А. П. УШАКОВ
В. Н. ШОЛОХОВ
И. А. ЯКШТАС

ВОДОЗАБОРНЫЕ УЗЛЫ ФЕРГАНСКОГО ТИПА

ЎЗБЕКИСТОН ССР ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
СУВ ПРОБЛЕМАЛАРИ ВА ГИДРОТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

А. П. УШАКОВ, В. Н. ШОЛОХОВ,
И. А. ЯКШТАС

ФАРҒОНА ТИПИДАГИ КАМ БОСИМЛИ СУВ ОЛИШ ИНШООТЛАРИ

ЎЗБЕКИСТОН ССР ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ НАШРИЁТИ
ТОШКЕНТ—1962

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ И ГИДРОТЕХНИКИ

А. П. УШАКОВ, В. Н. ШОЛОХОВ,
И. А. ЯКШТАС

НИЗКОНАПОРНЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ УЗЛЫ ФЕРГАНСКОГО ТИПА

Поступит 29 ноября 1974

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР
ТАШКЕНТ—1962

В монографии обобщены данные об основных построенных, проектируемых и исследованных в Средней Азии плотинных водозаборных узлах ферганского типа, представляющих собой одно из достижений советской гидротехники.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников гидротехнической специальности, занятых проектированием и эксплуатацией водозаборных сооружений, а также на студентов гидромелиоративных институтов и факультетов.

Ответственный редактор

кандидат технических наук

З. Х. ХУСАН-ХОДЖАЕВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основой для составления данной книги послужил обширный материал лаборатории водозаборов ИВПиГ АН УзССР (бывшая гидротехническая лаборатория САНИИРИ) по усовершенствованию водозаборных узлов оросительных систем Средней Азии, накопленный в результате многих модельных и полевых исследований, выполненных по заданиям различных водохозяйственных организаций.

Значение данной работы вытекает из больших задач, намеченных XXII съездом КПСС по развитию ирригации в зонах орошаемого земледелия.

Известно, что водозаборные узлы играют очень важную роль в плановой подаче воды в системы, нормальная работа которых оказывает существенное влияние на получение высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.

Монография написана под руководством и под редакцией канд. техн. н. А. П. Ушакова.

Введение, главы I, II, IV и V составлены совместно всеми авторами, а глава III —В. Н. Шолоховым.

Авторы выражают признательность д-ру техн. н. С. Х. Абальянцу, канд. техн. н. В. Н. Ярцеву и инж. Г. И. Прозорову за помощь и полезные советы в подготовке рукописи к изданию.

ВВЕДЕНИЕ

Водозаборный узел инженерного типа — важнейший элемент оросительной системы, предназначенный для регулирования водоподачи в каналы.

Инженерное переустройство головных водозаборов, проводимое с целью наиболее полного использования водных источников и улучшения условий эксплуатации систем, ставит одновременно задачу дальнейшего улучшения компоновки водозаборных узлов.

Различные условия гидрологии источников питания и топографии, степень отбора воды, состав и количество наносов, лед и шуга, различия грунтов основания создают значительное разнообразие как в конструкциях сооружений, так и в характере их эксплуатации.

Опыт эксплуатации многих плотин, построенных в 1927—1937 гг. по заграничным образцам (Рават-Ходжа, Кугарт, Чумыш и др.), показал, что старые, заграничные типы плотинных узлов работают в местных условиях не всегда удовлетворительно. Причинами следует считать недоучет в компоновке и конструкции узлов многих гидрологических факторов, в том числе режима напосов, паводков, зимнего режима и главным образом основных гидрологических характеристик, обеспечивающих устойчивое, «самоформирующееся» русло реки при проектировании верхнего бьефа гидроузла.

Исследования неудовлетворительно работающих плотин, а также моделирование намеченных к строительству и последующее изучение их работы в условиях эксплуатации позволили коллективу лаборатории водозаборов ИВПиГ АН УзССР в содружестве с инженерами-проектировщиками института «Средазгипроводхлопок» (В. В. Пославский, С. Н. Оболенский, Г. И. Прозоров и В. Ф. Поярков) и инженерами-строителями МВХ УзССР (Б. П. Курбанов, А. А. Жимский, Д. К. Терситский, И. Ф. Федодеев, С. В. Пугачев и др.) создать и внедрить новый тип низконапорной плотины, названный по месту первоначального применения ферганским.

Новый тип гидроузла основан на закономерности явлений русловой поперечной циркуляции, практически использовавшихся в старом народном опыте расположения головы канала на вогнутом берегу реки и получивших теоретическое обоснование в трудах А. Я. Миловича, М. В. Потапова, Д. Я. Соколова и других советских ученых.

Первое водозаборное сооружение этого типа — Кампыр-Раватская плотина, проект которой составлен под руководством В. В. Пославского, а строительство осуществлено под руководством инжене-

ров А. А. Жимского, Б. П. Курбанова и С. В. Пугачева. Изучение плотины на модели проводил Н. И. Теперин, обративший внимание на необходимость создания зарегулированного криволинейного участка реки на подходе к плотине.

Водозабор ферганского типа усовершенствован в 1945 г. при проектировании и лабораторных исследованиях Сары-Курганского узла на р. Сох (исследователь М. С. Вызго, проектировщик С. Н. Оболенский, консультант В. В. Пославский)[1], а также других водозаборных сооружений в 1947—1960 гг. (Я. А. Никитин, А. П. Ушаков, В. Н. Шолохов, И. А. Якштас и др.).

В работе не приведены данные по водозаборному узлу левобережного Карасу на р. Чирчик, Дам-Ходжинскому гидроузлу на р. Зеравшан, так как проектирование и строительство этих узлов осуществлено без предварительных модельных исследований и, кроме того, второй из них эксплуатируется не в проектных условиях (фактический водозабор составляет 30% от расчетного). Данные обстоятельства не позволили накопить материал для обобщения, хотя частично опыт эксплуатации этих и других узлов учтен при составлении выводов и рекомендаций.

Результаты многолетнего и многостороннего изучения водозаборов использованы в производстве и частично отражены в опубликованных трудах Е. А. Замарина, С. Т. Алтунина и др. В настоящее время ферганский тип водозаборного узла широко применяется в Узбекистане и других республиках Советского Союза (АзССР, КазССР, КиргССР), а также за рубежом (КНР), благодаря высоким показателям по защите каналов от поступления в них наносов, простоте конструкции и надежности в эксплуатации. Некоторые дефекты в конструкциях первых построенных сооружений данного типа (Кампыр-Раватский и Сары-Курганский гидроузлы) не обусловлены самим типом этого сооружения и могут быть без труда устранены.

До сего времени недостаточно обобщены материалы исследований и не созданы точные приемы гидравлического расчета основных элементов ферганского типа сооружений.

Обобщая накопленный опыт, авторы предлагаемой работы дают основные указания по компоновке, эксплуатации и, частично, приближенному гидравлическому расчету водозаборного узла ферганского типа и его элементов (криволинейное подводящее русло, катастрофический водослив, водоприемник, плотина и др.), а также по приближенному расчету занесения верхнего бьефа.

---

[1] Первоначальная проектная проработка этого узла произведена в 1934—1935 гг. Г. И. Прозоровым, а исследование осуществлено под руководством А. В. Троицкого.

Глава I

ЭЛЕМЕНТЫ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОДВОДЯЩИХ РУСЕЛ И КОМПОНОВКА СХЕМЫ ВОДОЗАБОРНОГО УЗЛА

ПОПЕРЕЧНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ И ЕЕ РОЛЬ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ

При протекании жидкости в криволинейном (в плане) русле, кроме продольных движений в направлении оси русла, возникают поперечные течения в плоскостях живых сечений. Эти течения, названные поперечной циркуляцией, складываясь с продольными движениями, образуют винтовые течения жидкости в извилистых руслах рек.

Изучению течений в криволинейных открытых руслах и закрытых водоводах посвящено много теоретических и лабораторных работ. Производились наблюдения и на реках в натуре. Особенно обширные исследования выполнены советскими учеными за последние двадцать лет с использованием для практических целей мощного воздействия поперечной циркуляции на внутреннюю структуру потока, транспортирование наносов и формирование русел. Отметим два этапа в истории этих исследований.

Первый этап изучения поперечной циркуляции характеризуется в основном теоретическими исследованиями течений, выполненными путем анализа уравнений гидродинамики невязкой жидкости.

И. С. Громека показал, что при совпадении направления вихря с направлением полной скорости частицы жидкости и, следовательно, при пропорциональности компонентов вихря компонентам скорости жидкость движется с выполнением интеграла Д. Бернулли.

А. Я. Милович развил исследования И. С. Громеки. Оперируя уравнениями потенциального винтового движения, он дал глубокий анализ при изгибе, делении и соединении потоков.

Знаменитый русский гидродинамик Н. Е. Жуковский изложил более просто выполненный Буссинеском теоретический анализ движения жидкости в горизонтальном круговом закрытом канале малой высоты и распространил этот анализ на всякие течения вязкой жидкости, обтекающей неподвижные контуры по изотермическим линиям в руслах малой высоты.

Н. Е. Жуковский и Буссинеск считают перекос донных вихревых нитей причиной возникновения поперечной циркуляции. Донные вихревые нити, опирающиеся на стенки канала, перекашиваются при переходе на закругление, так как концы их вдоль выпуклой стенки двигаются быстрее, чем вдоль вогнутой. Это сообщает точкам жидкости, лежащим вблизи дна канала, некоторую скорость по направлению к выпуклому берегу. Далее Жуковский, анализируя движение вдоль стенки, создал модель образования эллиптических вихрей, перемещающихся «наподобие гусеничных тракторов».

Таким образом, Н. Е. Жуковский на основе отвлеченного анализа уравнений гидродинамики открыл структурные образования турбулентного потока, которые опытными исследованиями того времени еще не могли быть обнаружены. Результаты анализа способствуют уяснению общих тенденций течения, но не могут дать расчетных зависимостей для практического применения.

К первому этапу изучения поперечной циркуляции мы относим и работы одного из основоположников науки о формировании речного русла выдающегося русского инженера Н. С. Лелявского, успешно использовавшего свойства циркуляционных течений при создании очень эффективной, не потерявшей значения и по сей день, системы выправления рек для целей судоходства.

Считая, что для возведения гидродинамики в степень точной науки «недостаточно еще одних отвлеченных математических исследований, вроде тех, кои исполнены гг. Навье, Гельмгольцем... и многими другими», что «гидродинамика, подобно физике, есть наука опытная и... в основу своих выводов должна класть не произвольные допущения, а данные, добытые обобщением результатов непосредственных наблюдений и опытов», Н. С. Лелявский провел обширные наблюдения внутренних течений на Днепре. Он сконструировал специальный прибор — «измеритель речных струй», представляющий комбинацию вертушки с флюгером. Вертикальный и горизонтальный рули в этом приборе позволяют определять направления струй.

Н. С. Лелявский проводил наблюдения с большой тщательностью, регистрируя не только направления поплавков, но и скорости их вращения.

Неясность представлений о действующих силах на кривой не помешала Лелявскому составить достаточно правильное представление о действии этих сил — формировании русла на кривой. Он замечает, что глубина в плесах обратно пропорциональна радиусу кривизны, что на выходе из кривой «гладкая продольная вымоина дна заменяется волнообразной поверхностью с постепенно уменьшающимися глубинами». Эти детали формирования дна на изгибе, легко наблюдаемые нами в модельных руслах, неизмеримо труднее обнаружить на больших судоходных реках, на которых проводил опыты Лелявский.

Характерным для первого этапа изучения поперечной циркуляции является разрыв между теоретической гидродинамикой и практикой. Теоретики давали формулы, не применявшиеся в практике; практики руководствовались наблюдением и опытом без количественных выражений формулами.

Второй этап в исследованиях поперечной циркуляции начинается работами М. А. Дементьева и М. В. Потапова, продолженными В. М. Маккавеевым, А. В. Караушевым, И. Л. Розовским, А. С. Офицеровым и др. В этих исследованиях на первое место выдвинута центробежная сила как главная причина возникновения поперечной циркуляции. Теоретический анализ и опытные наблюдения стали составными частями единого процесса исследований на данном этапе.

По современным представлениям, поперечная циркуляция возникает на повороте русла под действием центробежных сил при неравномерном распределении продольных скоростей течения по глубине.

На частицу воды с массой m, движущуюся с продольной скоростью v по криволинейной траектории радиуса r, действует центробежная сила

$$F = \frac{mv^2}{r}. \qquad (1)$$

Эта сила направлена по радиусу от центра кривизны. Так как она прямо пропорциональна квадрату скорости продольного течения воды, то эпюра распределения ее по вертикали потока имеет характер, аналогичный эпюре распределения продольной скорости по той же вертикали.

Центробежные силы, приложенные к точкам у поверхности, больше среднего значения, а приложенные к точкам у дна, меньше (рис. 1). Поэтому элемент потока вертикали неустойчив в поперечном направлении. Противоположно направленные избыток и недостаток центробежной силы вызывают вращательное движение воды в плоскости живого сечения. В области избытка центробежной силы у поверхности

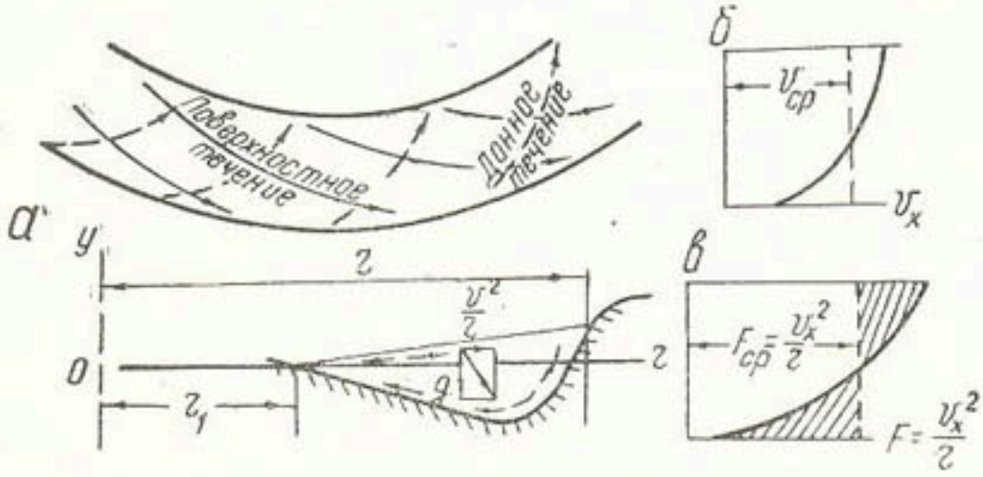


Рис. 1. Поперечная циркуляция на изгибе потока.

а — поперечная циркуляция в русле, *б* — распределение продольной скорости по вертикали, *в* — распределение центробежной силы по вертикали.

потока возникает течение от центра вращения к вогнутому берегу, а в области недостатка ее у дна — к центру вращения.

Приведем некоторые данные о поперечной циркуляции на реках в натуре, представляющие интерес при проектировании подводящих русел водозаборных узлов. Государственный гидрологический институт провел исследования на р. Юля-Йока со следующими осредненными (по шести створам) характеристиками потока: $Q = 0{,}50$ *м³/сек*, $B = 4{,}8$ *м*, $h = 0{,}17$ *м*, $r = 17{,}3$ *м*, $v_x = 0{,}60$ *м*, $I_x = 0{,}0079$, среднее значение поверхностных поперечных составляющих скоростей — $v_{r\ пов} = 0{,}026$ *м/сек*, то же донных — $v_{r\ дон} = 0{,}0028$ *м/сек*, поперечного уклона — $I_r = 0{,}0024$.

Русло каменистое, берега в плане извилистые. Гидравлические элементы имели значительные отклонения от средних величин, в частности, радиус кривизны закругления менялся от 10 до 25 *м* на коротком, длиной около шести ширин, участке. Скорости замерялись на 1 *см* от поверхности воды и на 2 *см* от дна.

Институт гидрологии и гидротехники АН УССР исследовал излучины реки с углом поворота 180° при $Q = 185$ *м³/сек*, $B_{ср} = 160$ *м*, $h_{ср} = 3$ *м*, $h_{макс} = 7$ *м*, $C = 45$—50, $r = 400$ *м*.

В обоих случаях наблюдалась одна поперечная циркуляция, охватывавшая все живое сечение потока. Это нарушалось на р. Юля-Йока лишь в местах с особыми условиями (резкое расширение, слияние рукавов). Поперечная скорость в опытах меняла знак примерно на половине глубины ($0{,}40 \div 0{,}70\ h$).

Простые, надежные и оправданные практикой методы расчета циркуляции в реках пока отсутствуют. Из имеющихся предложений назовем формулу В. М. Маккавеева, отличающуюся простотой структуры и ясностью учета неравномерности распределения продольной скорости по вертикали, и формулу И. Л. Розовского, показавшую удовлетворительную сходимость с данными наблюдений.

Формула В. М. Маккавеева:

$$v_r = \frac{hC^2}{g v_{x\,\text{ср}} r}\left[v^2_x - (v^2_x)_{\text{ср}} \right], \qquad (2)$$

где $(v^2_x)_{\text{ср}}$ — среднее значение квадрата скоростей по глубине. Применение формулы требует наличия эпюры продольных скоростей.

Формула И. Л. Розовского:

$$v_r = \frac{v_{\text{ср}}}{\varkappa^2}\,\frac{h}{r}\left[F_{1(t)} - \frac{\sqrt{g}}{\varkappa C} F_{2(t)} \right], \qquad (3)$$

где $\varkappa$ — параметр (постоянная) Кармана, некоторыми авторами [18] именуемый параметром логарифмической формулы вида

$$\frac{v_{\text{макс}} - v}{v} = \frac{1}{\varkappa}\ln \eta;$$

$F_{1(t)}$, $F_{2(t)}$ — графически заданные функции (рис. 2). По опытам Розовского $\varkappa = 0{,}50$.

Формулы (2) и (3) не имеют пока оправданных практикой коэффициентов пропорциональности. По данным Г. В. Железнякова, k для рек колеблется от 0,3 до 0,9. Обе формулы относятся к вполне развившейся циркуляции соответственно радиусу закругления.

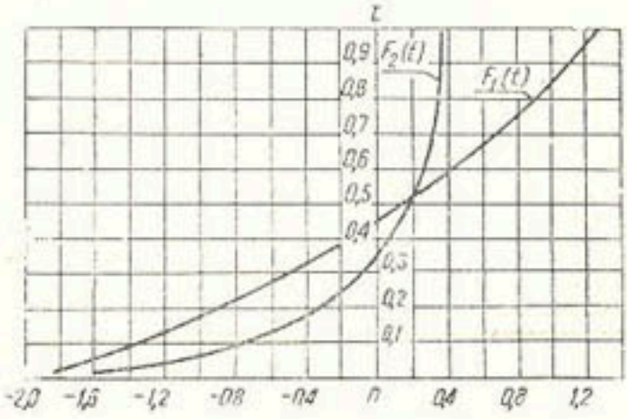


Рис. 2. Графически заданные функции.

Для расчета русел при водозаборе важно знание отношения поперечных скоростей или линий токов к продольным, особенно в придонной области. Сопоставление результатов наблюдений показывает, что отклонения токов от продольного направления резко возрастают с глубиной при неизменной ширине. По опытам в лотках, при больших значениях отношения h/B, донные токи имеют отклонения до $40 \div 45°$, а на реке Юля-Йока при $h/B \approx 1/25$ углы отклонения придонных струй $\approx 2°$.

По опытам И. К. Никитина в лаборатории САНИИРИ (ныне ИВПиГ АН УзССР) с криволинейным бетонированным руслом, по ряду характеристик напоминающим реку Юля-Йока, донные токи пересекали русло под средним углом $\approx 11°$.

Возможные причины расхождения на р. Юля-Йока и в лабораторном русле САНИИРИ следующие: 1) лабораторное русло имело уклон в сторону выпуклого берега до $I_r = 0{,}06$, 2) в лаборатории отражены непосредственно донные токи (размыв краски), а на реке производились замеры шаровым насадком на относительной высоте, равной 0,12 глубины от дна. У дна же, как известно, резко изменяется интенсив-

ность поперечной циркуляции. Рельеф водной поверхности отражает структуру внутренних течений и легче поддается наблюдениям.

Поперечный уклон водной поверхности, вызываемый центробежными силами, может быть выражен формулой

$$I_{1_r} = \frac{v^2_{\text{ср}}}{gr} f\,(C), \tag{4}$$

где C коэффициент Шези, а уклон, вызываемый отклоняющей силой вращения земли,

$$I_{2_r} = \frac{v_{\text{ср}}}{g}\, 2\omega \operatorname{Sin} \varphi \chi\,(C), \tag{5}$$

где $\omega = 7{,}29 \cdot 10^{-5}$ *рад/сек* — угловая скорость вращения земли,

φ — широта места.

Значение $\chi\,(C)$ применительно к рекомендации В. М. Маккавеева приближенно может быть принято равным от 1,01 для больших C до 1,1 для малых C.

По А. В. Караушеву, $\varphi\,(C) = 1{,}04$ для $C = 50$ и возрастает до 1,08 при $C = 20$.

