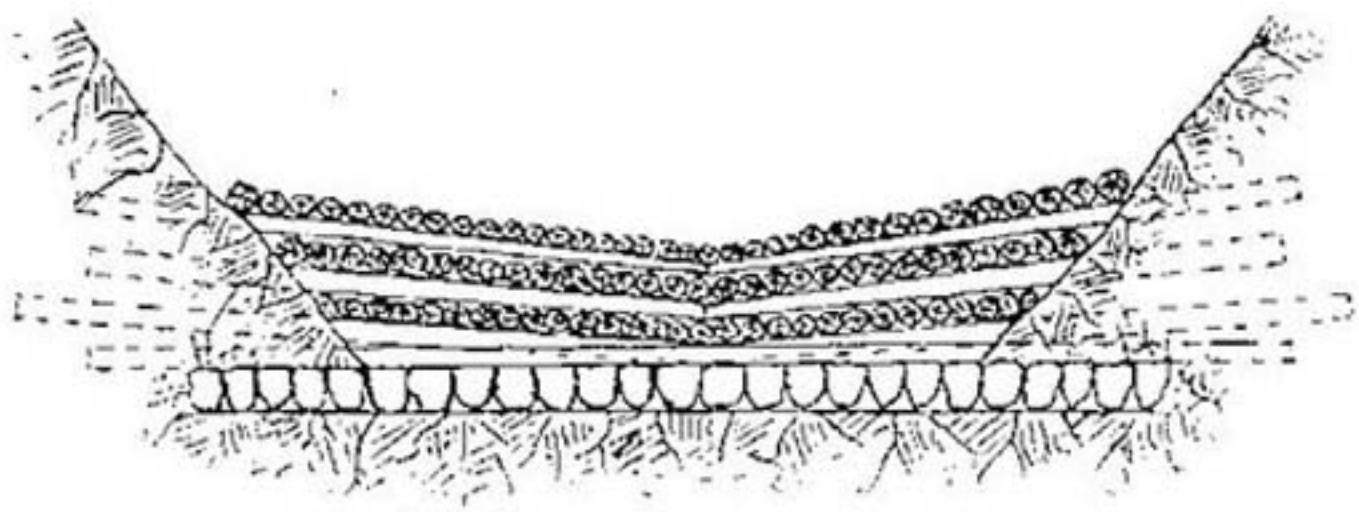


Рис. 263-*b*. Поперечный разрез.

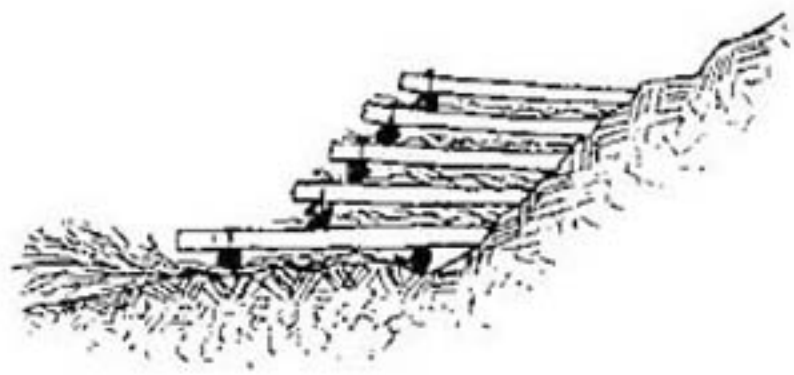


Рис. 263-*c*. Продольный разрез.

Рис. 263. Жердяные запруды.

На рисунках 263—*a*, *b* и *c* показана конструкция жердяных заграждений, часто применяющаяся в Тироле. Способ устройства этих запруд сходен с вышеописанным, но, вместо свежесрубленных деревьев с их ветвями, служат стволы нетолстых деревьев (кругляки или жерди). Каждая поперечина состоит из двух или трех стволов, скрепленных между собою болтами и шурупами и образующих как бы горизонтальную подкосную ферму. Концы бревен глубоко запущены в откосы. Такое устройство поперечин сообщает запруде большую сопротивляемость сдвигу при напоре воды и движущихся наносов. Тело запруды состоит

из нескольких ярусов продольных рядов коротких жердей, уложенных в каждом ярусе вплотную друг к другу на упомянутых поперечинах, разделяющих ярусы. Верхний сплошной ряд продольных жердей закрепляется длинными железными нагелями. Междуярусные промежутки заполняются древесными ветвями и засыпкой земли. Верхней поверхности запруды придают форму лотка, сосредоточивающего течение воды по середине, чтобы предохранить от размыва откосы русла. Такая форма достигается соответствующим подбором и расположением жердей, а именно в поперечинах жерди кладутся тонкими концами к середине, заделывая толстые их концы в откосы, а в продольных рядах жерди в каждом ярусе располагают более толстые по бокам и по мере приближения к середине подбирают все более и более тонкие стволы. Для предохранения дна русла от образования рытвин под действием воды, сливающейся с гребня запруды, устраивается с низовой стороны последней у подошвы водобойный настил, состоящий из выпущенного вперед нижнего яруса продольных жердей, под который подкладываются, кроме того, хворост и древесные ветви, смягчающие удары воды благодаря своей упругости. Иногда водобойный пол делается в виде каменной мостовой.

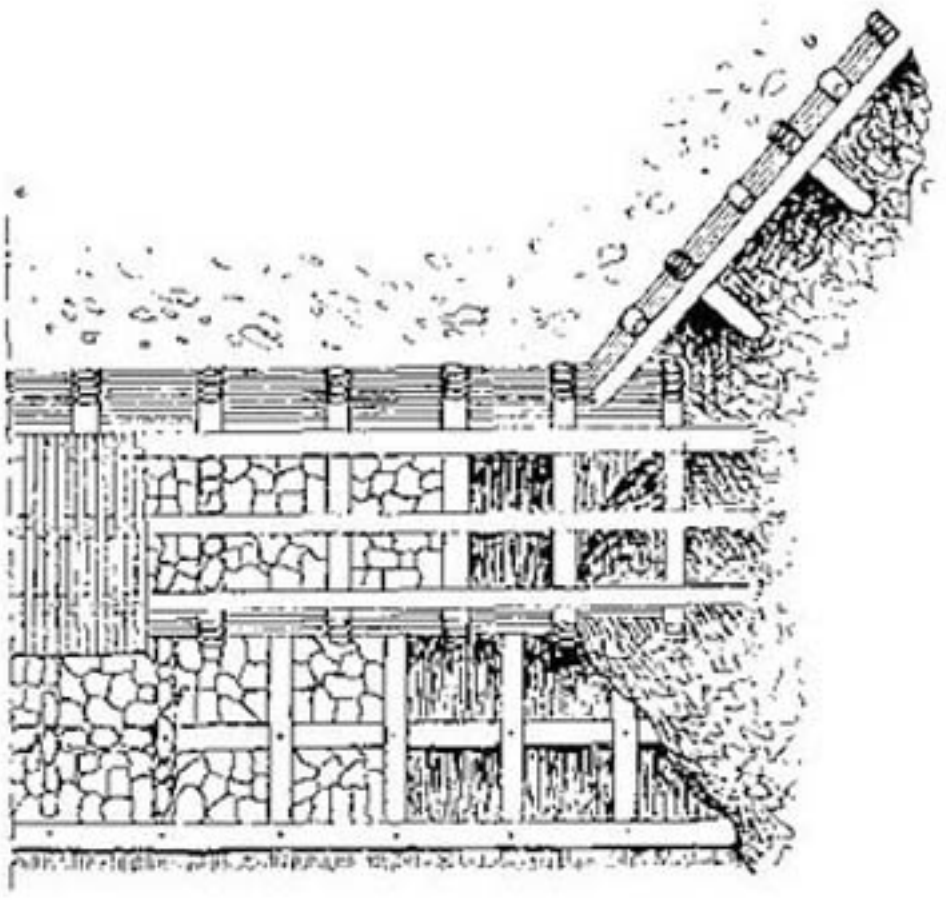


Рис. 264-*а*. План.

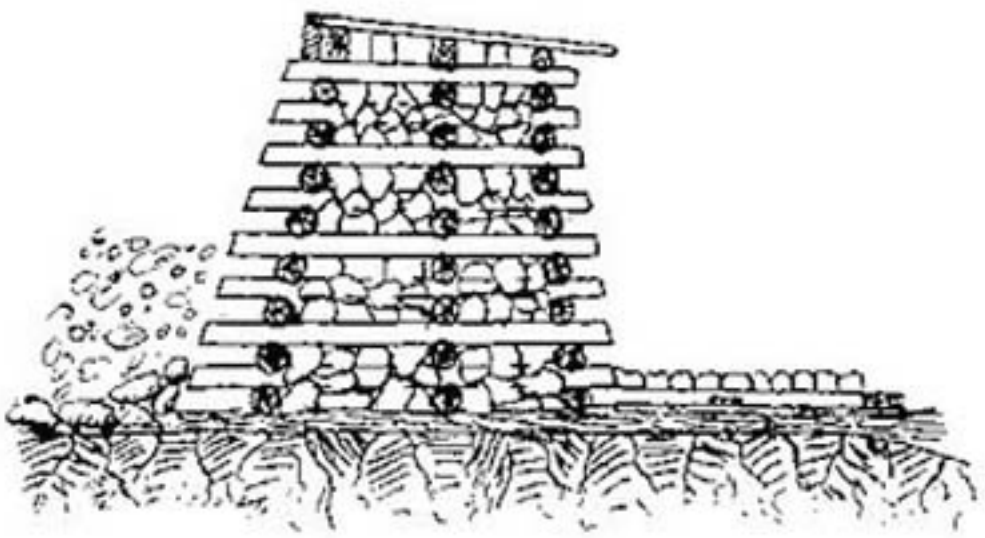


Рис. 264-*б*. Поперечный разрез.

Рис. 264. Деревянная запруда.

Деревянные запруды описанных типов строятся обыкновенно последовательно по длине русла сверху вниз. Расстояние между ними зависит от крутизны уклона русла; так, например, при уклоне русла в 1 : 10 они расставляются на расстоянии 15—16 *м*., между тем как при уклове в 2 : 3 приходится их сближать до 3—4 *м*.

Нередко применяются для запруд и порогов смешанные конструкции: камень с деревом. Для стенок запруд, возвышающихся более или менее над руслом, в этих случаях служат обыкновенно ряжп.

На рисунках 264—*a* и *b* изображен пример одной из ряжевых запруд. Для удешевления постройки ряжевый сруб делается с просветами между бревнами. По заполнении ряжа камнем он поверху покрывается плотным досчатым настилом. Важнейшим условием является предохранение запруды от размыва с боков и под ряжем, а также

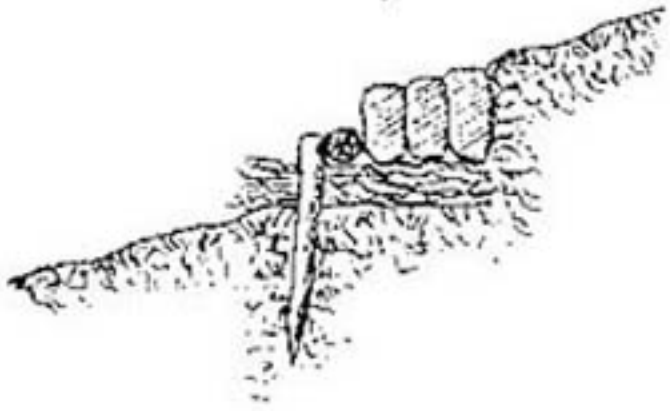


Рис. 265-*a*.

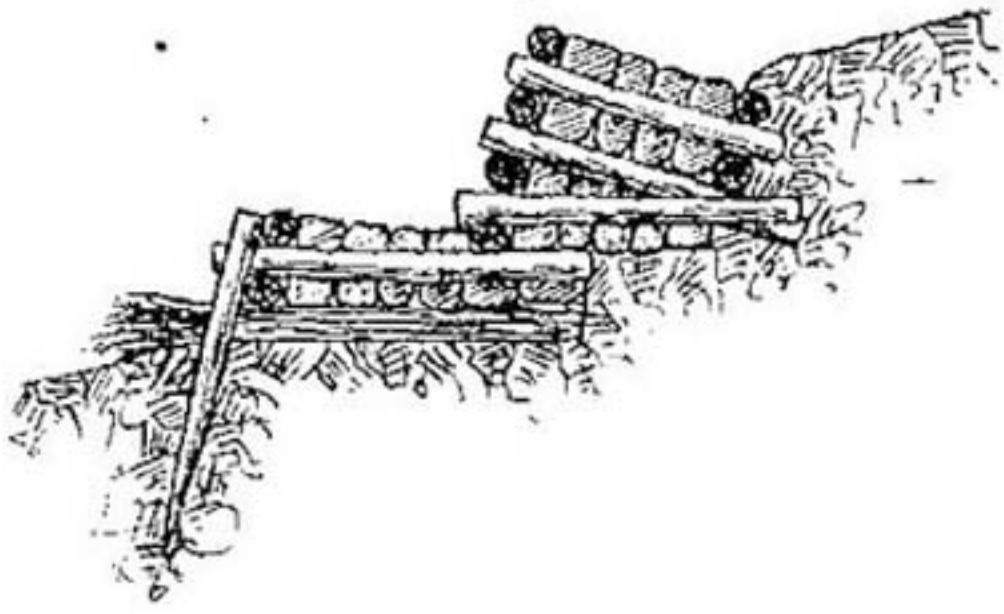


Рис. 265-*c*

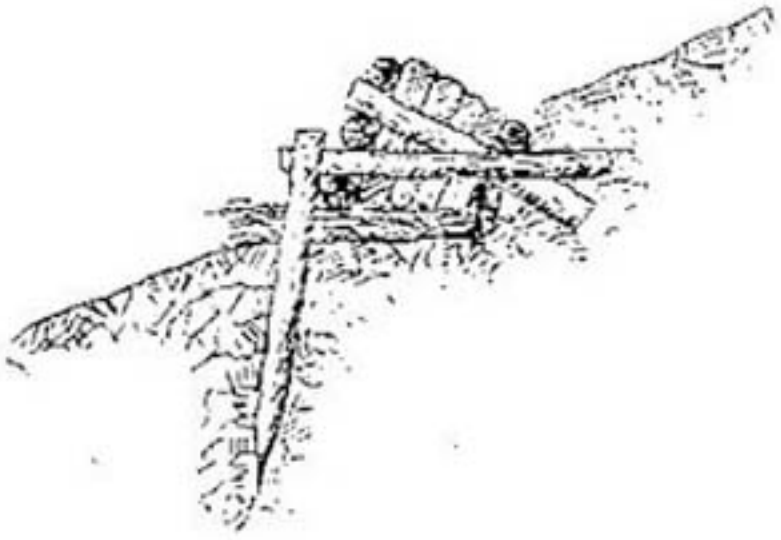


Рис. 265-*b*.

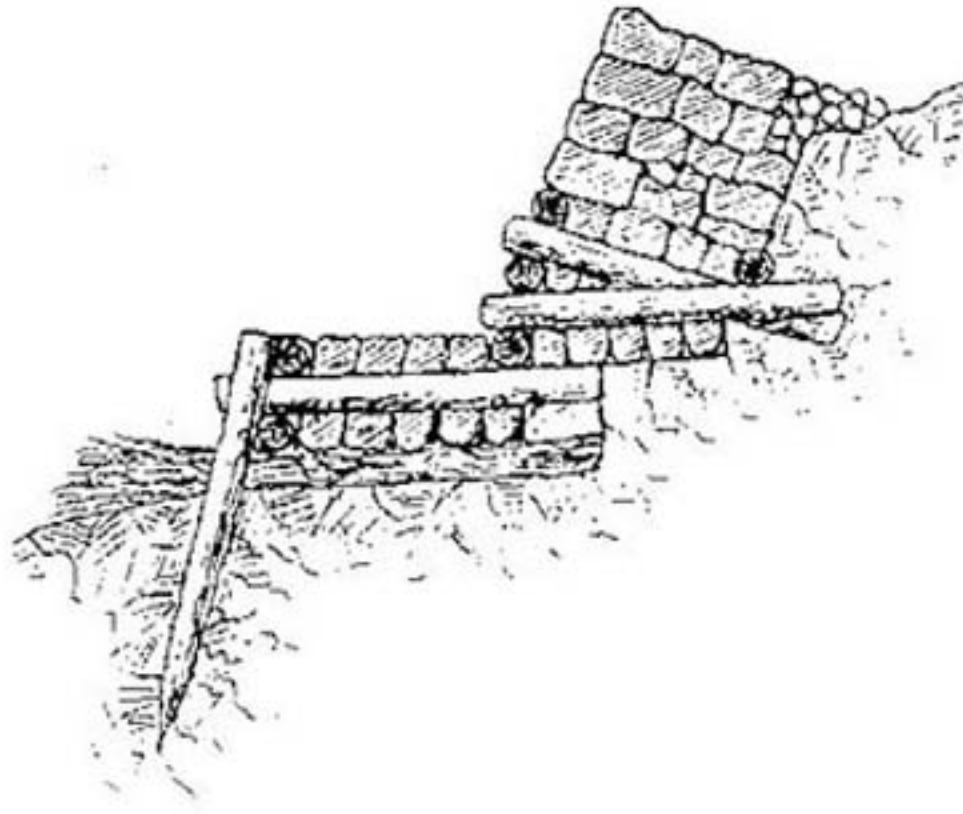


Рис. 265-*d*.

Рис. 265. Конструкции деревянно-каменных порогов.

устройство водобойного пола впереди стенки. С упомянутой целью устраиваются, как показано на чертеже, боковые крылья в виде бревенчатых сплошных стенок, укрепленных спереди свайками, а сзади поперечными стенками бревен, одним концом врубленных в крыло, а другим заделанных в откос. Водобойный пол составляется из бревенчатой клетки, замощенной крупным камнем; под водобойный пол и под ряжевую стенку кладется слой хвороста.

Примеры деревянно-каменной конструкции порогов показаны на чертежах 265—*a*, *b*, *c* и *d*. Они состоят из клети, составленной из коротких

скрепленных между собою бревен, упирающихся в забитые спереди свайки, и заполненной плотной кладкой отборных камней. Так же, как в запрудах, необходимо укрепление дна русла впереди порога помощью выстилки камнем и хворостом, а также устройство по бокам порога крыльев для предохранения от размыва откосов русла, причем такие крылья обыкновенно делаются в виде невысоких примкнутых к откосу каменных продольных стенок, несколько приподнятых выше гребня порога.

В долине, куда вытекает горный поток и где выносимые им сели образуют конические высыпки, регуляционные работы могут вполне достигать свою цель в том лишь случае, если ранее урегулирован сам горный поток. Цель эта заключается в сосредоточении потока в устойчивом русле, чтобы предохранить всю местность, расположенную на прежде образовавшихся высыпках, от наводнений при паводках, от размыва берегов и от образования новых русел. При естественном состоянии конических высыпок устье потока обыкновенно приобретает дельтообразный вид. Разбросанное по рукавам дельты течение не обладает достаточной скоростью, чтобы не происходило отложение наносов; последние при сильных паводках вызывают подпор воды, затопление местности и образование на ней новых протоков.

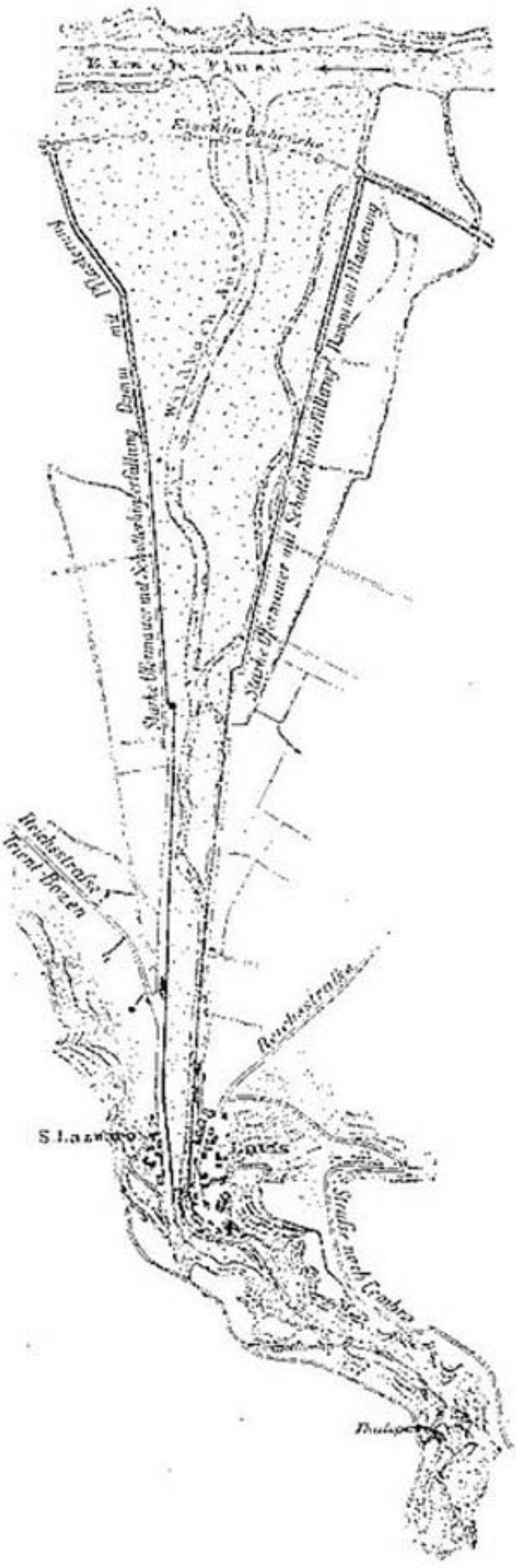


Рис. 266. Отраженное русло конической высыпки горного потока Авизио при выходе в долину р. Этш (в Южном Тироле).

Для сосредоточения потока в одном русле обыкновенно прибегают к ограждению русла каменными дамбами или к устройству по

обоим его берегам каменных стенок в виде берегоукрепительных подпорных стенок. Расстояние между такими стенками, следовательно ширина русла, должно быть сообразено с величиной расхода воды при сильных паводках горного потока. Направление образованного таким образом русла должно быть по возможности прямолинейно, чтобы не вызывать в крутых извилинах сосредоточенного течения у вогнутого берега, где могут происходить опасные для оградитель-

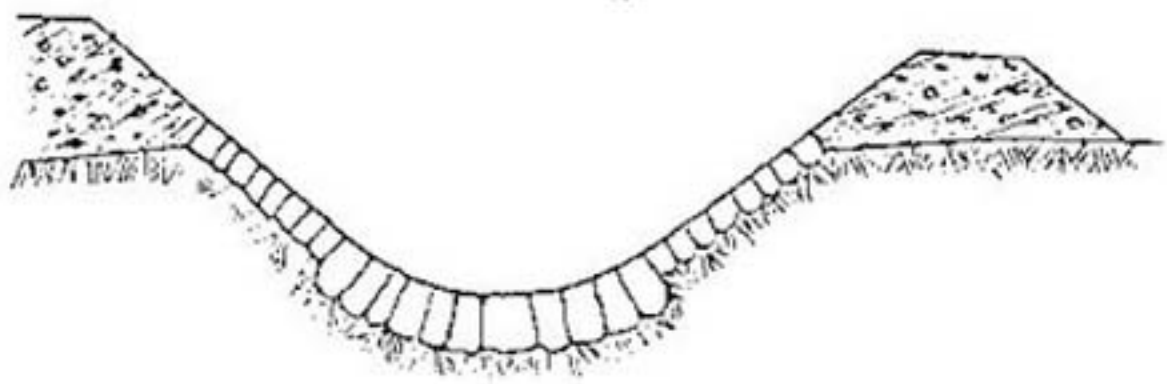


Рис. 267.

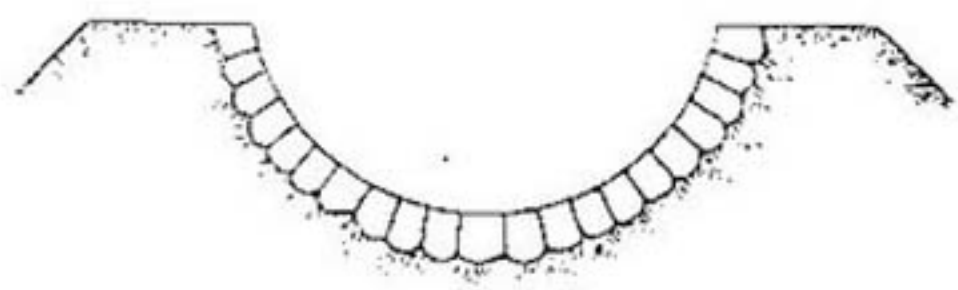


Рис. 268.

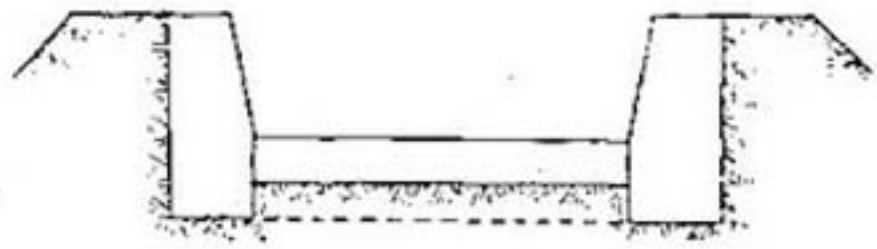


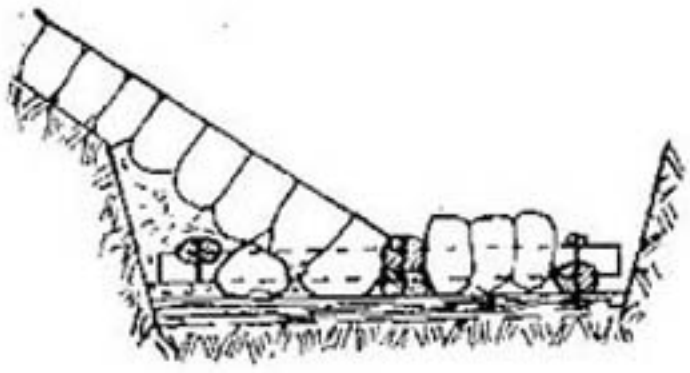
Рис. 269.

Рис. 267, 268 и 269. Укрепленное каменной одеждой русло потока на конической высыпке.

ных дамб и стенок размывы дна. На рисунке 266-м показан пример такого огражденного русла на конической высыпке горного ручья Авизио в Южном Тироле при впадении в реку Этш. Длина русла около 3 км.

При правильном направлении огражденного русла некоторый размыв его дна по середине ширины предоставляется явлением даже полезным, так как тем самым увеличивается уклон русла, ускоряется сток воды при паводках и понижается уровень воды в русле. Однако, если такое русло станет отступать назад к месту выхода горного потока в долину, то, распространяясь далее и на русло самого потока, оно может нарушить его устойчивость, достигнутую работами по регулированию потока. В таком случае, дальнейшее распространение размывов в сто-

рону русла потока может быть локализировано устройством сильной запруды на месте выхода горного потока в долину. Последствием самоуглубления русла потока в районе конической высыпки является удлинение этой высыпки. Если по каким-либо причинам удлинение высыпки не желательно, например если оно достигнет берега реки и грозит выдвижением в самую реку, то русло потока в районе высыпки требуется образовать в виде лотка криволинейной или прямоугольной формы с укреплением дна и откосов его каменной одеждой, как, например, показано на рисунках 267, 268 и 269.



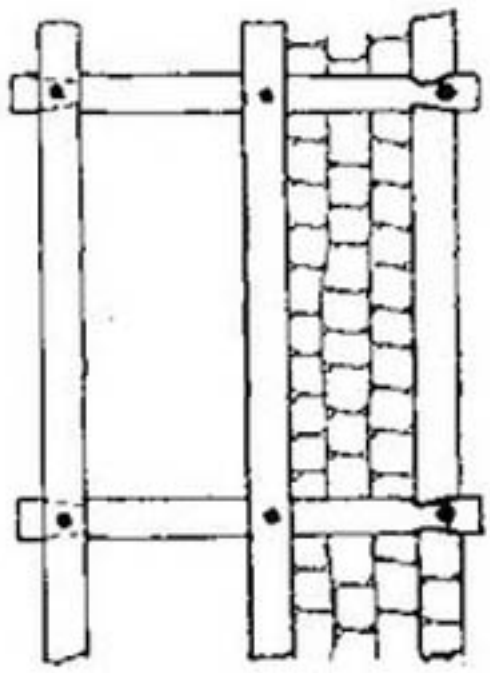


Рис. 270. Укрепление откосов русла на конической высыпке.