Поперечный уклон водной поверхности на повороте русла

$$I_r = I_{1_r} + I_{2_r} = \frac{v}{g}\left[\frac{v}{r} f\,(C) \pm 2\omega \operatorname{Sin} \varphi\ \chi\,(C)\right]. \tag{6}$$

Отсюда видно, что влияние кориолисовых сил может учитываться лишь при расчете формирования русел больших рек, когда радиусы закруглений измеряются километрами.

Как же распределяются продольные и поперечные скорости и уклоны по ширине русла и длине закругления?

По опытам в прямоугольных лотках с прямолинейным входом установлено, что продольные скорости и уклоны возрастают в начале закругления у выпуклого берега. Здесь же обычно бывает и максимальный поперечный уклон, тогда как наибольшая интенсивность поперечной циркуляции наблюдается во второй половине закругления.

Циркуляция зарождается в прямолинейном потоке на расстоянии до двух ширин лотка от начала закругления и затухает на много большем расстоянии за пределами закругления. Прямолинейная вставка длиною до трех ширин лотка между соседними криволинейными участками (опыты О. Л. Юшманова и др.) далеко не погашает взаимного влияния кривых.

В опытах И. А. Холькина в лаборатории САНИИРИ с извилистым размываемым дном и закрепленными берегами циркуляция наиболее интенсивно развивалась не на середине кривой и не на трех четвертых длины кривой от ее начала, как это следовало бы по общеизвестным законам Фарга, а в точках перехода из одной кривой в другую (рис. 3). Столь резкий сдвиг гидравлических характеристик по отношению к плановым есть следствие крутых ($r/B = 1{,}75$) поворотов при больших скоростях.

Циркуляция в криволинейном русле поддерживает постоянство больших глубин и удельных расходов у закрепленного вогнутого берега при одновременном отклонении донных токов с наносами к противоположному, выпуклому берегу.

Наносонесущие реки Средней Азии обычно криволинейны в плане. Прямые участки во многих случаях представляют лишь переходы между кривыми противоположных направлений. Таким образом, сама природа как бы указывает места водозабора. Неудивительно поэтому,

что народы Средней Азии в период древнего орошения использовали поперечную циркуляцию, располагая свои водозаборы на вогнутом берегу. Европейские инженеры не учли этого обстоятельства и долгое время упорно отстаивали боковой водозабор из прямого русла, хотя из горького опыта хорошо известно, что при этом создается интенсивная вредная циркуляция. Поток круто поворачивает в сторону водоприемника; водная поверхность перекашивается; наносы энергично завлекаются через верхнюю часть водоприемника.

В боковой отвод из прямолинейного русла могут завлекаться почти все донные наносы реки при отборе половины воды; в такой же

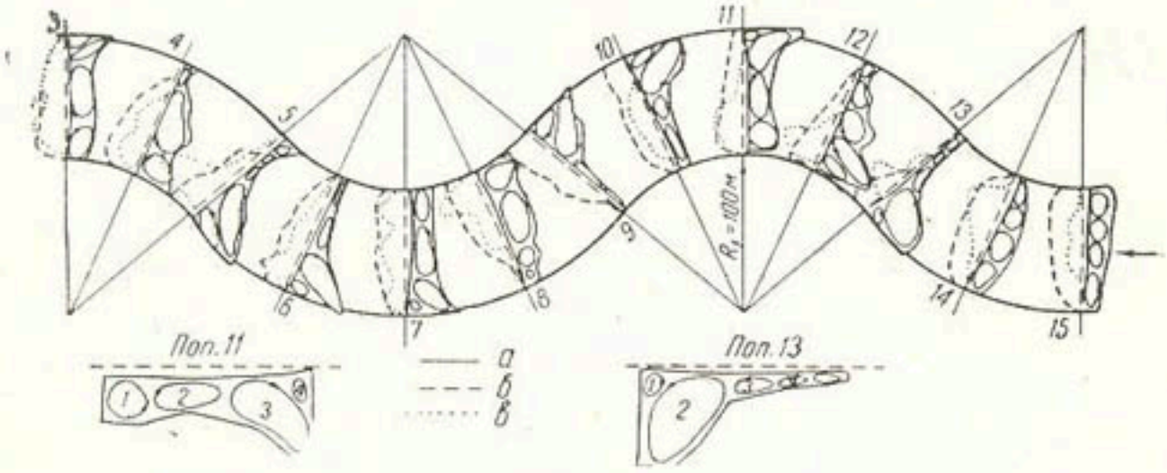


Рис. 3. Схема вертикальных течений в извилистом русле с размываемым дном и неразмываемыми берегами.

а—эпюра глубин, *б*—эпюра средних скоростей, *в*—эпюра влечения донных наносов.

отвод из криволинейного русла может быть отобрано до половины воды совсем без донных наносов. Такова роль циркуляции. Нет водозабора без поперечной циркуляции, полезной или вредной, по какой бы схеме он ни строился.

Хорошо известна полезная роль поперечной циркуляции в ферганской схеме водозабора. Однако она не ограничивается данной схемой.

На селевых реках используется водозабор через решетку в донном пороге при минимуме застройки речного створа. Расположение решетки водоприемника не на прямом участке, как это практикуется, а у вогнутого, неразмываемого берега криволинейного участка несомненно улучшило бы работу этого водозабора.

По рекомендации и при консультации гидротехнической лаборатории САНИИРИ (А. П. Ушаков) в 1956 г. Южно-Казахстанской экспедицией института „Казгипроводэлектро" (инж. П. К. Константиниди) запроектирован водозабор из р. Балдыбрек с водоприемником решетчатого типа и криволинейным руслом по ферганской схеме.

КОМПОНОВКА СХЕМЫ И ПОДВОДЯЩЕЕ РУСЛО

Выбор схемы узла — наиболее ответственный момент в проектировании водозабора. Он производится с максимальным использованием действующих в естественном водотоке сил для создания благоприятного режима потока в месте отвода воды.

Схема водозаборного узла сооружений составляется на основе сопоставления режима источника на участке водозабора с режимом потребления. Хотя режим источника часто существенно изменен хозяйственной деятельностью человека, он все же рассматривается как естественный фактор, учитываемый для наиболее эффективного исполь-

зования водных запасов при проектировании режима потребления. Каждый отдельный водозаборный узел расценивается как элемент комплекса водозаборов. По речным системам сопоставляются генеральные схемы их комплексного использования.

Кроме обычных расчетных характеристик водного источника, при проектировании водозабора необходимы основные характеристики режима водопотребления, непосредственно влияющие на схему узла сооружений:

1) односторонность или двусторонность водозабора;

2) требуемая степень освобождения воды от наносов;

3) проектируемый коэффициент водозабора, представляющий отношение отводимого расхода воды к расходу реки выше водозабора — $\varphi = \frac{Q_в}{Q_р}$. В данном случае особый интерес имеют значения коэффициента φ при максимальном расходе реки, чему обычно соответствует и максимум содержания в реке наносов; наибольшее значение самого коэффициента водозабора φ ($\varphi_{макс}$). Этот показатель является решающим при выборе схемы и конструкции водозаборного узла для успешной борьбы с наносами. Если $\varphi_{макс}$ приходится на период, когда в реке донные наносы не движутся ($\rho = 0$), рассматриваемая характеристика дополняется максимальным значением φ в период транспортирования рекою донных наносов[1] (φ при $\rho > 0$), так как оно в этом случае расчетное;

4) гидравлические, конструктивные и эксплуатационные характеристики каналов, отходящих от водозаборного узла;

5) путевые устройства для сообщения между берегами реки и каналов (мосты, подъездные пути), энергетика, рыбоводство и пр.;

6) особенности зимней эксплуатации каналов и сооружений.

Основными требованиями, предъявляемыми к водозаборному узлу, конструируемому с учетом характеристик источника и потребления, являются создание благоприятных условий протекания потока во всех частях узла при всех расходах; выполнение заданного деления воды и наносов при всех расходах; экономичность и простота конструкций в строительном и, особенно, эксплуатационном отношениях (водомерность, удобство и минимум потребного маневрирования затворами и др.) при полной надежности работы и обеспеченности от аварий.

Компоновка схемы водозаборного узла усложняется противоречивостью предъявляемых к нему требований, а также переменностью условий, в которых он работает. Недопуск в каналы донных наносов требует водоприема из верхних слоев потока, а борьба с плавником (древесина, мусор, шуга, лед и т. п.) — сброса поверхностных струй. Ирригация нуждается в больших расходах в середине лета, энергетика же — в относительно равномерном стоке. Большой диапазон колебания речных расходов, быстрота нарастания паводков, двусторонность водозабора, пропуск транспорта через сооружения усложняют схему.

Благоприятный для водозабора створ реки выбирается по технико-экономическим соображениям. Составляются эскизные варианты конструктивных схем водозаборного узла с учетом естественных условий и хозяйственных требований.

Отметим лишь некоторые из них, непосредственно влияющие на техническое качество узла сооружений.

---

[1] Значения φ определяются по пятидневкам или декадам.

Благоприятные геологические условия обеспечивают надежное основание для сооружений. Положительный показатель — устойчивость руслового участка в обоих бьефах будущего узла. Наилучшим является спокойный подход реки с относительно нешироким руслом и спокойным очертанием берегов к плотине или к искусственно устраиваемому подводящему руслу. Важна устойчивость русла не только в поперечном, но и в продольном профиле.

Большая динамичность в изменении русла реки особенно вредна в верхнем бьефе, где она создает неустойчивый подход к узлу. Вредна она и в нижнем бьефе (возникает опасность подмыва каналов и подъездных путей, располагаемых по берегам реки).

Относительно устойчивые излучины русла в широкой пойме реки в нижнем бьефе плотины могут иметь и положительное значение при отборе большой доли чистой воды из наносонесущей реки у низконапорной плотины. Увеличивается очень ценная в этом случае емкость бьефа как наносохранилища, создаются благоприятные условия для устройства спрямляющих прорезей при угрозе завала плотины наносами.

Участок с большими уклонами ниже водозабора, если русло устойчивое, облегчает сброс наносов в реку.

Участок с большими уклонами, порожистый, с быстринами и внезапными поворотами выше водозаборных сооружений неблагоприятен, так как создает дополнительное взмучивание речного потока.

Вторая половина или конец плавной кривой могут упростить устройство подводящего русла с благоприятной для водоприема структурой потока.

Опасен приток реки выше створа плотины с удельным содержанием наносов, бо́льшим, чем река, особенно когда приток находится близко от водоприемника и на одном с ним берегу.

При выборе створа следует учитывать возможности расположения строительной площадки и эксплуатационного городка и в первую очередь удобства эксплуатации и максимальное выполнение требований водопользования.

Во многих случаях для производства работ выгодно размещать водораспределительные сооружения вне действующего русла реки с последующим прорытием проектного подводящего русла и перекрытием русла, действующего после постройки основных сооружений[1]. Это нередко позволяет подобрать гидравлически удобную трассу подводящего русла и избавляет от устройства обводного русла на время строительных работ.

Должны учитываться доступность створа, транспортные условия, местные строительные материалы.

Устройство водозаборов на конусах выносов с интенсивными переформированиями русел и аккумулированием наносов связано с большими трудностями. Однако по благоприятным условиям командования и доступности именно эти места часто, и вполне резонно, выбираются под головные водозаборные сооружения. Разработаны приемы преодоления трудностей.

Борьба с донными наносами в условиях горно-предгорной зоны Средней Азии — обязательное и в то же время трудно выполняемое требование, предъявляемое к водозабору. Существующие приемы борьбы с донными наносами наиболее сильно влияют на компоновку схемы водозаборного узла, и поэтому мы берем их за основу класси-

---

[1] Так скомпонована плотина, показанная на рис. 10.

фикации схемы водозаборов. Все приемы борьбы с наносами применены на разных водозаборных сооружениях.

Первыми по времени строились в Средней Азии хорошо известные по литературе плотины, названные индийскими. Сооружение состоит из водосливной плотины, располагаемой поперек русла реки, с промывными шлюзами по концам (при двустороннем водозаборе). Регуляторы водоприемников с повышенными порогами размещаются под прямым углом к плотине. Наносы осаждаются в карманах-отстойниках перед промывными шлюзами и водоприемниками. Карманы промываются периодически через промывные шлюзы. На время промыва водозабор прекращается.

Схема эта проста и мало стесняет речной поток, но водозабор по ней очень затруднителен. Неудобства бокового водозабора, перерывы в подаче воды на время промыва, чрезмерное усложнение схемы при попытках обеспечить удовлетворительный вход потока в карманы и др. привели к отказу от строительства водозаборов этого типа в условиях Средней Азии.

Не раз предлагавшиеся гравиеловки для осаждения наносов в камерах непосредственно за регулятором водоприемника с периодическим смывом в Средней Азии почти не применяются: трудности смыва осевших крупных наносов противодействуют успешному применению схем, основанных на данном приеме борьбы с наносами.

На горных селеносных реках небольшое количество воды (до 10 $м^3/сек$) отводится через решетки, не допускающие поступления крупных наносов в водоприемные галереи, располагаемые в теле донного порога-плотины. Несмотря на еще не устраненные эксплуатационные трудности, сооружения, основанные на таком приеме борьбы с наносами, широко применяются в Казахской и Киргизской ССР.

Широко применяются схемы водозабора, содержащие конструкции, делящие поток на зоны по высоте с отводом в канал верхней, свободной от наносов зоны.

Водозаборные сооружения (ферганский тип), осуществляющие борьбу с наносами путем развития поперечной циркуляции в потоке перед водоприемником, оказались наиболее эффективными и получили признание в Средней Азии. Рассмотрим эту схему.

Характеристики поперечных течений на повороте русла даны выше. Напомним лишь, что в криволинейном русле поверхностные струи с максимальными продольными скоростями и, следовательно, максимальными центробежными силами инерции, набегая на вогнутый берег, создают здесь повышенные уровни и теснят донные струи вместе с влекомыми ими наносами к противоположному выпуклому берегу.

Идея схемы водозаборного узла по принципу поперечной циркуляции состоит в приеме воды у вогнутого берега криволинейного русла, где свободный от наносов поток сосредоточивается при всех расходах реки.

В состав плотинного водозабора с использованием поперечной циркуляции входят следующие части: 1) зарегулированное криволинейное подводящее русло, 2) щитовая плотина, 3) водоприемный порог различной конструкции на вогнутом берегу с расположенным за ним регулятором канала. Существенной и обязательной составной частью в некоторых условиях является катастрофический водослив, примыкающий к плотине со стороны выпуклого берега.

На рис. 4 представлена вододелительная часть принципиальной схемы ферганского типа водозабора. В ней, как будет показано ни-

же, важное значение для работы узла имеет фронтальность его составных частей (фронтальность — величина проекции данного элемента на перпендикуляр к оси подводящего русла).

Ферганская схема является по существу схемой одностороннего водозабора, так как поперечная циркуляция, освобождая поток от наносов у одного берега (вогнутого), перегружает его у другого (выпуклого). Использование схемы для двустороннего водозабора достигается конструктивными усложнениями, как это видно на примерах водозабора из Карадарьи и Соха. Водозабор у выпуклого берега, как правило, недопустим.

Лабораторные исследования и практика эксплуатации низконапорных водозаборных плотин в Средней Азии показали, что незаре-

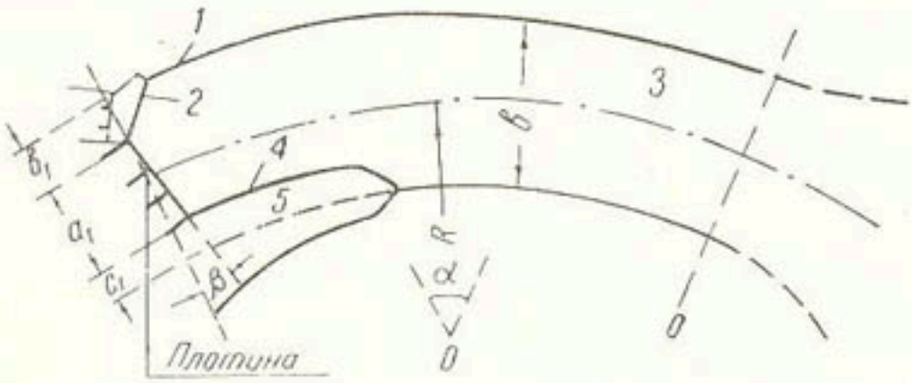


Рис. 4. Принципиальная схема водозабора ферганского типа.

1—урез воды при расчетном расходе, *2*—водоприемный порог, *3*—подводящее русло, *4*—катастрофический водослив; *5*—траншейный сброс; относительные фронтальности: $a=a_1/B$ (на рисунке—ошибочно b) плотины, $b=b_1/B$ водоприемного порога, $c=c_1/B$ сбросного водослива; α—угол поворота подводящего русла, β—угол щитового сброса (отклонение фронта плотины от $\perp$ к подводящему руслу).

гулированный подход к плотине реки, блуждающей в собственных отложениях, делает безуспешной борьбу с наносами. Это относится не только к ферганской, но и к другим схемам. Устройство зарегулированного подводящего русла стало здесь неотъемлемой частью водозаборного узла.

В ферганской схеме водозабора подводящее русло — одна из важнейших составных частей гидроузла. Оно должно обеспечить пропуск максимальных расчетных расходов в заданных габаритах без ущерба для прочности сооружения, достаточные глубины и благоприятную структуру потока у водоприемника с отвлечением от него наносов, а также оградить поток от блуждания при малых расходах реки.

Приемы выполнения поставленных общих требований рассматриваются ниже на конкретных примерах отдельных объектов.

Кампыр-Раватский водозаборный узел

Питающая водозабор р. Карадарья несет многолетний среднегодовой расход 117 *м*³/*сек*, средний максимальный 500 (1914—1950 гг.), максимальный наблюденный около 1100.

Обычный паводок ($\approx$ 200—300 *м*³/*сек*) продолжается около 3 мес. (V—VII); меженные расходы составляют $\approx$50 *м*/³*сек*. Наблюдались быстро нарастающие паводки; зарегистрировано прибавление расхода до 250 *м*³/*сек* за 12 час.

Средний бытовой уклон реки на участке водозабора 0,0045. При максимальных расходах река передвигает камни размером до 40 *см*.

Ниже приводится фракционный состав донных наносов, имеющих среднюю крупность 54 *мм*.

Диаметр, мм	*Содержание, %*
180-100	11
100-50	35
50-20	29
20-2	13
2-0	12

Среднегодовой сток донных наносов определяется в 150 тыс. $м^3$ с десятикратным увеличением в исключительно многоводный год (1936).

Среднегодовой сток взвешенных наносов исчислен в 5,5 млн. *т* с зарегистрированным максимальным удельным содержанием до 13 $кг/м^3$.

Фракционный состав взвешенных наносов с $d_{ср} = 0{,}05$ *мм* характеризуется следующими данными.

Диаметр, мм	*Содержание, %*
1-0,25	4
0,25-0,12	6
0,12-0,05	10
0,05-0,01	20
<0,01	60

Узел располагается в месте сжатия реки горами, подступающими с обеих сторон. Узкая (150 *м*) пойма облегчает сопряжение подводящего русла с коренными берегами. Близкое (1 — 2 *м* и более) подстилание русла скальными породами упрощает устройство фундаментов. При таком расположении подводящее русло принуждено вписываться в плановую форму теснины. Непосредственно ниже плотины ширина поймы резко возрастает (до 1—2 *км*), увеличивается и толщина слоя галечных отложений в ней.

Гидроузел проектировался на водозабор в левобережный канал 188 $м^3/сек$ (с форсированием до 230 $м^3/сек$) и в правобережный — до 15. Применена принципиальная схема одностороннего водозабора с использованием поперечной циркуляции для борьбы с наносами. Переброска воды на правый берег запроектирована через дюкер, расположенный в теле плотины (рис. 5). Правобережный канал не построен, и дюкер не эксплуатировался.

Криволинейная в плане плотина с радиусом 168 *м* состоит из 8 пролетов по 15 *м*, разделенных быками толщиной по 2,5 *м*. Толщина их к низовой части уменьшается до 1,5 *м*. Угол между фронтом плотины и регулятором равен 121° и уменьшается до 100° в месте смыкания фронтов.

Плотина расположена в пойме, а водоприемник — непосредственно в русле реки. Порог плотины заложен на 1,5—2 *м* ниже отметок поймы.

Пролеты плотины перекрываются сегментными затворами высотой 3,9 *м*. Затворы двух примыкающих к водоприемнику пролетов плотины снабжены козырьками для сброса шуги. В эксплуатации эти козырьки не использовались: шуга пропускалась в канал. Затворы оборудованы электрифицированными подъемниками. Порог плотины и грани быков на высоту 0,5 *м* облицованы чугунными плитами размером 50 × 35 × 4 *см*. Общая площадь облицовки 1180 $м^2$.

Водоприемник, состоящий из 10 пролетов по 5 *м*, расположен фронтально по отношению к подводящему руслу, составляя угол 97° с левобережной струенаправляющей дамбой. Один из пролетов подает воду в дюкер для перевода на правый берег. Пролеты разделены армированными бычками по 0,7 *м* толщиной.

Отверстия водоприемника перекрываются деревянными шандорами с электрифицированным передвижным подъемником.

Перед фронтом затворов водоприемника устроен криволинейный порог, возвышающийся на 1,5 *м* над порогом плотины и описанный радиусом 70 *м*.

Зарегулированное подводящее русло двойной кривизны (в виде знака интеграла) имеет общую длину около 800 *м*. Очертания русла подобраны на модели. Правобережная струенаправляющая дамба двойной кривизны, длиной 660 *м*, описана радиусами 150 ÷ 400 *м*. Подво-

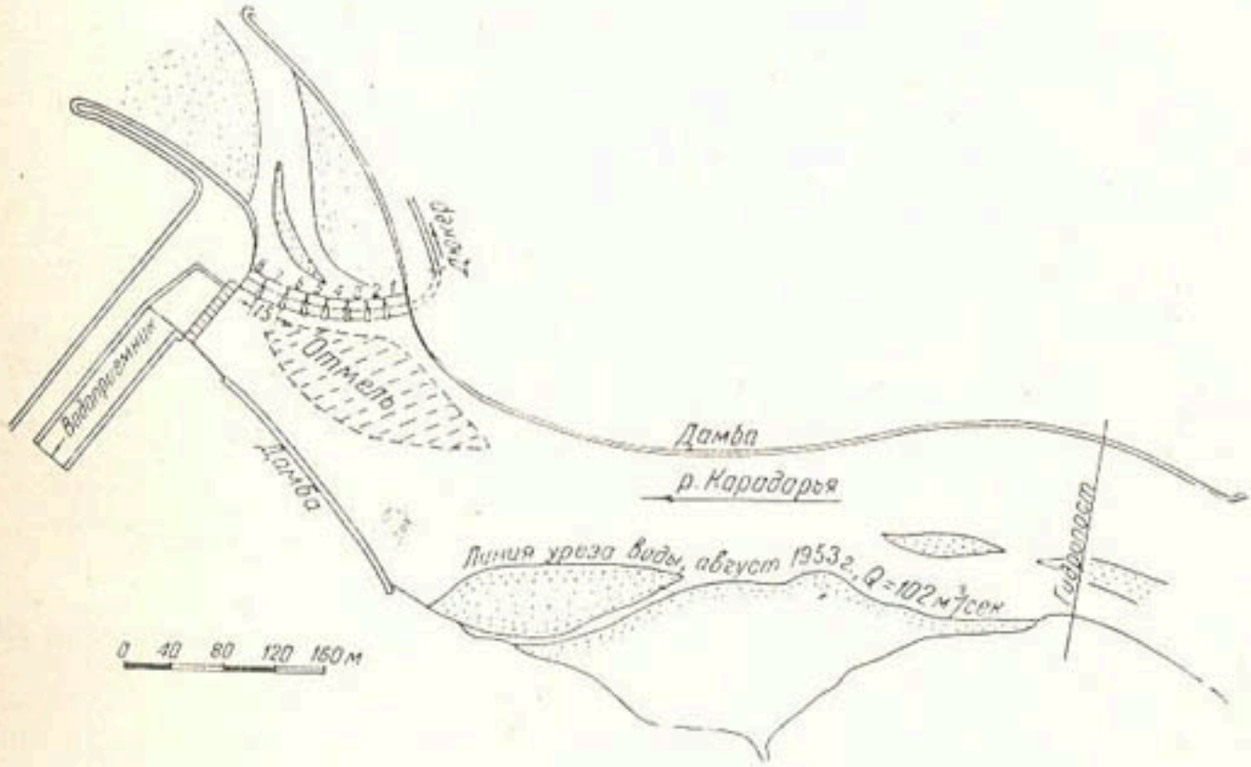


Рис. 5. Плотина Кампыр-Рават и ее струенаправляющие дамбы.

дящее русло Кампыр-Раватского гидроузла характеризуется отсутствием обычного для стандартной ферганской схемы вогнутого ведущего берега перед водоприемником. Как видно из рис. 5, русло состоит из двух противоположно направленных криволинейных плесов и сопрягающего их переката. Относительно устойчивый подход речного потока к плотине обеспечивается условиями вступления реки в зарегулированное русло с нажимом потока на правую струенаправляющую дамбу и работой этой дамбы. При таких условиях устройство короткой прямолинейной струенаправляющей дамбы у левого берега перед водоприемником оказалось достаточным: не потребовалось оформления левого берега в средней части русла.

Основные параметры подводящего русла, приведенные в табл. 1, очень приближенные, так как оно не строилось по определенным геометрическим фигурам, а подобрано на модели в привязке к конкретному заданному участку реки.

На рис. 6 показано подводящее русло на модели (масштаб 1 : 40) в горизонталях после пропуска расхода, превышающего максимальный расчетный, а на рис. 7 — траектории и эпюры поверхностных скоростей в том же опыте при полностью открытых пролетах плотины.

Существовавшая еще до строительства плотины шпора с гребнем на уровне меженных вод (по модельным исследованиям) положительно влияет на направление потока, сосредоточивая его у струенаправляющей дамбы. Из рис. 7 видно, что при крутом повороте русла вправо на подходе к плотине максимальные скорости продолжают держаться у правой, уже выпуклой дамбы, в то время как фарватер

Таблица 1

Характеристика подводящих русел

Река и гидроузел	Расход реки, $м^3/сек$			Процент обеспеченности, $Q_{расч}$	Уклон реки в тысячных	Ширина зеркала подводящего русла, $м$	Длина подводящего русла		Радиус закругления по оси подводящего русла		Угол поворота, градусы
	среднегодовой	максимальный									
		50% обеспеченности	расчетный				абс., $м$	относит., в частях B	абс., $м$	относит., в частях B	
Кара-Дарья, Кампыр-Рават	117,0	500	1400	0,1	4,5	80-150	800	10-5	200—600 и больше	—	—
Сох, Сары-Курган	43,0	180	360	0,1	10	30-45	150	3-5	40-200	1-7	56
Каратаг	22,6	136	350	0,1	5	34	165	5	186	≈4	66
Ангрен	24,6	168	750	0,1	10	46-32	190*	4-6	120****	2,5-4	67
Кугарт	16,4	105	251	1,0	12	26-15***	190**	7-13	92	3-6	86

* Учтены лишь прямая вставка и нижний криволинейный участок.
** Из них 70 $м$ в пределах водослива.
*** Величина переменная, осредненная для верхнего и нижнего участков.
**** Величина радиуса принята осредненной, фактически она изменяется от 130 до 115 $м$.

переходит к левому берегу. В верхней части русла превышение уровня воды у правого вогнутого берега над уровнем у левого в этих опытах достигало 0,6 $м$. В нижней части поперечный уклон имел обратное направление и разность уровней у плотины составляла 1,25 $м$.

Вдоль фронта регулятора уровень приближался к горизонтальному. Соответственно уровням воды менялись и уклоны в русле вдоль берегов. Если в начальной части уклон у левого берега был вдвое больше, чем у правого, то в конце он был в десять раз меньше.

В створе *5* на подходе к узлу (рис. 7) третья часть ширины потока с расходом 45—50%, превышающим в 3 раза расход водоприемника в опыте, приходится против левой половины плотины. Поэтому происходит энергичное отклонение потока в сторону пролетов плотины с развитием интенсивной поперечной циркуляции и полным отвлечением донных наносов от водоприемника. Два правых отверстия в опытах почти не работали. Находясь с внутренней стороны круто изогнутого потока, они заваливались наносами как с верхнего, так и с нижнего бьефов.

При малых расходах поток в русле теряет устойчивость, перед плотиной образуется отмель и, наконец, остров, как показано на рис. 5.

На двух третьих зарегулированного русла поток как в период модельных исследований, так и в течение более двух десятков лет эксплу-

атации построенного гидроузла сосредоточивается у правой струенаправляющей дамбы с отжимом к левому берегу лишь перед самой плотиной. Отсюда следует, что питание проектировавшегося правобережного канала можно было осуществить через отдельный водоприемник по схеме последовательного водозабора, что проще дюкера.

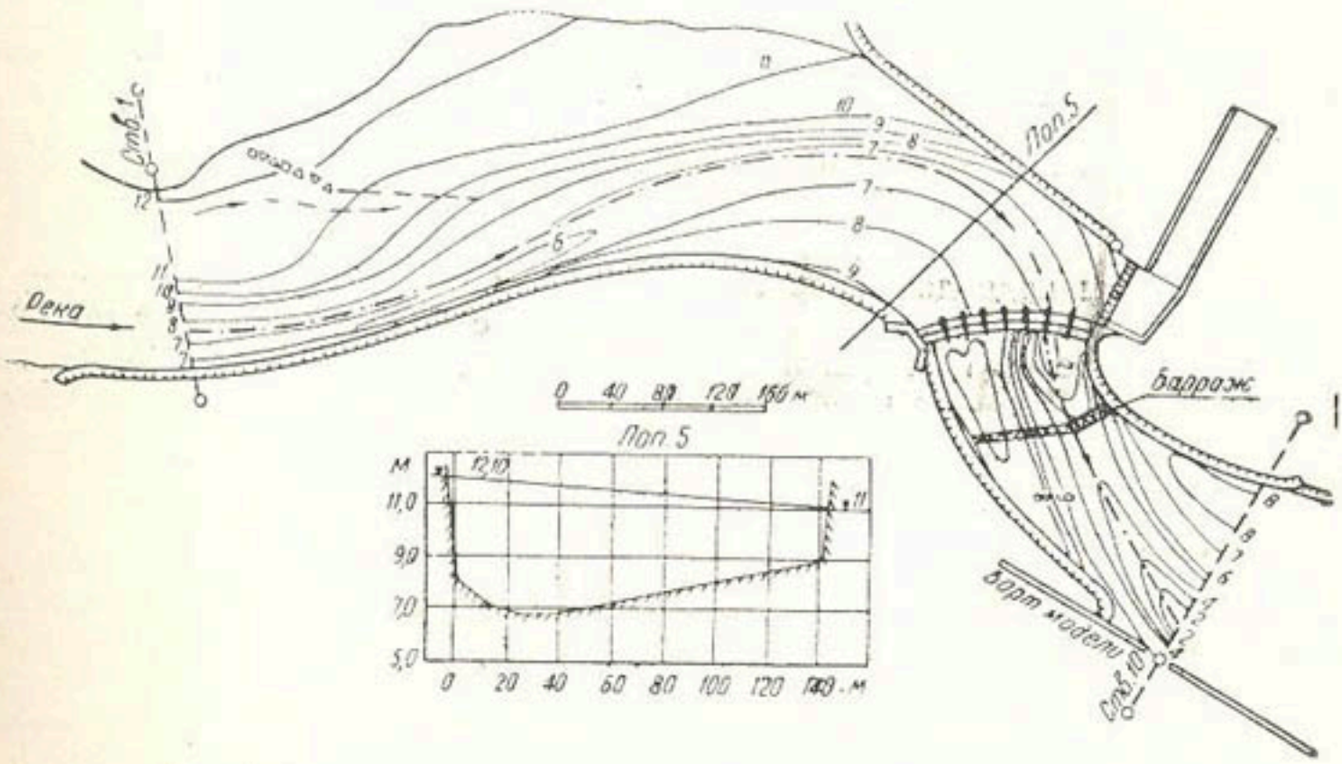


Рис. 6. Русло в горизонталях после пропуска Q =1500 $м^3/сек$.

Исследования по модели показали возможность промыва заиленного подводящего русла при расходах обычного половодья без прекращения водозабора, что вполне подтвердилось опытом эксплуатации.

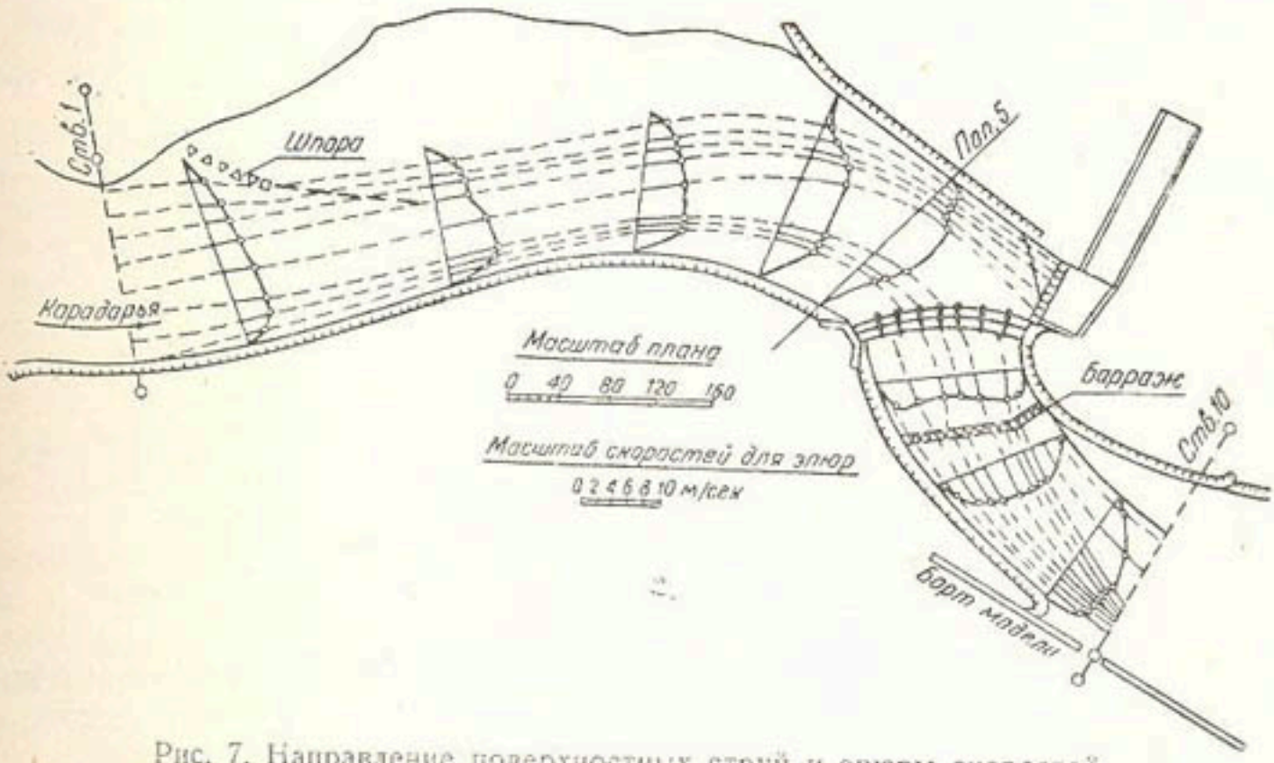


Рис. 7. Направление поверхностных струй и эпюры скоростей при $Q = 150$ $м^3/сек$; водозабор 230 $м^3/сек$.

Вследствие маловодности первых лет эксплуатации гидроузла и других причин наносы, отложившиеся в русле, недостаточно промы-

вались. Возникли опасения за пропускную способность плотины [10]. Дальнейшими наблюдениями при больших расходах установлена промывающая способность русла. Максимальная пропускная способность, по-видимому, также близка к установленной модельными исследованиями, хотя не могла еще быть проверенной ввиду отсутствия соответствующих расходов.

По замерам экспедиции гидротехнической лаборатории в 1953 г., при меженном расходе реки (102 $м^3/сек$) имелись отложения наносов перед плотиной на высоту 2,3 *м* (над порогом плотины) и на 1,5 *м* у левого устоя, что близко к величинам, полученным по модельным исследованиям. Дно подводящего русла в створе гидропоста Уз ГМС на расстоянии 560 *м* от плотины повысилось после строительства на $\approx$ 0,5 *м*; тенденции к дальнейшему повышению не замечается.

Дамбы подводящего русла общей длиной 950 *м* (700 *м* правая и 250 левая) построены из местного грунта с укреплением мокрого откоса наброской из крупного рваного камня, размером 0,5—1,5 $м^3$, весом до 4 *т*. Ширина наброски до 1,5 *м* поверху и до 4 *м* понизу. Дамбы без ремонта уже в течение 20 лет выполняют свое назначение по укреплению русла.

Сары-Курганский водозаборный узел на р. Сох

Гидроузел расположен в галечной пойме ($i = 0{,}01$) шириной около 600 *м*, в месте выхода реки на широкий конус выноса (рис. 8).

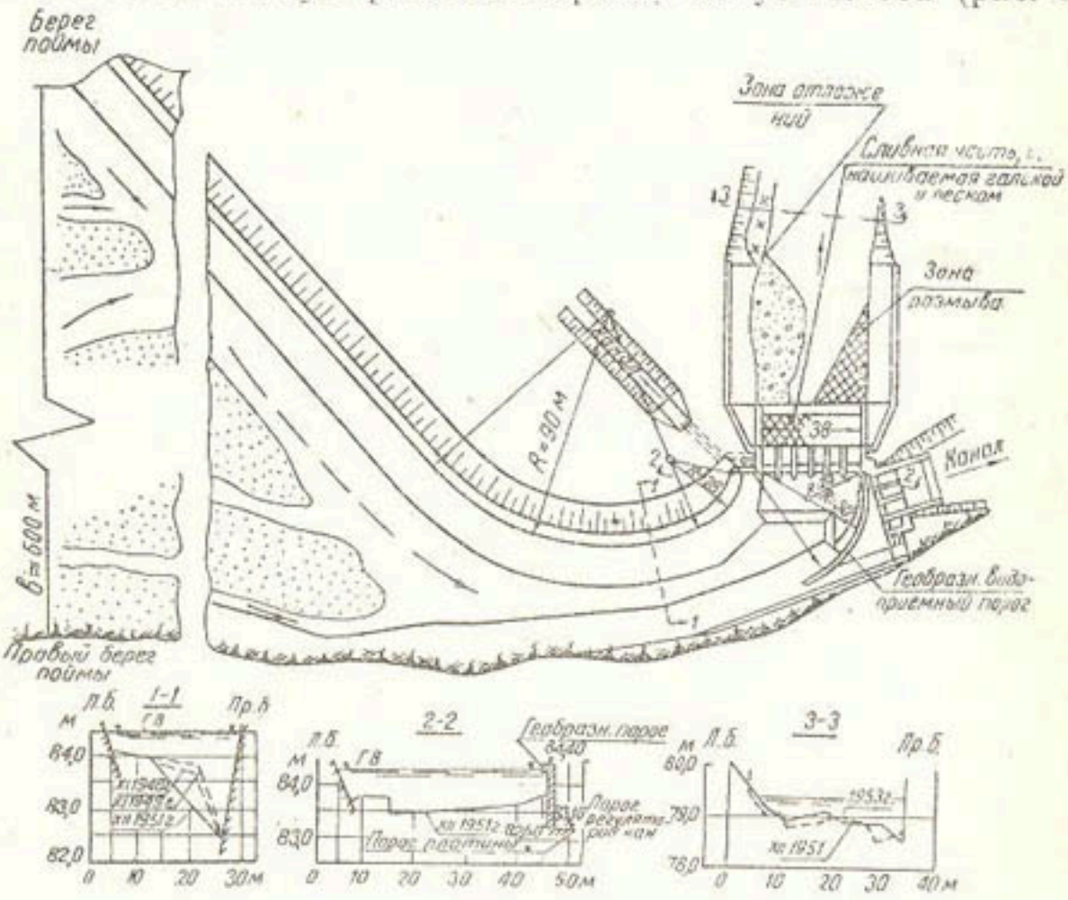


Рис. 8. Сары-Курганский водозаборный узел на р. Сох.

Река Сох ледниково-снегового питания с длительным летним половодьем имеет, однако, и резкие паводковые колебания расхода. Значения характерных расходов реки приведены в табл. 1.

Гидроузел подает воду на оба берега, но скомпонован по ферганской схеме с расположением плотины и водоприемника у правого высокого берега поймы. Проектный водозабор 98 $м^3/сек$, из которых 38

передается на левый берег через дюкер, находящийся под водобоем плотины (рис. 25, 26).

Основное русловыправительное сооружение — струенаправляющая дамба длиной 825 *м*, перекрывающая пойму реки под углом 45÷50° и образующая левый берег подводящего русла. Низовым концом она примыкает к левому устою плотины. Дамба насыпана из местного галечного грунта поймы с $m = 1{,}75$, шириной по верху 5 *м*. Напорный откос ее облицован бетонной кладкой толщиной 0,5—0,6 *м*, с втопленными в нее валунами размерами до 0,3 — 0,4 *м* (бутобетон — 30% бетона и 70% валунов).

Дамба у плотины возвышается над ее порогом на 6,3 *м*, а над максимальным расчетным уровнем воды — на 3,0. Большой запас в высоте дамбы, как и в высоте устоев и быков плотины, сделан с учетом будущего наращивания порога плотины после занесения нижнего бьефа гидроузла.

Верх дамбы на длину 290 *м* построен без уклона, а на верхнем начальном участке ей придан уклон 0,005, примерно в два раза меньше уклона поймы реки.

Криволинейная часть дамбы, образующая левый берег подводящего русла, описана радиусом 90 *м*; ее оконечность, примыкающая к плотине,— радиусом 29 *м*, считая по бровке дамбы. Угол поворота подводящего русла составляет около 70°.

Правый берег подводящего русла образован естественным конгломератным берегом поймы, сглаженным под откос около 1,75 и укрепленным бетонировкой.