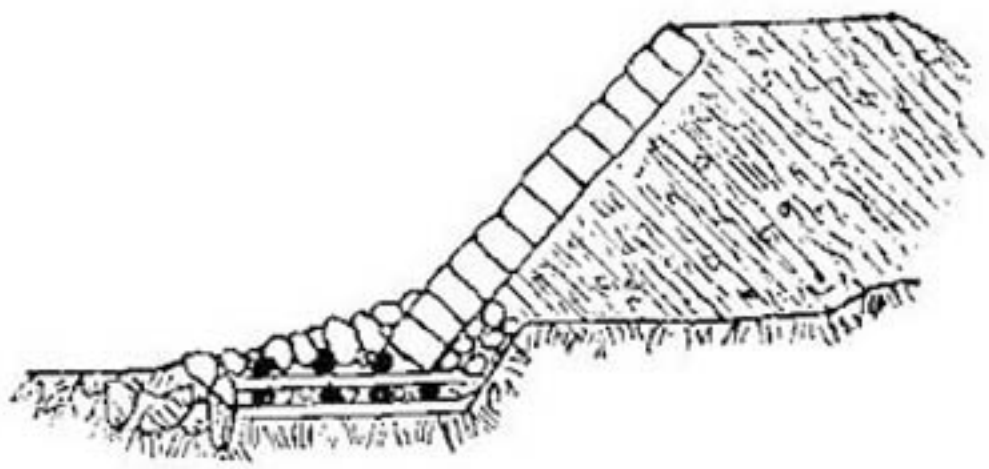


Рис. 271. Укрепление откосов русла на конической высыпке.

Криволинейная форма лотка благоприятна в том отношении, что при меняющейся величине расхода воды течение сохраняет свою сосредоточенность по середине лотка и потому русло менее подвергается как отложению наносов, так и подмывам откосов. Но по причине сложности работ при устройстве такой формы лотка предпочитают делать лоток трапецоидальной формы, укрепляя лишь подошву откосов (рис. 270 и 271). В случаях, когда уклон русла в районе высыпки получается слишком крутым, его обращают в ступенчатый вид помощью устройства невысоких стенок-перепадов.

ГЛАВА VIII.

Регулирование стока паводков. Дополнительное питание реки в межень. Предохранение местностей от наводнения.

§ 38. Общие пояснения.

Большие изменения величины расхода воды в реке, происходящие по причине неравномерного питания атмосферными осадками, во многих случаях вызывают затруднения как для судоходства, так и при пользовании рекою для иных надобностей. Часто бывает, что река, несущая в половодие и во время сильных паводков огромные массы воды, получает ее при наступлении межени настолько мало, что фарватер обмелевает, суда принуждены плавать с уменьшенной осадкой, а потому перевозить гораздо меньшее количество товаров по сравнению с грузоподъемностью судна при нормальной осадке; иногда же меженний горизонт настолько понижается, что судоходство должно вовсе приостанавливаться в ожидании времени, когда вновь наступит прибыль воды. В главе III-й было об'яснено, что регуляционные на реках работы для надобностей судоходства относятся преимущественно к улучшению меженнего русла и что пределы возможных при регулировании реки достижений ставятся, главным образом, величиной меженнего расхода воды. По причине недостаточного расхода воды при самых низких меженних горизонтах, в основание проекта регуляционных работ принимаются только более длительные, следовательно, более высокие меженние горизонты. Задача работ ограничивается стремлением обеспечить нужную для судоходства глубину и ширину фарватера только при этих и при высших горизонтах. Чем менее колеблются величины меженних расходов воды, тем задача регуляционных работ становится более определенной и тем бо́льшую глубину может получить судоходство при успешных результатах регулирования меженнего русла.

В подобной же зависимости от степени устойчивости величины меженних расходов воды находятся некоторые другие виды пользования рекою. Например, при утилизации гидравлической энергии реки, с устройством для этого гидроэлектрической силовой станции, мощность последней, зависящая от величины используемого падения

реки на данном ее протяжении и от величины направляемого в турбины расхода воды, может быть установлена тем более выгодная, чем равномернее естественные расходы воды в реке в течение меженнего периода времени. Пользование речной водой для искусственного орошения земель, для водоснабжения городов, для крупных промышленных предприятий и т. п. также заинтересовано в равномерности меженних расходов воды, так как в некоторых случаях приходится базировать расчеты такого пользования речной водой не на общем количестве несомой рекою воды и не на средних меженних расходах, а, во избежание случаев нехватки воды, только на минимальных расходах.

С другой стороны, сильные паводки представляют явление тоже нежелательное, а в некоторых случаях вредное и даже опасное. Бесполезно стекающие в короткое время огромные массы воды лишают бассейн реки тех запасов воды, которые необходимы для достаточного питания реки в меженнее время. Высокие воды, текущие с большими скоростями, размывают берега, производят глубокие местные вымоины дна меженнего русла, влекут большие количества наносов, образуют в других местах мели и препятствуют поддержанию благоприятных форм русла. При высоком половодии и сильных паводках вода выступает в некоторых местах из берегов, заливая прибрежные местности и образуя иногда неожиданные опасные для населения наводнения.

Вышеотмеченные явления побуждают изыскивать технические меры для регулирования стока воды в реке с целью улучшить ее меженнее состояние и обезвредить паводки, или, по крайней мере, смягчить их вредное влияние. Меры эти бывают разнообразны в зависимости от местных условий, от цели, для которой они предпринимаются, от средств, которыми можно располагать и от различных других обстоятельств. Но, в общем, они могут быть сведены к двум главнейшим группам: а) *магазинаж воды*, заключающийся в искусственном задержании некоторого количества воды при половодии или паводках с тем, чтобы усилить этой водой питание реки в маловодное время, и б) *регулирование русла высоких вод*.

Не останавливаясь в настоящем труде на обозрении условий и способов регулирования стока речной воды для различных других специальных целей, мы в дальнейшем ограничиваемся рассмотрением регулирования стока для улучшения судоходных условий реки при свободном ее течении, а также для предохранения местностей от вредных разливов реки.

§ 39. Дополнительное водоснабжение реки во время межени для улучшения условий судоходства.

Неодинаковость величины расхода воды в меженнее время отражается на качествах меженнего фарватера. С уменьшением расхода понижается уровень воды, уменьшаются глубина и ширина фарватера,

а расположение последнего в плане приобретает более крутые извилины, могущие затруднять судоходство. Искусственное регулирование меженнего русла помощью регуляционных сооружений и землечерпания тоже не всегда может обеспечить необходимую для судоходства глубину и ширину меженнего фарватера, если в некоторые периоды меженнего состояния реки расход воды сильно уменьшается, так как для регулирования русла реки, несущей наносы и текущей на размываемых грунтах, необходимо сохранение в межень достаточной энергии воды для поддержания фарватера на перекатах, а для этого требуется и достаточная величина расхода воды. В § 20-м приведено выражение зависимости гидродинамических элементов речного потока, дающее возможность оценить ту предельную величину средней глубины живого сечения на перекатах, больше которой нельзя рассчитывать получить в результате регуляционных работ, а именно:

$$t = \sqrt[6]{\left(\frac{Q}{6\,\beta\,c}\right)^2 \times \frac{1}{J}}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

где t — средняя глубина, Q — расход воды, J — поверхностный уклон, c — коэффициент формулы Шези, а β — крутизна откосов дна около уреза воды, зависящая от свойств грунта. Так как уменьшение уклона J не может быть достигнуто более того предела сглаживания уклонов, который ставится естественными падениями, то с уменьшением величины расхода Q, положенного в основание расчетов регуляционных работ, неминуемо уменьшается и расчетная глубина фарватера на перекатах. Также вредно отражаются сильные уменьшения меженнего расхода воды на судоходных условиях в порожистых участках реки. С уменьшением расхода и понижением уровня воды рельеф неразмываемого дна более сильно реагирует на положение поверхности воды: падения становятся более крутыми, увеличиваются быстротоки и водовороты, а глубина воды уменьшается.

Неравномерность меженнего расхода воды в реке зависит от многих весьма разнообразных обстоятельств, при которых складывается режим естественного питания реки. Воздействовать на все эти обстоятельства с целью обеспечить полную равномерность питания реки мы не можем. Но в некоторых случаях условия местности и естественного стока воды позволяют образовать искусственно большие резервуары, чтобы скоплять в них некоторую часть избытков воды, стекающих в реку во время половодия и паводков, сохранять эту воду до наступления сильных понижений уровня воды во время межени и выпускать ее в реку в количествах, необходимых для поддержания глубины в наиболее мелководных местах реки, следовательно, производить искусственно дополнительное питание реки в меженнее время. Природа дает нам примеры благотворного влияния больших резервуаров воды на умерение колебаний меженнего уровня воды в реке. Реки, вытекающие из боль-

щих озер, служащих естественным регулятором стока воды в реку, резко отличаются от других рек как своими менее высокими под'емами воды во время половодия и паводков, так и своими более равномерными расходами в меженний период времени.

Однако, упомянутый способ искусственного дополнительного питания реки в межень при применении его для улучшения судоходных условий на реках сколько-нибудь значительных как по величине естественного расхода в межень, так и по протяжению реки, на котором требуется улучшить судоходные условия этим способом, встречает большие затруднения, ограничивающие пределы выгодности применения упомянутого способа. Поясним это рассмотрением некоторых свойств дополнительного питания реки из водохранилищ.

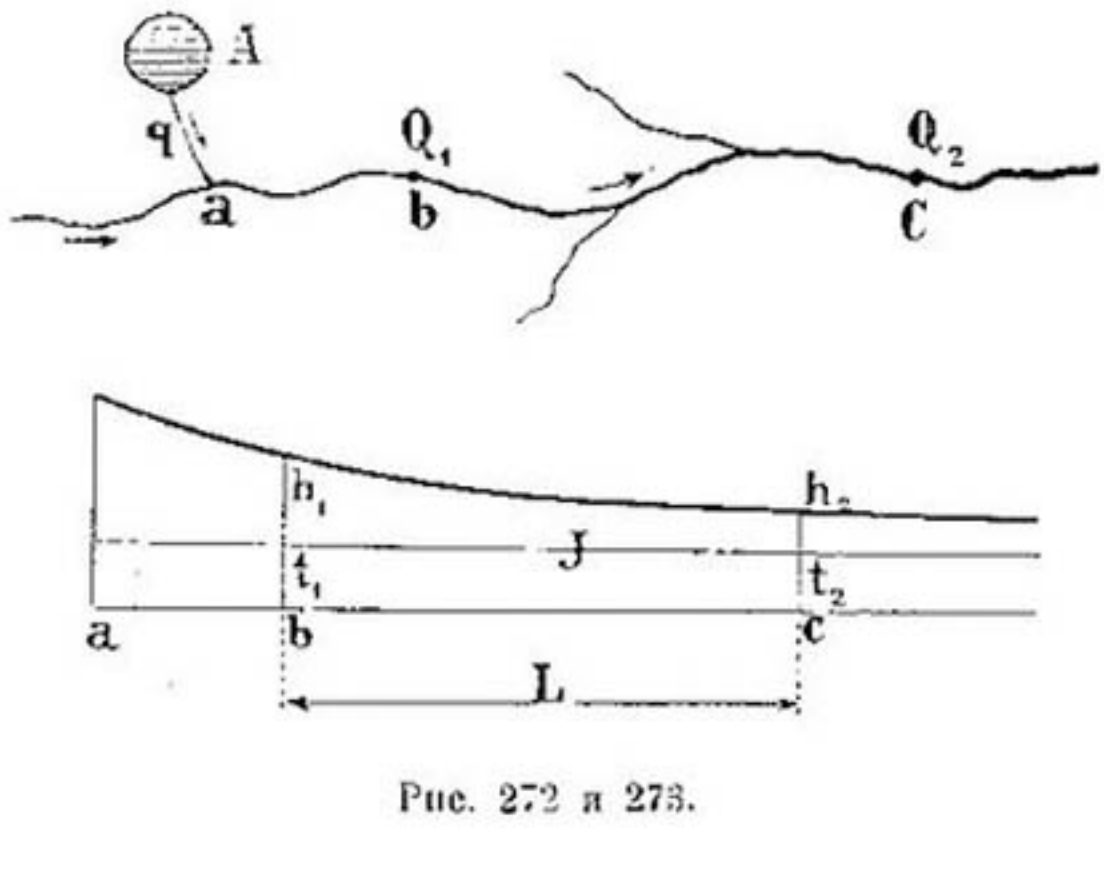


Рис. 272 и 273.

Пусть для дополнительного питания участка реки bc (рис. 272) устроено водохранилище A, из которого подается в реку в точке a вода в количестве q *кб. м* в секунду в дополнение к естественному меженнему секундному расходу воды в реке, величина которого составляет Q_1 *кб. м* в точке b и Q_2 *кб. м* в точке c, причем средняя глубина t живых сечений b и c одинакова и оба сечения имеют параболическую форму. Зависимость гидродинамических элементов при параболической форме русла можно, из выражения (1), представить в следующем виде:

$$Q = 6\ \beta\ c \sqrt{J}\ t^{3/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Допуская, для простоты рассуждений, что при колебаниях горизонта меженних вод, в зависимости от изменений расхода воды, величины J, β и c настолько мало меняются, что их можно принять за постоянные, обозначим произведение $6\ \beta\ c \sqrt{J}$, как постоянную величину, буквой M.

Следовательно, для живого сечения в точке b имеем при естественном расходе Q_1 *кб. м* в секунду:

$$Q_1 = Mt^{5/2}.$$

При попуске из водохранилища дополнительного расхода q *кб. м* в секунду прежняя глубина t увеличится на некоторую высоту h_1 причем

$$Q_1 + q = M(t + h_1)^{5/2}.$$

Отношение расходов

$$\frac{Q_1 + q}{Q_1} = \left(\frac{t + h_1}{t}\right)^{5/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Выражение (3) показывает, что если необходимо увеличить в сечении b среднюю глубину в полтора раза, то расход воды потребуется увеличить в $1{,}5^{5/2} = 2{,}75$ раза; для чего необходимая величина попуска составит $1{,}75\ Q_1$. При увеличении же глубины в два раза потребуется величина попуска $4{,}66\ Q_1$. Предположим, например, что при естественном расходе 50 *кб. м* в секунду средняя глубина равна 0,8 *м* и необходимо увеличить ее до 1,2 *м*. Для этого потребуется величина дополнительного попуска воды $50 \times 1{,}75 = 87{,}5$ *кб. м* в секунду, и если такой попуск необходим в течение 4-х недель, то придется из водохранилища израсходовать об'ем воды, равный $87{,}5 \times 60 \times 60 \times 24 \times 28 = 210{,}68$ милл. *кб. м*. Величина водохранилища потребуется еще бо́льшая, если та же глубина 0,8 *м* соответствует бо́льшему естественному расходу, например, расходу 80 *кб. м*. В таком случае, по аналогичному расчету, придется для поддержания глубины в течение 4-х недель выпустить из водохранилища об'ем воды 338,69 милл. *кб. м*.

Приведенные подсчеты показывают, что вообще для дополнительного питания рек в межень требуются водохранилища огромной емкости и что потребная емкость водохранилища увеличивается для рек с более значительным меженним расходом. Поэтому способ дополнительного питания рек применим лишь для сравнительно малых рек, или же только для верховьев более значительных рек.

Обращаясь к вопросу о том, как далеко по длине реки распространяется полезное действие попуска из одного водохранилища, предположим (рис. 273), что на месте, находящемся на расстоянии L ниже по течению от места b, расход воды Q_2 больше, чем Q_1, так как на участке bc река принимает некоторые количества воды, стекающей со склонов долины или прибывающей из притоков; средняя же глубина

t_2 мало отличается от t_1. Пользуясь выражением (3), можем для обоих мест представить его в следующем виде:

для места b:

$$1 + \frac{q}{Q_1} = \left(1 + \frac{h_1}{t_1}\right)^{5/2}$$

для места c:

$$1 + \frac{q}{Q_2} = \left(1 + \frac{h_2}{t_2}\right)^{5/2}.$$

Так как $Q_2 > Q_1$, то

$$1 + \frac{q}{Q_1} > 1 + \frac{q}{Q_2}, \quad \text{а потому}$$

$$\left(1 + \frac{h_1}{t_1}\right)^{5/2} > \left(1 + \frac{h_2}{t_2}\right)^{5/2}, \quad \text{или}$$

$$\frac{h_2}{t_2} < \frac{h_1}{t_1}.$$

Следовательно, полезное действие попуска воды из водохранилища, в смысле относительного увеличения глубин и повышения горизонта воды, более значительно вблизи места попуска и быстро уменьшается по мере удаления, вниз по реке, от места попуска. Поэтому, если помощью дополнительного питания реки в межень требуется поддержать необходимую для судоходства глубину на значительном протяжении реки, то нужно иметь несколько водохранилищ, так расположенных, чтобы производить одновременно попуски воды в нескольких местах по длине реки.

Полезное значение производства попусков воды из водохранилищ не в одном, а в нескольких местах реки обусловливается еще следующим обстоятельством. Введение в реку в одном месте большого количества воды вызывает резкое увеличение скоростей течения и высокие падения поверхности воды. Для судоходства, в особенности взводного, такое обстоятельство может вызывать серьезные затруднения. Менее оно вредно для сплава плотов и для сплава лесных материалов россыпью.

Возможность и степень выгодности применения способа дополнительного питания реки зависит также от топографических и гидрологических условий местности. Для получения такой огромной емкости, какая необходима водохранилищу, служащему для дополнительного питания реки, требуется устроить водохранилище, имеющее очень большую площадь водной его поверхности. Нижеприведенные примеры существующих для этой цели водохранилищ у нас и в Америке характеризуют огромность площадей водохранилищ, когда их приходится

устраивать в местностях более или менее ровных. Их устройство сопряжено с затоплением обширных земельных площадей, что возможно только в местностях мало населенных и мало пригодных для культурной обработки. В местностях гористых водохранилища большой емкости могут быть устроены в глубоких горных долинах помощью заграждения последних высокими водоудержательными плотинами, причем необходимая емкость может быть обезпечена при меньшей площади водохранилища за счет бо́льшей его глубины.

Обращаясь к основаниям, на которых разрешается задача устройства дополнительного питания реки для надобностей судоходства, рассмотрим главные вопросы, из которых слагается упомянутая задача, а именно: а) определение величины и длительности необходимых попусков воды для дополнительного питания реки, б) определение нужной для этой цели емкости водохранилища и в) определение условий, необходимых для образования водохранилища заданной емкости.

Величина и длительность попусков воды из водохранилища.

Попуски воды делаются для увеличения глубины фарватера в тех местах реки, где глубина недостаточна при малых меженних естественных расходах воды. Такими местами обычно бывают перекаты или иные местные возвышения дна. Увеличение, помощью попуска, расхода воды поднимает уровень ее поверхности и тем самым увеличивает глубину фарватера в упомянутых местах. Высота, до которой нужно поднять уровень воды, определяется недостающей глубиной фарватера. Величина секундного расхода воды, соответствующая этому поднятому уровню, а следовательно и необходимая добавочная, к естественному, величина расхода воды, получаемого из водохранилища, могла бы быть исчислена теоретически, пользуясь приведенным выше выражением (2). Однако, такому способу определения величины и длительности попусков присущи большие неточности и затруднения, так как во время действия попусков уклоны воды в реке меняются, а дно реки на перекате с изменением расхода может либо размываться, либо наращиваться наносами. Задача еще более осложняется по той причине, что приходится иметь дело не с одним перекатом, а с несколькими, где бывает недостаточная глубина, причем деформации дна на этих перекатах могут происходить различно, между тем как исчисляемая величина попуска должна обезпечить нужную глубину на всех таких перекатах. Поэтому поставленная задача может быть разрешена более правильно, если ее решение основано на данных, полученных непосредственными измерениями глубин на перекатах при различных положениях уровня воды в реке, соответствующих также уже известным величинам естественного расхода воды. Для этого необходимо, чтобы река на данном ее участке была изучена путем многолетних тщательных гидрометрических работ.

Для упрощения об'яснений предположим, что на данном участке реки, для которого предполагается устроить дополнительное водоснаб-

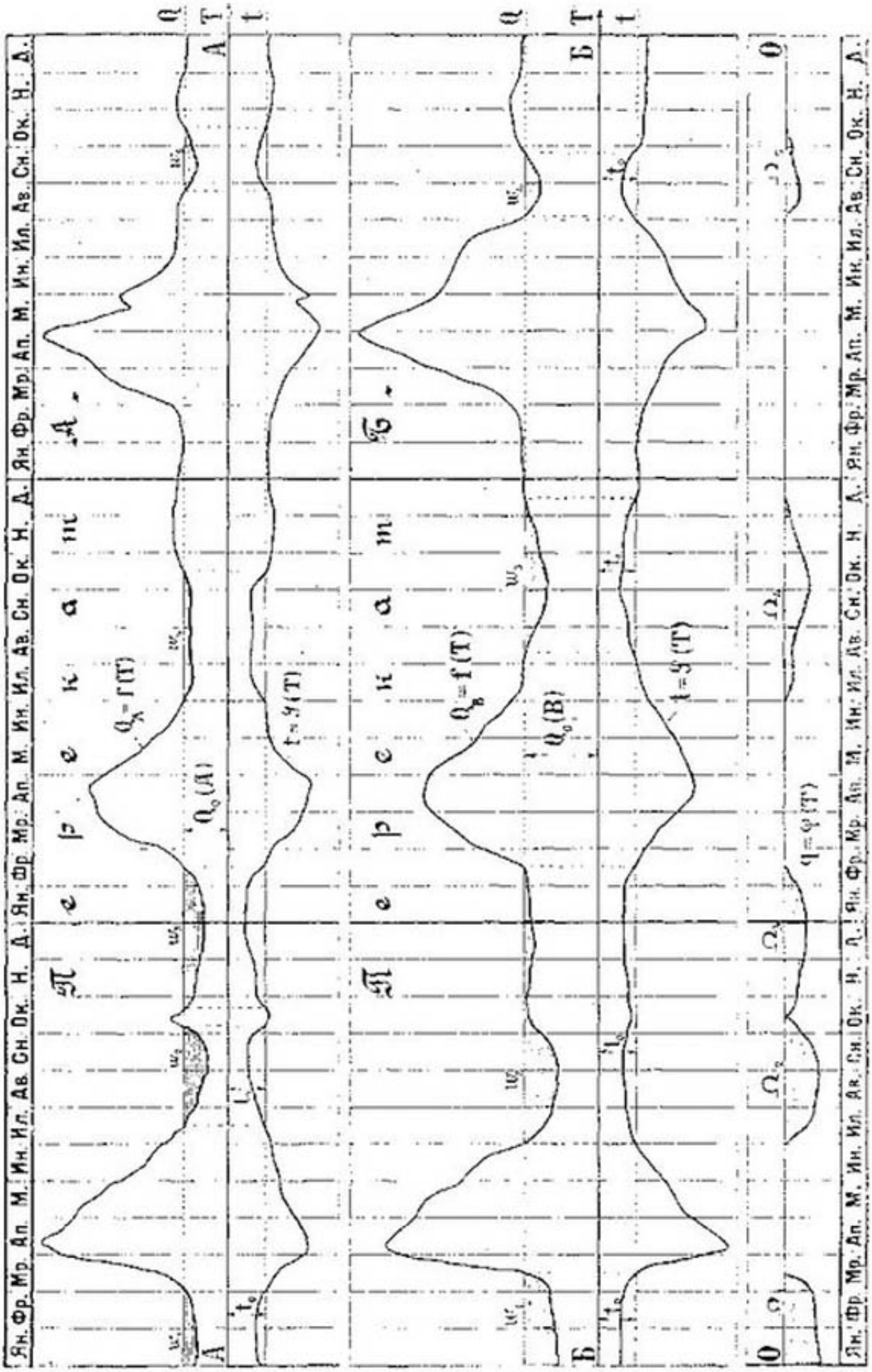


Рис. 274. График для определения секунд об'ема и длительности пропусков воды из водохранилища при дополнительном питании реки с целью увеличения глубины фарватера на перекатах.

жение в межень, имеется только два переката A и B, на которых глубина воды недостаточна, и требуется помощью попусков из водохра-

нилища обеспечить на этих перекатах глубину фарватера t_0. Также для упрощения об'яснений возьмем результаты измерений только за три года.

На рис. 274-м две верхние диаграммы (для перекатов *А* и *Б*) представляют каждая хронологическую линию колебаний величины естественного расхода $Q=f(T)$, вычерченную по данным наблюдений над уровнями воды и по установленной зависимости между величиной расхода и положением уровня, а под нею вычерчена кривая $t=\varphi(T)$, представляющая измеренные глубины фарватера на том же перекате при различных положениях уровня воды в течение рассматриваемого трехлетия. Величины расхода и величины глубины для каждой единицы времени (средний месячный или средний за несколько дней) отложены, в определенных произвольно выбранных масштабах, первые—вверх, а вторые—вниз от прямой горизонтальной линии А—А для переката *А*, и Б—Б для переката *Б*. Прямая горизонтальная линия, изображающая дно на требуемой глубине t_0, пересекаясь с линией колебаний глубин $t=\varphi(T)$, указывает периоды времени, когда нужно дополнительное водоснабжение реки. По той же диаграмме определяется необходимая для этих периодов величина расхода воды Q_0. Заштрихованные площади W_1, W_2 и т. д. определяют необходимый (для данного переката) об'ем воды для дополнительного питания в течение отдельных периодов низкого стояния горизонта, а ординаты этих площадей дают для того же переката секундные величины необходимого попуска воды в каждую единицу времени, принятую для составления графика.

Если весь участок, на котором находятся перекаты *А* и *Б*, обслуживается одним водохранилищем, устроенным выше по течению от переката *А*, то секундная величина попуска воды из водохранилища, также как длительность попусков, должна удовлетворять требованиям каждаго переката, т. е. должна быть избрана наибольшая по обоим диаграммам; такое же условие необходимо и в отношении длительности попусков. Соответственно этому условию построена внизу рис. 274-го диаграмма необходимых попусков воды из водохранилища для обслуживания всего участка, т. е. в данном случае обоих перекатов *А* и *Б*. Заштрихованные площади Ω_1, Ω_2 и т. д. ограничены снизу кривыми линиями, коих ординаты q являются для каждой единицы времени максимальными из ординат (для той же единицы времени) площадей W_1, W_2 и т. д., построенных для перекатов *А* и *Б*.

Таким образом, нижняя диаграмма рисунка определяет искомые для всего участка реки указания о времени начала и конца попусков и о секундной величине попуска в каждую единицу времени. По этой же диаграмме может быть определен общий об'ем воды, нужный для дополнительного питания участка в данный меженний период. Так, например, для всего меженнего времени между половодием 1-го и 2-го годов минимум необходимого об'ема воды для дополнительного питания участка реки определяется по сумме площадей $\Omega_2+\Omega_3$; для межени между половодиями 2-го и 3-го годов об'ем определяется по величине площади Ω_4.

Если перекаты расположены на столь значительных расстояниях друг от друга и от водохранилища, что требуется учитывать время, необходимое для прохождения по реке воды, выпускаемой из водохранилища, то, учтя такое время, нужно, взамен нижней диаграммы рис. 274-го, построить новую диаграмму, соответственно времени достижения попуска воды к каждому перекату. Такие поправки особенно необходимы в тех случаях, когда участок реки длинен, а требующиеся попуски воды короткие по длительности их производства.

Пользуясь нижней диаграммой рис. 274-го, можно построить для всего трехлетия суммарную (интегральную) кривую расхода воды [1]) из водохранилища для дополнительного питания участка реки, какая показана далее на рис. 276. Способ построения интегральных кривых расхода воды, равно как свойства таких кривых, об'яснены в главе I-ой (см. стр. 44).

Емкость водохранилища.

Наличие данных о необходимых для дополнительного питания реки величине и длительности попусков воды из водохранилища позволяет определить и нужную для этой цели емкость водохранилища. Решение такой задачи тоже удобнее производить графическим методом. Сущность удобоприменимого для сей цели графического метода заключается в следующем (рис. 275). Предположим, что имеется водохранилище и что известны для каждого месяца в году количества воды, притекающей в резервуар, и количества воды, расходуемой из водохранилища, а также предположим, что в течение отдельных месяцев приток и расход происходят равномерно. Предположим, что к началу рассматриваемого года резервуар был вовсе опорожнен и построим для всего года суммарные кривые (в данном случае они будут ломаные линии) притока и расхода. Они показаны на рисунке и обозначены ΣП и ΣР. По свойствам суммарной кривой, чем круче в данном периоде времени поднимается кривая, тем больше секундная величина, с которой происходит приток или расход воды; ординаты же кривых изображают, в масштабе, общее количество воды, притекшей или израсходованной за весь период времени от его начала до момента, к которому относится ордината. По этому графику можно различить те периоды времени, когда секундный приток воды в резервуар превышает секундный расход из него, от периодов, когда соотношение между секундными величинами притока и расхода имеет обратное значение. Например, в данном случае до 1-го июня секундный приток превышал секундный расход, с 1 июня до 1 октября секундный расход превышал приток, а с 1 октября опять приток преобладал над расходом. В каждый момент года отрезок соответствующей ординаты между кривыми притока

---

[1]) Практически трудно менять непрерывно величину попуска; приходится сохранять для некоторого периода времени одинаковую (наибольшую) его величину. В таком случае суммарная кривая обращается в ломаную линию.