Правый берег подводящего русла описан радиусом, примерно в 5 раз большим, чем левый, поэтому ширина русла переменна по длине с минимумом в средней части. Показанные в табл. 1 характеристики отражают действительные величины лишь приближенно. Пространство между правым естественным берегом и левобережной струенаправляющей дамбой уменьшается постепенно. Начальная часть подводящего русла имеет форму конфузора шириной на входе более 50 *м*. В начальной и средней частях закругление очень пологое с относительным радиусом $\rho = \frac{r}{B} = \frac{200}{30-50}$. При подходе вдоль правого берега поток может быть почти прямолинейным. Резкий поворот поток испытывает в концевой части, где на длине около 40 *м* по оси он поворачивается на угол около 56° с относительным радиусом закругления, близким к единице. В концевой части русла, благодаря крутому повороту и расширению, происходит восстановление кинетической энергии потока.

На рис. 8 показаны глубины воды в подводящем русле, замеренные при меженных расходах.

В средней части русла, в створе I—I, сформировались характерные для криволинейного участка поперечные сечения с глубинами у вогнутого берега, превышающими до четырех раз глубины у выпуклого. Так как и скорости у вогнутого берега в два-три раза больше, чем у выпуклого, то удельные расходы на единицу ширины профиля здесь в десять раз и более превышают расходы у выпуклого.

На рис. 9 нанесены уровни воды и отметки дна русла вдоль дамбы. Подошва дамбы имеет уклон 0,005, отметка у плотины на 3,1 *м* ниже порога плотины.

На модели проекта наблюдалось и в эксплуатации подтвердилось периодическое перемещение речных протоков в пойме в процессе ее занесения. Действующие русла наращиваются крупным камнем, пока по-

ток не свалится в межрусловые пространства, где до того отлагался более мелкий материал. Так меняются места подхода потока к дамбе, а следовательно, и места подмыва дамбы. На рис. 9, отражающем это явление, можно видеть, что запасы в заложении подошвы дамбы не велики, кроме второй половины подводящего русла. Проектные отмет-

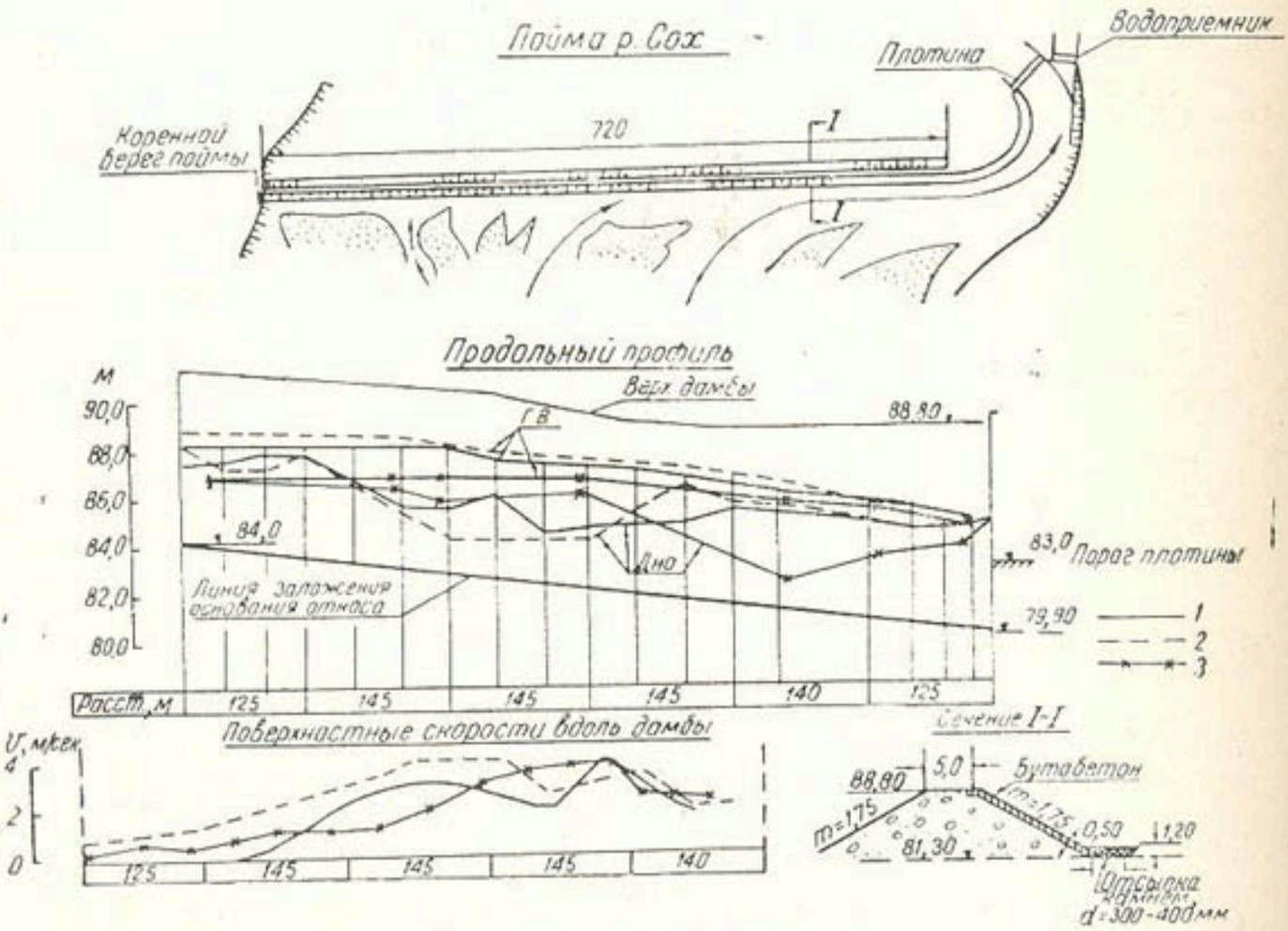


Рис. 9. Струенаправляющая дамба Сары-Курганского гидроузла.

1 — горизонты воды, дно и скорости 18.V 1954 г. при $Q = 45{,}4$ *м³/сек*; *2* — 3.VIII 1954 г. при $Q = 149{,}1$ *м³/сек*; *3* — 13.VII 1949 г. при $Q = 140$ *м³/сек*.

ки дамбы проверялись на модели. По наблюдениям 1954 г., в местах сосредоточенного подхода потока к дамбе, почти перпендикулярно ее направлению, глубины достигали 4 *м*, поверхностные скорости 4,2 *м/сек* при среднем уклоне водной поверхности около 0,006.

Кроме описанной выше построенной косой дамбы, в проекте рассмотрен вариант дамбы, расположенной перпендикулярно пойме для кратчайшего соединения верхнего конца подводящего русла с левым берегом. По результатам исследований модели этот вариант отклонен.

Плотина на р. Каратаг

Плотина проектировалась для одностороннего водозабора в правобережный оросительный канал из предгорного участка р. Каратаг, которая протекает по пойме шириной до 120 *м*, имеющей средний уклон $i_{ср} = 0{,}011$ при бытовом уклоне реки $i_р = 0{,}005$. Пойма сложена песчано-галечной смесью с $d_{макс} = 250$ *мм*.

Характерные расходы реки (табл. 1) следующие: максимально наблюденный 182 *м³/сек*, среднегодовой многолетний 22,6, минимальный 3,5, максимальный 50-процентной обеспеченности 136 и расчетный

0,1-процентной обеспеченности 350 *м³/сек*. По характеру питания река относится к смешанному типу. Паводки обычно проходят в мае—июне. Иногда отмечаются селевые паводки.

О расходе донных наносов на р. Каратаг неизвестно; фракционный состав взвешенных наносов за 1953 г. приводится ниже.

Диаметр, мм	*Содержание, %*
0,5—0,25	5
0,25—0,05	15
0,05—0,01	25
< 0,01	55

Нормальный проектный расход канала 31,4 *м³/сек* с форсировкой до 40 *м³/сек*. Проектом предусмотрен забор до 70% речного расхода при движении донных наносов и всего расхода реки в межень.

В гидротехническую лабораторию САНИИРИ для модельных исследований по этому объекту представлен проект плотины с четырьмя пролетами по 10 *м* в свету, прямолинейным подводящим руслом длиной 115 *м* и шириной по дну 50 *м*. Для борьбы с наносами введен кри-

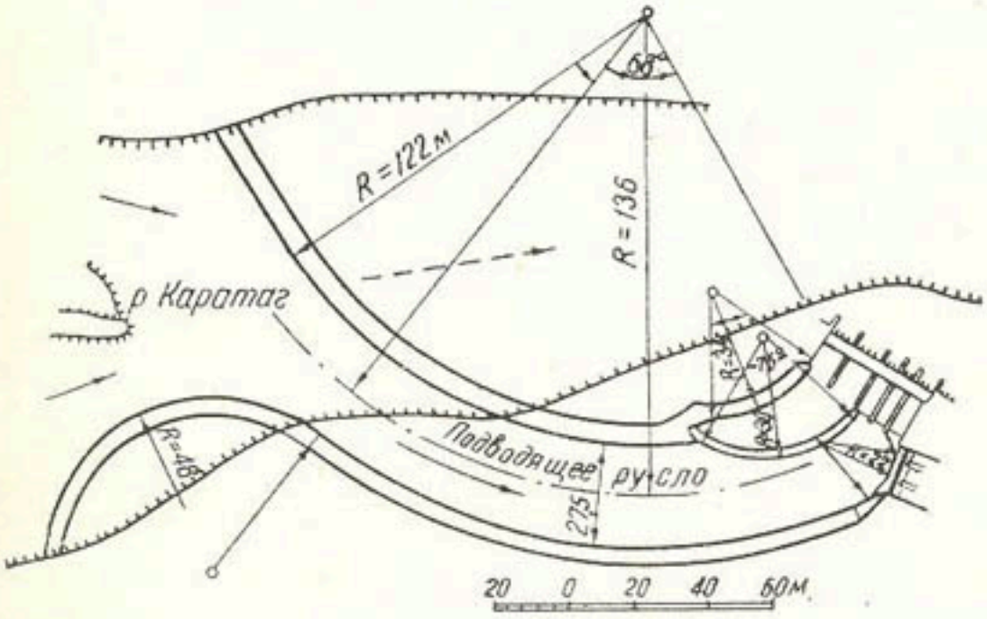


Рис. 10. План головного сооружения Тупалангского канала на р. Каратаг (лабораторное проектирование).

волинейный ($r = 19$ *м*) карман длиной 30 *м*, шириной 10 *м*, с гравиеловкой в виде поперечной открытой донной галереи по схеме, рекомендованной для горной р. Ардон.

Результаты исследований модели показали неустойчивость потока в широком прямолинейном подводящем русле с перегрузкой наносами криволинейного кармана, циркуляция и галерея в котором не справлялись с отклонением донных наносов от водоприемника.

При исследованиях в гидротехнической лаборатории, в порядке лабораторного проектирования [24], скомпонован водозабор по ферганской схеме, показанной на рис. 10. Плотину с примыкающими к ней сооружениями располагают на берегу пологой речной излучины, за естественной перемычкой, с тем чтобы не устраивать обводного русла.

При составлении схемы и подборе элементов узла решена задача забора в канал до 70% расхода речной воды без завлечения донных наносов.

В результате опытов на модели принято криволинейное подводящее русло шириной по зеркалу воды при рабочем уровне 34 *м* (при $Q = 45$ *м³/сек*), увеличивающейся до 38 *м* при максимальном расчетном расходе реки. Длина его 165 *м*, радиус закругления по оси 136 *м*, центральный угол поворота $\alpha = 66°$.

Борьба с донными наносами осуществляется поперечной циркуляцией в потоке, возбуждаемой подводящим руслом и усиливаемой дополнительным искривлением у водоприемного порога. При компоновке схемы на модели испытаны четыре варианта, причем для усиления борьбы с наносами первоначальное русло несколько сужено, усилена роль катастрофического водослива увеличением его длины и выдвижением в русло. Горизонтальная полка водоприемного порога доведена до затвора, примыкающего к водоприемнику пролета плотины. В принятом варианте значительно сужена концевая часть подводящего русла с приданием относительной фронтальности водоприемнику примерно 0,36, катастрофическому водосливу около 0,24; фронт щитовой плотины при этом занимает около 40% средней ширины подводящего русла.

Русло на подходе к щитовой плотине сильно сжато, и лишь на расстоянии 40 *м* от нее ширина его возрастает до 27 *м*.

При малом паводковом расходе (45 *м³/сек*) ширина верхней части подводящего русла со средней глубиной 0,9 *м* явно велика; поток проявляет тенденцию к блужданию в нем. Верхняя часть катастрофического водослива, выдвинутого в подводящее русло до 36% его ширины, облегчает в данном случае борьбу с наносами, играя роль направляющей шпоры, придающей потоку лобовое направление относительно водоприемника. В то же время это выдвижение способствует выравниванию удельного расхода через катастрофический водослив при больших расходах.

Подводящее русло, занесенное отложениями наносов при малых расходах самопромывалось на модели при увеличении расхода в рабочих условиях, без выключения водозабора. С возрастанием расходов от 45 до 350 *м³/сек* в части русла выше катастрофического водослива средние глубины увеличиваются от 0,9 до 3,0 *м* за счет повышения уровня и размыва дна. Повышение составляет около 1,7 размыва.

При максимальном расчетном расходе становится ощутимым поперечный уклон водной поверхности: на участке выше катастрофического водослива он равняется среднему продольному уклону и возрастает к концу водосливной части русла до 0,04. При таком расходе продольный уклон вдоль выпуклого берега в три раза больше, чем вдоль вогнутого.

Ангренский водозаборный узел

Гидротехнической лабораторией САНИИРИ совместно с Ленинградским отделением теплоэлектропроекта разработан (гл. инж. проекта П. А. Солодов), а Узгидроэнергостроем (А. С. Вавилов и А. А. Звонцов) осуществлен в 1957 г. водозаборный узел ферганского типа на р. Ангрен [19].

Река Ангрен снегово-дождевого питания, имеет следующие характерные расходы: максимальный наблюденный 399 *м³/сек*, многолетний среднегодовой 22,4, средний из максимальных наблюденных 160 (1927 — 1952 гг.) и максимальный расчетный расход 0,1-процентной обеспеченности 750 *м³/сек* и 1-процентной — 498.

Гидроузел построен на участке реки по выходе из ущелья на конус выносов. Река здесь протекает по искусственному обводному руслу угольных разработок, так что бытовой режим ее изменен деятельностью человека. Средний уклон на участке 0,009 — 0,01. В составе донных отложений в створе гидроузла имеется более 10% камней диаметром свыше 200 *мм*, $d_{макс} = 300$ *мм*, $d_{ср} = 80$. Отдельные камни на участке достигают 0,8 — 1,0 *м*.

Гидроузел одностороннего водозабора (рис. 11) состоит из щитовой плотины, развитого катастрофического водослива, водоприемника и криволинейного подводящего русла. Гидроузел проектировался и

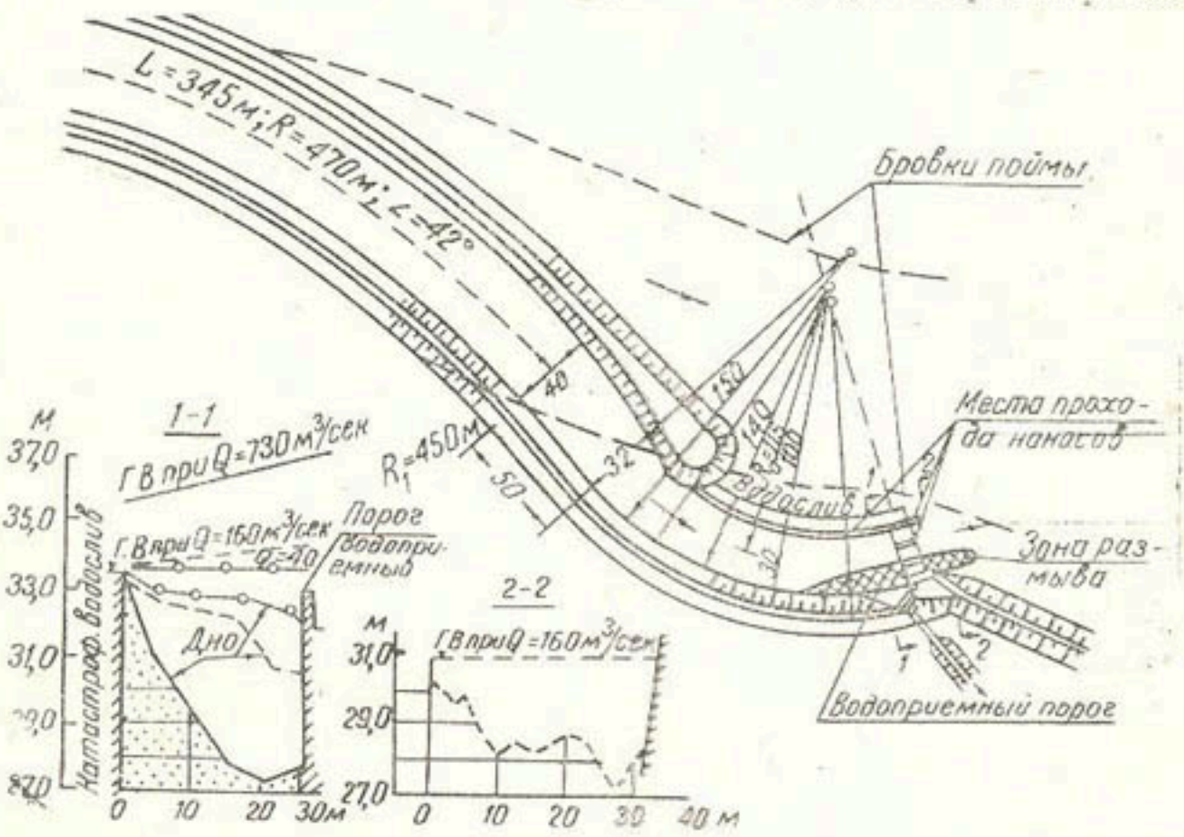


Рис. 11. Водозаборный узел на р. Ангрен.

испытывался на модели на водоприем до 10 *м³/сек*. В дальнейшем выяснилась необходимость увеличения водозабора до 24 *м³/сек*, что удалось получить благодаря проектным запасам и некоторым переделкам водоприемника.

Водозабор запроектирован из реки, протекающей на протяжении около 4 *км* выше гидроузла по искусственному обводному руслу угольных разработок.

По проекту гидроузла, для создания благоприятного подхода к плотине концевой части обводного русла приданы двойная кривизна и размеры, показанные на рис. 11.

Для преодоления вредного влияния верхнего участка с обратной кривизной на низовую часть подводящего русла с водоприемником на его вогнутом берегу введена прямолинейная вставка длиной 50 *м*, сопрягающая две противоположно направленные кривые. Сопрягающей вставке придана односторонняя конусность с углом $\alpha = 9°$ поджатием левого берега, направляющим поток к вогнутому берегу нижнего криволинейного участка. Считая условно подводящим руслом лишь прямую вставку и нижний криволинейный участок до плотины, т. е. элементы, преобразующие вредную поперечную циркуляцию в полез-

ную, получим длину подводящего русла в 190 *м*, из них 105 в пределах вододелительной части и 85 на подходе к ней.

На рис. 12 приводятся гидравлические характеристики по модельным исследованиям подводящего русла, сформированного расходом 80 *м*³/*сек*, представляющим среднемесячный расход половодья, соот-

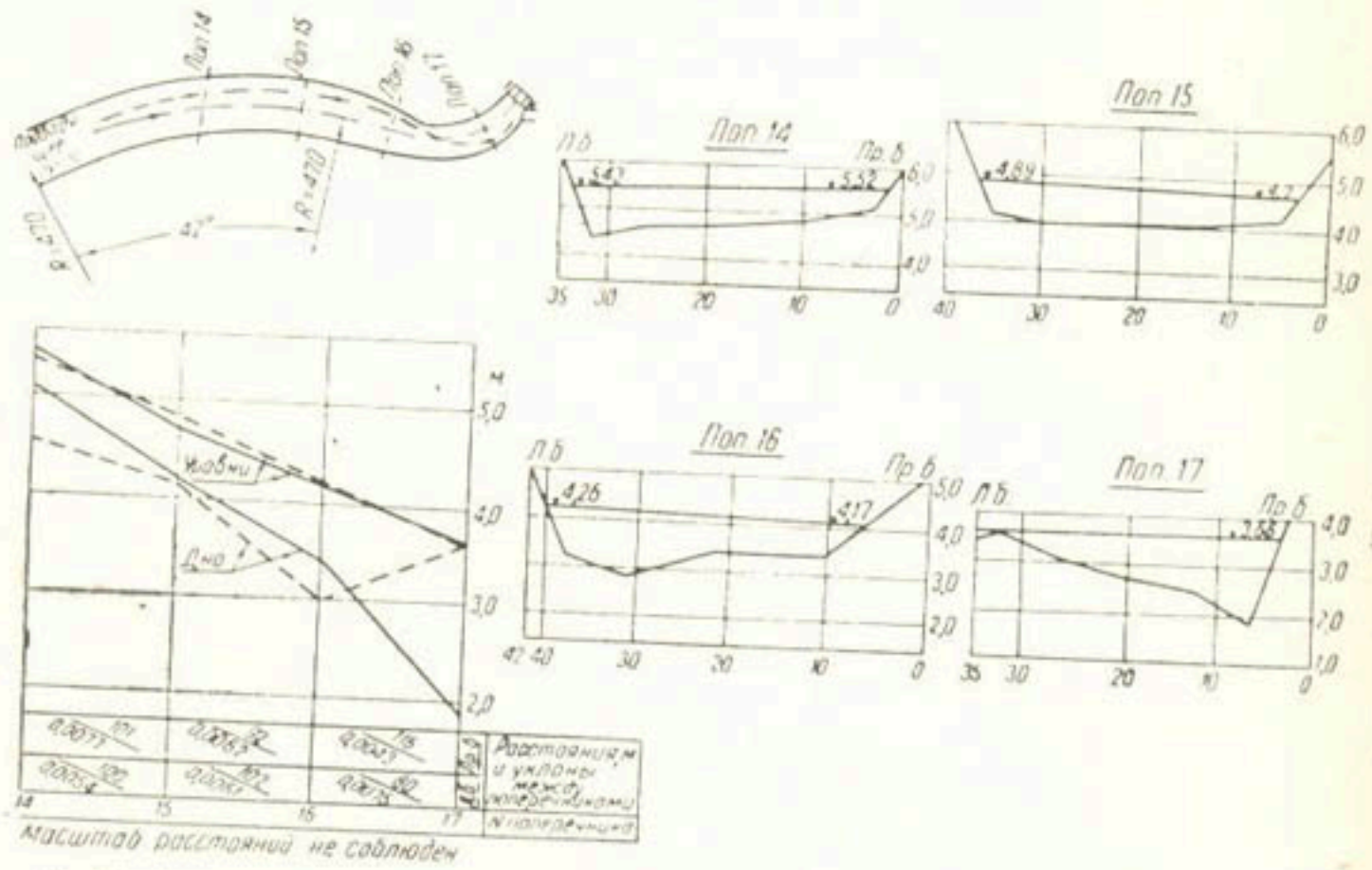


Рис. 12. Профили дна и уровни воды в подводящем русле на модели Ангренского гидроузла при $Q_{нат} = 80 м^3/сек$.

ветствующий максимуму движения донных наносов (май). В створе *16* стрежень еще у противоположного водоприемнику берега. Перекат между створами *16* и *17*.

Элементы гидроузла подобраны с расчетом прохождения расхода (примерно до максимального 50-процентной обеспеченности) через щитовую плотину без вступления в работу катастрофического водослива.

Проектная ширина подводящего русла по дну для верхнего криволинейного участка принята $b = 40$ *м*. При модельных исследованиях русло несколько деформировалось и имело ширину по урезу $B = 33$—34 *м* при $Q = 80$ *м*³/*сек*, которая увеличивалась до 43—45 *м* при руслоформирующем расходе 400 *м*³/*сек*. Эти величины близки к ширине существующего обводного русла в более устойчивом верхнем участке. По натурным и модельным наблюдениям, обводное русло проявляет особую неустойчивость на низовом участке, где ширина достигает 50—60 *м*.

В пределах катастрофического водослива подводящее русло сужается до 35—32 *м*, а при подходе к плотине — еще больше.

Относительный радиус кривизны по оси для верхней кривой $\rho = \frac{470}{45} \approx 10$, для нижней $\frac{125}{32} \approx 4$.

Угол поворота нижней кривой $\alpha = 67°$, ее длина 140 *м*.

Катастрофический водослив является продолжением выпуклого берега подводящего русла и примыкает по касательной к левобережному устою плотины.

В начальном створе нижнего криволинейного участка стержень потока при всех расходах находится у левого, выпуклого берега, а на 100 *м* ниже в створе *17* надежно сосредоточивается у вогнутого берега. Меняет знак и перекос водной поверхности, возрастающий с увеличением расходов и достигающий у плотины значений, приведенных на рис. 12.

Кугартский водозаборный узел

Рассматриваемая схема водозаборного узла ферганского типа разработана в порядке лабораторного проектирования в поисках рекомендаций для реконструкции существующих неудовлетворительно работающих сооружений.

Река Кугарт снегового питания с резко выраженным кратковременным весенним половодьем протекает в районе плотины по пойме шириною до 600 *м*. Уклон поймы 0,012—0,013, уклоны отдельных русел 0,008—0,01.

Пойма сложена галечником с размерами валунов до 40—45 *см*. Берега поймы лессовые, подстилаемые галечником, подмываются блуждающей по ней рекой.

Наблюденные расходы изменяются от 1,3 $м^3/сек$ до 200.

Максимальные расчетные расходы составляют: 50-процентной обеспеченности 105 $м^3/сек$, 10-процентной 164, 5-процентной 208, 1-процентной 251.

При паводковом расходе 130 $м^3/сек$ река переносит 1,98 *г/л* донных и 12,4 *г/л* взвешенных наносов. Минимальные расходы при их движении 16—19 $м^3/сек$.

Плотина с водозабором двустороннего командования построена одной из первых в Средней Азии по схеме, показанной на рис. 13. Она состоит из щитовой части с суммарной величиной отверстий в свету 28 *м* и водосливной части длиной 35 *м*.

Проектировщики стремились возможно меньше нарушать естественное состояние реки. Этим и объясняется значительная общая длина фронта плотины — 68,5 *м*, а также постановка порога плотины на наиболее низких отметках русла и малый рабочий напор на плотине (1 *м*) с увеличением до 2 *м* при пропуске максимального расчетного расхода.

Водозабор для правобережного канала до 3,94 $м^3/сек$ производится из кармана в средней части плотины с переброской воды на берег водоводом, расположенным в теле водосливной плотины, имеющей гребень на 1 *м* выше порога щитовой части плотины; на левый берег вода (до 4,82 $м^3/сек$) подается через боковой открытый водоприемник.

Для предупреждения обхода рекой плотины насыпаны водоудержательные дамбы до коренных берегов поймы и устраивались временные сипайные струенаправляющие дамбы.

Избыточная величина фронта плотины и незарегулированность подхода к ней потока в первые же годы эксплуатации приводила к забивке водоприемников наносами с выводом плотины из строя.

После полевых и лабораторных исследований недостатков гидроузла усилены разрушавшиеся крепления, повышен рабочий напор до 1,6 *м* и устроены перед водоприемниками выносные полки А. В. Троицкого для борьбы с наносами расслоением потока по высоте.

Полки значительно улучшили работу гидроузла в отношении борьбы с наносами. Однако ввиду конструктивных недостатков (малые отверстия, много стоек для образования щитовых пазов) и недостаточная зарегулированность русла их эксплуатация оказалась неудобной.

Хотя к водоудержательным дамбам (рис. 13), идущим поперек поймы от плотины к коренным берегам ее, были добавлены струенаправляющие дамбы, один из основных недостатков схемы — чрезмерно большой фронт плотины — сохранился. Кроме того, подводящее русло было непропорционально коротким.

Согласно предоставленной потоку большой ширине подхода определялись малые удельные расходы его и соответственно — слабые крепления. Фактически поток блуждал по широкому руслу и подходил к плотине с удельными расходами значительно больше проектных. Это было одной из причин систематических повреждений креплений пло-

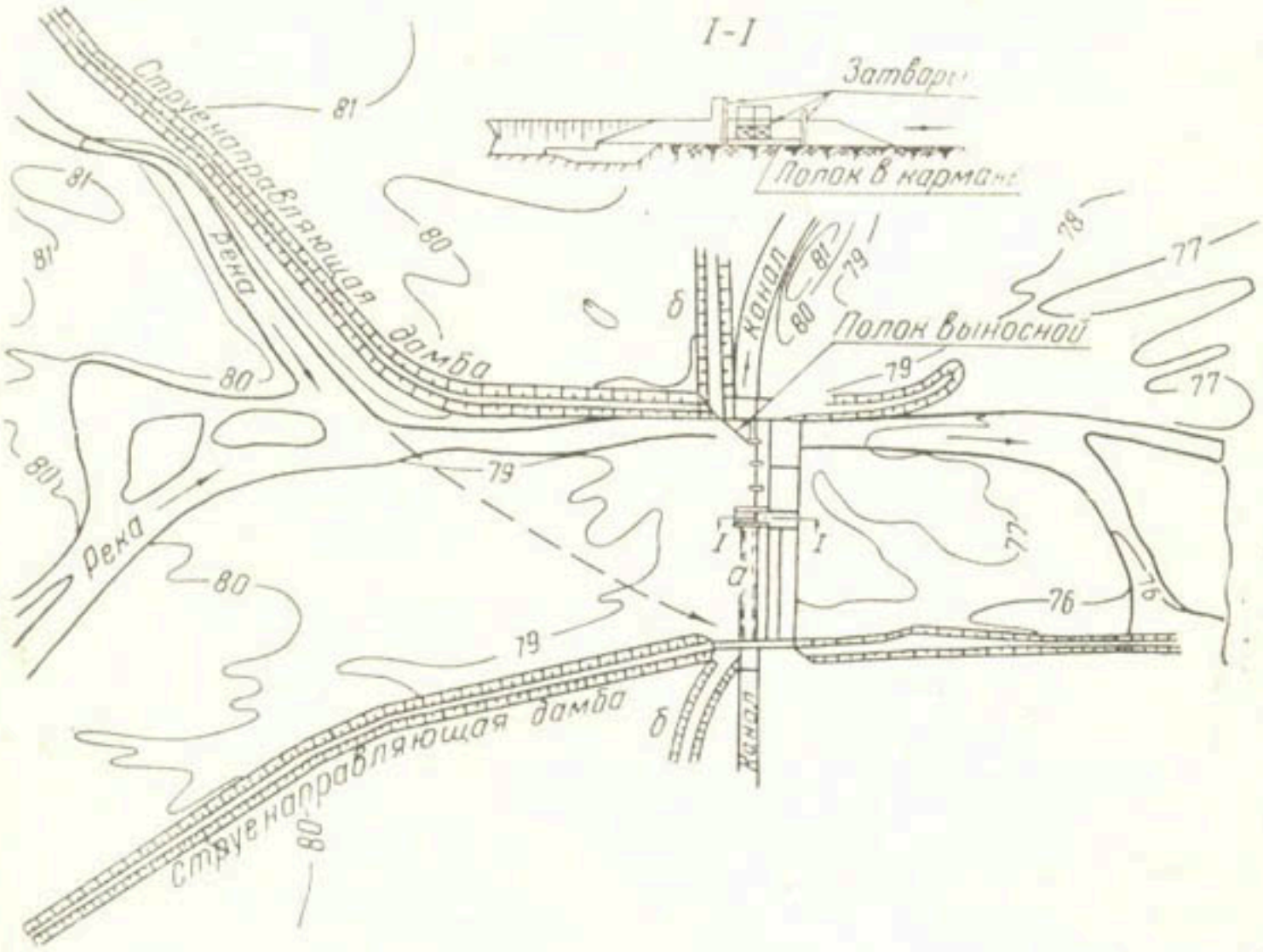


Рис. 13. Схема двустороннего водозабора на горной реке с делением потока по высоте (русло XI 1938 г.). Вверху водозабор в разрезе.
а — водосливная плотина с потерной в реке, *б* — водоудержательные дамбы.

тины и привело в 1953 г. к серьезной аварии. Уже в предшествовавшие аварии годы речной поток стал сосредоточиваться у левой струенаправляющей дамбы на подходе к подводящему руслу.

В половодье 1953 г. поток косо пересекал подводящее русло, как показано пунктирной стрелкой на рис. 13, и сосредоточенной струей бил в правую дамбу и правобережный устой верхнего бьефа. При расходе реки около 130 *м*³/*сек* подмыты правобережный устой и водосливная плотина в примыкающей к нему части. Вода прорвалась в канал под устоем и в нижний бьеф плотины под водосливом; водобойная плита на этом участке была снесена.

Перед аварией поток при расходах, достигавших 175 *м*³/*сек*, перебрасывался через водосливную плотину у правого берега, тогда как через все щитовые полностью открытые пролеты плотины с порогом на 1 *м* ниже водослива проходило лишь около 20 *м*³/*сек*. Водозабор левобережного канала оказывался необеспеченным, канал подпитывался

через временную неинженерную голову, расположенную выше плотины в месте прижима речного потока к левой струенаправляющей дамбе.

В гидротехнической лаборатории САНИИРИ испытывались модели реконструкции плотины с максимальным использованием существующих сооружений [22]. Наряду с этим, в порядке лабораторного проектирования, проработан вариант коренной реконструкции плотины по схеме ферганского типа водозабора (рис. 14).

Модели испытывались при неизменном водозаборе — 9,9 $м^3/сек$, составлявшем 24% среднепаводкового расхода и около 4% максимального расчетного расхода реки.

Особенность этого варианта гидроузла — отведение большой роли катастрофическому водосливу длиной 68 *м*, располагаемому на вы-

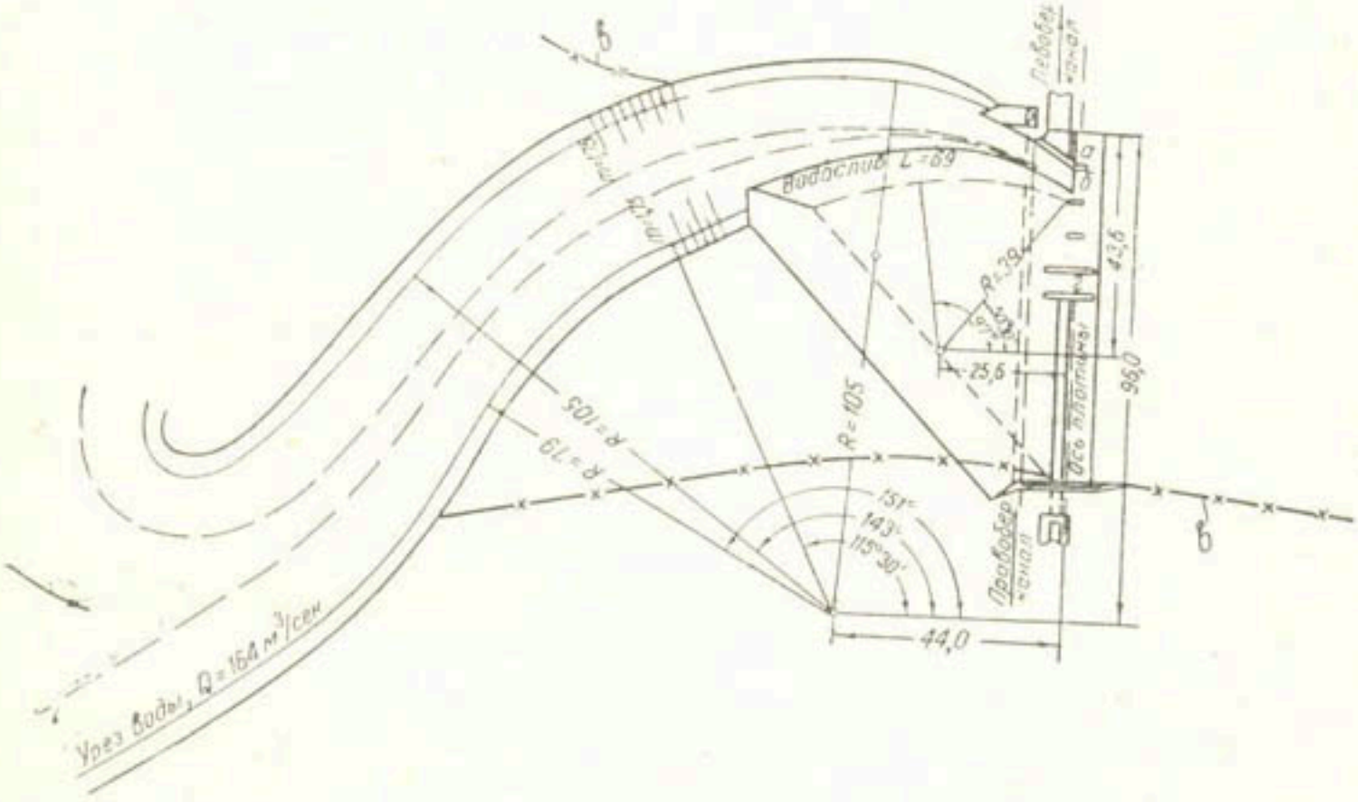


Рис. 14. Схема реконструкции плотины на р. Кугарт (лабораторное проектирование).

а — перекрываемый пролет существующей плотины; *б* — пролет плотины $l=6$ *м*, сохраняемый в схеме реконструкции; *в* — дамбы существующего сооружения (размеры в метрах натуры); *г* — вход в люкер для подачи воды на правый берег, $I_б = 0{,}012$, $Q_{ср.\ год} = 16{,}1$ $м^3/сек$, $Q_{макс.\ набл} = 191$ $м^3/сек$, $Q_{20\%} = 105$ $м^3/сек$; $Q_{10\%} = 164$ $м^3/сек$.

пуклом берегу подводящего русла. Отметки гребня катастрофического водослива и переменная по длине ширина канала подобраны так, чтобы среднемесячный (многолетний) расход воды во время влечения наносов — 41,1 $м^3/сек$ — проходил по руслу без перелива через гребень водослива.

Длина подводящего русла в верхней части до катастрофического водослива 120 *м* и в пределах этого водослива 70 *м*. Ширина суживающегося русла по урезу воды при $Q_{макс}$ 50% составляет 30÷22 *м*, в среднем 26 *м* в верхней части и около 15 *м* в нижней.

Русло двойной кривизны в плане. В верхней части, до водослива, можно различить три участка: 1) описанный радиусом 100 *м*, длиной 30 *м*; 2) прямолинейный, сопрягающий два противоположных криволинейных участка, $l = 40$ *м*; 3) с $r = 92$ *м*, $l = 60$ *м*. Нижняя часть описана радиусом 95—42 *м*.

Поток на модели вступал в подводящее русло, образованное бетонированными берегами с откосами $m=1,75$ и песчано-гравелистым дном, с навалом на правый берег. При входе потока с поймы в подводящее русло создавался подпор с обратным уклоном уровня воды. На переходном участке сохранялась циркуляция предшествующей кривой: глубины у правого берега при $Q=251$ *м³/сек* достигали 3,5 *м* при глубинах у противоположного берега около 0,5, поперечный уклон водной поверхности примерно равнялся продольному.

Данный вариант реконструкции плотины, разработанный в гидротехнической лаборатории САНИИРИ в 1955 г., по ряду причин не был осуществлен. В 1957—1958 гг. службой эксплуатации произведены работы по реконструкции плотины без учета рекомендаций лаборатории.

В мае 1960 г. на плотине произошла еще одна авария. Из-под понура и водобая, в результате износа их наносами, через образовавшиеся сквозные пробоины был вынесен грунт. Оставшаяся на весу бетонная плита за бычками обвалилась, а при дальнейшем размыве упало два средних бычка. К концу паводка щитовая часть плотины оказалась почти полностью разрушенной [5].

Мы предполагаем, что к причинам аварий (1953 и 1960 г.) относятся не только вышеперечисленные факты, но и увеличение напора на плотине почти в два раза (относительно к осуществленному по проекту) в процессе неоднократных реконструкций и ремонтов ее, без надлежащей увязки с требованиями статики, длиной подземного контура и учета возможного истирания бетона. Эти обстоятельства должны всесторонне учитываться при реконструкции низконапорных плотин (им. 1-го Мая на р. Зеравшан, Караспанский барраж на р.Арысь, Ассакинский регулятор на канале Шаарихан и др.).

* *
*

По способу удовлетворения хозяйственных и технических требований в разных естественных условиях различают следующие варианты ферганского типа водозабора:

1) по фронтальности расположения основных элементов: а) фронтальный водозабор при почти боковом сбросе (Кампыр-Рават, частично Сары-Курган), б) фронтальный водоприем и сброс, в) полуфронтальный водозабор и сброс (Каратаг, частично Ангрен);

2) по наличию в составе гидроузла автоматически действующего (катастрофического) водослива-водосброса;

3) по водозабору на один или оба берега реки;

4) по менее существенным признакам: наличию проезжего моста, характеру кривизны подводящего русла, месту расположения гидроузла и т. д.

Нормальная схема водозаборного узла для горно-предгорных участков должна включать пролеты, перекрываемые затворами, и открытые водосливы. Первые необходимы для промыва русел и пропуска больших расходов на ограниченной ширине подводящего русла, вторые облегчают пропуск внезапных паводков, упрощают эксплуатационное обслуживание.

Свободный пропуск быстронарастающих кратковременных паводков является одним из важнейших условий удовлетворительной работы водозаборного узла на предгорных участках и, безусловно, обязательным условием на горных. Известны случаи аварий, выводивших

сооружения из строя из-за несвоевременного открытия затворов при внезапном паводке.

Замена водосливов сифонами или автоматически действующими затворами затрудняется недостатком обеспеченных перепадов для первых и неразработанностью надежных конструкций для вторых. Сбросной водослив, кроме того, способствует преодолению затруднений по пропуску расходов большого диапазона и борьбе с наносами, как видно из рис. 10, 14 (Каратаг, Кугарт).