и расхода выражает в масштабе об'ем воды, составляющий разность между общим об'емом притекшей воды и общим об'емом израсходованной воды. Например, на 1 июня эта разность об'емов выразится в масштабе отрезком ΣП—ΣР = ТЦ. На нижней диаграмме рис. 275-го построена кривая А Ж К Л Ш, которую назовем разностной кривой. Ее ординаты равны отрезкам ординат между кривыми верхней диаграммы:

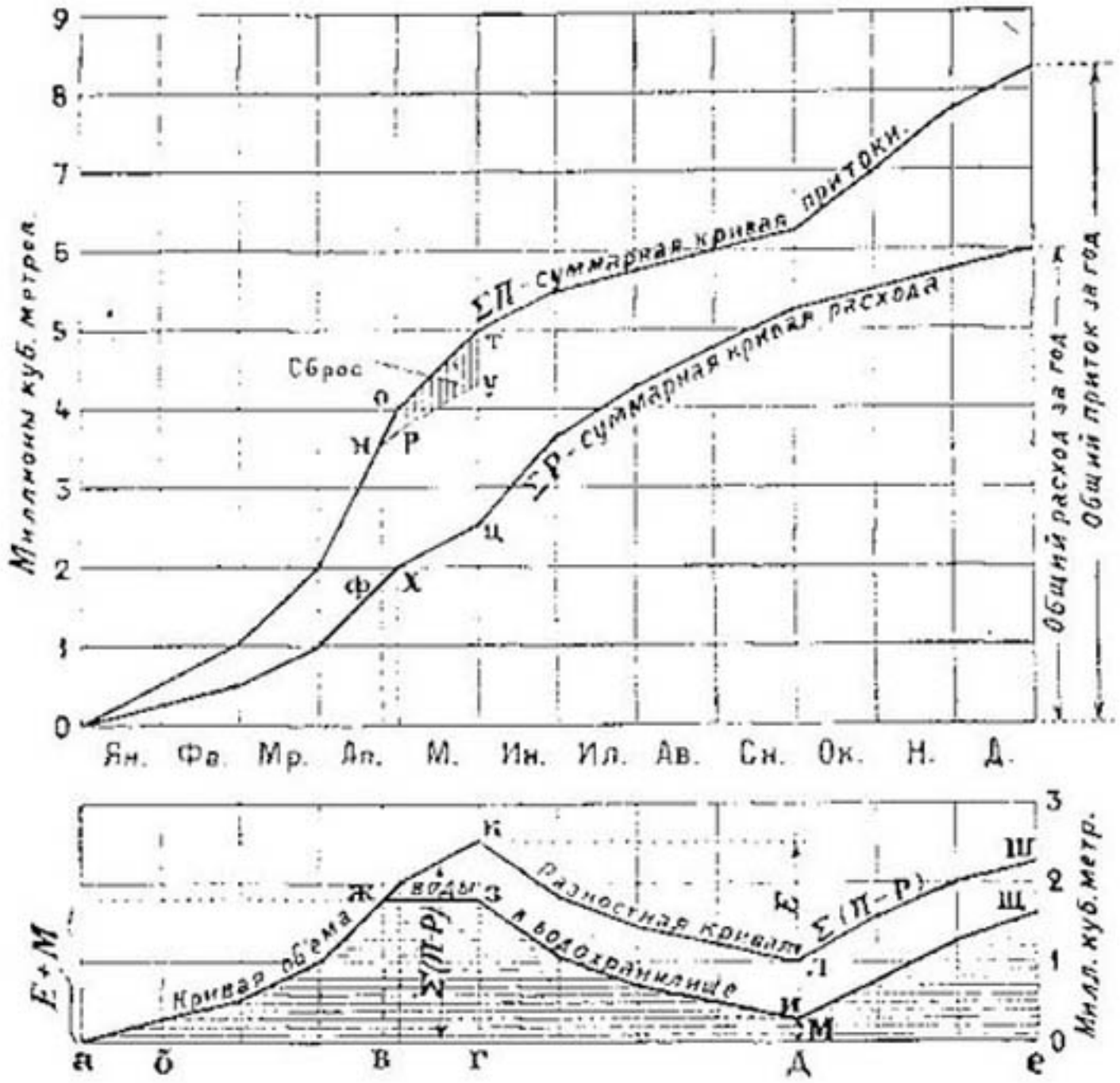


Рис. 275. Графический способ определения необходимой величины полезного об'ема воды по имеющимся диаграммам приточности и расходования воды.

ВЖ = НФ, ГК = ТЦ и т. д. На протяжении разностной кривой от *а* до К, т. е. в течение времени с 1 января по 1 июня происходило превышение общего количества притекшей воды над общим количеством израсходованной воды, а с 1 июня начались убыли об'ема воды и они продолжались до 1 октября, а засим вновь наступил прирост об'ема воды. Если из вершины К разностной кривой провести горизонтальную прямую до продолжения ординаты ДЛ, проведенной через наинисшую точку разностной кривой, то отрезок *Е* выразит в масштабе наибольший об'ем убыли воды. Если убыль шла на полезные расходы воды из резервуара, а также на некоторые неизбежные потери воды (испарение, просачивание в землю, фильтрация через затворы плотины и т. п.), то очевидно, что необходимая емкость резервуара должна быть не менее величины *Е*. Эту емкость назовем полезным

об'емом водохранилища. Но, так как в большинстве случаев не представляется возможным опоражнивать водохранилище полностью, а необходимо оставлять в нем некоторый об'ем воды (например, для рыбоводства, для пользования населением, или во избежание заболачивания и заростания дна), то этот добавочный об'ем, который назовем мертвым об'емом водохранилища и обозначим буквой M, нужно добавить к полезному об'ему, чтобы получить полную необходимую емкость водохранилища, равную $E + M$.

Найденные таким образом величины могут, в связи с построенной разностной кривой, служить характеристикой работы водохранилища. Предполагая, что устроенное водохранилище вступило в работу с 1 января, а что до сего дня оно было порожним, отложим на начальной ординате величину $E + M$ и проведем горизонтальную прямую до пересечения в точке Ж с разностной кривой. В период времени aВ водохранилище будет наполняться до полного об'ема своей емкости. После этого в течение времени ВГ еще происходит превышение притока над расходом; получаемый избыток воды нужно выпускать из водохранилища—производить так называемые сбросы. С момента Г в течение времени ГД расход воды из водохранилища превышает приток в него, поэтому об'ем воды, находящейся в водохранилище, будет постепенно уменьшаться. Уменьшение об'ема будет происходить соответственно нисходящей части КЛ разностной кривой. Проведя кривую ЗИ, параллельную кривой КЛ, мы выразим графически уменьшение воды в водохранилище в течение времени ГД до величины мертвого об'ема М, после чего наступит опять период наполнения водохранилища. Таким образом, заштрихованная площадь, заключенная между абсциссой ae и линией a Ж З И Щ, выражает графически, в масштабе, изменения об'ема воды в водохранилище в течение годового периода времени. Диаграммы, приведенные на рис. 275-м, позволяют определить также величину сбросов воды из водохранилища, а именно как общий об'ем сбрасываемой воды, так и секундные сбросы в отдельные моменты периода времени ВГ. Для этого нужно продолжить ординату ВЖ нижней диаграммы до пересечения с суммарной кривой притока в точке Н (верхняя диаграмма), а засим из точки Н провести линию НРУ, параллельную участку ФХЦ суммарной кривой расхода. Заштрихованная вертикальными линиями площадь Н О Т У Р дает в масштабе величину общего об'ема сброса, а отрезки ординат в этой площади дадут секундные величины сброса для каждого отдельного момента.

Возвращаясь к вопросу об исчислении необходимого об'ема водохранилища для дополнительного питания реки в меженнее время с целью увеличения глубины фарватера, применим вышеописанный графический метод к рассматриваемому примеру дополнительного питания участка реки, имеющего мелководные перекаты A и $Б$.

На рис. 276 нижняя диаграмма соответствует нижней диаграмме рис. 274-го и представляет собою диаграмму необходимых попусков

воды из водохранилища для обслуживания обоих перекатов. По этой диаграмме можно построить суммарную кривую расхода воды из водо-

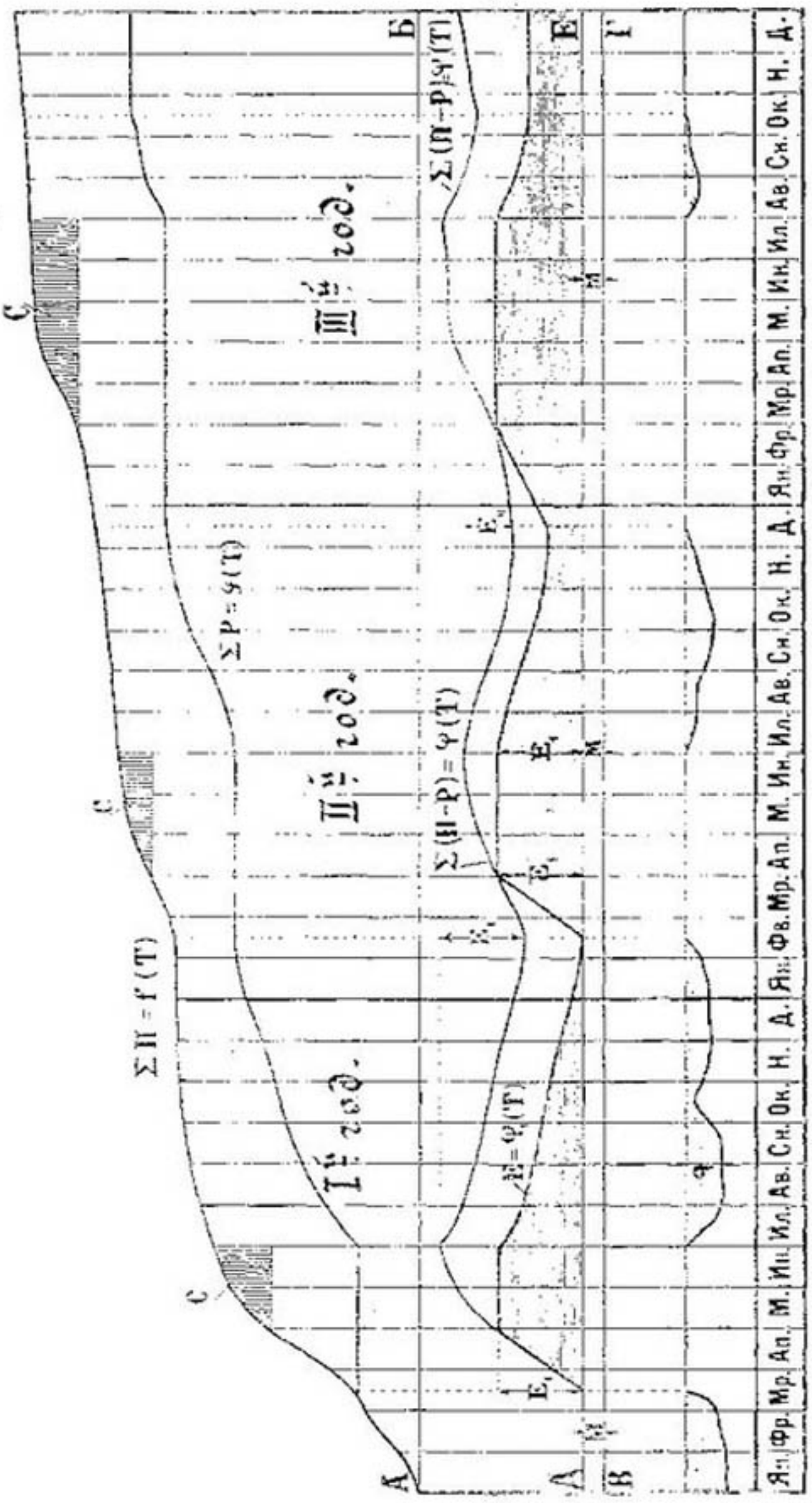


Рис. 276. Применение графического метода для определения емкости водохранилища, служащего для дополнительного питания реки в межень.

хранилища, показанную в верхней части рис. 276-го и обозначенную $\Sigma P = \varphi(T)$. Прямолинейные горизонтальные участки этой кривой соот-

ветствуют периодам времени, когда глубина достаточна и попусков не требуется.

Избравши подходящую для устройства водохранилища долину притока реки или имеющееся озеро, необходимо определить его приточность, а также достаточность последней для обеспечения дополнительного питания реки. Если водохранилище устраивается помощью заграждения плотиной долины речки (рис. 277), которая достаточно изучена в отношении колебаний уровня воды и величины расходов, то, для выяснения приточности, могут быть построены графики колебаний величины расхода за несколько лет по данным колебаний горизонта воды и по установленной зависимости между положением уровня и величиной расхода. В противном случае приходится обратиться к способу косвенного определения приточности на основании данных метеорологических наблюдений за высотою осадков, выпадающих в бассейне данной речки. Если площадь бассейна, питающего речку до места, где предположена плотина водохранилища, равна F *кв. км.*, а в течение данного месяца высота осадков в этом бассейне составила h миллиметров, то средний секундный приток в речку в этом месяце $Q = 0{,}0004\ \mu\ F\ h$ *куб. м./сек.*, а количество протекшей в реке за месяц воды $V = 1000\ \mu\ F\ h$, где μ обозначает коэффициент стока. Величину коэффициента стока приходится брать по аналогии с известным коэффициентом стока для других рек, находящихся в условиях, подобных данной речке.

Исчисливши помесячные притоки воды в водохранилище, можно построить суммарную кривую притока. На рис. 276-м она обозначена $\Sigma П = f(T)$. Если эта кривая нигде не пересекается с суммарной кривой расхода $\Sigma Р = (\psi T)$, то приточность является достаточной для требуемого дополнительного питания реки в межень. Засим, для определения величины полезной емкости водохранилища, достаточно построить вышеоб'ясненным способом разностную кривую $\Sigma(П—Р) = \psi(T)$, по которой и определится искомая полезная емкость водохранилища $Е_1$, характер изменения величины об'ема воды в водохранилище $Е = \psi_1(T)$, а также величины сбросов, которые обозначены на рисунке буквой C.

Назначение величины мертвого об'ема водохранилища и определение высоты плотины.

Для дальнейшего проектирования водохранилища нужно иметь план долины речки в месте, избранном для водохранилища, с нанесенными на плане горизонталями (рис. 277). Назначивши место расположения плотины cd, определяем по плану для каждой горизонтали площади (в кв. метр.) F_1, F_2, F_3 и т. д. и соответствующие об'емы пространства между площадями смежных горизонталей $V_n = \frac{F_{n-1} + F_n}{2} h$, где h обозначает высоту, в метрах, между горизонталями. По найден-

ным величинам можно построить показанный на рисунке график зависимости емкости водохранилища от высоты поверхности находящейся в нем воды: W *кб. м.* $= \Phi(h)$.

Мертвый об'ем водохранилища приходится чаще всего назначать в зависимости от той высоты, ниже которой не должна опускаться поверхность воды при опорожнении водохранилища. Пусть эта высота равна b. По графику определяется величина мертвого об'ема M *кб. м.*; отложивши засим по абсциссе необходимую величину полезного об'ема E *кб. м.*, находим высоту B поверхности воды при наполненном водохранилище. Гре-

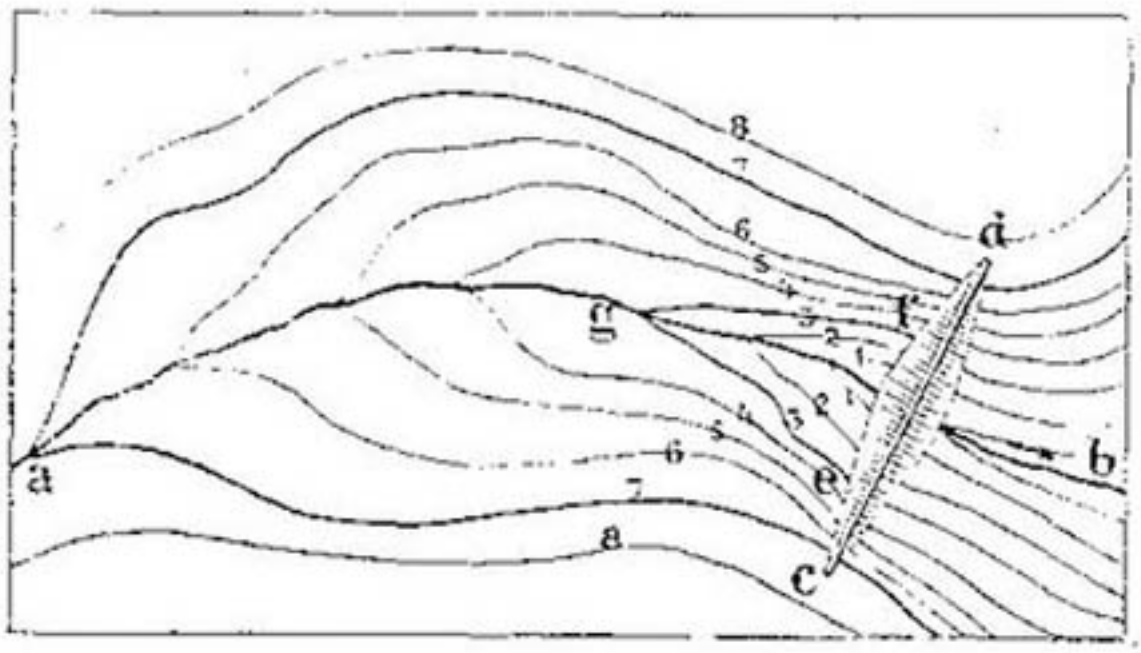


Рис. 277-*a*. План.

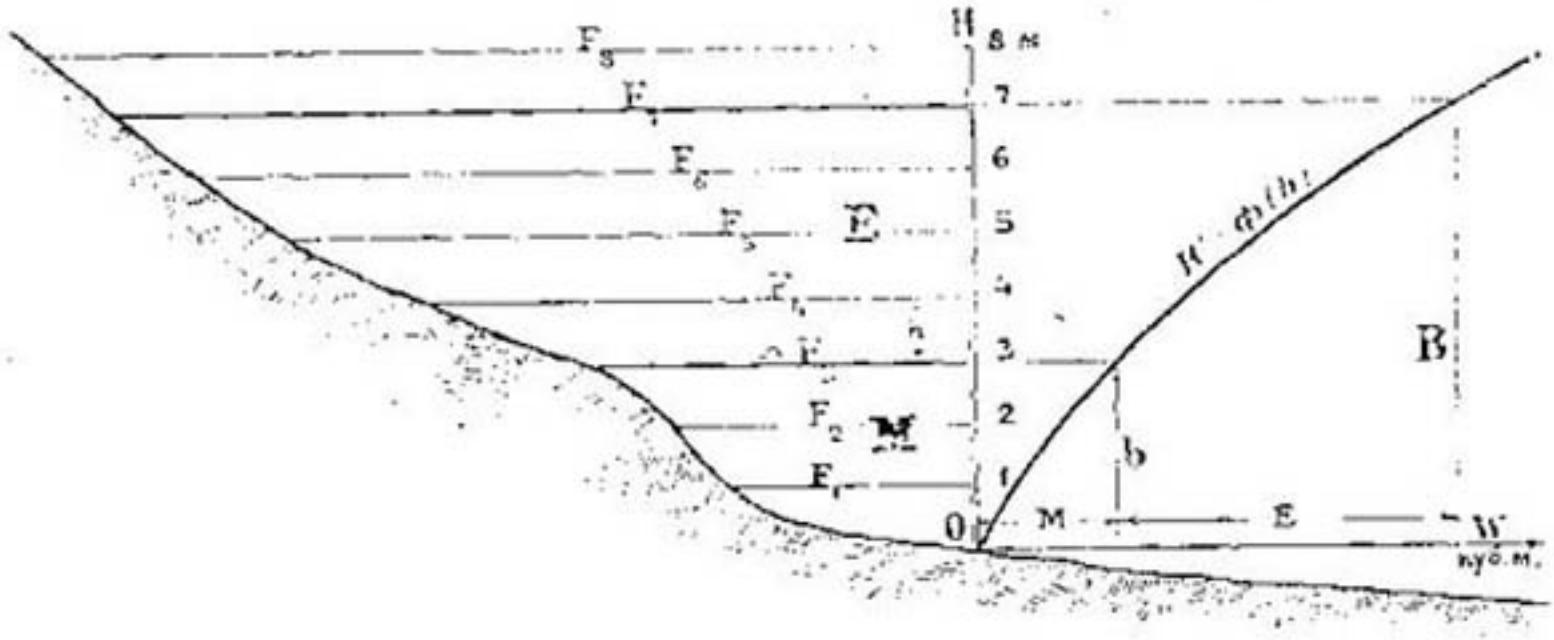


Рис. 277-*b*. Продольный профиль.

Рис. 277 *a* и *b*. Схема водохранилища, устроенного в долине речки, загражденной плотиной.

бень плотины должен быть поднят несколько выше над предельным уровнем воды наполненного водохранилища на величину, зависящую от площади поверхности воды, от типа плотины и проч.

Определенные вышеуказанным способом величины максимальных секундных попусков и сбросов воды являются необходимыми данными для проектирования водовыпускных и водосливных отверстий плотины. Не останавливаясь здесь на других вопросах проектирования плотин водохранилищ, считаем необходимым лишь отметить, что в отличие от водоудержательных плотин, строящихся для иных надобностей, водоспускные отверстия плотин водохранилищ, служащих для дополнительного питания рек в межень, должны бы. приспособлены для попуска воды с очень большим секундным ра :одом. Поэтому, при

низких плотинах водохранилищ, расположенных на сравнительно ровной местности, приходится для попусков иметь на значительном протяжении плотины разборчатое ее строение. В Северо-Западной области РСФСР, где имеется не мало таких водохранилищ, большей частью применены деревянные разборчатые части плотины, по типу так называемых бейшлотов.

Выше упоминалось, что при большой длине участка реки, для которого устраивается дополнительное питание, а также если перекаты или другие мелководные места находятся на значительных расстояниях друг от друга, необходимо учитывать скорость передвижения паводка, образуемого попуском воды из водохранилища, причем особенно важно это в тех случаях, когда длительность попуска не велика. В начале попуска образуемый им паводок доходит к различным перекатам разновременно. Если же попуск происходит в течение сравнительно короткого времени, то после его прекращения хвостовая часть паводка, имеющая меньшую высоту, чем передняя часть, будет проходить через вышележащие перекаты ранее, чем через нижележащие. Поэтому на практике вообще избегают производства коротких паводков. Обыкновенно попуски производятся в течение нескольких недель; их начинают ранее, чем естественный уровень опустится до судоходного горизонта и продолжают некоторое время после поднятия естественного горизонта до высоты судоходного.

Примеры применения способа улучшения судоходных условий реки помощью дополнительного водоснабжения в межень.

На реках со свободным течением способ дополнительного питания реки в межень из водохранилищ, для улучшения судоходных качеств реки, получил довольно широкое применение на некоторых реках Северо-Западной области РСФСР, как-то: Верхняя Волга, р. Мста, Тверца. Шексна, Сухона и др. (рис. 278). Начало устройства дополнительного водоснабжения р.р. Мсты и Тверцы относится еще к первой половине XVIII века, —ко времени устройства бывш. Вышневолоцкой системы, ныне утратившей свое прежнее значение транзитного водного пути. Для водоснабжения этих двух рек было образовано 13 водохранилищ, обладавших общим запасом воды до 900 милл. *куб. м.* Наибольшее из них, носящее название „Заводское водохранилище", питающее как р. Мсту, так и р. Тверцу, имеет площадь поверхности воды около 70 *кв. км.*; его полезная емкость составляет около 180 милл. *куб. м.*; кроме того, водохранилище имеет постоянный приток из впадающих в него рек в количестве от 750.000 до 1.500.000 *куб. м.* в сутки, которые отдаются тоже на питание упомянутых рек, главным же образом р. Мсты. Назначение водохранилищ состояло в том, чтобы поддерживать судоходную глубину на этих реках не менее 0,7 *м.*, падавшую в межень на р. Тверце и на верхней части р. Мсты до 0,5 *м.* Впоследствии некоторые из водохранилищ были закрыты, так как р. Тверца утратила судоходное значение; по ней ныне проходят попуски воды из Заводского водохранилища, в количестве около 26 *куб. м.* в секунду, для дополнительного питания Верхней Волги.

Дополнительное водоснабжение в межень Верхней Волги до ныне производится главным образом из Верхневолжского водохранилища, устроенного в половине прошлого века в истоке Волги. Его полезная емкость составляет около 370 милл. *куб. м.*, поверхность воды около · *кв. км.* Величина делаемых из него попусков в межень в р. Волгу выражается · кновенно в среднем около 60 *куб. м.* в секунду, увеличи-

ваясь иногда до 80 *куб. м.* в секунду. Этим обеспечивается в сухие годы судоходный горизонт Верхней Волги на 80—100 дней. Судоходным горизонтом для Верхней Волги считается горизонт, соответствующий показанию + 0,04 сажк. выше нуля по Тверскому водомеру; он дает возможность плаванию судов с осадкой до 0,8 *м.*; при этом секундный расход р. Волги у гор. Твери составляет 220 *куб. м.* в засушливое же время естественный расход р. Волги у гор. Твери падал иногда до 110 *куб. м.*, при котором горизонт опускается до 40 *см.* ниже судоходного. Таково значение попусков воды из водохранилища для поддержания судоходных глубин Верхней Волги до гор. Твери, находящегося на расстоянии около 376 *км.* от Верхневолжского водохранилища. Далее за Тверью влияние попусков на горизонт воды постепенно уменьшается и

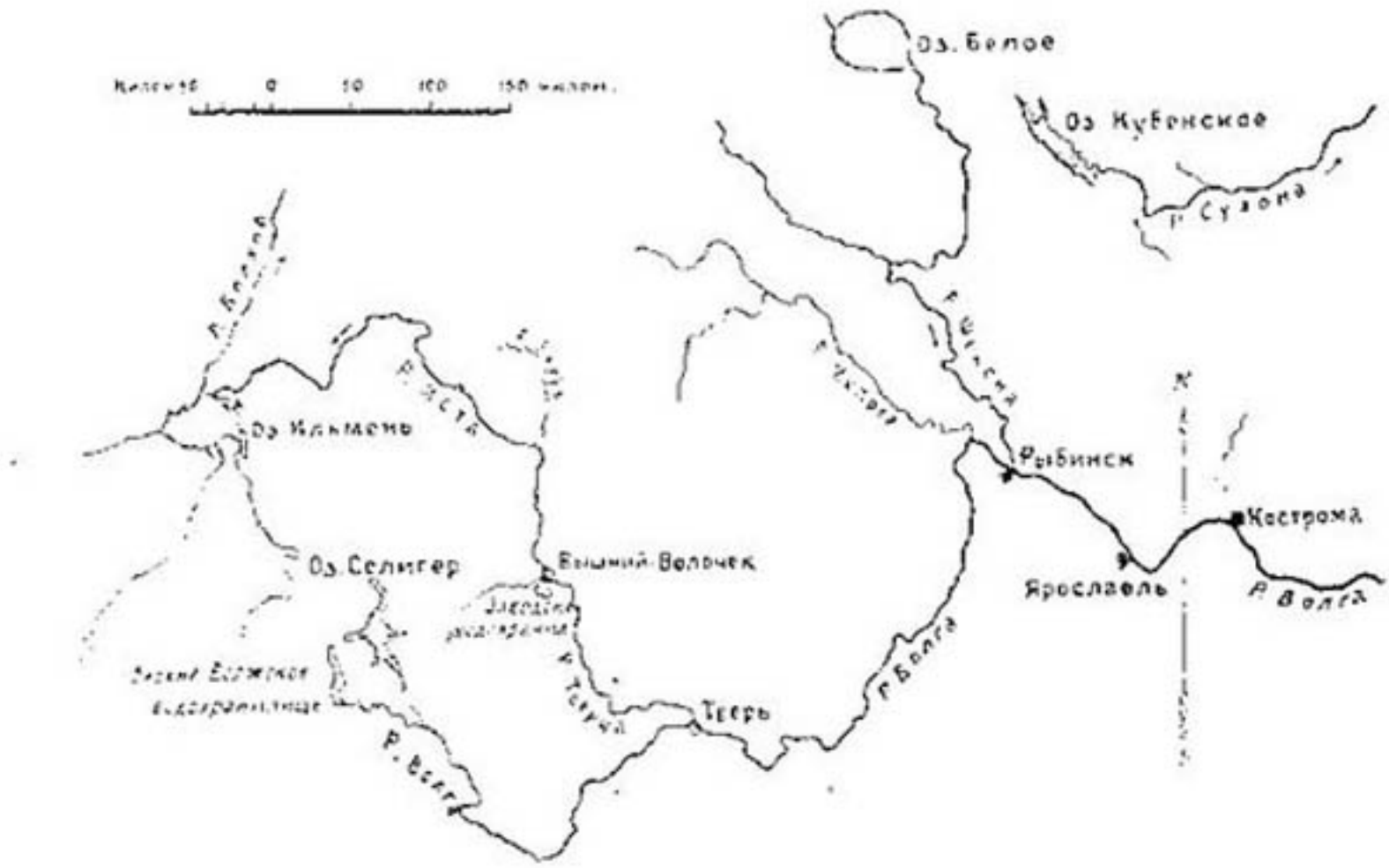


Рис. 278. Карта рек на Балтийско-Каспийско-Беломорском водоразделе.

около Рыбинска, находящегося в 671 *км.* от водохранилища, влияние попусков уже мало чувствительно. Наблюдение за действием попусков из Верхневолжского водохранилища показали, что понижение горизонта воды от прекращения попусков распространяется с такою же скоростью, как под'ем воды от возобновления питания и составляет в среднем для всего пути, от водохранилища до гор. Рыбинска, около 70 *км.* в сутки, т. е. скорость передвижения паводка выражается в среднем 0,8 *м.* в сек. Понижение и повышение уровня воды от вышеуказанных причин обнаруживается возле гор. Твери на 5-ые сутки, а возле гор. Рыбинска на 11-ые сутки.

В Соединенных Штатах Северной Америки применен способ дополнительного водоснабжения в очень широком масштабе на Верхней Миссисипи (рис. 279) для улучшения условий судоходства и сплава. С этой целью, пользуясь большими озерами в верховьях реки (рис. 280), устроено 5 обширных водохранилищ, водная поверхность которых составляет в общей сложности около 1.243 *кв. км.*, а емкость их достигает 2.697 милл. *куб. м.* Полезное значение попусков в межень воды из этих водохранилищ сказывается главным образом на участке реки, протяжением 620 *км.*, от водопадов „Большой порог" до гор. St-Paul. Период межени, когда требуются попуски, занимает около 90 дней в году. Влияние попусков выражается повышением меженного естественного горизонта у гор. St-Paul в среднем на 0,36 *м.* (от 0,127 *м.*—минимум до 1.02 *м.*—максимум). Средний естественный меженный расход воды р. Миссисипи в этом месте составляет около 150 *куб. м.*

в секунду. Выше, вблизи водопадов „Большой порог", влияние попусков более значительно. В местах, где ширина реки уменьшается, влияние попусков на поднятие горизонта больше, в местах расширений реки оно уменьшается. Влияние попусков вовсе прекращается на 82 *км.* ниже гор. St-Paul, где река проходит через широкое озеро.

В Германии были предприняты в 1911—1912 годах крупные работы на реках Везере и Одере по улучшению судоходных условий на некоторых участках этих рек помощью регулирования русла в связи с устройством дополнительного питания из

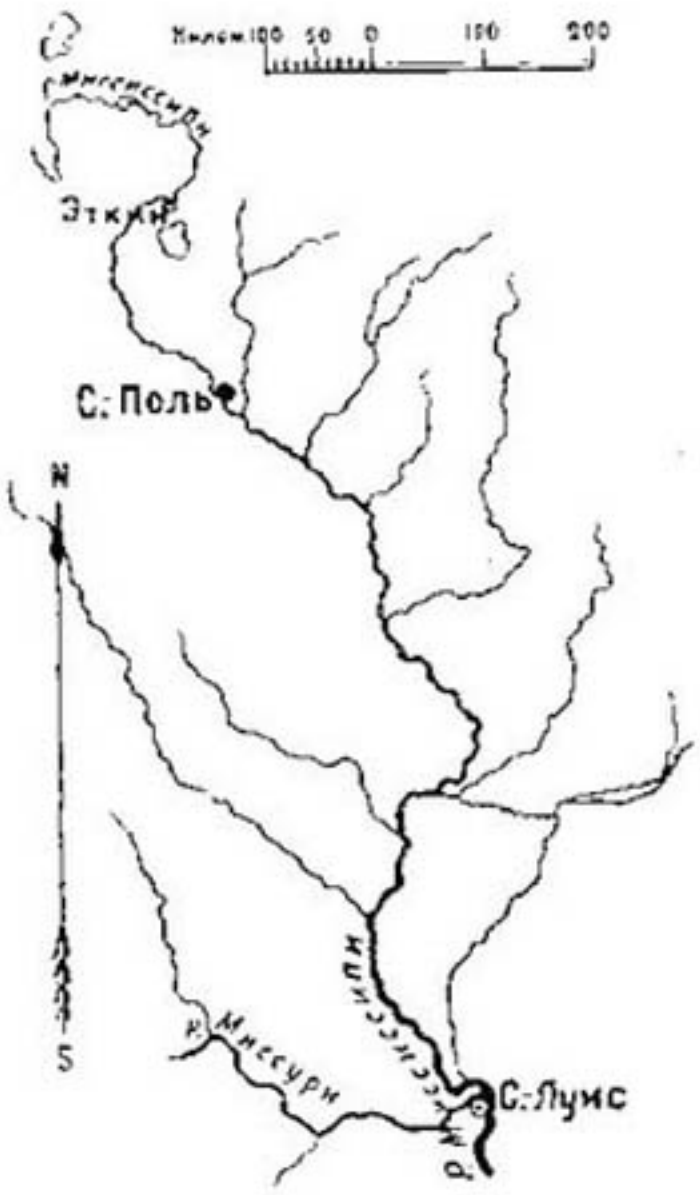


Рис. 279. Река Миссисипи от истока до слияния с р. Миссури.

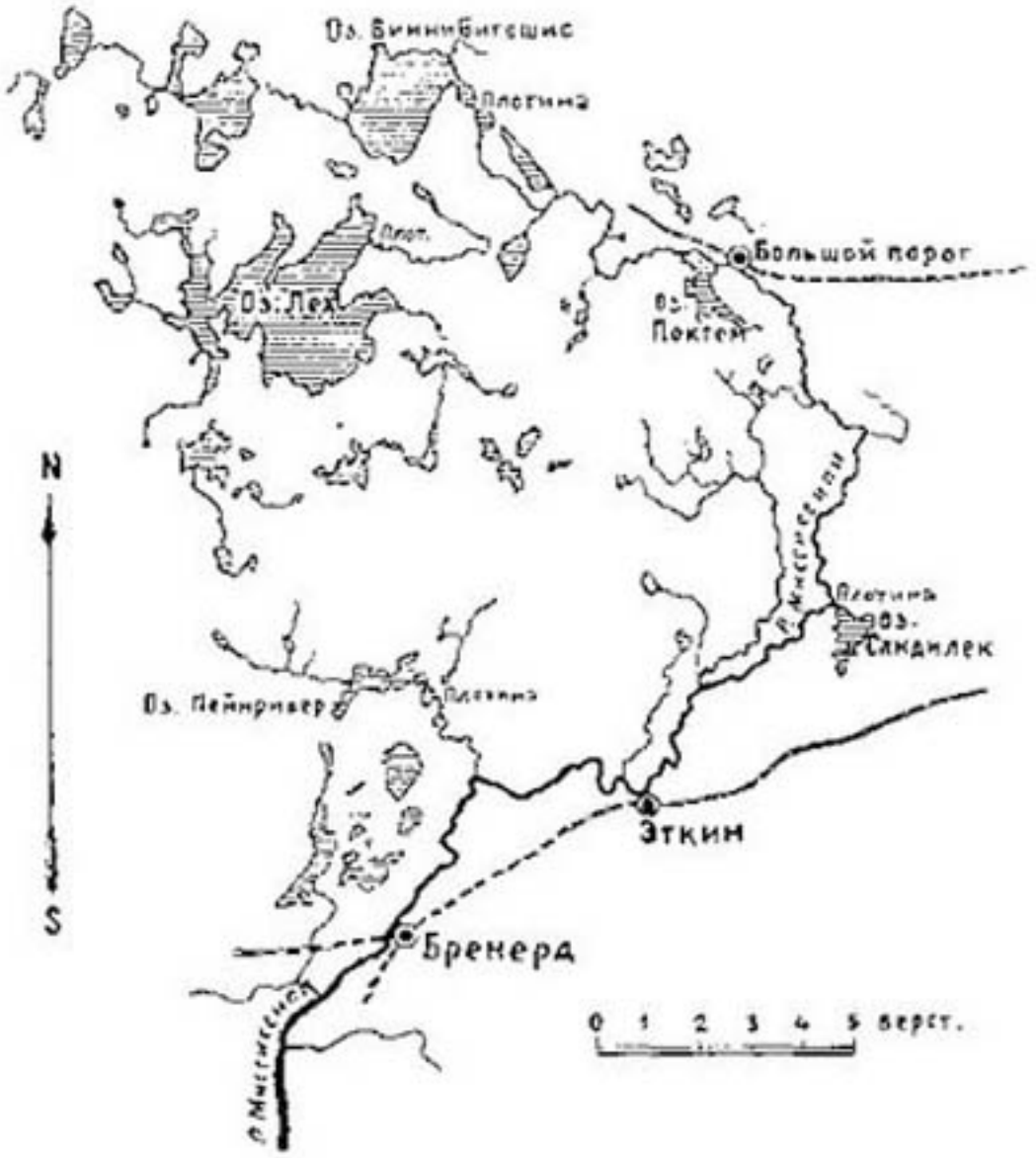


Рис. 280. Водохранилища в истоках р. Миссисипи.

водохранилищ в периоды очень низкого падения горизонта меженних вод. Река Везер, образующаяся из слияния рек Верры и Фульды около гор. Мюндена, на протяжении 367 *км.* от Мюндена до морского порта Бремена не была шлюзована. Ранее исполненными регуляционными работами глубина фарватера была увеличена, но в периоды самых низких меженних вод на верхней половине упомянутого участка реки она уменьшалась до 0,8 *м.*, а на нижней—до 1,0 *м.* Предпринятые с 1911 года работы состояли в развитии и переустройстве прежних регуляционных сооружений и в устройстве двух водохранилищ общей вместимостью 222 милл. *куб. м.* воды, образованных в холмистой местности помощью сооружений высоких каменных водоудерживательных плотин. Водохранилища так расчитаны, что, обслуживая одновременно некоторые другие потребности, они могут в засушливое время давать дополнительное питание р. Везеру, обеспечивающее минимальный расход в реке, не меньший 60 *куб. м.* в секунду. Благодаря такому одновременному регулированию и русла реки, и стока воды, наименьшие глубины на фарватере увеличиваются с упомянутых 0,8 и 1,0 *м.* соответственно до 1,25 и 1,5 *м.* Подобные же работы были предприняты на р. Одер для улучшения судоходных условий на участке от Бреслава до Фюрстенбурга. На этом участке, благодаря прежним регуляционным работам, минимальная глубина при

меженнем горизонте была обеспечена в 1,0 *м.*, за исключением некоторых особенно неблагоприятных мест, где при самых низких горизонтах глубина на фарватере падала до 0,8 *м.* Поэтому было решено поднять низкий уровень помощью дополнительного питания, для чего устроить в долине р. Нейсы два водохранилища общей вместимостью 152 милл. *куб. м.*

§ 40. Регулирующее влияние озера на сток воды в реке, вытекающей из него.

Причины более умеренных колебаний уровня воды на реках, вытекающих из больших озер, заключаются в том, что воды, поступающие в реку из той местности, которая служит питательным бассейном реки до места выхода ее из озера, предварительно стекают в озеро, где, благодаря обширной поверхности последнего, прибыль или убыль воды

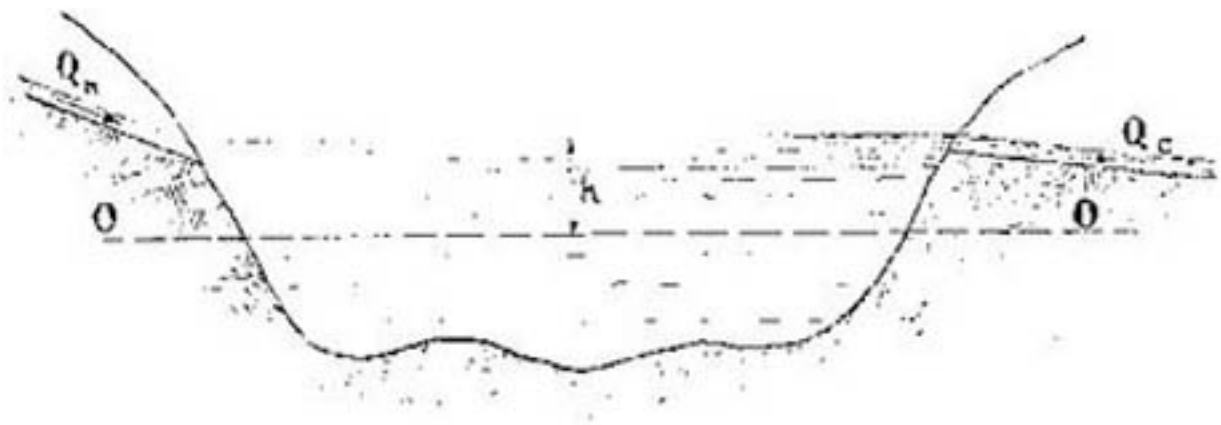


Рис. 281. Схема вертикального разреза озера.

сравнительно мало отражается на высоте уровня воды в озере. Между тем, интенсивность вытекания воды из озера в реку находится в прямой зависимости от положения поверхности воды в озере. Поэтому, озеро служит как бы аккумулятором, скопляющим воду в течение времени сильного притока и заспм отдающим накопленную воду реке в течение большего времени и с большей равномерностью. Аналогичное аккумулирующее действие производят встречающиеся на некоторых реках весьма большие, в виде озер, расширения русла; после прохода через озеро колебания величины расхода воды в реке, а следовательно и ее уровня, становятся более умеренными. Для об'яснения зависимости между стоком воды в озеро и ее вытеканием в реку воспользуемся исследованием этого вопроса, сделанным проф. Энгельсом [1]).

Пусть рис. 281 изображает озеро в вертикальном разрезе. Обозначим: F—величину площади поверхности воды в озере на высоте h от нуля водомерного поста, по которому отсчитывается уровень воды озера, Q_n — общий приток в 1 секунду воды в озеро из всех впадающих в него рек и ручьев, а также воды, непосредственно стекающей по склонам берегов озера, Q_c — сток воды в 1 секунду из озера в реку, вытекающую из озера. Допустим, для простоты рассуждения,

[1]) H. Engels: „Handbuch des Wasserbaues" (1923 г).

что потери воды из озера на просачивание в грунт незначительны и что количество атмосферных осадков, падающих непосредственно на поверхность озера, приблизительно равно количеству испарения воды с этой поверхности, а потому влиянием упомянутых факторов пренебрегаем.

Приток Q_n является в данном случае величиной независимой; сток Q_c и высота уровня h зависят от притока Q_n. В большинстве случаев определять непосредственными измерениями и наблюдениями величины притока Q_n затруднительно; о колебаниях высоты h уровня озера можно иметь сведения по записям регулярных наблюдений на

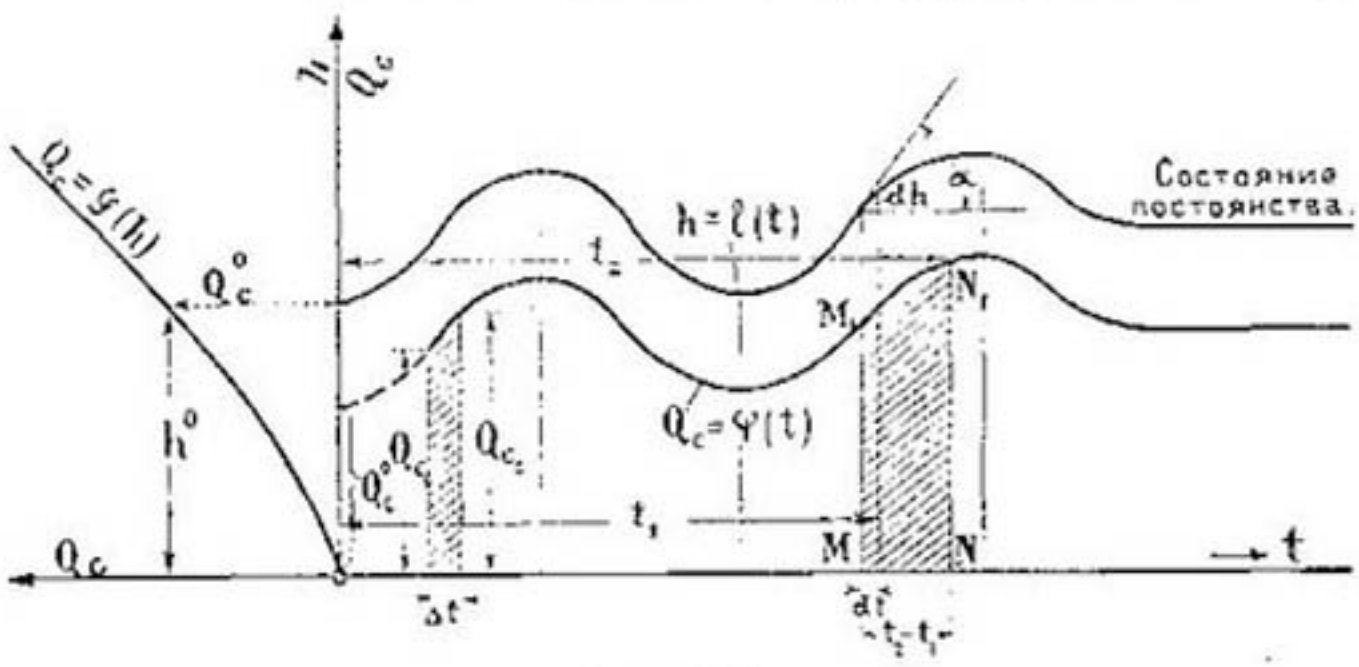


Рис. 282.

водомерных постах; расход воды в реке Q_c может быть измерен при различном положении уровня h, и на основании этого может быть установлена зависимость Q_c от h, т. е. $Q_c = \varphi(h)$, как показано на рис. 282-м. Также может быть установлена зависимость величины площади поверхности озера от высоты ее, т. е. можно выразить F как некоторую функцию h, но для простоты будем считать, что в пределах происходящих колебаний уровня озера площадь его поверхности настолько мало меняется, что ее можно принимать за постоянную величину. При большой площади озера и, сравнительно, небольшой амплитуде колебаний уровня такое допущение во многих случаях практически правильно. Таким образом, имеется возможность графически представить (рис. 282): кривую колебаний уровня воды в течение определенного периода времени, как функцию от времени $h = f(t)$, кривую колебания величины стока воды в реку тоже как функцию от времени $Q_c = \psi(t)$. Величина притока воды в озеро будет тоже изменяться по времени, но эту функцию $Q_n = \Phi(t)$ будем считать не определенной помощью непосредственных измерений.

Так как каждое изменение величины притока Q_n вызывает изменение высоты h, а потому и величины стока Q_c, как зависящего от напора, следовательно высоты h, то равенство $Q_n = Q_c$ может наступить лишь в тот период времени, когда приток Q_n остается величиной постоянной, причем в это время уровень воды в озере тоже

будет оставаться постоянно на одной высоте. Назовем такое положение состоянием постоянства. Пусть после некоторого времени t_1 (рис. 283) состояние постоянства нарушается увеличением притока Q_n. При увеличении притока уровень озера, благодаря большой площади его поверхности, поднимается очень медленно, поэтому влияние под'ема поверхности на увеличение стока в реку в начале мало. Вследствие этого увеличение стока в реку запаздывает против увеличения притока, а в озере происходит накопление воды. Накопление воды будет продолжаться до той поры t_2, когда все увеличивающийся сток в реку станет равным притоку, т. е. когда вновь наступит состояние постоянства. Об'ем накопившейся за время $t_2 - t_1$ воды в озере соответствует заштрихованной на рис. 283-м площади, выражающей собою разность между об'емом притекшей в озеро воды за время $t_2 - t_1$ и об'емом воды, вытекшей за то же время из озера.

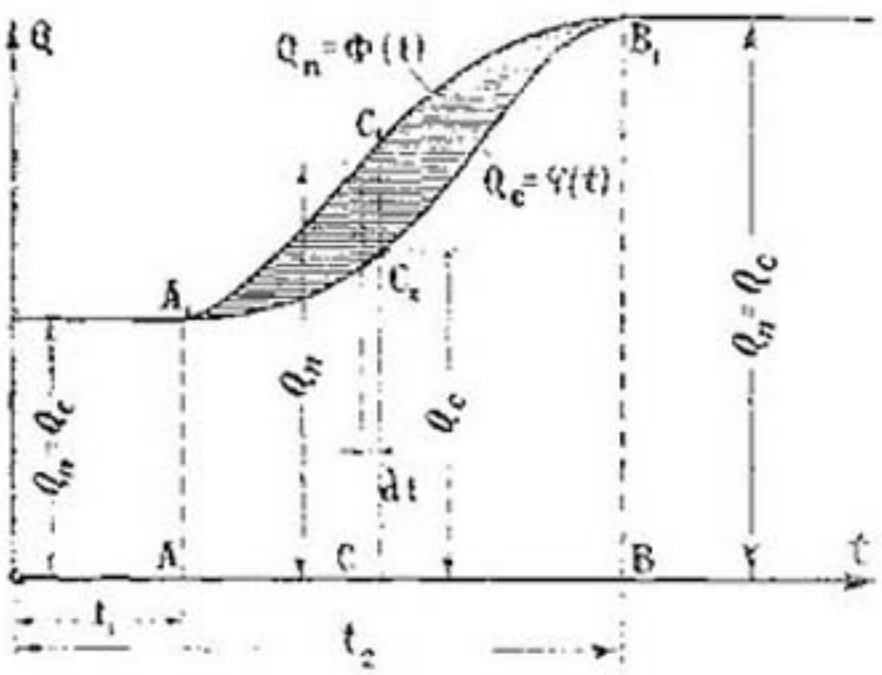


Рис. 283.

Называя:

V_n — об'ем притекшей воды,
V_c — об'ем вытекшей воды,
V — об'ем накопленной в озере воды за время $t_2 - t_1$,
h_1 — высоту уровня озера к моменту t_1,
h_2 — высоту уровня озера к моменту t_2,

имеем:

$$V = F\,(h_2 - h_1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

и по графику (рис. 283):

$$V_n = \text{площади } A\ A_1\ C_1\ B_1\ B = \int_{t_1}^{t_2} Q_n\,dt$$

$$V_c = \text{площади } A\ A_1\ C_2\ B_1\ B = \int_{t_1}^{t_2} Q_c\,dt$$

откуда:

$$V = F\,(h_2 - h_1) = \int_{t_1}^{t_2} Q_n\,dt - \int_{t_1}^{t_2} Q_c\,dt \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

Так как в каждый данный момент новое прибавление приточной воды $Q_n\,dt$ вызывает как некоторое новое накопление воды в озере с под'емом его уровня, т. е. Fdh, так и некоторое увеличение стока в реку $Q_c\,dt$, то

$$Q_n\,dt = Fdh + Q_c\,dt. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Равенство (3) выражает задерживающее (накопляющее) действие озера. Оно может иметь значение положительное или отрицательное: если $Q_n > Q_c$, то Fdt получает положительный знак, т. е. в озере прибавляется об'ем воды, если же $Q_n < Q_c$, то Fdt получает знак отрицательный, т. е. об'ем воды в озере уменьшается.

При данной кривой колебания уровня озера $h = f(t)$ и известной зависимости $Q_c = \varphi(h)$, построивши кривую стока $Q_c = \psi(t)$, можно по графику (рис. 282) определить секундный сток, как средний для какого нибудь небольшого промежутка времени Δt; его величина будет

$$Q_c = \frac{Q_{c_1} + Q_{c_2}}{2}\,\Delta t.$$

Количество вытекшей в реку воды за время $t_2 - t_1$, т. е. $\int_{t_1}^{t_2} Q_c\,dt$, определится в масштабе площадью $MM_1\,NN_1$. При состоянии покоя (охраняются равенства):

$$Q_n = Q_c,$$

$$\int Q_n\,dt = \int Q_c\,dt,$$

$$Q_n\,t = Q_c\,t.$$

Выражение (3) даст возможность построить кривую притока при вычерченной кривой колебаний уровня $h = f(t)$ и кривой зависимости $Q_c = \varphi(h)$, показанных на рис. 282-м, если кроме того известна площадь озера F.

Из выражения (3) имеем для каждого момента времени

$$Q_n = Q_c + F\frac{dh}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Величина F принята за постоянную, величина же $\frac{dh}{dt} = tg\alpha$ переменная, но для отдельных моментов времени она может быть определена, с известным приближением, либо вычислением, либо графически. Если, например, по имеющейся кривой колебания уровня из-

вестно, что в данное время под'ем уровня происходил со скоростью 0,5 *м.* в сутки, то $\frac{dh}{dt}$ равно, в среднем за эти сутки,

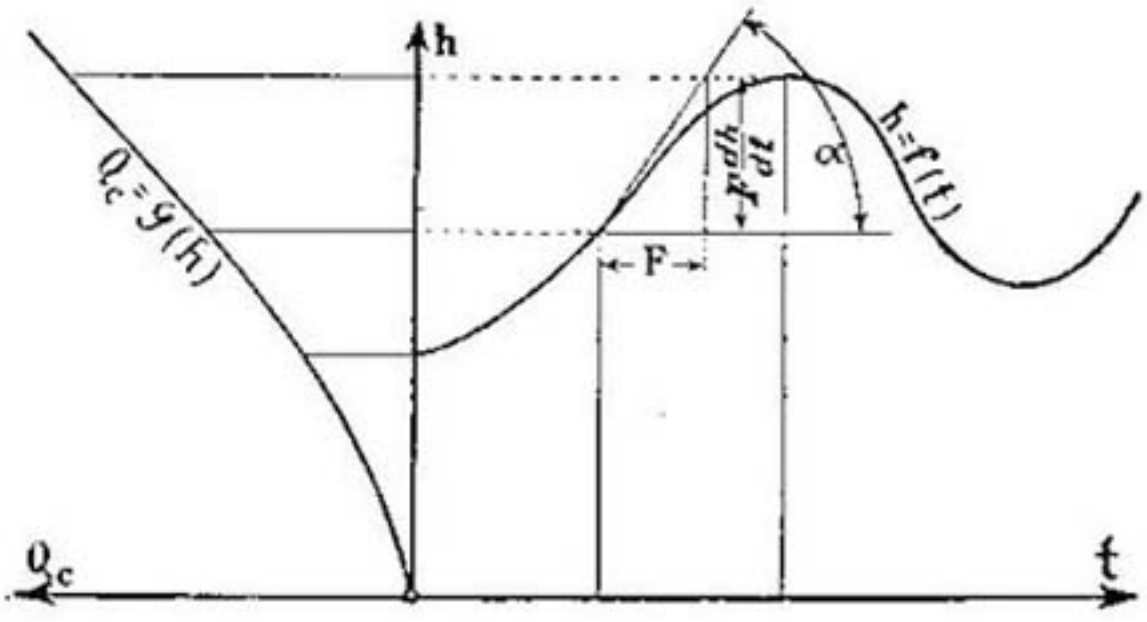


Рис. 284.

$$\frac{0{,}5}{24\times60\times60} = 0{,}0000006\ м.$$

в секунду.

Графически $\frac{dh}{dt} = tg\alpha$ определяется проведением касательной к кривой $h = f(t)$ в точке, соответствующей данному моменту, причем можно определить и величину $F\frac{dh}{dt}$, если на горизонтальной линии, проведенной из этой точки кривой $h = f(t)$, отложить в произвольно выбранном масштабе величину F и построить прямоугольный треугольник, как показано на рис. 284-м, причем высота треугольника равна

$$F tg\alpha = F\frac{dh}{dt}.$$

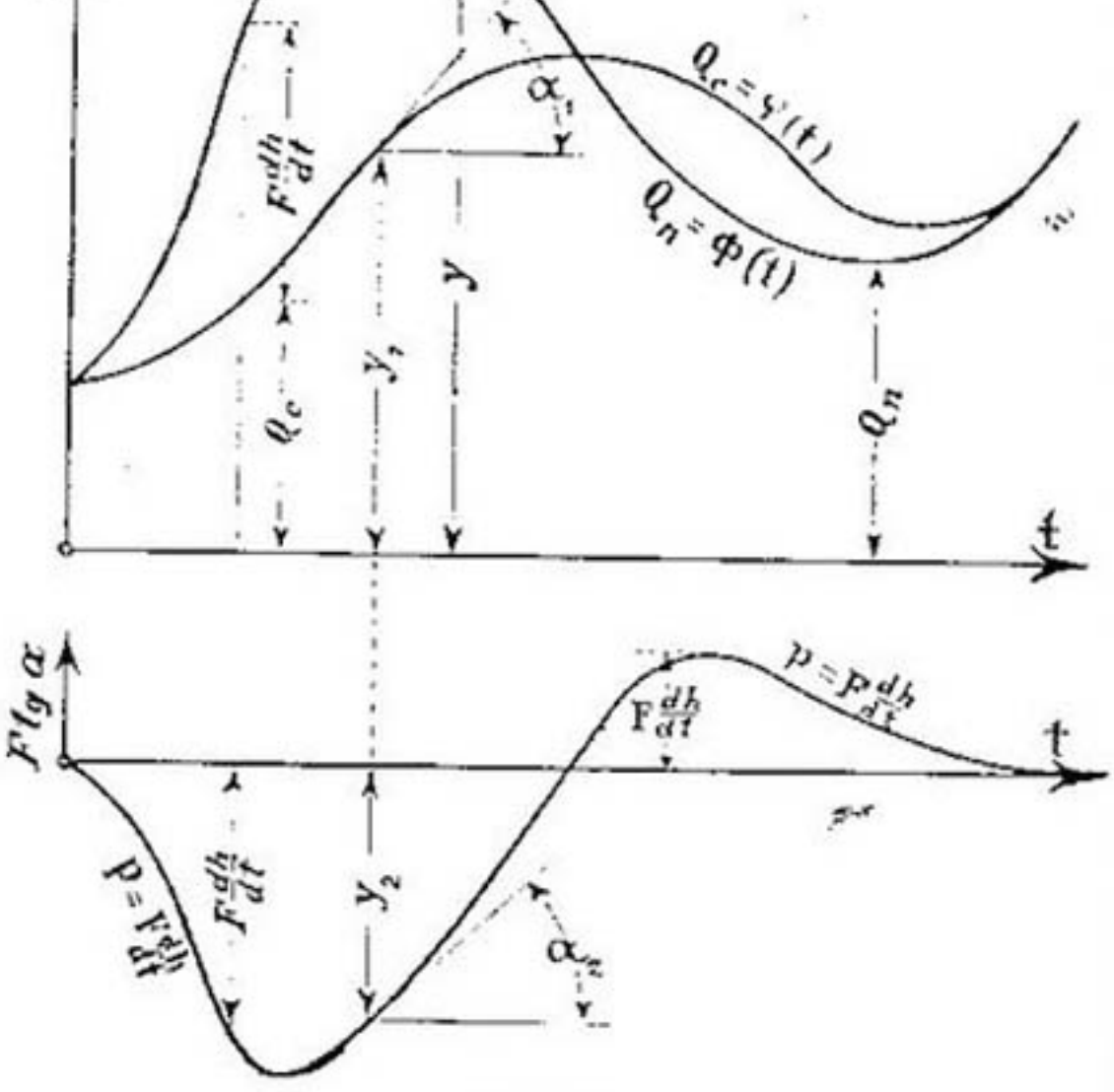


Рис 285.