Можно различить два варианта сбросного водослива по условиям работы его в составе узла. В одном варианте щитовая плотина обеспечивает пропуск максимального расхода 50-процентной обеспеченности при уровне ниже гребня водослива (рис. 10). В другом варианте сбросной водослив вступает в работу уже при среднепаводковом расходе расчетного года при полностью открытых затворах плотины. В этом случае русло перед водоприемником более сжато, поток более зарегулирован (рис. 14).

Переброска воды на другой берег при двустороннем водозаборе осуществляется конструктивными усложнениями (устройство дюкера) и не влияет на принципиальную схему водозабора. Дюкер рекомендуется подключать к верхним по течению пролетам регулятора, как более предохраненным от завлечения наносов. Вход в дюкер ограждается решеткой. Если в него по условиям гидравлики входа может завлекаться воздух, то должна ставиться выхлопная труба. Для поддержания расчетных скоростей при переменном эксплуатационном расходе желательно устраивать дюкер из двух-трех водоводов.

Положение и конструкция каждого из существенных элементов гидроузла должны назначаться в тесной увязке с размещением и конструкцией других элементов. Например, ширина подводящего русла, величина и положение водопропускного фронта (плотины, водоприемника, сбросного водослива), отметки порогов и глубины креплений как названных элементов, так и подводящего русла оказываются тесно зависящими друг от друга.

Конструктивно и эксплуатационно простая ферганская схема в тяжелых условиях борьбы с наносами при коэффициенте водозабора $\varphi > 0{,}75$ может быть дополнена включением нанососбросных лотков, порогов-галерей и других сбросных отверстий, работа которых в этом случае во много раз облегчается, как доказано модельными исследованиями, проводимыми лабораторией водозаборов на различных конкретных объектах, в которых для усиления борьбы с донными наносами применены дополнительно наносоотбойные вертикальные стенки, пороги-галереи, нанососбросные устройства в теле катастрофических водосливов и т. п.

Отмеченные мероприятия рекомендованы и проведены при модельных исследованиях плотины Арысь-Туркестанского канала (рис. 17, 18), плотины на р. Исфара, Куйлюкской плотины (вариант I и II, гл. инж. проекта Т. С Генкузен) на р. Чирчик (рис. 15, 19), плотины на р. Зеравшан (рис. 16) и др. Особенно хорошие показатели борьбы с донными наносами получены при использовании порога-галереи, предложенной Я. А. Никитиным для водозаборного узла Арысь-Туркестанского канала на р. Арысь [14]. В данных условиях при модельных исследованиях обычной ферганской схемы безнаносный водозабор выдерживается в течение периода наибольшего движения наносов в реке до значений коэффициента водозабора 0,75. С целью защиты канала от проникновения донных наносов при более высоких коэффициентах водозабора, что соответствует периоду межени, когда количество наносов

резко уменьшается, они целиком сбрасываются через порог-галерею. Коэффициент безнаносного водозабора при помощи порога-галереи вследствие значительной отсасывающей силы галерей повышается до 0,95, т. е. почти в 1,5 раза больше установленного для обычного водозаборного сооружения ферганского типа без специальных усиливающих устройств.

Наблюдения за работой порогов-галерей на моделях показали, что в период паводковых расходов и наибольшего движения наносов, когда действием поперечной циркуляции подводящего русла наносы авто-

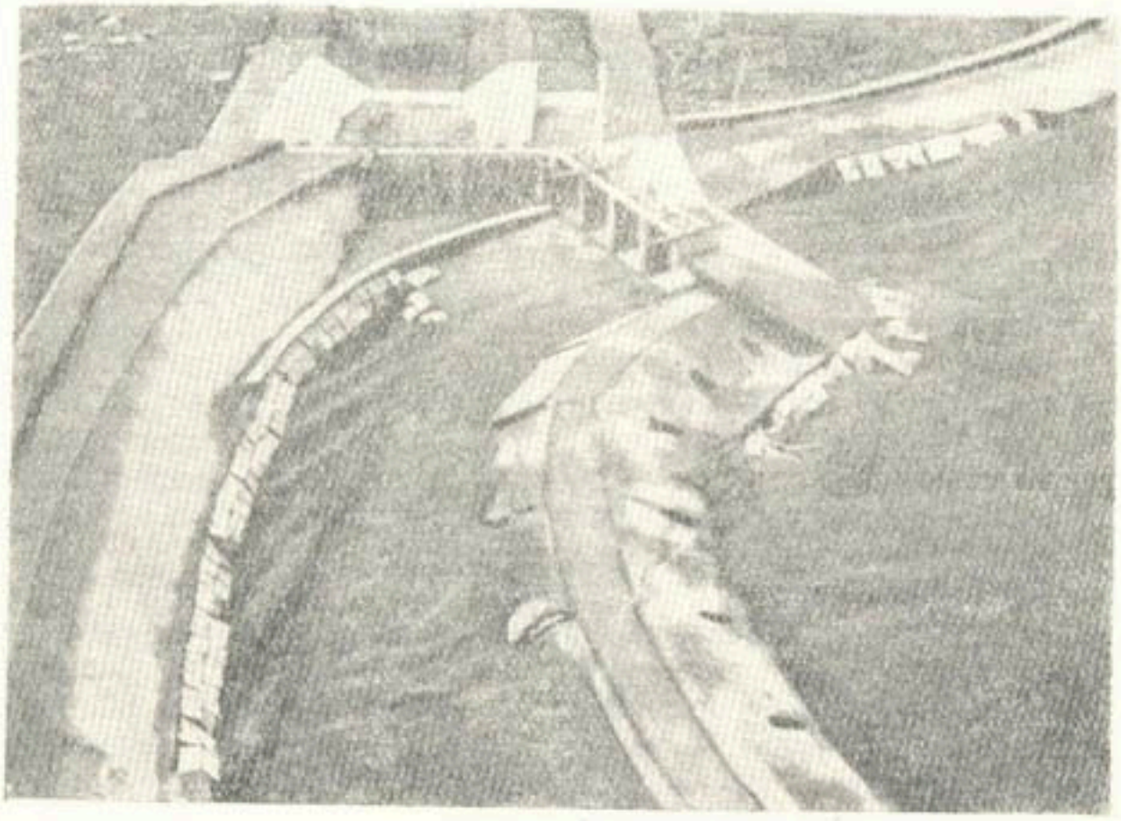


Рис. 15. Вид на концевую часть сооружений Куйлюкского водозаборного узла по II варианту: регулятор левобережного канала с водоприемным порогом Г-образного профиля; щитовой сброс и часть водослива с промывными галереями (модель).

матически отклоняются от регулятора в сторону плотины, пороги-галереи сбрасывают совершенно чистую воду, т. е. они могут быть закрыты, что предохраняет их от засорения плавающими предметами, которые обычно можно наблюдать в естественных потоках в период паводка. Отвод наносов порогом-галереей в нижний бьеф плотины без допуска их в канал следует производить с момента ослабления полезной поперечной циркуляции (когда коэффициент водозабора φ превышает 0,65—0,75).

Для успешного водозабора по ферганской схеме требуется сосредоточение изогнутого речного потока перед водоприемным порогом, что достигается в основном использованием криволинейного подводящего русла.

Элементы криволинейного зарегулированного подводящего русла определяются с учетом характеристик естественных устойчивых самоформирующихся русел. За основные характеристики криволинейного подводящего русла принимаются ширина по зеркалу воды B, радиус кривизны оси русла r и его длина L.

Из рассмотренных примеров компоновки схем видно, что выполнение поставленной задачи в конкретных условиях достигается

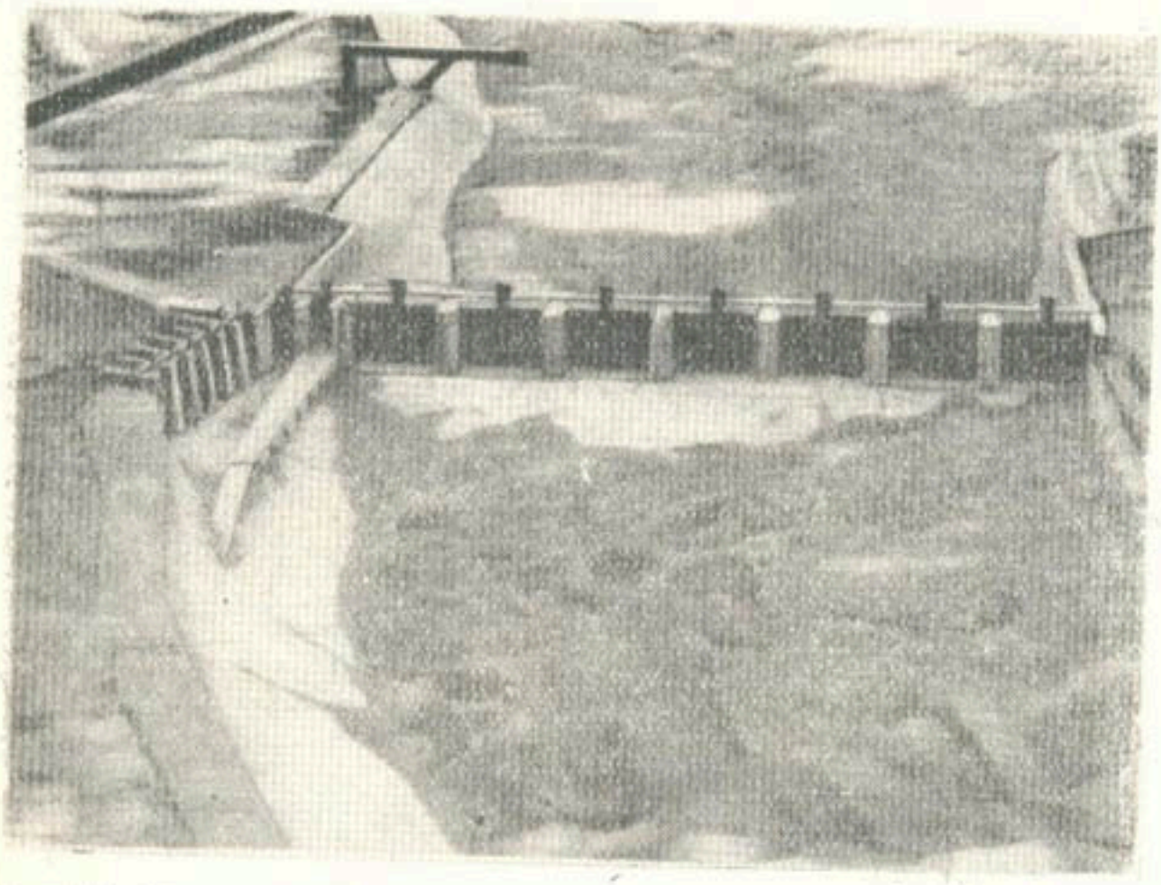


Рис. 16. Вид на плотину Навоинского гидроузла и регулятор канала с водоприемным порогом Г-образного профиля, переходящим в галерею с торцовыми и боковыми входными отверстиями (модель).

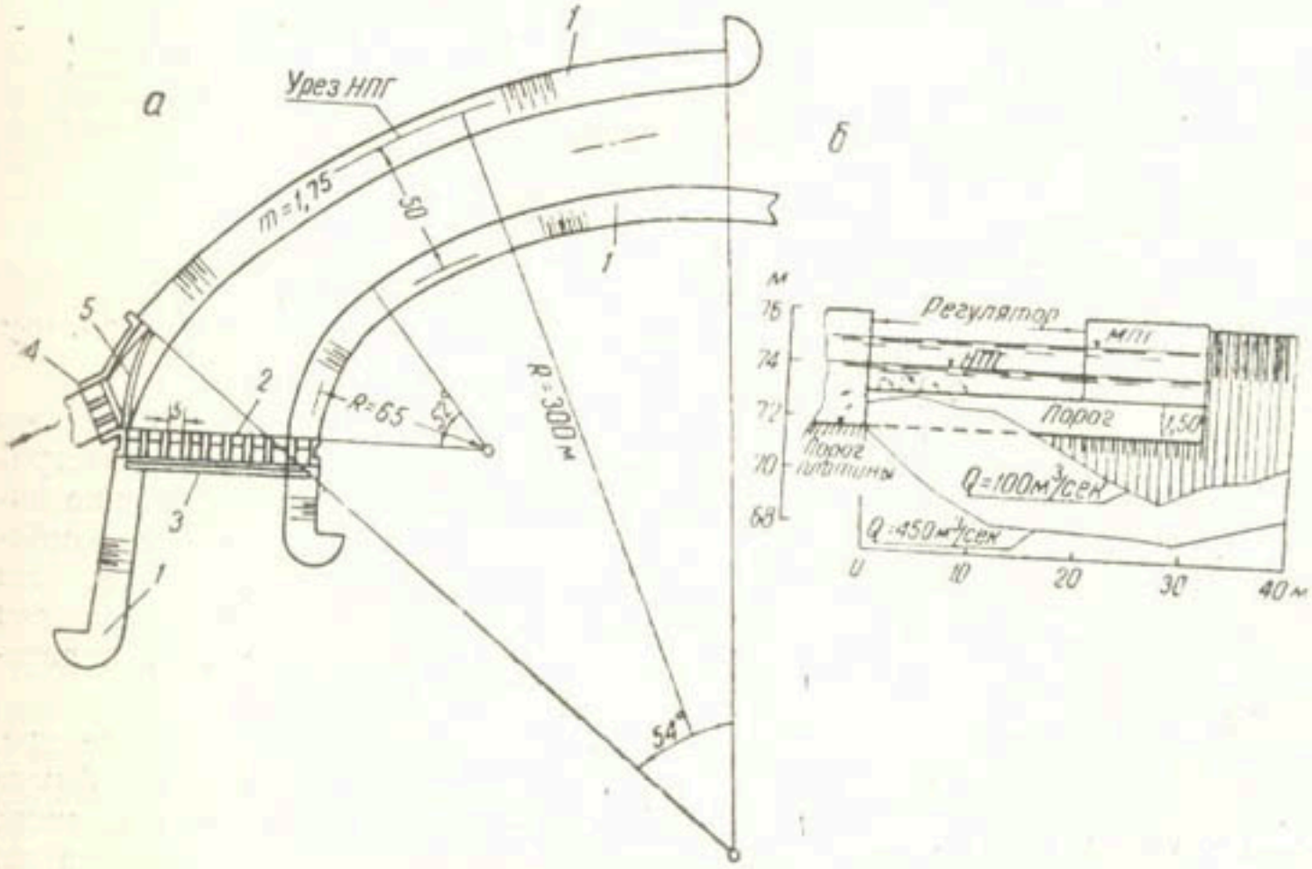


Рис. 17. Плотина Арысь-Туркестанского канала на р. Арысь.

а — план: *1* — струенаправляющие дамбы, *2* — плотина, *3* — предохранительная плоскость, *4* — регулятор, *5* — водоприемный порог. *б* — профили дна перед водоприемником с повышенным прямоугольным порогом (движение наносов через порог показано пунктирными стрелками).

устройством значительно различающихся по характеристикам подводящих русел.

Большое влияние на работу подводящего русла оказывает характер потока на участке реки, расположенном даже значительно выше зарегулированного подводящего участка. Это подтверждается рас-

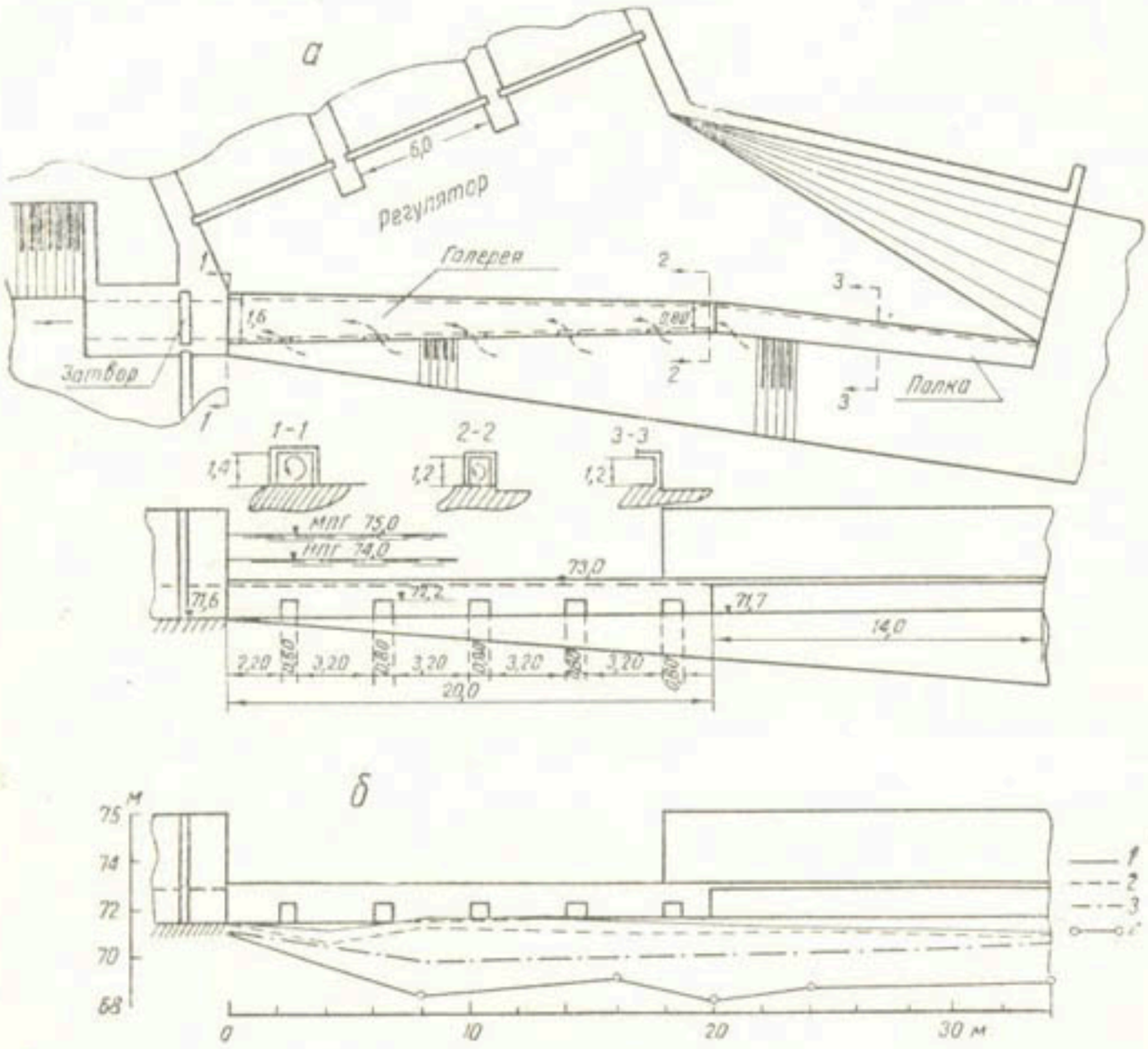


Рис. 18. Плотина Арысь-Туркестанского канала.

—план и разрезы порога галереи; *б*—профили дна перед порогом-галереей при $Q=67$ *м³/сек* (*1*), 100 (*2*), 180 (*3*) и 450 (*4*).

смотренными выше случаями составления схем и другими работами гидротехнической лаборатории по водозаборам и наглядно иллюстрируется результатами опытов Ф. Габермасса, изучавшего завлечение наносов в боковой отвод из лотков, представлявших различные комбинации из прямолинейных и криволинейных русловых участков. На рис. 20 показаны плановые элементы исследованных Габермассом схем и выписаны проценты завлекания наносов в отводы при 50% водозабора.

Сравнение результатов по схемам *1—4* показывает большие преимущества расположения водозабора со стороны вогнутого берега даже в том случае, когда водоприемник находится значительно ниже конца криволинейного участка. Завлечение наносов уменьшается по мере приближения водоприемника к кривой, и по схеме *4* осуществляется безнаносный водозабор, тогда как по схеме *1* все речные наносы полностью поступают в канал.