Таким образом, можно для разных моментов времени определить соответствующие отдельные точки искомой кривой притока $Q_n = \Phi(t)$ и по ним вычертить всю эту кривую.

На рис. 285-м совмещены на одном графике кривая притока и кривая стока. Согласно выражения (4), разность ординат этих кривых, в каждый момент времени, равна $F\frac{dh}{dt} = p$. По этим отрезкам ординат построена внизу кривая $p = F\frac{dh}{dt}$, представляющая кривую задерживающего действия озера. Чем больше

площадь озера F, тем больше его задерживающее действие и тем более равномерен сток воды из озера в реку.

Из выражения (2) следует, что при $h_2 = h_1$, т. е. в моменты, когда кривая колебаний уровня озера $h = f(t)$ делает перегиб от восходящей части к нисходящей или обратно, или же когда она обращается в горизонтальную прямую, имеем

$$F(h_2 - h_1) = 0,$$

$$\int_{t_1}^{t_2} Q_n \, dt = \int_{t_1}^{t_2} Q_c \, dt.$$

Следовательно, в промежутке времени, когда высота уровня озера остается постоянной, об'ем притока равен об'ему стока.

Рис. 284 и 285 показывают, что наивысшее положение уровня озера соответствует моменту, когда кривая притока пересекает кривую стока, т. е. когда секундный приток станет равным секундному стоку, и что секундный приток достигает наибольшей своей величины ранее, чем достигает своей наибольшей величины секундный сток из озера в реку. Наибольший секундный приток, максимум $Q_n = y$, наступит в момент, когда сумма секундного стока $Q_c = y_1$ и секундного накопления $F\frac{dh}{dt} = y_2$ будет иметь максимальную величину, т. е. когда $\frac{dy_1}{dt} + \frac{dy_2}{dt} = 0$, следовательно, когда углы α_1 и α_2 будут равны. Как видно из чертежа, момент максимального притока находится в промежутке времени между моментом, когда скорость накопления воды в озере достигает максимума, и моментом, когда достигает своего максимума секундный сток из озера в реку.

Приведенные зависимости между притоком и стоком воды в озере и положением уровня последнего показывают, что бо́льшая или меньшая способность озера задерживать в себе прибылые воды во время паводков и тем самым регулировать сток паводков в реку зависит, при естественном состоянии озера, от величины его площади. Но если это регулирующее действие озера недостаточно, то оно может быть увеличено искусственно помощью технических мер, позволяющих увеличивать об'ем скопляющейся в озере воды во время сильных паводков, если по местным условиям допустимо увеличить под'ем уровня воды в озере. Для этой цели могут служить или устройство в истоке реки плотины с соответственными ее отверстиями и затворами, или регуляционные работы в истоке реки для искусственного изменения ее живого сечения с расчетом повлиять на уменьшение стока воды из озера в реку при сильных паводках.

Вышеприведенные исследования дают возможность разрешать графическим способом некоторые задачи.

1) Даны: $Q_n = \Phi(t)$ и $Q_c = \varphi(h)$
нужно найти: $h = f(t)$ и $Q_c = \psi(t)$.

Для промежуточного момента Δt приток равен

$$\Delta Q_n = \frac{Q_{n_1} + Q_{n_2}}{2} \Delta t,$$

если обозначим:

Q_{n_1} — об'ем притока в начале времени Δt,
Q_{n_2} — об'ем притока в конце времени Δt.

Соответственно:

$$\Delta Q_c = \frac{Q_{c_1} + Q_{c_2}}{2} \Delta t.$$

Согласно выражения (4):

$$Q_c = Q_n - F \frac{dh}{dt},$$

или

$$F \Delta h = \frac{Q_{n_1} + Q_{n_2}}{2} \Delta t - \frac{Q_{c_1} + Q_{c_2}}{2} \Delta t.$$

В этом уравнении нам не известны Δh и средняя для Δt величина стока $\frac{Q_{c_1} + Q_{c_2}}{2}$. Решаем подбором уравнение для построения по точкам кривой $Q_c = \psi(t)$, а именно, задаваясь для каждого из отдельных промежутков времени Δt величиной Δh, ищем по кривой $Q_c = \varphi(h)$ такую среднюю величину $\frac{Q_{c_1} + Q_{c_2}}{2}$, чтобы удовлетворить уравнение, и тем получаем ординаты кривой $Q_c = \psi(t)$ для середины каждого промежутка времени Δt. Когда построена кривая $Q_c = \psi(t)$, то зная $Q_c = \varphi(h)$, нетрудно построить и $h = f(t)$.

2) Даны: $Q_c = \psi(t)$ и $Q_c = \varphi(h)$ и новая кривая $Q'_c = \varphi'(h)$.

Нужно выяснить какие при этом последнем соотношении установятся зависимости: $Q'_c = \psi'(t)$ и $h = f(t)$.

Соответственно основному уравнению,

$$Q_n\, dt - Q_c\, dt = F dh,$$
$$Q_n\, dt - Q'_c\, dt = F dh'$$

вычитая, получаем

$$Q'_c\, dt - Q_c\, dt = F(dh - dh').$$

$dh - dh'$ выражает элементарное повышение уровня озера в течение dt. Для конечной величины промежутка времени Δt будет:

$$(Q'_c - Q_c)\, \Delta t = F(\Delta h - \Delta h') \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(a)}$$

Для начала и для конца промежутка времени Δt нам известны:

$$Q_c = Q_{c_1} \text{ (в начале)}$$
$$Q_c = Q_{c_2} \text{ (в конце).}$$

Обозначим для того же промежутка Δt неизвестные нам

$$Q'_c = Q'_{c_1} \text{ (для начала)}$$
$$Q'_c = Q'_{c_2} \text{ (для конца)}$$

подставляем в уравнение (а):

$$\left(\frac{Q'_{c_1} + Q'_{c_2}}{2}\right) - \frac{(Q_{c_1} + Q_{c_2})}{2} = F\ (\Delta h - \Delta h')$$

отсюда получаем

$$\Delta h' = \Delta h - \left\{\frac{Q'_{c_1} + Q'_{c_2}}{2} - \frac{Q_{c_1} + Q_{c_2}}{2}\right\}\frac{1}{F}.$$

В этом уравнении неизвестны $\Delta h'$ и полусумма $\frac{Q'_{c_1} + Q'_{c_2}}{2}$.

Путем подбора, задаваясь величиной $\Delta h'$ ищем, по данной нам кривой $Q'_c = \varphi'(h)$ такую величину $\frac{Q'_{c_1} + Q'_{c_2}}{2}$, чтобы она удовлетворяла уравнению, и тем находим для средины каждого промежутка времени ординату искомой кривой $Q'_c = \psi'(t)$. Построивши по точкам эту кривую, не трудно определить функцию $h = f(t)$.

Практическое применение означенных задач может встречаться как в случаях изучения режима озера при недостатке некоторых гидрометрических данных, так и при проектировании сооружений в истоке реки, могущих влиять на режим озера. Приведем примеры таких случаев.

При изучении режима озера оказалось, что впадающие в него реки настолько уже исследованы гидрометрическими работами, что имеется возможность определить приточность озера в хронологическом порядке за достаточно длинный период времени ($Q_n = \Phi(t)$) и что также имеется для реки, вытекающей из озера, кривая зависимости расхода от положения уровня озера ($Q_c = \varphi(h)$), но отсутствуют для сего периода времени достаточные данные для построения хронологической линии колебаний уровня озера [прекращение действия постоянного водомерного поста, утеря результатов наблюдений и т. п.] и не имеется возможности построить хронологическую кривую стока из озера в реку, почему требуется найти $h = f(t)$ и $Q_c = \psi(t)$. Для решения такой задачи делим рассматриваемый период на части Δt и для каждой из них пользуемся уравнением

$$F\Delta h = \frac{Q_{n_1} + Q_{n_2}}{2}\Delta t - \frac{Q_{c_1} + Q_{c_2}}{2}\Delta t.$$

При известных F, Q_{n_1} и Q_{n_2}, — задаваясь путем подбора некоторыми значениями для h, определяем по кривой расхода $Q_c = \varphi(h)$ соответствующие этим значениям величины Q_{c_1} и Q_{c_2}, удовлетворяющие уравнению. Проделав это для всего периода времени, получаем данные для хронологических кривых $h = f(t)$ и $Q_c = \psi(t)$.

Надобность решения второй из вышеуказанных задач появляется при проектировании некоторых сооружений в истоке вытекающей из озера реки (углубление фарватера, регулирование русла и пр.), когда необходимо выяснить, какое изменение режима озера и стока из него вызовут эти сооружения. Например, при известных $Q_c = \psi(t)$, $Q_c = \varphi'(h)$ и $Q_c = \varphi(h)$, требуется определить $h = f(t)$ и $Q'_c = \psi'(t)$. Для решения вопроса пользуемся уравнением

$$\Delta h_1 = \Delta h - \left\{ \frac{[Q'_{c_1} + Q'_{c_2}]}{2} - \frac{[Q_{c_1} + Q_{c_2}]}{2} \right\} \frac{1}{F}.$$

Путем подбора значений Δh_1 и соответствующих им по функции $Q'_c = \varphi'(h)$ значений Q'_{c_1} и Q'_{c_2}, удовлетворяющих уравнению, находим величины h и Q'_c для отдельных частей Δt рассматриваемого периода времени и строим для него кривые искомой зависимости $Q'_c = \psi'(t)$ и $h = f(t)$.

§ 41. Речные разливы и наводнения; причины наводнений и меры предохранения от них прибрежных местностей.

Низкие местности, расположенные по берегам реки, естественно подвергаются затоплению, когда уровень воды в реке поднимается выше обычного ее русла. Если затопляемая местность имеет пологий склон к берегу, она покрывается водою постепенно, по мере под'ема уровня воды в реке. Нередко, однако, бывает, что низкая равнина отделена от реки небольшим возвышением, расположенным узкой полосой около самого берега, что особенно часто наблюдается на островах речной дельты и на таких частях реки, где она прокладывает свое меженнее русло в низкой, широкой и ровной долине, образуя вдоль берегов этого русла невысокие валики из наносных отложений во время половодия и паводков. В этих случаях равнина быстро затопляется по всей своей площади, как только уровень воды в реке поднимется выше преграды (рис. 286).

Такие, вообще, затопления могут представлять собою или явления, повторяющиеся периодически всегда в определенное время года, например, если местность расположена ниже обыкновенного уровня весеннего половодия, или же явление случайное, как следствие неожиданно высокого под'ема воды в реке по той или иной причине.

Первого рода затопления, их обыкновенно у нас называют разливы, хотя и могут быть вредными, но не представляют прямой опасности прибрежному населению, так как последнее ожидает раз-

лива к определенному времени и приспосабливается к нему. На берегах наших больших рек имеется много селений, которые ежегодно во время весенних разливов остаются отрезанными от сухопутного сообщения; имеются и такие селения, которые расположены на затопляемом месте, причем жилые дома и постройки приспосабливают к столь трудным условиям жизни. В подобных условиях находятся и некоторые большие наши города; так, например, в Киеве довольно значительная часть города, так называемая Плоская часть Подола, весною затопляется, причем сообщение между домами происходит на лодках; в подобных же условиях находятся некоторые части Нижнего-Новгорода и других приречных городов.

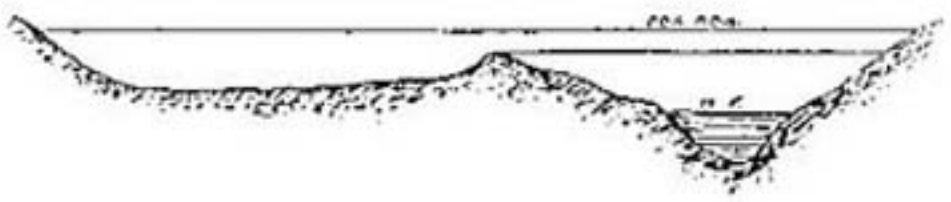


Рис. 286.

Нередко разливы реки представляют не вредные, а благотворные явления. При соответствующих почвенных и климатических условиях речные разливы, увлажняя почву или складывая на ней ил, благодетельно влияют на плодородие местности. Долина р. Нила, узкой полосой проходящая через знойные песчаные пустыни, имеет всемирную известность по своему плодородию; в этом она обязана разливам р. Нила, когда долина покрывается тонким слоем илистых осадков, возрождающих из года в год, в продолжение тысячелетий, плодородие этой местности. Примером благодетельного влияния речных разливов у нас в СССР могут служить заливные луга в долинах некоторых рек, где, без каких-либо искусственных удобрений, тучные травы дают большую доходность и высокую ценность луговым землям.

Бывают, однако, и такие затопления, которые представляют грозную опасность для населения. В большинстве случаев опасные последствия затоплений обусловливаются неожиданностью их появления. Необычайно высокое половодие или же подпор воды в реке, происходящий от ледяных зажоров, обвалов берегов, горных снежных лавин или от других причин внезапного засорения русла,—врасплох застигают прибрежных жителей, затопляют жилые помещения, губят скот, портят и уносят имущество. В гористых местностях сильные и продолжительные ливни, быстро наполняя реку водою, стекающей с гор, обращают ее в грозный поток, выходящий из обычных берегов реки и внезапно затопляющий долину реки.

Вред и бедствия от наводнений заставляют изыскивать средства, могущие предупредить возобновление подобных явлений.

Различая, таким образом, полезные и вредные разливы реки, условимся в дальнейшем под понятием наводнение разуметь такие разливы реки, с которыми нужно бороться, устранять их повторение, или же, в случае невозможности достигнуть этого, изыскать способы предугадать наводнения для своевременного предупреждения о них жителей.

Причины речных наводнений. Как сказано выше, наводнение является следствием высокого поднятия уровня воды в реке. Положение уровня воды зависит от гидродинамических элементов речного потока. Рассматривая эту зависимость для прямоугольного русла и называя для данного места реки через: Q—расход воды, V—среднюю скорость течения, b—среднюю ширину русла, t—среднюю его глубину, F—величину площади живого сечения, J—уклон поверхности воды, C—коэффициент Шези, имеем:

$$V = C\sqrt{tJ}$$
$$F = bt$$

$$Q = FV = btC\sqrt{tJ} = bC\sqrt{J}\,t^{\frac{3}{2}},$$

откуда

$$t = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2C^2J}}.$$

Это выражение показывает, что средняя глубина, а, следовательно, и высота уровня воды в реке увеличиваются, при прочих равных условиях, когда увеличивается расход воды Q, или уменьшаются ширина реки или же поверхностный уклон воды.

Кроме того, под'ем уровня воды в реке может быть следствием подпора речной воды, который происходит как от местного сужения реки, так и от местных повышений дна, вообще от местного сокращения площади живого сечения вследствие уменьшения означенных ее элементов, или же по причине случайного загромождения русла реки какими либо предметами.

Таким образом, причинами наводнения могут быть следующие явления.

1. Сильные увеличения расхода воды в реке. Более других элементов меняется в реке величина расхода воды, поэтому чаще всего наводнения происходят от неожиданного сильного увеличения расхода воды. Такие увеличения расхода воды случаются, например, в период половодия весною, если наступает дружное таяние снега и с ним совпадают обильные дожди. Необычайно высокие паводки происходят иногда от сильных и продолжительных ливней, выпадающих по всей холмистой местности, составляющей питательный бассейн для данного места реки. В горных реках причинами сильного увеличения расхода воды могут также служить таяние лавин, прорыв воды из глетчерных озер и т. п.

2. Неправильности русла реки. Они выражаются, обычно, в местных обмелениях, суженнях, крутых и сильно развитых извилинах реки. К ним можно также отнести неудачно расположенные

в русле реки искусственные сооружения, случайные загромождения русла при ледяных зажорах, при обвалах берегов и т. п.

Наводнения, происходящие от дождей, становятся особенно сильными, когда к данному месту реки одновременно подходят большие паводки, образовавшиеся в нескольких крупных ее притоках.

В качестве примера наводнений такого происхождения можно указать на сильные наводнения города Парижа, изредка повторяющиеся и причиняющие городу большие бедствия. Особенно сильным и длительным было наводнение в начале 1910 года, когда уровень воды в р. Сене около Парижа поднялся до высоты 8,5 *м*, небывалой в течение более трех последних столетий. Наивысший под'ем

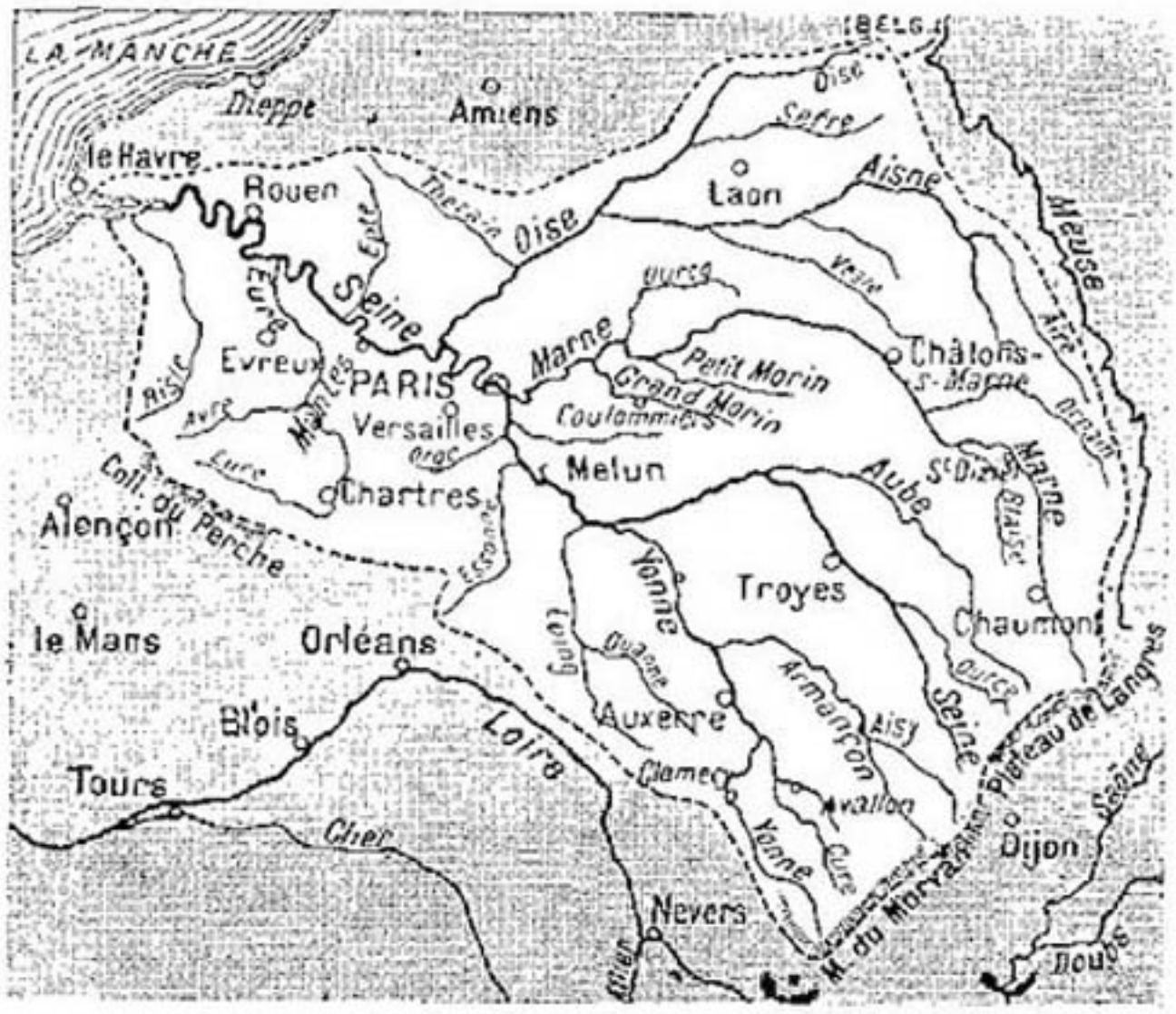


Рис. 287. Бассейн р. Сены.

9,1 *м* наблюдался в 1658 году, следующий, по высоте, под'ем 8,2 *м* был в 1846 году. В 1925—1926 г. сильное наводнение повторилось, но не достигло высоты наводнения 1910 года. Во время наводнения 1910 года, длившегося в течение всей второй половины января месяца и причинившего огромные бедствия и убытки, р. Сена разлилась на значительную часть города, покрыла высоким слоем воды многие улицы и площади и совершенно затопила некоторые подземные галлерен, дороги и железнодорожные вокзалы. Уровень воды р. Сены, в пределах Парижа, стал быстро подниматься с 12 января и достиг максимума 28 января, когда он поднялся на 8,5 *м* выше нулевого горизонта. Причины парижских наводнений заклю-

чаются в следующем. Бассейн р. Сены выше Парижа (рис. 287) орошается тремя главнейшими ее притоками: Марна, Верхняя Сена и Ион. Местность в бассейнах этих рек неодинакова как по климатическим, так и по топографическим и почвенным условиям. Средняя высота осадков, выпадающих в течение года, составляет у Парижа только 0,58 *м*, между тем как в верховьях р. Иона она достигает 1,78 *м*. При общей площади бассейна, питающего р. Сену у Парижа, около 79 тыс. *кв. км*, большая ее часть (59 тыс. *кв. км*) в бассейнах рек Марны и Верхней Сены имеет водопроницаемую почву, скалистая же почва остальной части площади (20 тыс. *км*), гористой местности верховьев р. Иона, водонепроницаема. Соответственно таким условиям неодинаков коэффициент стока этих местностей; так, например, средняя величина коэффициента стока определяется для верховьев р. Иона в 0,75, для р. Сены у Парижа 0,45, а для притоков в западной части бассейна р. Сены лишь 0,15; однако, коэффициент стока и в той части бассейна, питающего Сену у Парижа, которая имеет водопроницаемую почву, может стать бо́льшим в случаях насыщения почвы водою при предшествующем длительном периоде весьма ненастной погоды. Неодинаков, поэтому, характер паводков в притоках р. Сены: паводки Марны обыкновенно спокойные, медленно нарастающие и медленно движущиеся к Сене. Напротив, паводки Иона весьма стремительны, река быстро вздувается и волна паводка с большою скоростью перемещается к Сене. Вследствие этого, хотя образование паводков начинается на всех притоках Сены одновременно, но на самой Сене около Парижа волна паводка из реки Иона проходит обыкновенно дней на пять раньше, чем подойдут к Парижу паводки из Марны и Верхней Сены. Очень высокий под'ем воды Сены около Парижа происходит лишь в тех редких случаях, когда, в силу каких-либо особых обстоятельств, совпадает подход к Парижу паводков как реки Иона, так и рек Марны и Верхней Сены. Такие именно условия и вызвали чрезвычайно сильное наводнение Парижа в 1910 г. В половине января выпали очень обильные и продолжительные дожди по всему бассейну р. Сены. Паводки р. Иона подошли к Парижу 20 января. Едва засим начал спадать уровень воды в Сене, как подошли к Парижу паводки Марны и Верхней Сены, вновь поднявшие уровень воды. К несчастью, в то же время стал подходить к Парижу новый паводок, образовавшийся на р. Ионе. Под влиянием этих совпавших паводков уровень воды в Сене около Парижа поднялся к 28 января до высоты 8,5 метр., небывалой в течение более трех последних столетий.

Наводнение Парижа в зиму 1925/26 г. имело одной из главнейших причин увеличение коэффициента стока, вследствие сильного насыщения водою проницаемой почвы бассейна в течение ненастного 1925 года; по данным исследований, насыщенность почвы увеличилась за время с 1 января по 1 декабря 1925 г. с 35.000 до 200.000 *куб. м*, считая на площадь 1 *кв. км* поверхности земли.

Меры предохранения от наводнений. В зависимости от тех или иных причин наводнения находятся и меры, которые предпринимаются для борьбы с этим явлением. Они могут заключаться или в воздействии на причины под'ема воды в реке с целью ослабить его, или же в непосредственной защите низменной местности от затопления помощью дамб, отделяющих эту местность от реки. В свою очередь способы воздействия на причины наводнения могут быть сведены к двум методам, которые на первый взгляд кажутся противоположными друг другу, но которые, однако, преследуют одинаковую цель—уменьшить высоту под'ема воды в реке. Один из них направлен к ускорению стока воды в самой реке, другой к замедлению стока воды, еще только поступающей в реку.

Значение таких методов видно по самому характеру наступления и прекращения наводнений. Когда, благодаря различным метеорологическим явлениям, например сильным ливням, стекают большие массы воды с обширного бассейна реки, воды эти, по мере их выпадения, собираются в русло реки из ее притоков и побочных тальвегов и, производя в реке быстрый под'ем ее уровня, вызывают наводнение. Повышение уровня продолжается до той поры, когда живое сечение и скорость течения в нижележащей части реки станут достаточными, чтобы пропустить всю прибыль воды, накопившуюся в верхней части реки. Этот момент обыкновенно совпадает с максимумом под'ема уровня в данном месте. Вслед за сим наступает период понижения уровня, во время которого об'ем истекающей воды более ее прибыли, причем наводнение, постепенно спадая, наконец исчезает. Таким образом, наводнение можно рассматривать как явление некоторой волны, пробегающей по долине. Волна поднимается или при встрече с каким-либо препятствием в реке, или благодаря притоку, увеличивающему об'ем воды, несомой рекою; напротив, волна опускается, если вступает в большее живое сечение, или в место больших скоростей течения. Для реагирования на эту волну естественно представляются два способа: или возможно более ускорить истечение воды к низовьям реки и, таким образом, отводить ее как только она появляется, или же, сдерживая прибыль воды в реку, растянуть на более продолжительное время сток по реке всей выпавшей в ее бассейне воды и тем уменьшить интенсивность стока, сделавши его более равномерным, а, следовательно, уменьшить максимум величины секундного расхода воды в реке, соответственно чему уменьшится и высота ее уровня.

Таким образом, разные способы, к которым прибегают для предохранения местностей от наводнений, сводятся к следующим трем главным методам:

1) продление на большее время стока вод в реку (магазинаж атмосферных осадков);

2) увеличение скорости прохода воды в реке и устранение причин местного подпора поверхности воды;

3) непосредственная защита затопляемых местностей помощью ограждения их дамбами.

Рассмотрим каждый из этих методов в отдельности.

§ 42. Магазинаж атмосферных осадков.

Меры, направленные к замедлению стока воды в реку, заключаются в искусственном задержании атмосферных вод, выпавших в бассейне реки, ранее чем они достигнут того места реки, где вызывают наводнения. Способы такого задержания (магазинаж) атмосферных осадков могут состоять: а) в устройстве водохранилищ, б) в за-

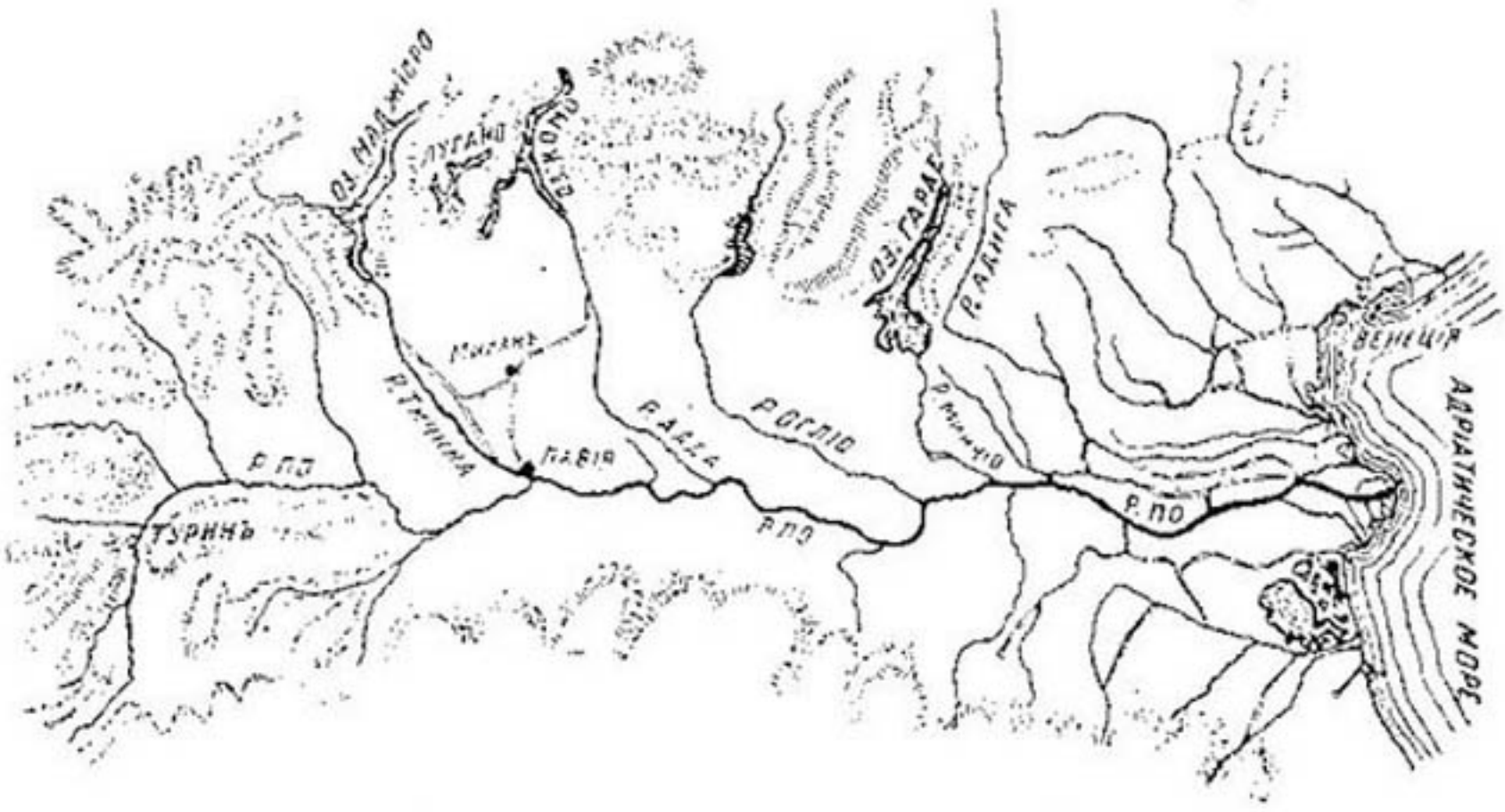


Рис. 288. Озера на притоках реки По.

медлении стока воды в тальвегах помощью прудов и стеснения тальвегов полузапрудами, или же водопроницаемыми запрудами, в) в искусственном впитывании воды в почву помощью вырытия ярусных канав на склонах долин и г) в соответствующей обработке земли, и в культуре растительности на площади бассейна реки.

а) Водохранилища. Природа дает много замечательных примеров, какое полезное значение, в рассматриваемом вопросе, имеют обширные естественные бассейны—озера, расположенные в верховьях реки. Как об'яснено в § 40-м, озера являются как бы временным хранилищем, в котором задерживается вода, приносимая реками, впадающими в озеро, и засим равномерно, в течение продолжительного времени, вода из такого хранилища стекает в реку, берущую свое начало из озера.

В числе наиболее известных примеров подобного рода значения озер можно указать на озера северной Италии, а у нас в СССР на озера в бассейне р. Невы.

Река По (рис. 288) питается главным образом из притоков, берущих свое начало в Альпийских горах и образующих у подножия гор большие озера. Таковы, например, р. Тичина с озером Маджиоре, р. Адда с озером Комо, р. Минчио с озером Гарде. При сильных ливнях в горах и при таянии снегов горные речки обращаются в бурные потоки, несущие большие массы воды. Озера принимают в себя эти воды и засим, с некоторою равномерностью, в течение более или менее продолжительного времени отпускают те же воды далее в р. По.

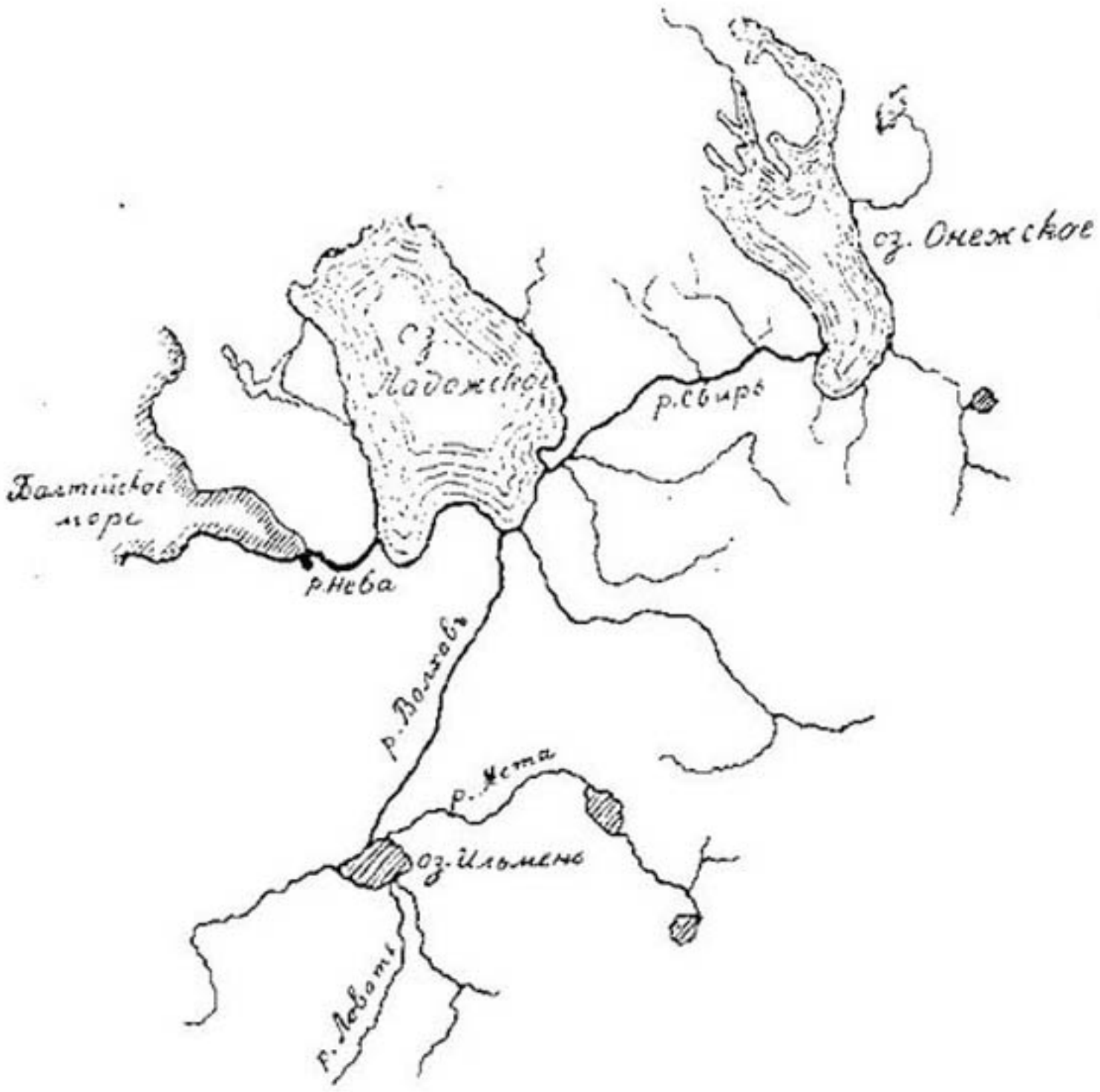


Рис. 289. Озера в бассейне р. Невы.

По исследованию инженера Ломбардини, озеро Комо при сильных ливнях уменьшает таким образом секундный расход р. Адды в отношении 2,4 : 1.

Река Нева (рис. 289), вытекающая из Ладожского озера и имеющая протяжение всего лишь около 70 верст, принадлежит к числу самых многоводных рек РСФСР. Бассейн, питающий реку Неву занимает обширную площадь около 281.000 *кв. км* общая длина всех питающих Неву рек в этом бассейне составляет более 20.000 *км* Тем не менее, в отличие от прочих больших рек СССР, на которых

уровень воды в весеннее половодие поднимается на много метров выше меженнего горизонта. Нева имеет весьма небольшие колебания своего уровня в разное время года. Происходящие же в устьях р. Невы наводнения, когда горизонт воды поднимается до 3 и даже до 4 метров, зависят не от прибыли воды сверху реки, а от нагона воды ветрами с моря. Такое постоянство расхода воды в Неве обусловливается расположением в ее бассейне обширнейших озер (Ладожское, Онежское, Ильмень и др.), служащих аккумуляторами атмосферных вод, выпадающих в бассейне Невы.

Следуя примерам природных водохранилищ, можно было бы, с целью предохранения от наводнений, устраивать подобные же водохранилища искусственно. Однако, для этого требуются подходящие топографические условия местности и большие денежные затраты, сопряженные с отчуждением земель, устройством плотин и прочих сооружений, нужных для образования искусственных водохранилищ. Тем не менее имеются примеры борьбы с наводнениями помощью устройства больших водохранилищ. К ним, между прочим, относятся исполненные в начале нынешнего века работы для предохранения от наводнений города Вены.

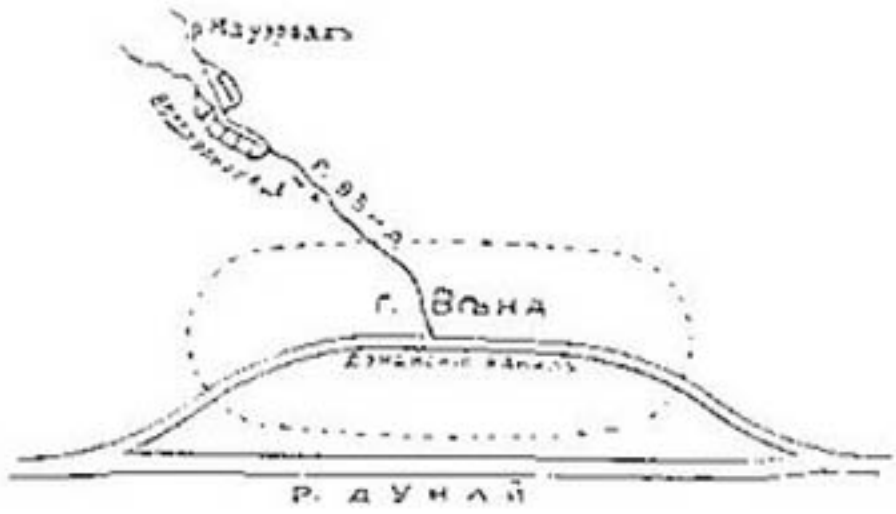


Рис. 290.

Город Вена (рис. 290) расположен на р. Дунае, занимая оба берега его рукава, называющегося „Дунайский канал". Через центральную часть города протекает небольшая речка Вена, вытекающая из гор, откуда берет начало и ее приток р. Мауэрбах. Обычно р. Вена представляет собою небольшой ручей с ничтожным расходом воды. Но при сильных ливнях в горах расход воды в р. Вене весьма быстро возрастает, достигая 610 *куб. м* в секунду, из коих верхняя часть р. Вены дает 480 *куб. м*, а р. Мауэрбах—130 *куб. м*. Протекая в пределах города среди низких берегов, р. Вена при сильных ливнях выступала из берегов, наводняя центральные части города. Поэтому, в конце прошлого века, в связи с устройством городских железных дорог и канализации города, были предприняты также работы по регулированию р. Вены с целью предохранить город от наводнений. Для этого р. Вена, на протяжении 18 *клм.* от своего устья, была регулирована, причем в пределах центральной части города, на протяжении около 2 *клм.*, русло реки обращено в крытую каменную галлерею весьма большого сечения (около 8 *м.* высоты и 21 *м.* ширины). С целью же регулировать сток по реке ливневых вод устроены обширные бассейны около места слияния р. Вены с р. Мауэрбах (рис. 291). Общая

емкость бассейнов назначена с таким расчетом, чтобы при ливнях пускать по р. Вене не более 800 *кб. м* в секунду, остальную же часть притекающей воды, около 210 *кб. м* в секунду, направлять в бассейны. Все семь бассейнов, занимая площадь около 38 гектаров, имеют общую емкость в 1.500.000 *кб. м* и, таким образом, могут принимать в себя избыток ливневых вод в течение 2-х часов, что считается достаточным по характеру бывающих дождей. Бассейны окаймлены каменными стенами и укрепленными откосами выемок. Они отделены друг от друга каменными дамбами, имеющими гребни в форме водосливов, через которые переливается вода по мере наполнения бассейна, так что бассейны наполняются постепенно один за другим (рис. 292). Для выпуска воды из бассейнов в реку, по миновании ливня, служат особые снабженные затворами отверстия в дамбе, отделяющей реку от бассейнов. На регулирование р. Вены израсходовано свыше $18^1/_2$ милл. рублей; из них около $3^1/_2$ милл. рублей приходится на устройство вышеописанных бассейнов.

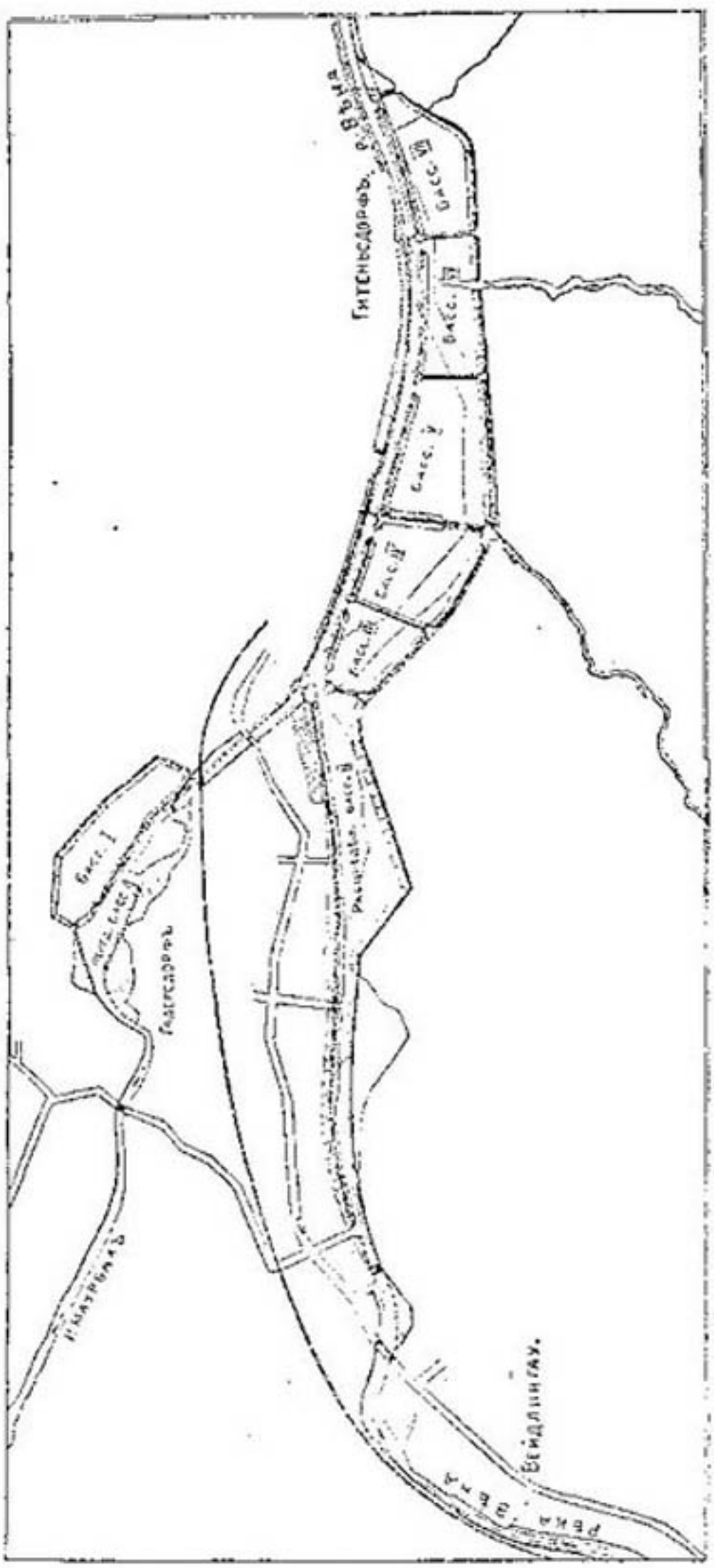


Рис. 291. Водозадерживающие бассейны для предохранения гор. Вены от наводнений.

б) Пруды и заграждения тальвегов полузапрудами или водопроницаемыми запрудами. Влияние, подобное вышеуказанным обширным водохранилищам в верховьях реки,

могут оказывать на наводнения также пруды, устроенные в тальвегах, по которым стекают в реку атмосферные осадки, выпадавшие в ее бассейне (рис. 293). В период интенсивного питания реки дождевою водою значительная часть ее собирается в пруды. В них она частью идет на пополнение убыли прудовой воды, частью расходуется на испарение и на фильтрацию в дно пруда, и только остальная часть вытекает далее в тальвег через водосливы плотин.

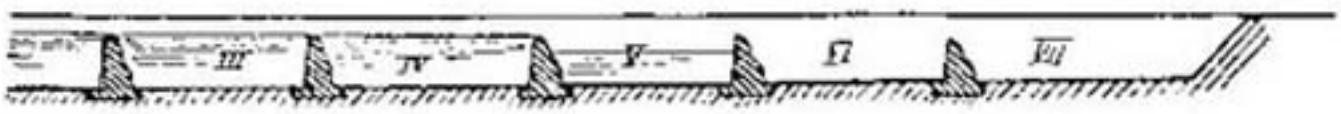


Рис. 292. Разрез по бассейнам.

Но, чтобы такие пруды могли оказать существенное влияние на наводнение, необходимо иметь их в большом количестве, равномерно распределенном по тальвегам бассейна реки. Стоимость же прудов довольно значительна, если принять в расчет как сооружение плотин с их водосливами и прочими устройствами, так и отчуждение земель, занимаемых каждым прудом. Тоже значительны и эксплоатационные расходы по содержанию и ремонту плотин многочисленных прудов, разбросанных по разным местам бассейна реки. Поэтому, если предпринять устройство целой системы новых прудов с исключительной целью предохранения от речных наводнений, то, вероятно, в большинстве случаев пришлось бы остановиться перед весьма крупными затратами. Тем не менее система прудов, как магазинаж атмосферных осадков для предохранения от наводнений, не должна исключаться из числа разных для этой цели мер. Нужно иметь в виду, что устройство прудов полезно и во многих других отношениях: для земледелия, скотоводства, для устройства гидроэлектрических установок, для фабричного производства, для искусственного питания судоходных каналов, для орошения земель и проч. Поощряя, поэтому, частную и общественную инициативу в деле устройства прудов, можно, путем менее значительных затрат на сооружение дополнительного числа прудов, где в них не имеется надобности для иных целей, использовать всю систему прудов также как средство предохранения от наводнений.

Рис. 293. Водозадерживающие пруды.

Вместо постоянных прудов можно устраивать в тальвегах, для замедления стока атмосферных вод, заграждения в виде полузапруд

(рис. 294), или водопроницаемых запруд с целью временного скопления за ними воды.

Стесняя живое сечение тальвега, полузапруды во время ливней задерживают часть подходящей воды, образуя как бы временный пруд. По мере под'ема горизонта в таком пруде, истечение из него воды через отверстие между полузапрудами будет становиться, вследствие напора, интенсивнее, пока не установится равновесие между притоком и вытеканием. Можно так расчитать отверстие между полузапрудами,

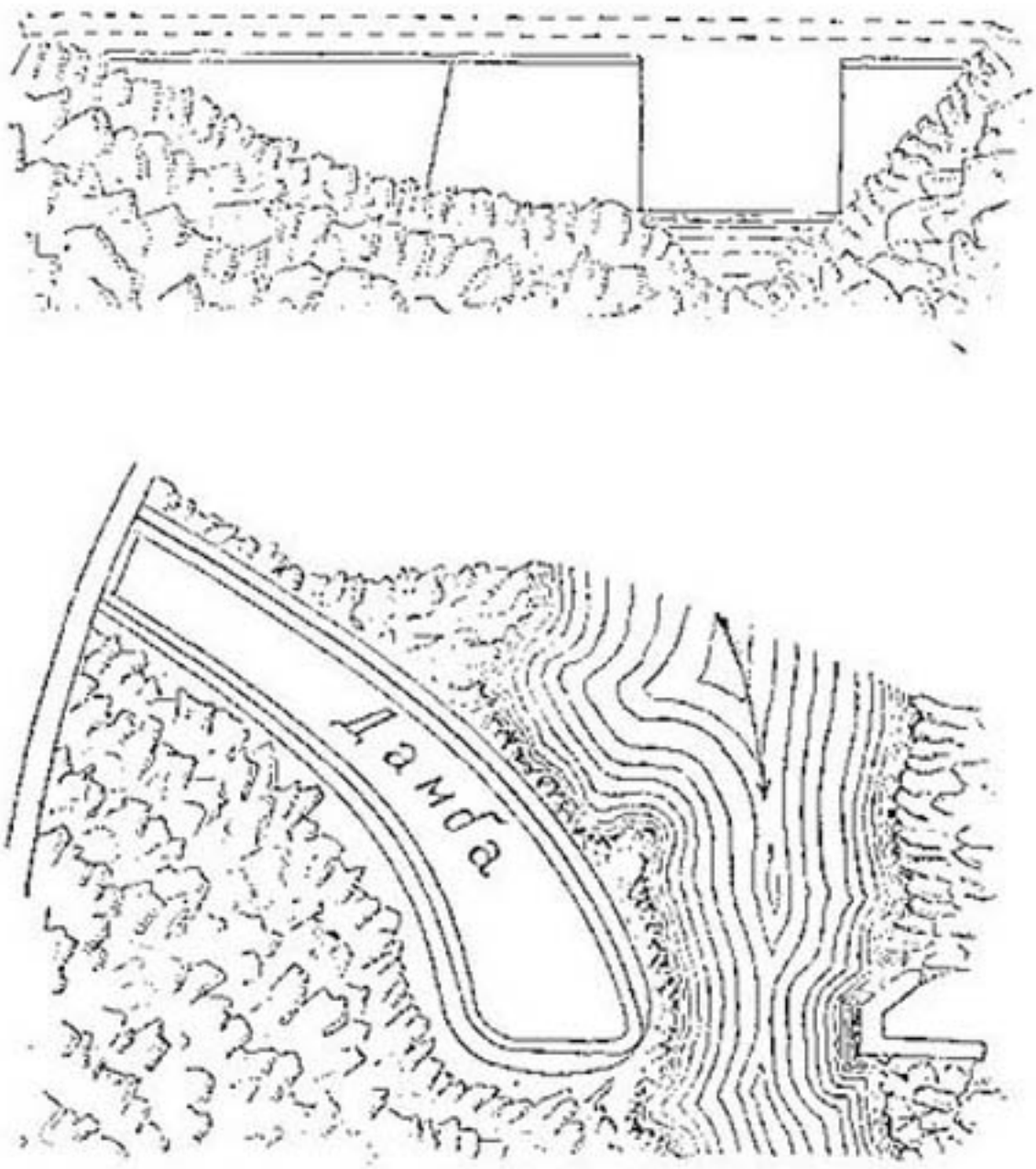


Рис. 294. Сужение тальвега полузапрудой.

чтобы оно регулировало сток прибылой воды в требуемой степени. По окончании ливня образовавшийся за полузапрудами водоем постепенно опорожняется. Подобное же действие оказывают и водопроницаемые запруды, образованные, например, из наброски крупных камней.

Устройство полузапруд, как средство для предохранения от наводнений, нашло, между прочим, применение при обширных работах, предпринятых с этою целью во Франции, в бассейне р. Луары.

в) Ярусные нагорные канавы устраиваются на крутых склонах долин в горных местностях с целью задерживать в этих канавах воду при сильном дожде, дабы она впитывалась в почву. Устройство и действие ярусных канав описано в главе VII-й о регулировании горных потоков.

г) Обработка земель и культура растительности. Как известно, коэффициент стока, т. е. отношение количества воды, несомой рекою, к количеству атмосферных осадков, выпавших на площади речного бассейна, значительно зависит от характера почвы. Невозможно, конечно, сделать почву водопроницаемой, если она непроницаема, но несомненно также, что, несмотря на водонепроницаемый характер почвы данной местности, род обработки земли может оказать заметное влияние на поглощение ею влаги дождя. Следует заметить, что поглощение влаги зависит как от свойств почвы, так и от продолжительности соприкосновения воды с землей; почва одной и той же местности почти совершенно поглотит мелкий и длительный дождь и даст, напротив, сбежать большей части ливня, так как вода не успеет впитаться. Если-же дождливое время продолжается столь долго, что почва успеет полностью насытиться водой, то поглощательная способность ее прекращается, а сток воды от новых дождей происходит скорее. Распашка земли, разведение на ней травы, кустарников и других растений способствуют задержанию и поглощению влаги. В качестве примера поглощательной способности травянистого покрова земли можно указать на интересные результаты опыта, сделанного в Альпах инженером Геймаром. Квадратный метр верхнего покрова альпийской лужайки, толщиною 0,20 *м.*, был снят и взвешен; затем, его подвергли сильной поливке и новое взвешивание показало, что такой травянистый покров поглотил 50 *кгр.* влаги; количество это соответствует об'ему воды от дождя, измеряемого столбом жидкости в 50 *мм.* высотою. Сельскохозяйственная обработка земли тем более может способствовать уменьшению стока воды по ее поверхности, если обработка земли сопряжена с устройством дренажа; известно, что дренаж начинает действовать ранее полного насыщения почвы влагою.

Вопрос о влиянии лесов на высоту речных разливов остается еще недостаточно выясненным. Не останавливаясь на этом вопросе, упомянем некоторые обстоятельства, вследствие которых леса могут умерить речные паводки. Выпавшая влага задерживается в лесу долее, чем на открытой местности. Дождь принимается листьями кроны дерева, общая площадь которых огромна по сравнению с площадью земли, покрываемой этой кроной. Во время дождя остается на листьях значительная часть воды, впоследствии испаряющаяся. Вода, стекающая по листьям и ветвям, достигает земли не так скоро и, таким образом, смачивание почвы происходит более продолжительно, а это обстоятельство, как сказано выше, способствует большему впитыванию воды в почву. Перегной листьев и хвои представляет материал, обладающий большой способностью поглощать влагу. Некоторые исследователи причин наводнений в северной Италии доказывали, что гора, поросшая лесом, может задержать $^4/_5$ выпавшей на нее влаги, тогда как та же гора, но обезлесенная, могла бы поглотить только $^1/_5$ часть этой воды.

Таким образом, земля и ее растительность, представляя сами по себе естественный магазинаж атмосферных осадков, могут при соответствующей культуре еще усилить магазинаж и, если меры подобного рода нельзя отнести к средствам быстрого воздействия на наводнения, то, во всяком случае, прибегая для того к иным способам, сопряженным с крупными единовременными затратами на специальные искусственные сооружения, нужно не упускать из виду и степень ожидаемого прогресса в культуре данной местности.

§ 43. Регулирование русла высоких вод и обвалование затопляемых местностей. Предсказание наводнений.

Если в реке, протекающей по низменной равнине, происходят разливы и наводнения вследствие местных препятствий в русле, замедляющих сток воды и образующих подпор ее поверхности, то для устра-

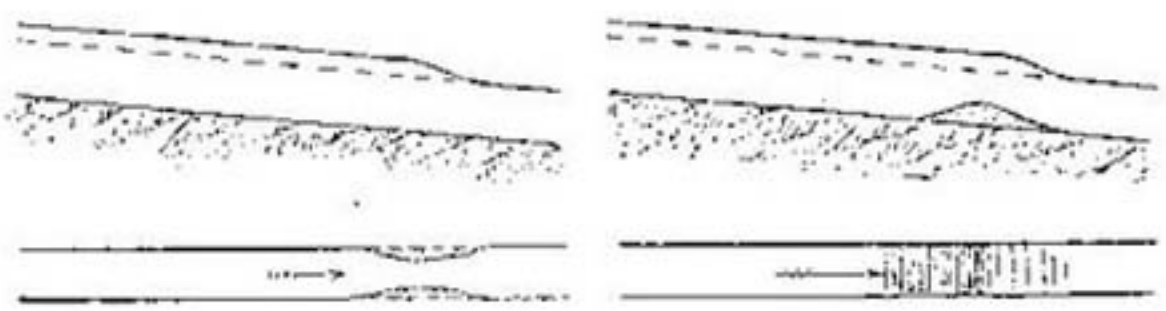


Рис. 295. Подпор, вызванный обмелением дна или сужением русла.

нения таких явлений необходимо регулировать русло. Увеличение скорости прохода паводков в самой реке может быть достигнуто: а) устраняя причины местных подпоров и б) увеличивая уклоны реки, а, следовательно, и скорости ее течения. То и другое является регулированием реки, достигаемым помощью землечерпательных работ и выправительных сооружений.