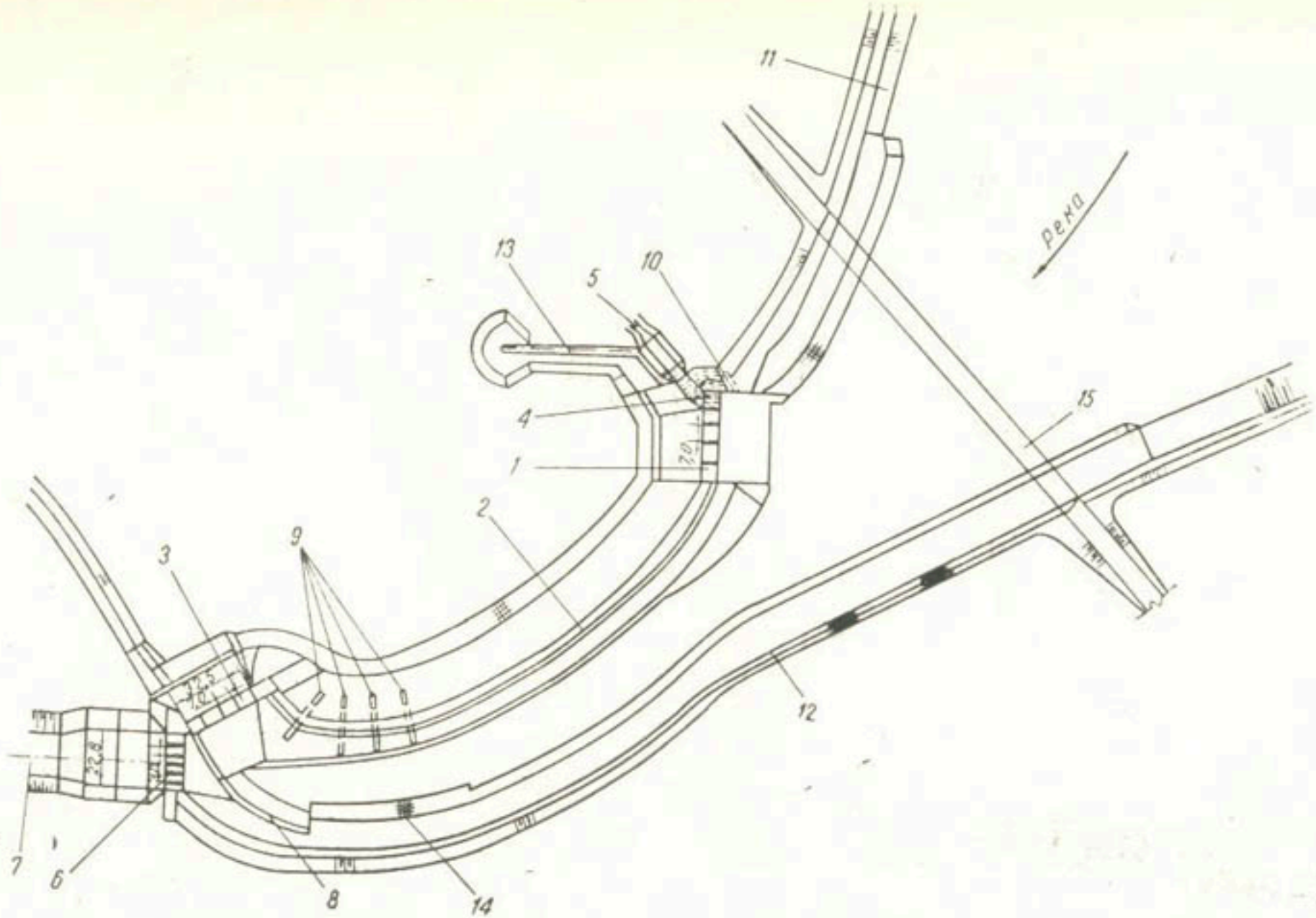


Рис. 19. План Куйлюкского гидроузла на р. Чирчик (II вариант).

1—верхний щитовой сброс, *2*—водослив, *3*—нижний щитовой сброс, *4*—регулятор правобережного канала, *5*—правобережный канал, *6*—регулятор левобережного канала, *7*—левобережный канал, *8*—водоприемный порог Г-образного профиля, *9*—промывные галереи в водосливе, *10*—наносоперехватывающие галереи, *11*—правая струенаправляющая дамба, *12*—левая струенаправляющая дамба, *13*—правая струенаправляющая дамба нижнего бьефа, *14*—крепление из плит, *15*—мост.

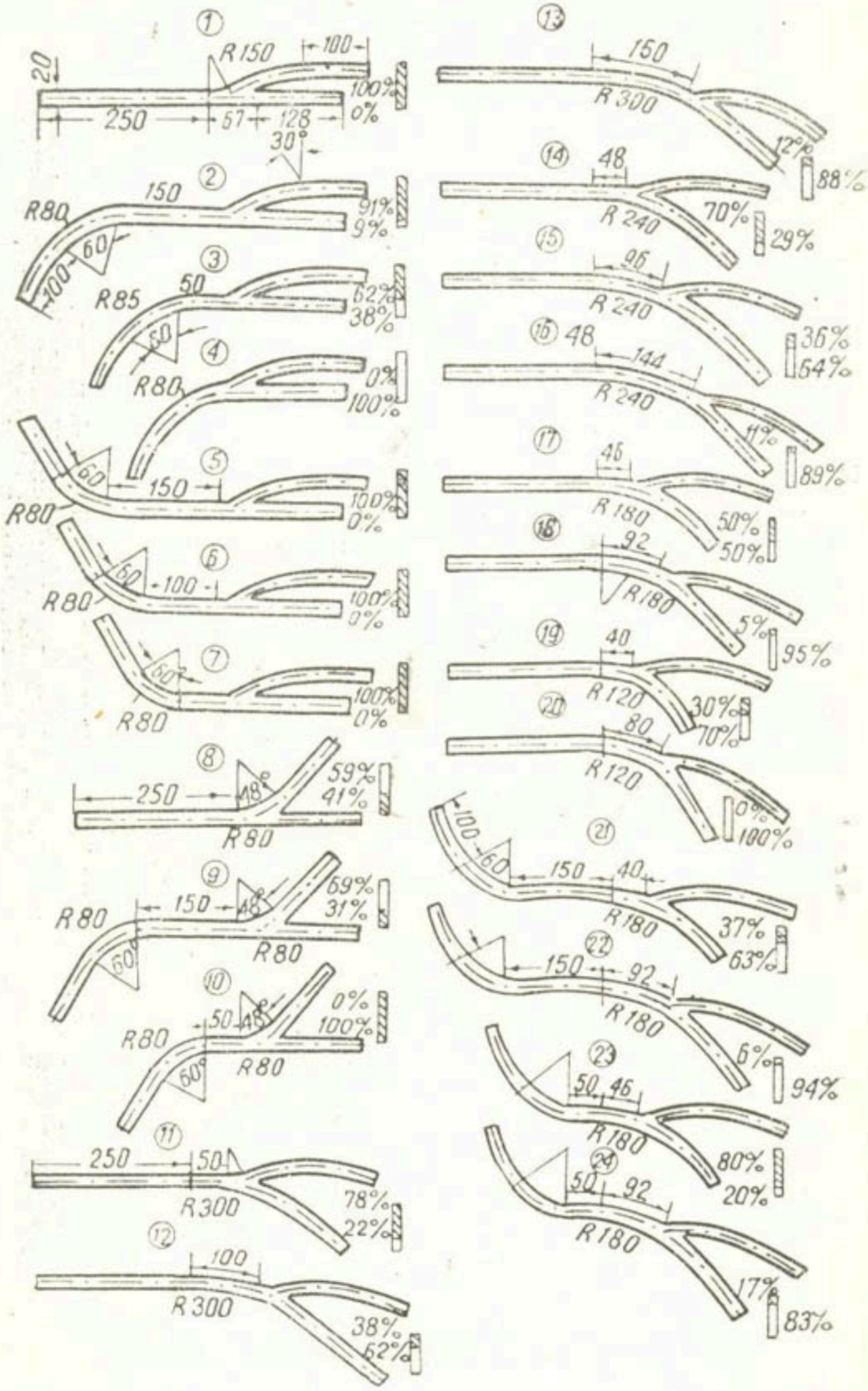

1
R150
100
20
250
57
128
100%
0%
30°
2
150
R80
91%
9%
100
60
3
50
R85
62%
38%
60
4
R80
0%
100%
60
5
150
R80
100%
0%
6
60
100
R80
100%
0%
7
60
R80
100%
0%
8
250
48°
59%
41%
R80
9
R80
150
48°
69%
31%
60
R80
10
50
48°
0%
100%
R80
60°
R80
11
250
50
R300
78%
22%
12
100
R300
38%
62%
13
150
R300
12%
88%
14
48
R240
70%
29%
15
96
R240
36%
64%
16
48
144
R240
11%
89%
17
46
R180
50%
50%
18
92
R180
5%
95%
19
40
R120
30%
70%
20
80
R120
0%
100%
21
100
60
150
40
R180
37%
63%
22
150
92
R180
6%
94%
23
50
46
R180
80%
20%
24
50
92
R180
17%
83%

Рис. 20.

Те же исследования показали, что водозабор, расположенный со стороны выпуклого берега, даже на значительном расстоянии за кривой перегружается наносами, и тем больше, чем короче прямая вставка между местом водозабора и концом вышерасположенного криволинейного участка (схема *5—7*).

Влияние вышерасположенного криволинейного участка на завлечение наносов в водозабор распространяется на длину более десяти ширин русла по урезу воды *(B)*, но при длине прямых участков между водозабором и кривой более 5*B* это влияние невелико (схема *2*).

Схема и размеры подводящего русла как составной части водозаборного узла намечаются одновременно с составлением схемы водозаборного узла с учетом всех местных условий и хозяйственных требований. Зависимость от местных условий очень велика. При благоприятных условиях не исключена возможность устройства надежного водозабора ферганского типа и совсем без искусственного подводящего русла с использованием лишь русла естественного. Простое решение в отношении подводящего русла может быть получено при расположении плотины у одного из берегов поймы (например, Сары-Курганский гидроузел).

Ввиду неразработанности методики расчета криволинейных русел их рассчитывают обычно как прямолинейные с введением потом поправок на кривизну.

Самоформирующиеся русла проверяются на устойчивость по ширине и глубине. По определению параметров таких русел дается ряд рекомендаций. Для определения ширины устойчивого в плане участка реки по урезу воды в метрах в практике используется формула С. Т. Алтунина [1, 2].

$$B = A\,\frac{Q^{0,5}}{I^{0,2}}, \qquad (7)$$

где I — продольный уклон поверхности реки;

A — параметр, характеризующий поперечный профиль русла;

Q — руслоформирующий расход, $м^3/сек$.

За руслоформирующий принимается максимальный расход 3÷10-процентной обеспеченности.

Коэффициенту A для прямолинейных русел в предгорной зоне с малоразмываемыми берегами и размываемым дном придается значение 0,9. Устойчивая ширина криволинейных русел уменьшается до трех четвертых или даже до половины ширины прямого русла. При расчете подводящих русел обычно принимается

$$B_{кр} = 0,75\ B_{пр}.$$

М. С. Вызго [7] предложил выражать ширину устойчивого криволинейного русла в виде

$$B_{кр} = f\sqrt[3]{\frac{Q}{\sqrt{I}}}. \qquad (8)$$

Числовые значения опытного коэффициента для разных условий пока не разработаны.

В первых построенных в Средней Азии плотинных водозаборах принималась избыточная ширина подводящих русел, что приводило к

очень вредным чрезмерным блужданиям в них речного потока. Гидротехническая лаборатория на протяжении своей деятельности при исследованиях уменьшала ширину подводящих русел проверяемых ею проектов. В частности, для Сары-Курганского узла на р. Сох проектная ширина русла уменьшена при моделировании в 1936 г. с 50 до 40 *м* и в 1946 г. дополнительно до 30 *м*; для гидроузла на р. Каратаг рекомендовано уменьшение проектной ширины подводящего русла от 50 *м* по дну до 34 по урезу воды.

Проектную ширину криволинейного подводящего русла мы рекомендуем определять по формуле (7) с коэффициентом $A = 0{,}5-0{,}7$ с меньшими значениями при крутых поворотах и большими при пологих. Принятая ширина подводящих русел в рассмотренных компоновках приведена в табл. 1.

Средние устойчивые глубины самоформирующегося русла определяются из следующих соотношений по принятым выше Q и B:

$$Q = Bhv \tag{9}$$

и

$$v = v_{ф}\ h^{\alpha}, \tag{10}$$

где $v_{ф}$ — так называемая скорость формирования при глубине $h = 1 м$, принимаемая по нормам допускаемых неразмывающих скоростей течения для несвязных грунтов, отнесенная к самым крупным наносам русла.

α — коэффициент, зависящий от относительной шероховатости русла. Для максимальных руслоформирующих расходов, по Алтунину, $\alpha = 1/5$.

Однако глубины значительно изменяются по ширине русла при крутых поворотах, как, например, в русле на рис. 8.

В табл. 1 приведены некоторые значения безразмерного радиуса кривизны на рассмотренных схемах гидроузлов

$$\rho = \frac{r}{B}. \tag{11}$$

Предельным наименьшим допустимым значением ρ является значение, обеспечивающее безотрывное протекание потока у выпуклого берега русла. По А. Я. Миловичу, для потенциального потока это обеспечивается при $\rho = 2{,}23$, что близко и к данным опытов в лотках. Значение $\rho = 3$ можно считать минимально допустимым для подводящих русел.

Практикой подтверждены ранее данные рекомендации С. Т. Алтунина о том, что значения $\rho = 4-6$ способны обеспечить интенсивную циркуляцию и спокойное протекание потока на предгорных участках рек.

Точных данных для уверенного назначения оптимальных и предельных величин ρ в разных условиях еще не получено. Следует учитывать, что большие продольные скорости делают поток менее способным к крутым поворотам и одновременно создают более интенсивную поперечную циркуляцию, исключающую необходимость в таких поворотах. Следовательно, с продвижением водозабора вверх по реке значения ρ подлежат уточнению путем проведения специальных исследований.

Подводящее русло не обеспечит проектной структуры потока у водоприемника, если его длина недостаточна. Необходимая относи-

тельная длина подводящего русла $\lambda = \frac{L}{B}$ зависит от условий вступления потока в его начальный створ, кривизны русла и многих других причин.

Для рассмотренных компоновок относительная длина

$$\lambda \approx (1 \div 1{,}2)\,\rho \qquad (12)$$

и абсолютная

$$L \approx (3 \div 6)\,B. \qquad (13)$$

При этом угол поворота между начальным и концевым створами составляет около 60—70°, что и может служить критерием для предварительных соображений в обычных условиях пойменных рек.

К приближенному определению наименьшей необходимой длины подводящего русла при вступлении в него потока из прямолинейного участка реки можно подойти назначив длину русла с таким расчетом, чтобы прямолинейный ток от выпуклого берега входного створа мог достигнуть вогнутого берега в пределах подводящего русла. На рис. 21 с практически приемлемой точностью можно считать

$$L \approx 2\,B_r = B\sqrt{2\rho} \qquad (14)$$

или

$$\lambda = \sqrt{2\rho}. \qquad (15)$$

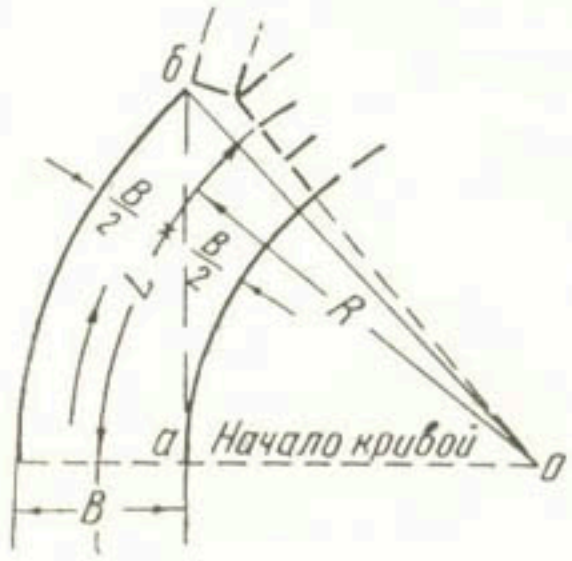


Рис. 21.

В табл. 2 приводятся в нашей обработке данные из упомянутых опытов Габермасса, показывающие влияние длины криволинейного подводящего участка и относительного радиуса кривизны на завлечение наносов в отвод. Завлечение наносов характеризуется показателем, представляющим отношение процента завлечения к проценту водозабора. Из данных табл. 2 видна большая роль радиуса относительной кривизны.

Таблица 2

Номер схемы	Относительный радиус кривизны $\rho = \frac{r}{B}$	Длина подводящего криволинейного участка L_0 (в опытах), *м*	Длина подводящего русла по формуле $L = B\sqrt{2\rho}$, *м*	$x = \frac{L_0}{L}$	Значения наносного показателя по опытам
11	9,55	0,5	1,37	0,37	1,56
12	»	1,0	»	0,73	0,76
13	»	1,50	»	1,10	0,24
14	7,64	0,48	1,22	0,39	1,42
15	»	0,96	»	0,49	0,72
16	»	1,44	»	1,18	0,22
17	5,73	0,46	1,06	0,43	1,00
18	»	0,92	»	0,87	0,10
19	3,82	0,40	0,865	0,46	0,60
20	»	0,80	»	0,92	0

При $\rho < 8$ длину подводящего русла ориентировочно можно определять из выражения

$$L = kB_{\text{р}}, \tag{16}$$

где $k = 1$ для средних условий;
$k = 0{,}75$ для благоприятных условий.

Ошибкой было бы считать, что ферганская схема характеризуется только определенной длины и кривизны руслом. В действительности требуется лишь подача к водоприемнику потока с изгибом сбросной части при всех наносотранспортирующих расходах реки. Достигается это по-разному. В частных случаях работа подводящего русла усиливается сбросными водосливами, увеличением кривизны концевой части, донными шпорами, отбойными стенками и др.

Подводящее русло шириной, подобранной по руслоформирующему расходу по формуле (7), проверяется с соответствующим повышением дамб на пропуск максимального расчетного расхода. Увеличенный вследствие изгиба потока уклон определяется по формуле Буссинеска

$$I = \frac{v^2}{C^2 H}\left(1 + \varepsilon \sqrt{\frac{B}{r}}\right). \tag{17}$$

По данным С. Т. Алтунина, $\varepsilon = 0{,}75$ при $\frac{r}{B} = 3$, 0,65—при $\frac{r}{B} = 4$; $\varepsilon \leqslant 0{,}60$ при $\frac{r}{B} \geqslant 5$.

Узкие подводящие русла с бетонированными берегами можно рассчитывать как однородные галечные (сопротивления от кривизны компенсируются сглаживанием откосов).

Подводящее русло сопрягается с берегами поймы плавным конфузором. Глубины размыва у дамб подводящего русла и струенаправляющих дамб, перекрывающих пойму реки, зависят от единичного расхода потока, угла его свала на дамбу, величины заложения откоса дамбы, его шероховатости и сопротивляемости грунта размыву. При блуждании потока по пойме разные участки струенаправляющих дамб подвергаются воздействию навалов речного потока периодически (рис. 13). Участок входа в подводящее русло является наиболее угрожаемым, так как значительные массы воды могут подходить сюда под большим углом к направлению дамб.

Дамбы насыпаются из местного песчано-галечного грунта с облицовкой мокрого откоса. Оправданы практикой два типа крепления: укладка крупного рваного камня весом до 4 *т* с шириной облицовки 1,5 *м* на верху дамбы и до 4 *м* по заложению зуба (Кампыр-Раватский гидроузел) и облицовка бетонной кладкой толщиной 0,5—0,6 *м* с втопленными в нее валунами размером до 0,3—0,4 *м* (Сары-Курганский гидроузел). Дамбы первого типа крепления проработали 22 года, второго—15 лет, не требуя никакого ремонта.

Криволинейное подводящее русло является, по существу, плесовым участком реки. Будучи занесено наносами при малых расходах, оно самопромывается в рабочих условиях без выключения водозабора при нарастании расходов реки. Накопление наносов в криволинейном подводящем русле при малых расходах уменьшает транзит их через плотину в период, когда циркуляция ослабевает и борьба с наносами на плотине затруднена, т. е. способствует борьбе с наносами при водозаборе.

Глава II

ПЛАНОВО-ВЫСОТНАЯ КОМПОНОВКА ЭЛЕМЕНТОВ ВОДОДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ УЗЛА

На составление схем водозабора ферганского типа значительное влияние оказывает гидрологический режим источника и характер водозабора (на один или оба берега). Оба фактора вносят значительное разнообразие в схемы. В частности, от первого зависит наличие в них катастрофического водослива, а от второго — наличие дюкера, лотка или иной конструкции по передаче потока на другой берег. Ниже рассматриваются элементы водозаборных сооружений с делением их по группам: узлы с катастрофическим водосливом и без водослива, узлы с односторонним и двусторонним питанием.

ЩИТОВАЯ ПЛОТИНА

Конструкция и плановое положение плотины в общих схемах компоновки узлов ферганского типа, как уже отмечалось, в значительной мере обусловлены гидрологическим режимом источника. В зависимости от этого или других факторов щитовая плотина в схемах узлов может занимать различное положение и иметь ту или иную пропускную способность. Данными факторами можно объяснить также наличие или отсутствие в схеме узла катастрофического водослива.

Плотины на узлах без катастрофического водослива

Узлы без катастрофических водосливов, как правило, возводятся на источниках с более или менее равномерным режимом питания (ледниковое или смешанное).

На Кампыр-Раватском гидроузле, построенном в 1939—1940 гг., плотина состоит из 8 пролетов по 15 *м* в свету каждый и имеет криволинейное очертание в плане, описанное радиусом 168 *м*, С целью возбуждения местной поперечной циркуляции в потоке ось плотины расположена под углом к оси подводящего русла (рис. 22, 23). Угол между фронтом регулятора каналов и плотиной 115°. Порог плотины заложен на отметке наинизшего дна. Водобой имеет длину 5,0 *м*, т. е. короче быков. Понур осуществлен отсыпкой рваным камнем. Поверхность водобоя и стенки бычков на высоту 0,5 *м* облицованы чугунными плитами. Подошва флютбета врезана в скалу. Глубина заложения зуба, считая от порога плотины, 5 *м*. Пролеты перекрываются сегментными затворами. Расчетные напоры составляют нормальный рабочий ($H=3{,}5$ *м*) и максимальный перед щитами ($H=3{,}8$ *м*). Плотина рассчитана на пропуск 1400 $м^3/сек$.