Причинами подпора текущей воды могут быть местные сужения русла реки и местные возвышения (обмеления) дна (рис. 295). Как то, так и другое, уменьшая живое сечение реки, действует на поверхность воды в реке, подобно речным водоподпорным плотинам. Устраняя те и другие местные неправильности русла, например, помощью расчистки русла землечерпанием или помощью удаления камней, корчей и прочих засорений, тем самым уничтожается подпор на вышележащем участке реки. Также помощью регулирования русла реки устраняются причины образования ледяных заяоров, вызывающих наводнения.

Увеличение уклона поверхности воды на данном участке реки может быть достигнуто путем спрямления извилистой реки, устраивая прокопы в излучинах, как показано на рис. 296-м.

Последствия такого спрямления видны из следующего.

Полагая, что в конечных точках спрямленного участка реки AB отметки уровня воды останутся на прежней высоте, но точка B перей-

дет в B', а общая длина AB вместо L сократится до L_1, и называя среднюю ширину реки через b, а уклоны поверхности воды и средние глубины до и после спрямления соответственно J и J_1 и t и t_1, будем иметь, что при той же величине расхода воды в неспрямленном виде участка реки

$$Q = btC\sqrt{tJ},$$

а в спрямленном

$$Q = bt_1C\sqrt{t_1J_1}, \text{ следовательно, } btC\sqrt{tJ} = bt_1C\sqrt{t_1J_1},$$

откуда

$$t_1 = t\sqrt{\frac{J}{J_1}}.$$

Так как J_1 больше J, то средняя глубина, а, следовательно, и высота уровня воды после спрямления реки уменьшатся. Подобными же рассуждениями можно заключить, что после спрямления

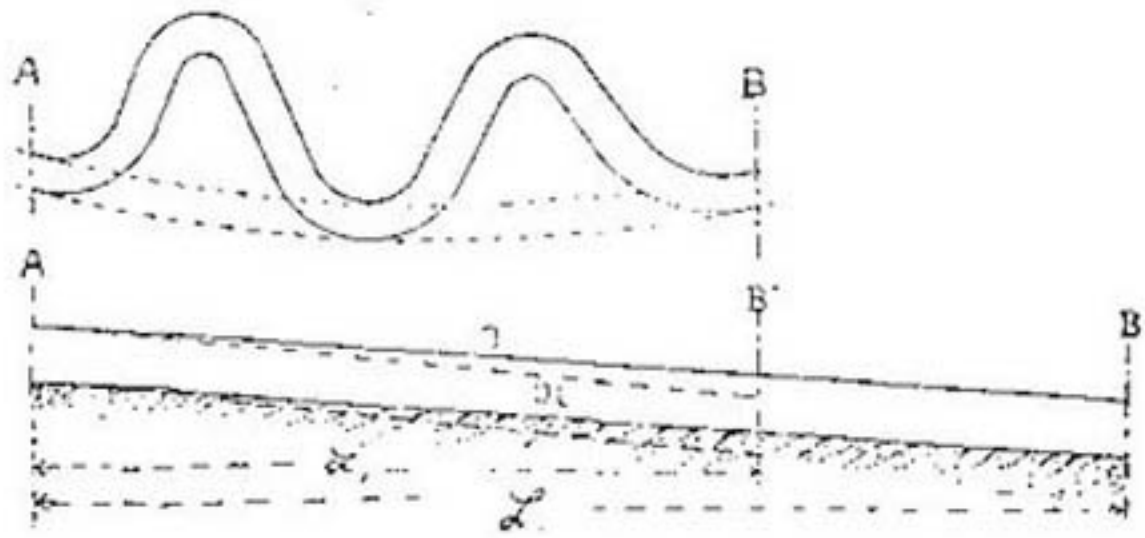


Рис. 296. Влияние спрямления русла на величину уклона.

участка реки скорость течения увеличится; поэтому, если малые скорости течения на извилистом участке реки служили причиной подпора воды на вышележащем участке, то после спрямления подпор этот соответственно уменьшится.

Таким образом, произведя на некотором участке реки расчистку русла или спрямление извилин,—вообще увеличивши сточную способность русла путем местных регуляционных работ, можно ослабить наводнения как на данном участке, так и на некотором протяжении реки выше его. Но нужно иметь в виду, что такого рода меры не решают коренным образом вопроса о предохранении от наводнений. Напротив, принося некоторую пользу для данного места реки, они могут весьма вредно отразиться на нижележащих ее частях, в смысле усиления здесь разливов, так как ускоренный приток воды к этим частям реки поставит их в положение, худшее прежнего. Поэтому, предпринимая подобные меры для устранения наводнений, где в том встречается надобность, нужно озаботиться одновременным регулированием и нижележащей части реки. Работы необходимо вести в таком

порядке, чтобы начинать регулирование снизу реки, распространяя его постепенно вверх по течению.

Поучительным в этом отношении примером представляются работы по регулированию реки Тиссы в Венгрии. Река Тисса, крупный приток р. Дуная, протекая по венгерской низменности. имела чрезвычайно извилистое русло. Извилистость реки так велика, что, при протяжении долины в 560 *км.* по прямой линии, длина самой реки составляла 1.180 *км.* С целью улучшить судоходные условия р. Тиссы, а также ввиду облегчения стока воды для устранения наводнений, были предприняты крупные работы по спрямлению русла реки помощью прокопов в извилинах. Было сделано около сотни таких прокопов; общая длина прокопов превосходит 120 *км.*, а достигнутое таким способом сокращение всей длины русла составляет около 480 *км.* При слабых вообще уклонах реки Тиссы столь значительное сокращение ее длины не вызвало каких-либо непосредственных неудобств в русле самой реки, но оно повлияло очень вредно ва разливы реки. Несмотря на меры предосторожности, принимавшиеся в отношении старого русла, которые состояли в возможно широком использовании старого русла в качестве отводной системы на случай разливов, в результате оказалось, что средняя высота разливов значительно увеличилась против бывшей ранее работ. Страшный случай наводнения в 1879 году в гор. Чегедине, когда этот большой город был почти совершенно разрушен наводнением, прорвавшим защитные дамбы города,—некоторые приписывают последствиям вышеупомянутого сокращения длины реки и, в особенности, порядку ведения регуляционных работ: вместо того, чтобы сокращение длины русла произвести сначала в низовьях реки, где они могли бы содействовать защите гор. Чегедина, их сделали в местностях, вышележащих по течению реки.

Обвалование. Все изложенные выше меры предохранения от наводнений заключаются в воздействии на режим реки, влияя тем или иным способом на самые причины поднятия уровня воды. Из изложенного видно также, что такого рода меры не могут быть ограничены каким-либо отдельным участком реки, что меры эти для сколько нибудь полного их осуществления требуют значительного времени и весьма крупных денежных затрат. Чем больше река, тем, конечно, более осложняется вопрос о воздействии на ее режим в смысле понижения высоких ее уровней тем или иным из указанных способов. Естественно, поэтому, что в борьбе с наводнениями чаще оказывается более целесообразным направлять борьбу не на устранение явлений высоких под'емов воды в реке, а на защиту низменных прибрежных местностей от затоплений, что достигается помощью устройства защитных валов.

Валы располагаются вдоль речной долины, на некотором расстоянии от меженнего русла реки, образуя для последней достаточное русло

для половодия и паводков. Таким образом, вся та часть речной долины, которая отделена валами от реки, затоплениям не подвергается. Возможность такого выделения значительной по ширине части речной долины явствует из свойств разливов. Известно, что при разливах затопляются иногда обширные площади, на которых, однако, почти незаметно течения. Последнее остается сосредоточенным только на некоторой части ширины разлива, обыкновенно ближайшей к меженнему руслу. Это обстоятельство указывает, что в период половодия и паводков река нуждается для беспрепятственного стока воды только в некоторой части затопляемой ширины долины; остальное же, иногда весьма обширное пространство может быть без вреда для течения реки выделено и ограждено от затопления.

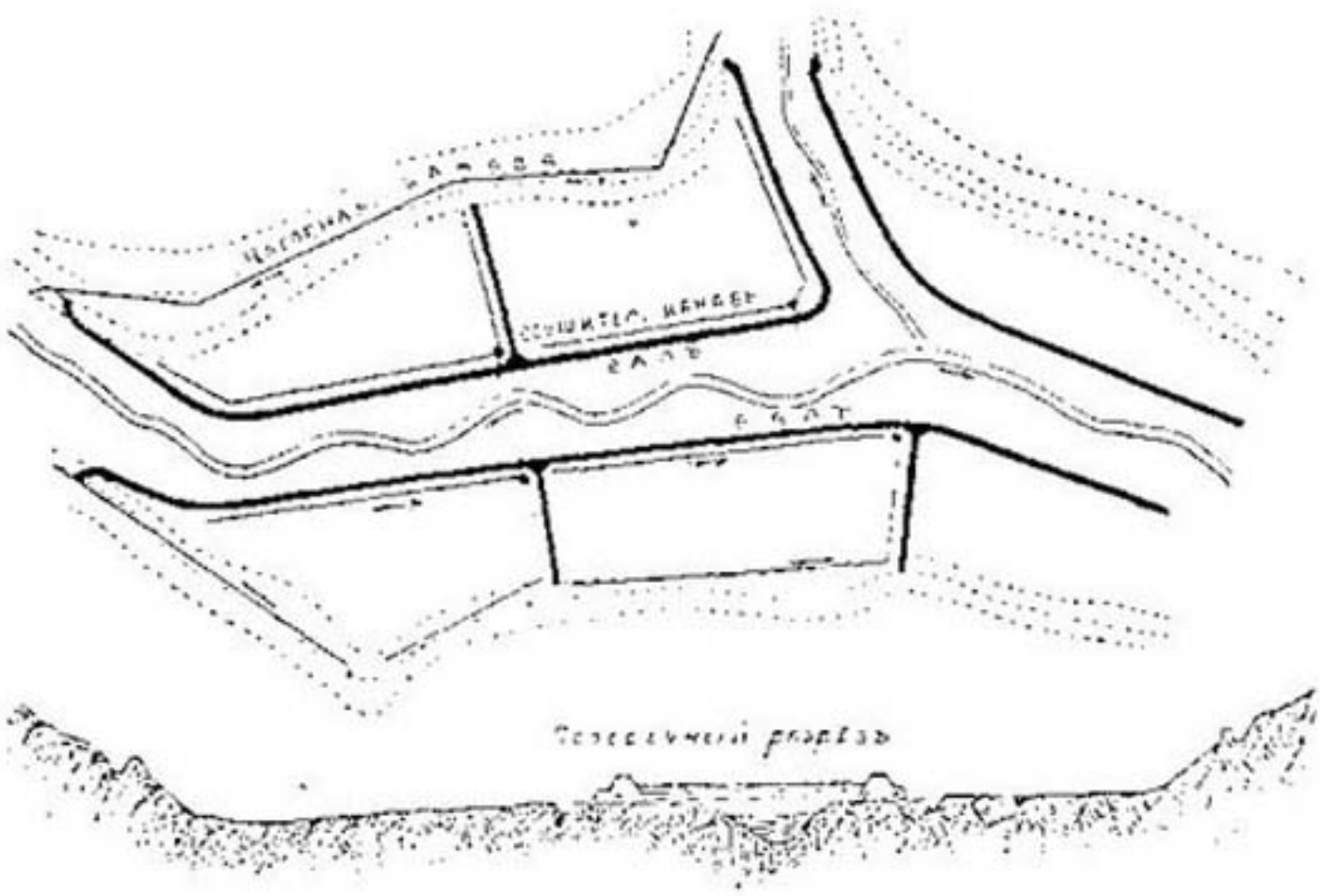


Рис. 297. Обвалование затопляемых местностей.

Оградительные валы (рис. 297) должны быть примкнуты к склонам долины в местах, не затопляемых при самом высоком уровне разливов. В местах соединения реки с ее притоками защитные валы загибаются вдоль долины притока. На случай прорыва дамбы устраивают, с целью локализировать затопление на меньшую площадь, кроме продольных, еще и поперечные валы, так называемые траверсы. Огражденную валами местность необходимо предохранить от заболачивания водою атмосферных осадков, стекающей по склонам долины или непосредственно падающей на огражденную площадь; равным образом, нужно предохранить эту площадь от воды, фильтрующей через почву и через валы при поднятии уровня в реке. С указанной целью на склонах долины роют нагорные канавы, выводя их в реку за пределами огражденного пространства. Воду, попадающую на огражденную площадь, собирают в канавы, вырытые вдоль валов с внутренней их сто-

роны. Для удаления этой воды устраивают под валом сточные трубы, снабженные затворами с таким расчетом, чтобы трубы были открыты при обычном положении уровня воды в реке, т. е., когда он ниже поверхности земли огражденной местности, и чтобы эти трубы закрывались, когда уровень реки поднимается. В случае же невозможности отвести воду трубами, устанавливают насосные станции для механической перекачки воды. Нужно заметить, что для использования огражденных местностей под сельско-хозяйственную или садовую культуру обычно приходится производить, кроме осушения заболачивающихся участков, также искусственное орошение земли. В таком случае огражденная площадь покрывается правильной сетью оросительных и осушительных канав со всеми необходимыми для них устройствами.

Вопрос о расстоянии между защитными валами, т. е. вопрос о необходимой ширине русла высоких вод является одним из сложных и трудных вопросов в деле предохранения местностей от наводнений помощью защитных валов. Вполне естественно стремление отвоевать от реки возможно бо́льшую площадь ее долины. Но нужно иметь в виду, что сближение валов, ограничивающих русло высоких вод реки, стесняет живое сечение этого русла и увеличивает под'ем воды в реке, что в свою очередь требует возвышения дамб; кроме того, стеснение живого сечения вызывает увеличение скоростей течения. То и другое требует усиления профиля оградительных валов и применения дорогих способов укрепления валов от размыва течением и от прорыва их под напором воды. Найти наивыгоднейшее решение при противоположных требованиях представляет трудную задачу, в особенности осложняющуюся для тех участков реки, где она принимает притоки, могущие в короткое время сильно увеличивать количество воды, несомой рекою. Следует также иметь в виду, что, как указал опыт подобных работ, производившихся в очень крупном размере и весьма долгое время на некоторых реках Западной Европы, уровень высоких вод в реке, вследствие ограждения валами, с течением времени постепенно поднимается. Так, например, на р. По максимальная высота уровня воды при разливах реки увеличилась более чем на 2 метра в течение последних двух веков; на р. Тиссе в Венгрии, около гор. Чегедина такое же повышение произошло в течение только полустолетия. Обстоятельство это об'ясняется как постепенным развитием защитных валов по длине и ширине речной долины, так и возможным повышением русла реки от наносных отложений. Повышение уровня высоких вод реки, увеличивая напор на валы, усиливает опасность их прорыва со всеми бедствиями, которые терпит при этом огражденная валами местность.

Ввиду этого, вопросу об установлении пределов возможного приближения к реке защитных валов,—вопросу о назначении так называемого з а п р е т н о г о п е р и м е т р а ограждаемых валами местностей,

должно быть придано самое серьезное значение. При назначении запретного периметра должна соблюдаться большая осторожность, дабы оставляемая для верхнего русла реки ширина полосы долины между защитными валами не оказалась недостаточной не только при современных условиях реки, но и при возможных изменениях их в будущем. Обычно это расстояние значительно превышает ширину нижнего, межсшего русла реки; так, например, на р. Тиссе, при ширине нижнего русла в 200—250 метр., расстояние между защитными валами колеблется обыкновенно в пределах от 800 до 1.000 метр. и значительно еще увеличивается в тех местах, где, как выше упоминалось, были сделаны прокопы реки с целью сокращения длины ее русла, причем между валами помещается как новое, так и старое русло.

Для приблизительного подсчета допустимой наименьшей ширины русла между защитными дамбами обоих берегов можно, при предварительных соображениях о размещении дамб, пользоваться следующим способом расчета (рис. 298). В основание расчета должен быть принят самый высокий, из когда-либо наблюдавшихся, горизонт воды. По данным наблюдений на водомерных постах, имеющихся в пределах рассматриваемого протяжения реки, определяется поверхностный уклон воды при этом горизонте. Выбравши на участке такие места, где поперечные профили реки и долины можно принимать как средние для участка, и измеривши размеры профилей, устанавливается средний поперечный профиль, изображенный на рис. 298-м. Пользуясь формулами и таблицами Германека (см. стр. 32), можно определить для частей профиля B_1, B и B_2, по их средним глубинам t_1, t и t_2, средние скорости течения:

$$v_1 = c_1\sqrt{t_1 J}$$
$$v = c\sqrt{t J}$$
$$v_2 = c_2\sqrt{t_2 J}.$$

По чертежу профиля находим для тех же частей его соответствующие площади живого сечения реки:

$$F = \frac{\beta_1 h_1^2}{2} + \beta_1 h_1 (t - h_1) + (B - \beta_1 h_1 - \beta_2 h_2) t + \frac{\beta_2 h_2^2}{2} + \beta_2 h_2 (t - h_2)$$

$$F_1 = B_1 t_1$$
$$F_2 = B_2 t_2$$

Расход воды во всем живом сечении:

$$Q = F_1 v_1 + F_2 v_2 + F v.$$

После постройки защитных дамб отнимутся на обоих разливах от прежней площади живого сечения площади $(B_1 - x_1) t_1$ и $(B_2 - x_2) t_2$ и весь расход воды должен проходить между дамбами. Вследствие

такого стеснения живого сечения горизонт воды между дамбами должен подняться на некоторую величину Z выше прежнего самого высокого горизонта. Расход, проходивший на отнятых дамбами площадях разливов, был

$$q = (B_1 - x_1)\ t_1\ v_1 + (B_2 - x_2)\ t_2\ v_2.$$

После устройства дамб он должен поместиться в подпертой зоне. При этом в зоне подпора скорости течения, как близкие к величинам поверхностных скоростей прежнего положения, могут быть приняты во всех частях ширины приблизительно равными $^5/_4$ средней скорости на каждой части. Из этих условий имеем уравнение

$$(B_1 - x_1)\ t_1\ v_1 + (B_2 - x_2)\ t_2\ v_2 = Z\ (x_1\ v_1 + B\ v + x_2\ v_2)\frac{5}{4},$$

откуда

$$Z = \frac{4}{5} \times \frac{(B_1 - x_1)\ t_1\ v_1 + (B_2 - x_2)\ t_2\ v_2}{x_1\ v_1 + B\ v + x_2\ v_2}.$$

В этом уравнении являются неизвестными величинами:

$$x_1,\ x_2 \text{ и } Z.$$

Предельной величиной Z может быть такая, какая не опасна в отношении размыва русла и подмыва откосов дамб. Для этих соображений можно определить новые средние скорости при подпертом горизонте, увеличивши соответственно глубины t, t_1 и t_2, по формулам или таблицам Германека:

$$v_1' = c_1' \sqrt{(t_1 + z)\ J}$$
$$v' = c' \sqrt{(t + z)\ J}$$
$$v_2' = c_2' \sqrt{(t_2 + z)\ J}.$$

Задавшись допустимым подпором, имеем неизвестными x_1 и x_2, которые определяем подбором по тому же уравнению, соображаясь с желательным расположением дамб на том и другом берегу.

Рис. 298.

Защитные валы (рис. 299) делаются земляные с пологим откосом со стороны реки. Профиль дамбы и его размеры должны удовлетво-

рять условию, чтобы при данном грунте, из которого построена дамба, линия фильтрации (линия депрессии уровня проникающей в дамбу воды) при наивысшем подпоре не выходила на внутренний откос дамбы. Для песчано-глинистого грунта, коим обычно пользуются для земляных дамб, угол наклона линии депрессии обыкновенно находится в пределах от 25 до 35 градусов. Защитные валы часто строятся с бермой на противоположной стороне. Берма, уширяя дамбу, вместе с тем защищает ту часть внутреннего откоса, которая, вследствие просачивания воды через дамбу, является слабым ее местом. Для предохранения от фильтрации в грунте под дамбой иногда устраивают так называемый замок (ров, заполненный водонепроницаемым грунтом). При сильных течениях или при больших напорах воды, вообще в случаях, когда профиль земляной дамбы оказывается недостаточным для

Рис. 299. Профиль защитной дамбы.

сопротивления действующим на него усилиям,—делаются каменные, фашинные и другие укрепления откосов дамб. Тем не менее случаи прорывов защитных валов бывают нередко, а потому принимают также меры к тому, чтобы в случае прорыва вала возможно было бы быстро исправить или заменить прорванную часть его другим валом, или, по крайней мере, локализировать гибельное действие прорыва на меньшую площадь (траверсы).

Бывают иногда такие условия пользования данной площадью земли, что требуется предохранять ее от затоплений лишь в течение определенного периода года, когда под'емы уровня воды в реке не достигают столь большой высоты, какая случается в остальное время, например, во время весеннего половодия. Между тем доведение оградительных валов до высоких уровней половодия может оказаться или чрезмерно дорогим, или даже невозможным по топографическим условиям местности. Иногда весеннее затопление прибрежных полей может быть даже полезным, например для луговых растений или для удобрения почвы наносным илом.

В этих случаях высоту валов назначают с таким расчетом, чтобы она была достаточна для защиты лишь от самых высоких летних паводков, но не от половодия. Но, так как в период половодия реки вода, достигнув высоты валов, стала бы через них переливаться, причем как валы, так и огражденная местность могут подвергаться опасным размывам, то для устранения этих вредных явлений устраивают в валах, несколько ниже их гребня, особые хорошо укрепленные

водосливы. Количество водосливов, их ширину и высоту назначают с таким расчетом, чтобы порог водослива был выше горизонта паводков и чтобы при более высоких под'емах уровня в период половодия местность, огражденная валами, заполнялась водою постепенно через водосливы, прежде чем уровень воды в реке достигнет гребня валов. Для удаления воды по окончании половодия, в валах устраиваются шлюзы и особые водоотводные в реку трубы с затворами.

Замечательные примеры работ по предохранению местностей от речных наводнений помощью защитных валов представляют обширные сооружения, возведенные в долине р. По в Италии, р.р. Тиссы и Дуная в Венгрии, р. Луары во Франции, р. Миссисипи в Америке и другие. Например, в Венгрии площадь земель, защищенных от наводнения, составляет ныне около 3.700.000 гектаров, из которых 1.100.000 гектаров в долине р. Дуная и 2.600.000 гектаров в долине р. Тиссы; для этого возведено около 5.800 *км.* защитных валов. На наших реках тоже имеются примеры обвалования низких берегов для защиты от наводнений (на р. Кубани, в низовьях р. Терека и др.), но систематичного широкого развития эти меры у нас еще не получили.

Предсказание наводнений. К числу мер, направленных к ослаблению вредных последствий от наводнений, следует, кроме способов предохранения местностей от затопления, отнести также предупреждение населения о возможности наступления столь высокого под'ема уровня воды в реке, что река выйдет из берегов и произведет затопление местности. Организация таких предупреждений возможна лишь при широко и правильно поставленной службе метеорологических и гидрологических наблюдений в данной местности. На основании этих наблюдений может быть эмпирически установлена зависимость между количеством и силой атмосферных осадков и состоянием уровня воды в реке, равно как установлена взаимная связь между показаниями высоты уровня воды на водомерных постах, находящихся в разных пунктах данного участка реки.

Необходимыми условиями для полезного значения предсказаний высокого под'ема уровня воды в реке являются заблаговременность и точность таких предсказаний. Первое условие тем более выполнимо, чем дальше расположено место реки, для которого делаются предсказания, от той части речного бассейна, где выпадающие атмосферные осадки служат причиной под'ема воды в упомянутом месте реки. Степень точности предсказаний зависит, кроме разных местных условий, также от возможности применения того или иного метода предсказаний, что обусловливается, между прочим, относительным расположением места предсказания и места, питающего реку водами сильных дождей.

Можно различать три главных случая взаимного расположения места реки, для коего требуются предсказания высоты под'ема воды, и места питающего бассейна, для коих необходимо применять три различные между собою способа предсказания (рис. 300).

I. Для пунктов реки, расположенных в пределах бассейна, питающего реку атмосферными осадками, предупреждения жителей о возможности наводнения могут заключаться лишь в предсказаниях сильных дождей. Такие предсказания делаются центральными метеорологическими станциями на основании данных метеорологических наблюдений.

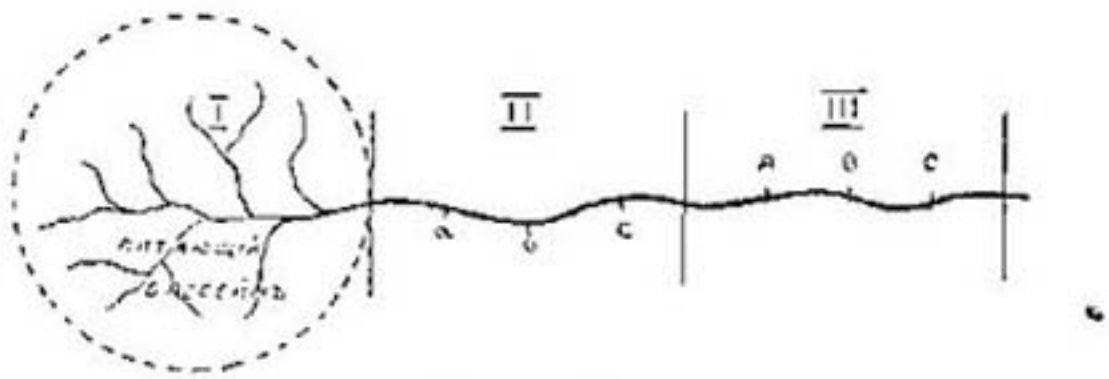


Рис. 300.

II. Для участка реки, расположенного вне питающего бассейна, но не настолько удаленного от него, чтобы время, потребное для стока воды, было достаточно для собрания сведений, необходимых для производства предсказания на основании данных о высоте уровня воды в разных пунктах реки,—предсказания высоты под'ема воды

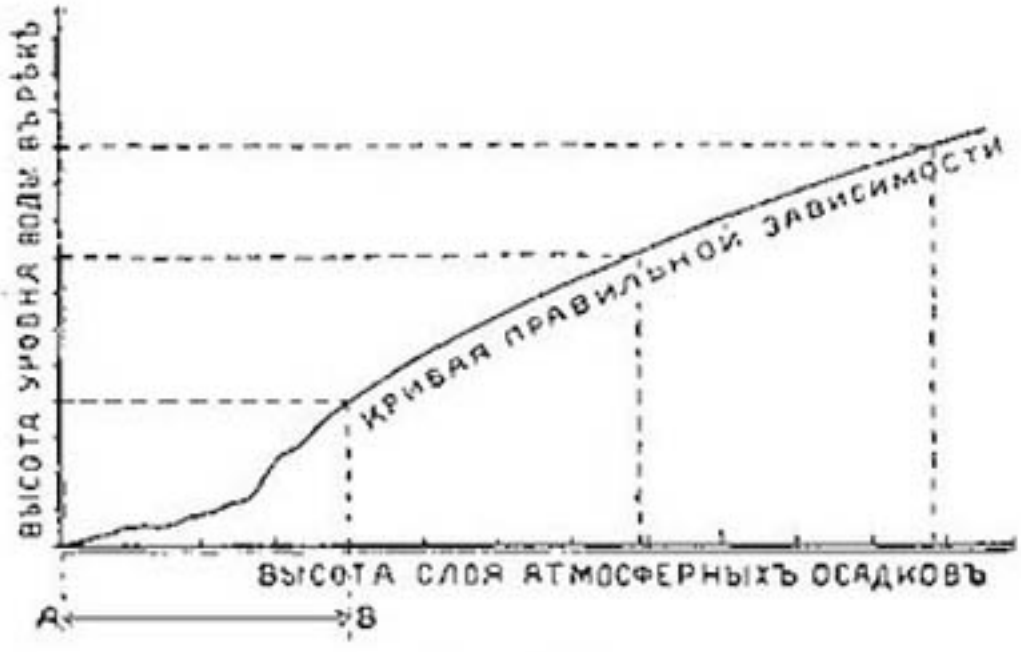


Рис. 301.

делаются на основании данных о количестве выпавших осадков. С этою целью, по данным продолжительных наблюдений, устанавливается для каждого пункта (*a*, *b*, *c*....) этого участка зависимость между высотой уровня воды в реке и высотой слоя выпавших атмосферных осадков (рис. 301). Обыкновенно сколько нибудь правильная зависимость между этими величинами устанавливается лишь с того момента от начала дождя, когда произойдет насыщение почвы; а так как для ее насыщения требуется более или менее определенная высота слоя атмосферных осадков, то именно с этой высоты и возможны более или менее правильные предсказания уровня воды в реке. Если же в районе

выпадения осадков, могущих вызывать наводнения на нижележащих участках реки, хорошо организованы наблюдения за степенью насыщения почвы, то предсказания возможности сильного наводнения в данном пункте реки могут быть и более точными, и более заблаговременными. В качестве примера можно указать на организацию предсказаний паводпений в Парпже; для этой цели, в числе прочих

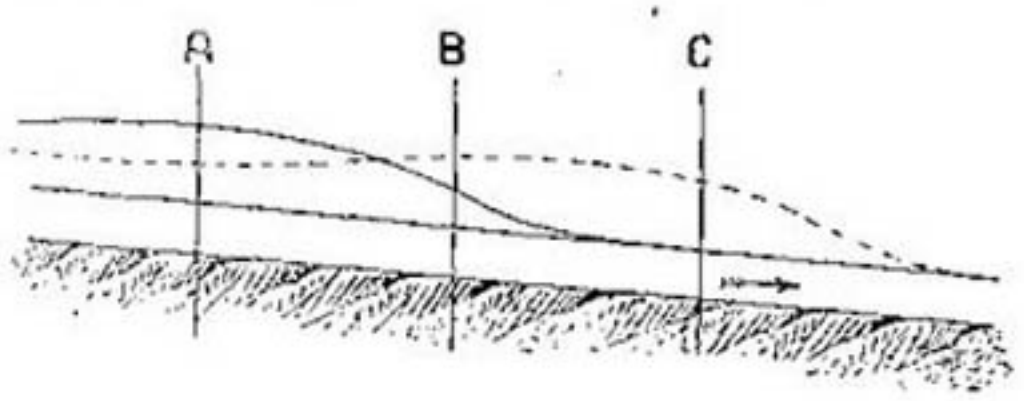


Рис. 302.

мер, ныне устроены в различных местах районов бассейна р. Сены глубокие колодцы, которые дают возможность постоянно следить за насыщенностью почвы.

III. Для местностей, достаточно удаленных от бассейна, собирающего атмосферные осадки, предсказания уровня воды в разных пунктах реки делаются на основании подмеченной зависимости между высотами уровня воды в разных пунктах реки при движении паводка (рис. 302).

При этом необходимо установить также способ определения высоты и скорости передвижения паводка в зависимости от силы и характера атмосферных осадков.

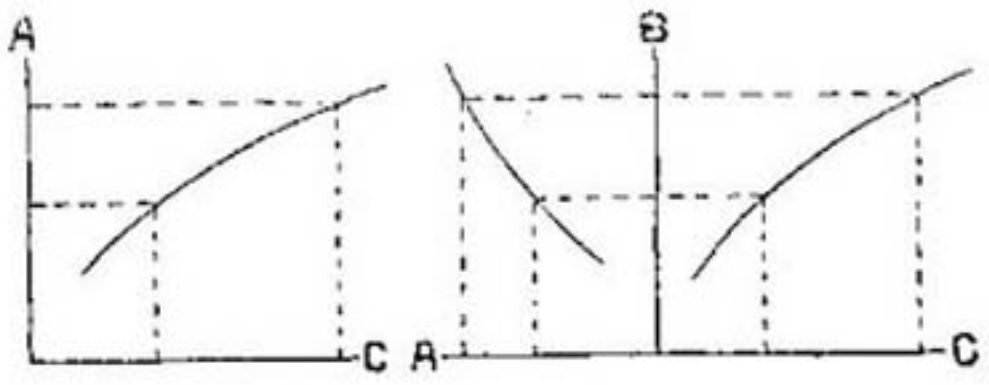


Рис. 303.

Рис. 304.

Зависимость между показаниями уровня воды в двух пунктах A и C в некоторых случаях может быть установлена непосредственная (рис. 303); в других случаях при помощи показаний уровня в промежуточных пунктах (рис. 304). Нужно иметь в виду, что предсказания уровня воды в редких случаях могут обладать большой точностью. На точность предсказания влияют многие обстоятельства, которые трудно учесть при каждом из применяемых методов предсказаний. Тем не менее, там, где метеорологические и гидрологические наблюдения в целях предсказания наводнений давно и правильно организованы, предсказания, на них основанные, приносят великую пользу населению.

Литературные источники.

1. Акулов, К. А.—Наблюдения над расположением струй в речном потоке и влияние их на передвижение речных наносов (1904).
2. Акулов, К. А.—О землечерпательных прорезях на реках (1905).
3. Акулов, К. А.—Выправительные работы на р. Днепре (1914).
4. Антонов, П. А.—Типичные явления, относящиеся к вопросу об устойчивости прорезей и величине их перемещения и краткие выводы относительно результатов землечерпания (1925).
5. Бернадский, Н. М.—Материалы по вопросу о применении химического метода к измерению расхода воды (1914).
6. Богуславский, П. А.—Волга, как путь сообщения.
7. Богуславский, П. А.—Инструкция для исследования и описания рек (1905).
8. Будревич, А. П.—Свайные плотины (1922).
9. Бушмакин, П. В.—Исследования для устройства дополнительного водоснабжения р. Волги. Отчет (1904).
10. Великанов, М. А.—Гидрология суши (1925).
11. Вознесенский, П. П. и Нагель, А. Б. Доклад Инженерному Совету Министерства Путей Сообщения по поставленному Государственным Совещанием вопросу о характере дальнейших работ по улучшению судоходных условий р. Волги, и журнал № 119 Инженерного Совета (напечатаны в 1909 г.).
12. Боларский, Е. А.—Выправительные работы на Рейне (1913).
13. Боларский, Е. А.—Хворостяные работы. Хворостяные выправительные и берегоукрепительные сооружения, применяемые на р. Волге (выше от Рыбинска) и на некоторых ее притоках (изд. 1913 г.).
14. Волжское землечерпание и его достижения. Сборник статей. 1925 г.
15. Ганкевич, В. В.—Рабионы Нальвиса (1922).
16. Глушков, В. Г.—Один из способов изучения условий движения наносов (1910).
17. Глушков, В. Г.—Исследование наносов в дельте р. Волги летом 1924 г. (1926).
18. Глушков, В. Г.—К вопросу о построении кривых расхода воды.
19. Жуковский, П. П.—Об организации и системе землечерпания на транзите рек с подвижным дном (1925).
20. Зброжек, Ф. Г.—Курс внутренних водяных сообщений (1898).
21. Калинович, В. Ю.—Очерк землечерпательных работ в рукаве р. Волги у гор. Саратова (1916).
22. Кандиба, Б. П.—Обзор водных путей Западной Европы (1909).
23. Кандиба, Б. П.—Речные наводнения (1913).
24. Кандиба, Б. П.—*Внутренние водяные сообщения*, вып. I (1922).
25. Квицинский, Л. П.—О предсказаниях колебания уровня воды и глубины фарватера в реках (1896).
26. Клейбер, В. Г.—О предсказаниях ожидаемой глубины перекатов на р. Волге (1896).
27. Колосов, С. А.—Проект приведения р. Волги к городу Саратову (1912).
28. Лелявский, Н. С.—О речных течениях и формировании речного русла (1893).
29. Лелявский, Н. С.—Об углублении наших больших рек (1904).
30. Лохтин, В. М.—О механизме речного русла (1897).
31. Лохтин, В. М.—Ледяной нанос и зимние заторы на р. Неве (1906).
32. Максимович, П. П.—Днепр и его бассейн (1901).
33. Максимов, С. П.—Вопросы речного быта. Сборник статей (1905).
34. Материалы для исследования реки Волхова (под редакцией В. М. Родевича), изд. 1925 и 1926 гг.

35. Никольский, А. И.—Типы укрепления берегов на главнейших каналах Западной Европы (1911).
36. Опоков, Е. В.—Режим речного стока в бассейне верхнего Днепра и его составных частей (1904).
37. Опоков, Е. В.—Водные богатства Украйны (1925).
38. Опоков, Е. В.—Некоторые проблемы в области гидрологии равнинных речных бассейнов (1925).
39. Ольковецкий, П. О.—Типы укрепления берегов, каналов, рек и озер (1903).
40. Пузыревский, П. П.—Движение речного наноса (1904).
41. Тимонов, В. Е.—Основы улучшения судоходства на больших реках в применении к современным потребностям России (1903).
42. Тимонов, В. Е.—По вопросу о рациональном методе коренного улучшения судоходных условий больших рек (1899).
43. Тимонов, В. Е.—Улучшение условий судоходства в порожистой части р. Дуная (1899).
44. Труфанов, А. А.—Речная гидрология (1923).
45. Тыцка, Л. И.—Об улучшении судоходных условий рек с подвижным дном применительно к р. Висле (1912).
46. Фролов, А. М.—О новых регуляционных работах на р. Волге в Саратовском участке (1924).
47. Фролов, А. М.—Новые регуляционные работы в Саратовском участке р. Волги по данным съемок и наблюдениям 1924 г. (1925).
48. Цинкель, И. В.—Фашинные работы (1895).
49. Цимбаленко, Л. И.—Землечерпательные работы Министерства Путей Сообщения на внутренних водных путях (1911).
50. Цюлглинский, М.—О наблюдениях над замерзанием р. Невы и исследованиях заторов на ней (1905).
51. Annual Report of the Mississippi River Commission (1902 and 1903).
52. Beyerhaus.—Der Rhein von Strassburg bis zur holländischen Grenze (1902).
53. Conda, V.—Die Regulierung des Eisernen Thores (1895).
54. Engels, H.—Untersuchungen über die Bettausbildung gerader oder schwach-gekrümmter Flusstrecken mit beweglicher Sohle (Zeitschr. f. Bauw. 1905).
55. Engels, H.—Versuche über Reibungswiderstand zwischen strömenden Wasser und Bettsohle (1912).
56. Engels, H.—Handbuch des Wasserbaues (1923).
57. Fargue, L.—La forme du lit des rivières à fond mobile (1908).
58. Franez.—Die Arbeiten an der Regulierung der Mittel-Elbe in 1914—1916 (Öster. Woch. Schr. 1919).
59. Gerhardt, I. P.—Regen, Grundwasser, Quellen und stehende Gewässer (1905).
60. Girardon, H.—Amélioration des rivières en basses eaux (1894).
61. Girardon, H.—(Перевод В. М. Родевича).—Общие замечания об условиях движения воды и наносов в реках с подвижным дном (1905).
62. Guillemain.—Navigation intérieure.
63. Hagen, G.—Handbuch der Wasserbaukunst (1871).
64. Iasmund, R.—Fliessende Gewässer (1906).
65. Iesovits, M.—Entwicklung des Flussregulirung mittels Fangwerken (Öster. Woch. Schr. 1919).
66. Iszkowski, K.—Formeln zur Ermittlung der Niedrigst-Normal—und Höchst Wassermengen auf Grund charakteristischer Merkmale des Flussgebietes (Zeitschr. d. Öster.-Ing. und Arch. Vereines. 1886).
67. Keller, H.—Die Hochwassererscheinungen in den deutschen Strömen (1904).
68. Köllerer.—Die Isarkorrektion Oberhummel-Moosburg (1912).
69. Kreuter, F.—Der Flussbau (1921).
70. De Mas, F. B.—Rivières à courant libre (1899).
71. Mattern, E.—Talsperren, Ermittlung der Niederschläge und Abflussmengen (1912).
72. Mylius und Isphording.—Der Wasserbau an den Binnenwasserstrassen. Teil II—Baukunde (1906).
73. Poisson.—La forme du cours d'eau à fond mobile (Ann. d. ponts et chaussées. 1902).
74. Der Rhein, d. Elbe, d. Weichsel, d. Oder.—Bearb. im Aufr. d. Ministers d. öffentl. Arbeiten (1902).
75. Roloff.—Mitteilungen über nordamerikanisches Wasserbauwesen.
76. Schlichting, I.—Regulierung und Kanalisierung der schiffbaren Flüsse oberhalb der Flutgrenze des Meeres.
77. Siedeck.—Die natürlichen Normalprofile (1902).
78. Simpher.—Amélioration des rivières par régularisation et par dragages et, le cas échéant, par réservoirs (XII Congrès International de Navigation. 1912).

79. Sappan. C. V. -Wasserstrassen und Binnenschifffahrt (1902).
80. Teubert. O.—Die Verbesserung der Schiffbarkeit unserer Ströme durch Regulierung (1891).
81. Timonoff, V. E.—Les Cataractes du Dniepre (1894).
82. Timonoff, V. E. et Kleiber, G. H.—Régularisation des rivières par le dragage mécanique des passes et son application au Volga (Доклад междунар. судох. конгрессу 1912 г.).
83. Thomas, B. F. and. Watt. D. A.—The Improvement of Rivers (1909).
84. Tolkmitt.—Grundlagen der Wasserbaukunst.
85. Wasserbau.—Königlich-Preussisches Ministerium der Öffentlichen Arbeiten (Weltausstellung St.-Louis. 1901).
86. Williams. R.—Projektirung und Verauschlagung von Flussbefestigungen (в переводе на русский язык С. А. Рейхмана. 1923 г.).
87. Wulf. A.—Neuere Strombauten an der Isar (Zeitschr. f. Bauw. 1886).
Материалы по описанию рек. Труды съездов русских деятелей по водным путям. Труды международных судоходных конгрессов.

Использованные рисунки

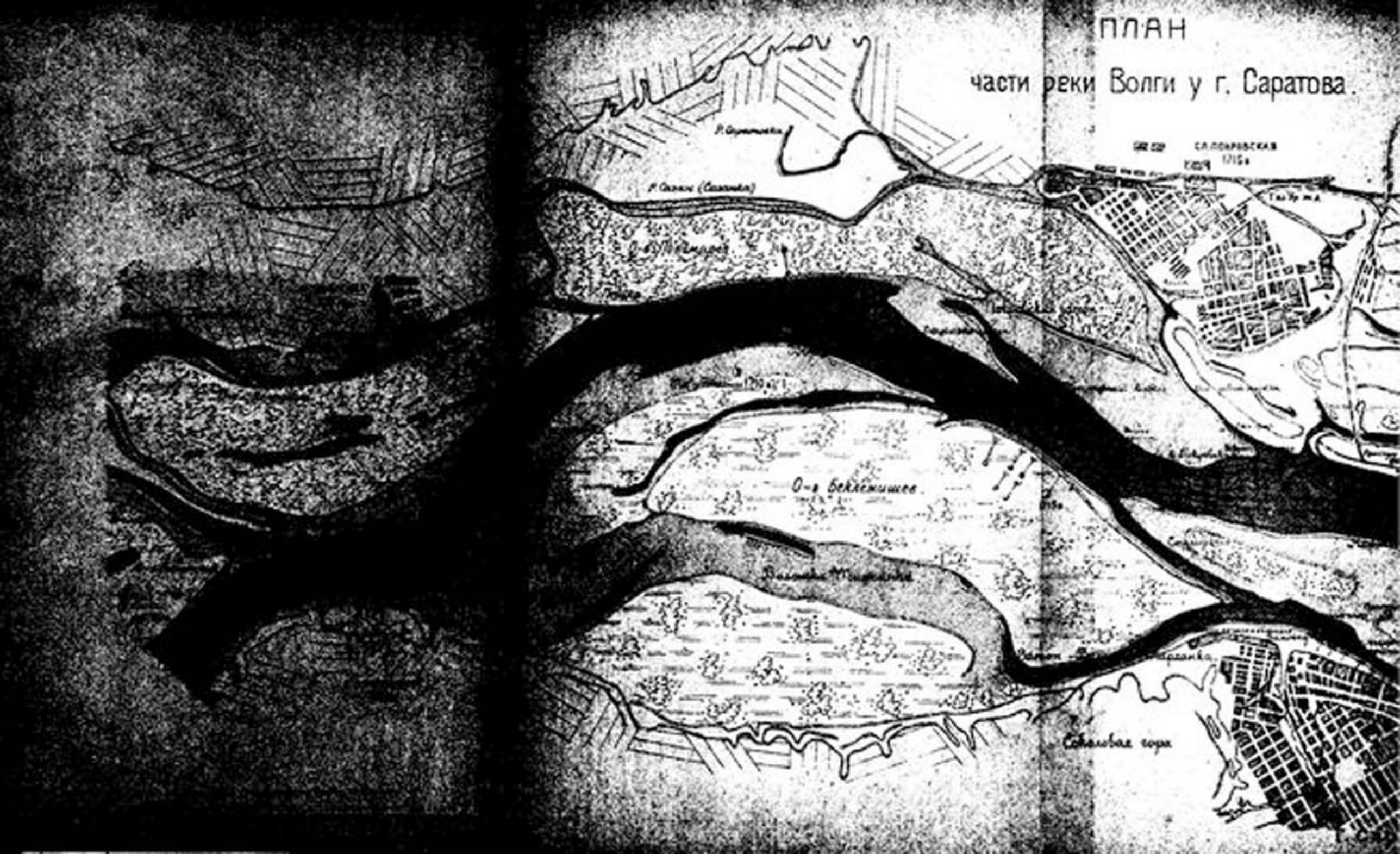
Главы I и II. Свойства речного потока, русло реки и его деформации.		Глава III. Регулирование судоходных рек.		Главы IV и V. Частные случаи регулирования рек и роль землечерпания.	
№№ рисунков.	№№ источников.	№№ рисунков.	№№ источников.	№№ рисунков.	№№ источников.
1, 3, 4, 12 – 14, 24, 26, 28—33	56	37, 39 - 44	69	61—71	56
17, 18, 20—23, 27	64	38	56	78	79
25	49	48—53	72	79—82	49
34	81	54—55	70	Табл. I	21
		56 - 60	28, 1, 3		
		Табл. II	78		

Глава VI. Типы и конструкции регуляционных сооружений.					
№№ рисунков.	№№ источников.	№№ рисунков.	№№ источников.	№№ рисунков.	№№ источников.
83 — 88, 133 — 134, 138, 139	15	144, 213, 232—237	60	109, 110, 163—166, 177, 188 — 190, 196 — 201, 206, 207, 209, 220—224	56
89—93, 145, 146	13	105, 108, 116, 168, 169, 175 — 176, 180 — 186, 217, 222	48	117 — 120, 149, 150, 191, 192	8
94—99, 106, 107, 121, 172 — 174, 193—195, 231	20	135, 137, 147, 148, 151, 154, 158 — 161	39	218, 219	3
100 — 104, 111 — 113, 129, 130, 141—				225 — 230	87

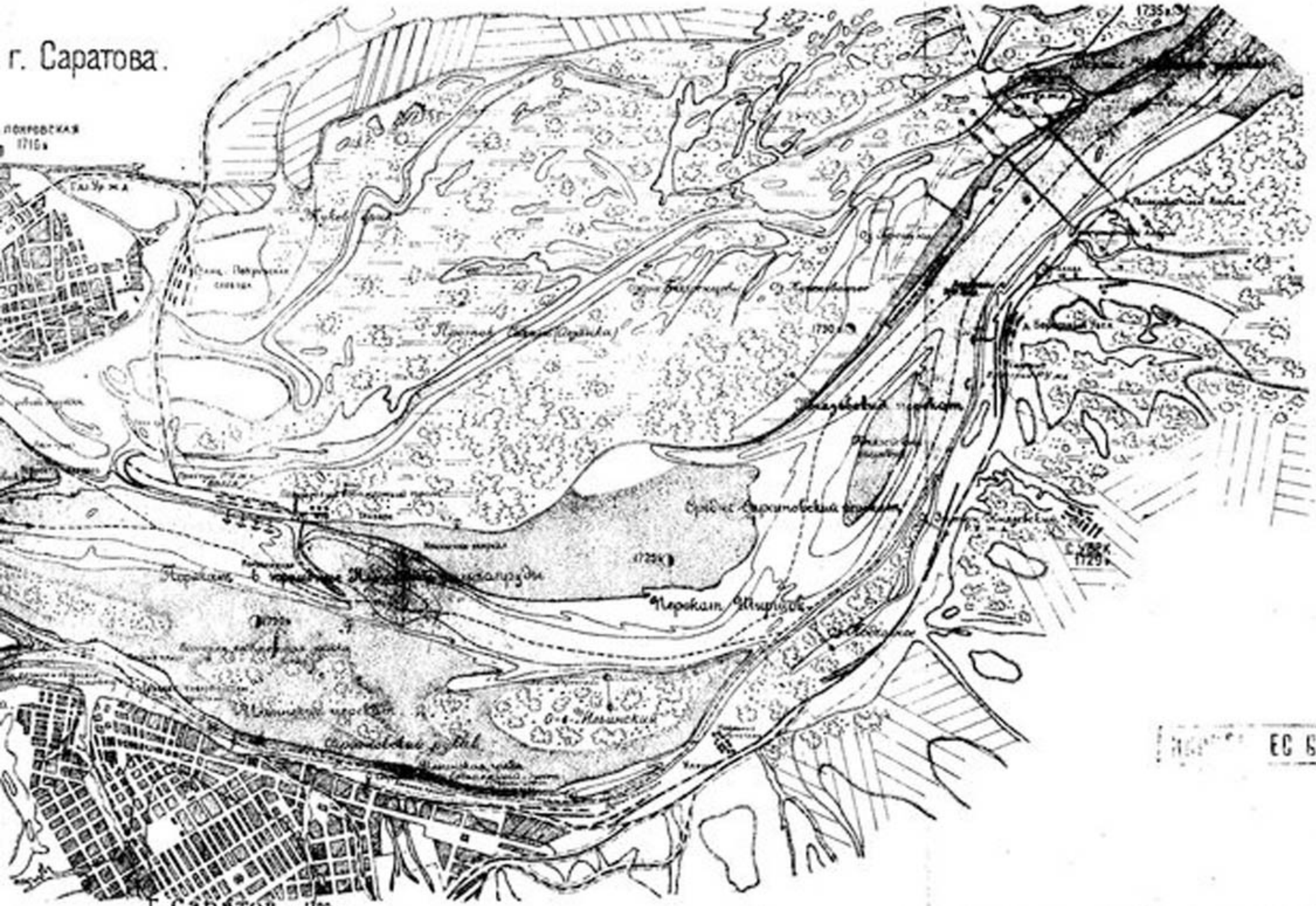
Глава VII. Регулирование горных потоков.		Глава VIII. Регулирование стока паводков.	
№№ рисунков.	№№ источников.	№№ рисунков.	№№ источников.
244, 248—250, 260—266, 270, 271	69	275	56
245, 250—259, 268	56	282—285	56
		294	70

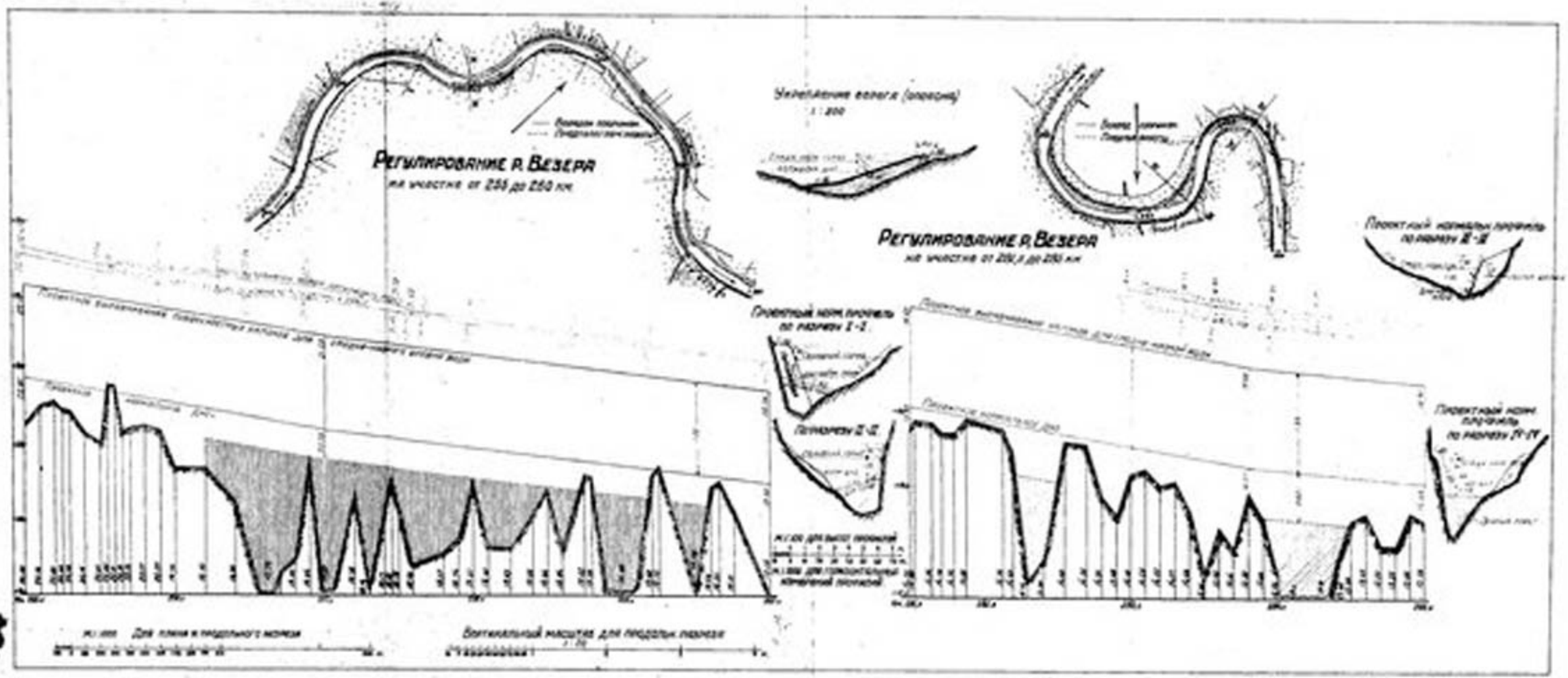
ПЛАН

части реки Волги у г. Саратова.



г. Саратова.


Покровская
1716 г.
1735 г.
1730 г.
1729 г.
Ямышевка
Ямышевский
Ямышевский
Ямышевский


Регулирование р. Везера
на участке от 255 до 260 км
Укрепление берега (откосы)
1:200
Регулирование р. Везера
на участке от 255 до 260 км
Проектный нормальный профиль
по разрезу II-II
Проектный норм. профиль
по разрезу I-I
Проектный норм.
профиль
по разрезу IV-IV
Разрез II-II
Для планов и продольного профиля
Вертикальный масштаб для продольн. профилей

СОДЕРЖАНИЕ.

Стран.

Предисловие 1
Введение 3

Глава I. Свойства речного потока.

§ 1. Общие замечания 7
§ 2. Состояние реки в зависимости от условий ее питания 7
§ 3. Уровень воды 12
§ 4. Продольный профиль поверхности воды 23
§ 5. Скорости течения и расход воды в реке 25
§ 6. Определение величины расхода воды и зависимость между его величиной и положением уровня воды в реке 35
§ 7. Замерзание рек и движение льда 45

Глава II. Русло реки и его деформации.

§ 8. Общие понятия о речном русле 51
§ 9. Очертание берегов 52
§ 10. Разделение на рукава 56
§ 11. Зависимость между очертаниями берегов и формой дна русла 56
§ 12. Реки с устойчивым руслом и реки с неустойчивым (подвижным) руслом. 62
§ 13. Блуждающие мели (косы) 65
§ 14. Зависимость между деформациями русла реки и гидродинамическими свойствами речного потока 67
§ 15. Пороги и водопады 73
§ 16. Устья рек 74

Глава III. Регулирование судоходных рек.

§ 17. Задачи регулирования судоходных рек. Общие пояснения 79
§ 18. Меры для общего упорядочения речного течения. Укрепление берегов. Сосредоточение течения меженних вод 83
§ 19. Выправительная трасса. Общие основания для ее назначения 86
§ 20. Проектная глубина и ширина фарватера. Пределы, которые в этом отношении ставятся естественными условиями реки. Методы определения проектных профилей живого сечения реки 93
§ 21. Выправительные сооружения 107
§ 22. Фарватер при низких уровнях воды. Регуляционные работы для его улучшения 114
§ 23. Принципы, установленные Жирардоном; проведение их при регулировании судоходных рек 122
§ 24. Метод регулирования судоходных рек, предложенный инженером Лелявским. 130

Глава IV. Частные случаи регулирования рек.

§ 25. Спрямление излучин помощью прокопов 141
§ 26. Места разделения русла на рукава 145
§ 27. Места слияния реки с притоками 151
§ 28. Регулирование порожистых частей реки 159

Глава V. Роль механического землечерпания в работах по урегулированию рек.

Стран.

§ 29. Землечерпание, как составная часть регуляционных работ. 162
§ 30. Землечерпание, как самостоятельный способ поддерживания глубины судового хода. 165

Глава VI. Типы и конструкции регуляционных сооружений.

§ 31. Строительные материалы и виды их употребления для регуляционных сооружений 175
§ 32. Укрепление берегов 198
§ 33. Типы выправительных сооружений (полузапруды, продольные и струенаправляющие дамбы, донные полузапруды и донные пороги, запруды, прокопы) 222
§ 34. Вспомогательные и другие простейшие регуляционные сооружения . . . 253

Глава VII. Регулирование горных потоков.

§ 35. Свойства горных потоков 269
§ 36. Способы регулирования горных потоков 275
§ 37. Типы и конструкции горных регуляционных сооружений 283

Глава VIII. Регулирование стока паводков. Дополнительное питание реки в межень. Предохранение местностей от наводнения.

§ 38. Общие пояснения 294
§ 39. Дополнительное водоснабжение рек во время межени для улучшения условий судоходства 295
§ 40. Регулирующее влияние озера на сток воды в реке, вытекающей из него. 312
§ 41. Речные разливы и наводнения; причины наводнений и меры предохранения от них прибрежных местностей 320
§ 42. Магазинаж атмосферных осадков 326
§ 43. Регулирование русла высоких вод и обвалование затопляемых местностей. Предсказание наводнений 333

Перечень литературы 341