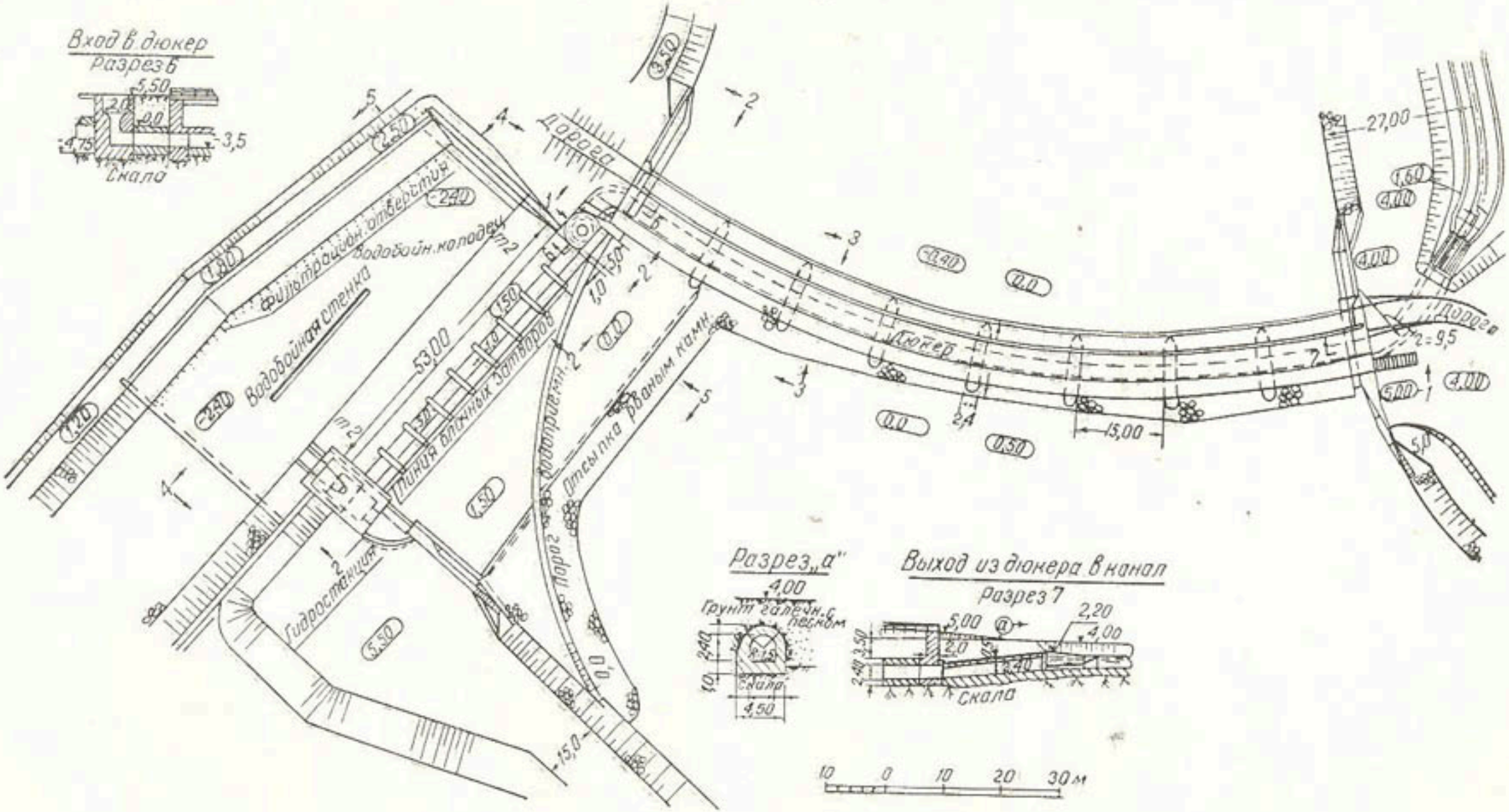


Рис. 22. Кампыр-Раватский гидроузел на р. Карадарья (план и разрезы).

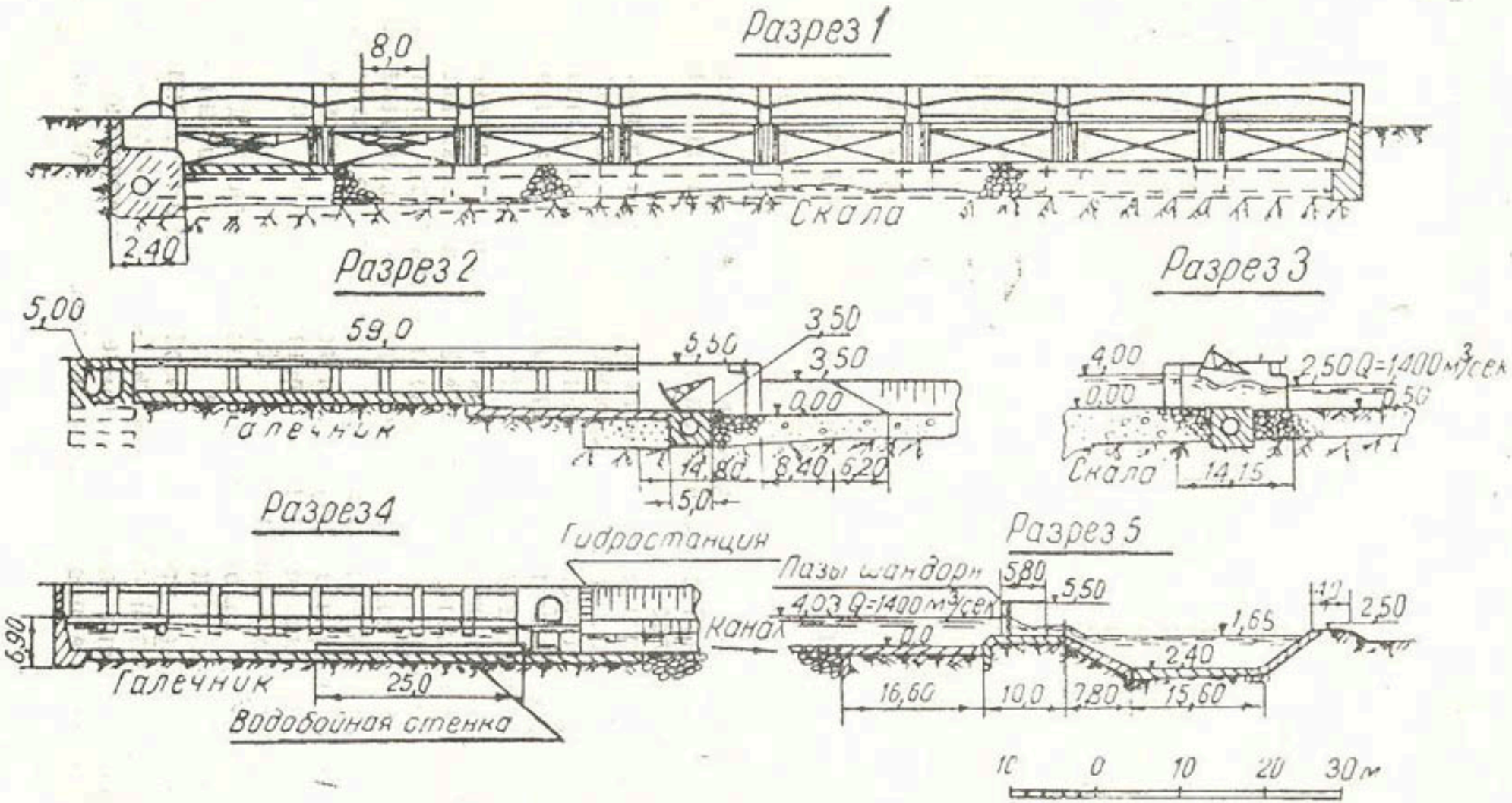


Рис. 23. Разрезы Кампыр-Раватского гидроузла.

В процессе эксплуатации плотины установлен ряд недостатков. Основные из них — несколько пониженная пропускная способность плотины против расчетного значения, отмеченная при значительном занесении нижнего бьефа в маловодные годы (1948—1949), и разрушение стенок быков и флютбета в районе правых пазов для затворов.

Первый дефект является следствием не только конструкции, но и, до некоторой степени, наблюдавшегося в маловодные годы (1948—1949) частичного занесения бьефов, носившего характер завала. В последующие годы, ввиду увеличенной многоводности, а также в

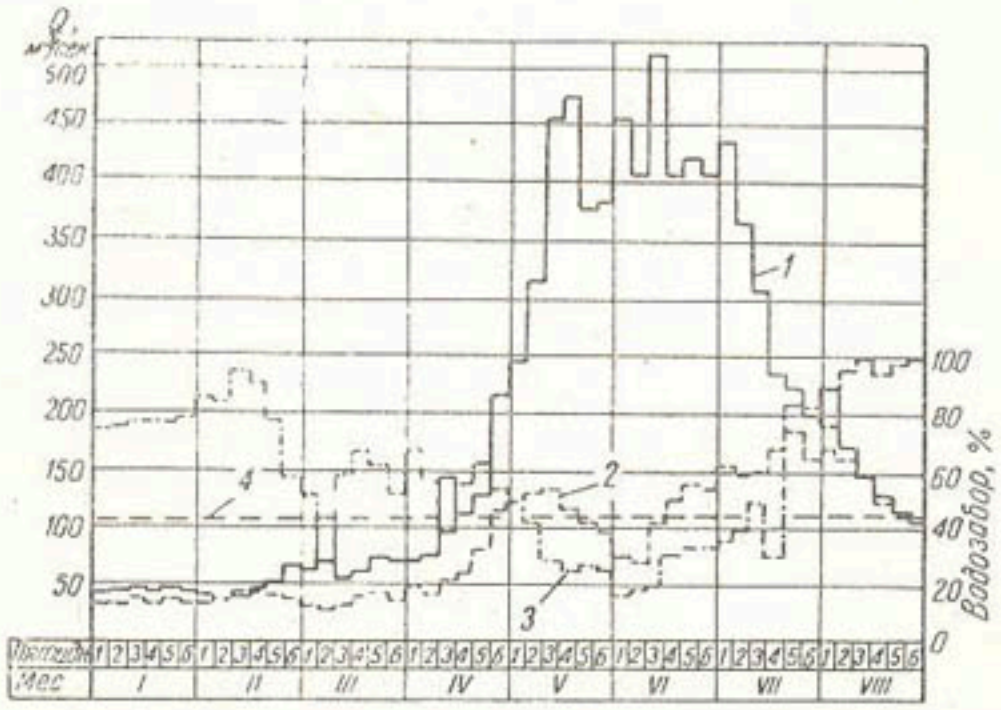


Рис. 24. Гидрографы р. Карадарья и водозабора у Кампыр-Раватской плотины за 1953 г.

1—река; *2*—водозабор, *м³/сек*; *3*—водозабор, %; *4*—расход начала движения наносов.

связи с более правильным маневрированием затворами на плотине, бьефы в значительной степени были промыты и пропускная способность вновь повысилась.

При этом пропускная способность крайних правых пролетов (№ 1, 2) наименьшая, так как они в условиях принятой компоновки прилегают к выпуклому берегу подводящего русла и привали́ваются наносами. Режим работы всего узла в отношении пропуска расходов в разрезе реального года виден на рис. 24.

Разрушение стенок быков и флютбета имеет постоянный характер, особенно в средних пролетах (№ 3—7), и вызван главным образом сбойным прохождением влекомых наносов через пролеты и незащищенностью пазов для затворов от ударного воздействия наносов.

На Сары-Курганском гидроузле плотина имеет шесть пролетов по 5 *м* в свету и расположена под углом к оси подводящего русла. Справа от плотины, примыкая к ней под углом 106°, расположен регулятор каналов (рис. 25, 26).

Порог плотины заложен на 1,3 *м* выше среднего дна основного русла. Нормальный напор равен 2,4 *м*, а максимальный — 3,2. Расчетная максимальная пропускная способность плотины при расчетном расходе 0,1-процентной обеспеченности ($Q = 360$ *м³/сек*) 300 *м³/сек*.

Для поддержания наиболее повышенного коэффициента расхода оголовкам бычков в пролетах плотины придана форма, обеспечиваю-

щая наибольшую обтекаемость, учитывающая направление подхода потока к плотине. Водобой за бычками наклонный, с откосом 1 : 3,5 и длиной 13,5 *м*. На конце он переходит в горизонтальную площадку (1 = 5,0 *м*), на которой расположены трамплины-гасители. Зуб плотины также наклонный и заложен в аллювиальных отложениях на 6,8 *м* ниже

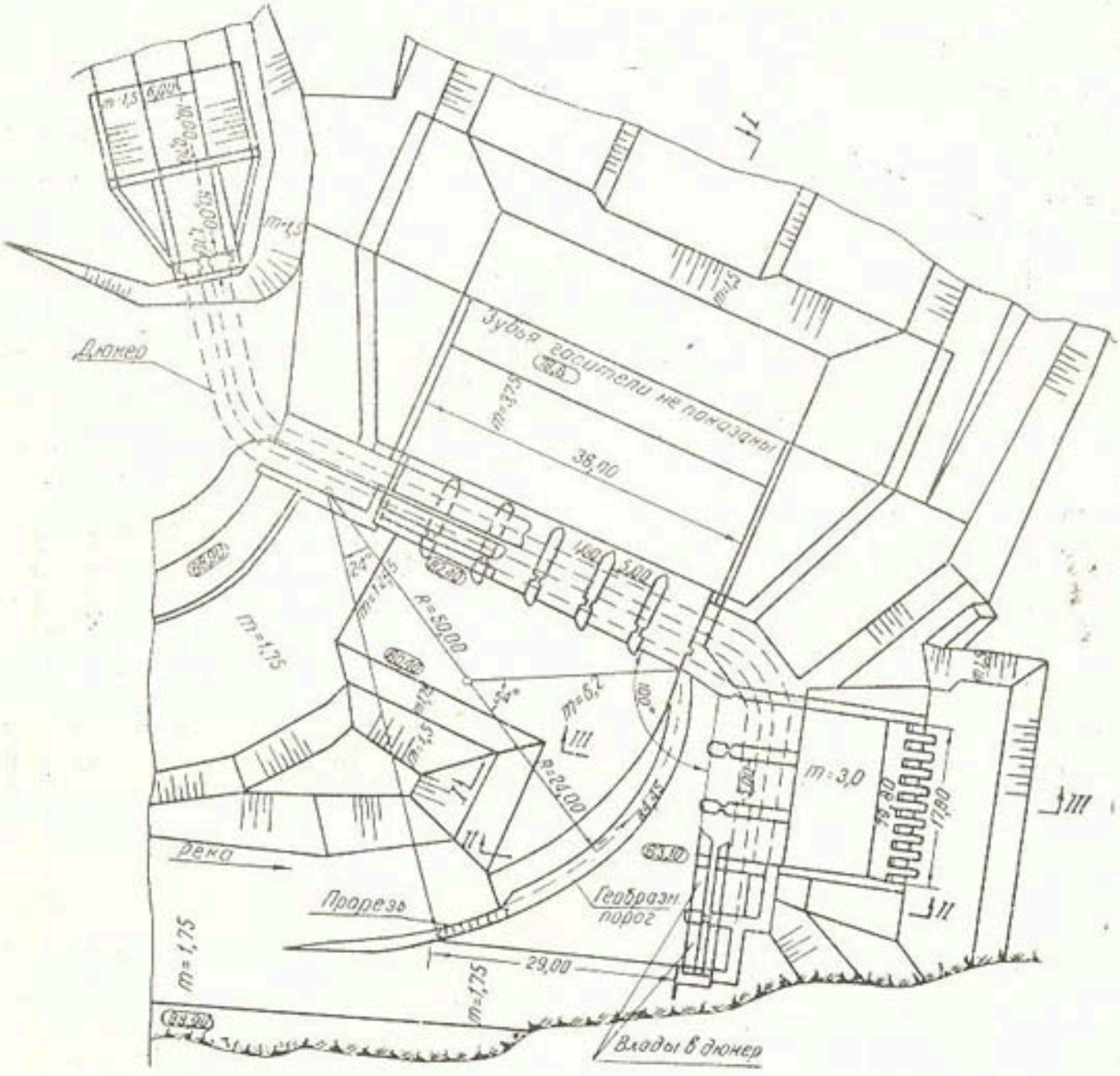


Рис. 25. План Сары-Курганского гидроузла.

порога плотины. Понурная часть выполнена в виде обратного откоса ($m = 1 : 6,2$ у вогнутого берега и 1 : 12,45 у выпуклого) длиной 17,0 *м*.

Наблюдениями установлено, что в случае придержки маневрирования затворами в порядке, принятом из-за необходимости недопуска влекомых наносов в каналы, пропускная способность плотины [6] по фронту переменная. Это обусловливается также компоновкой сооружений узла, в частности кривизной подводящего русла и положением плотины в схеме.

В табл. 3 приведены данные (по наблюдениям на модели и в натуре при радиусе закругления подводящего русла по оси (R) 110 *м*) о горизонтах воды по фронту плотины, свидетельствующие о значительной их неравномерности. Через правую половину плотины проходит до 60% всего сбросного расхода воды, а через левую —40. В про-

хождении влекомых наносов через плотину наблюдается обратная картина. Вследствие возбуждаемой поперечной циркуляции основная масса их, до 70%, проходит через левые пролеты плотины. Такое несоот-

Таблица 3

Расход реки Q, $м^3/сек$	Ширина зеркала B, $м$	$\frac{R_0}{B}$	Глубина перед плотиной (считая от порога), $м$			$\frac{H_{вогн}}{H_{вып}}$	$\frac{H_{вогн}}{H_{ср}}$	$H_{вогн}-H_{вып}$	Примечание
			у выпуклого берега ($H_{вып}$)	у вогнутого берега ($H_{вогн}$)	$H_{ср}=\frac{H_{вып}+H_{вогн}}{2}$				
90	28	3,90	3,55	3,70	3,63	1,04	1,02	0,15	Модель
180	30	3,70	3,10	4,35	3,73	1,40	1,17	1,25	Модель, при водозаборе 55%
360	31	3,50	3,50	5,55	4,53	1,58	1,22	2,05	
183	35	3,20	1,35	2,35	1,85	1,74	1,27	1,0	Натура, при водозаборе 43%

ветствие в распределении воды и наносов по фронту плотины приводит к отрицательным последствиям: интенсивному и сосредоточенному из-

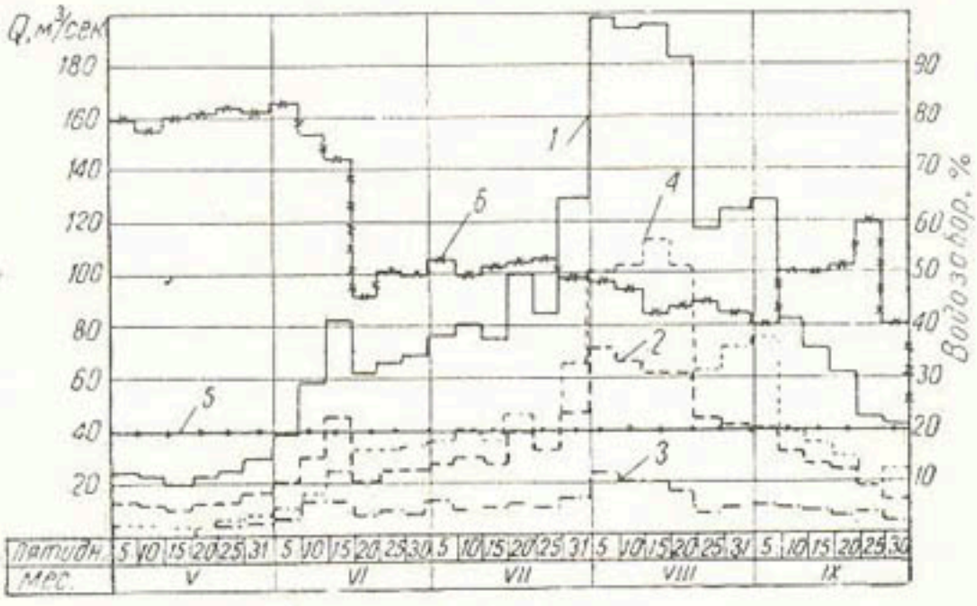


Рис. 27. Гидрографы р. Сох и водозабора на Сары-Курганском гидроузле за 1949 г.

1—река, *2*—правобережный канал, *3*—левобережный канал, *4*—сброс, *5*—расход начала движения влекомых наносов, *6*—водозабор, %.

носу наносами левой части водоската плотины и усиленному размыву части русла в нижнем бьефе, прилегающей к правому берегу.

Величина сбросных расходов воды через гидроузел представлена гидрографом 1949 г. на рис. 27.

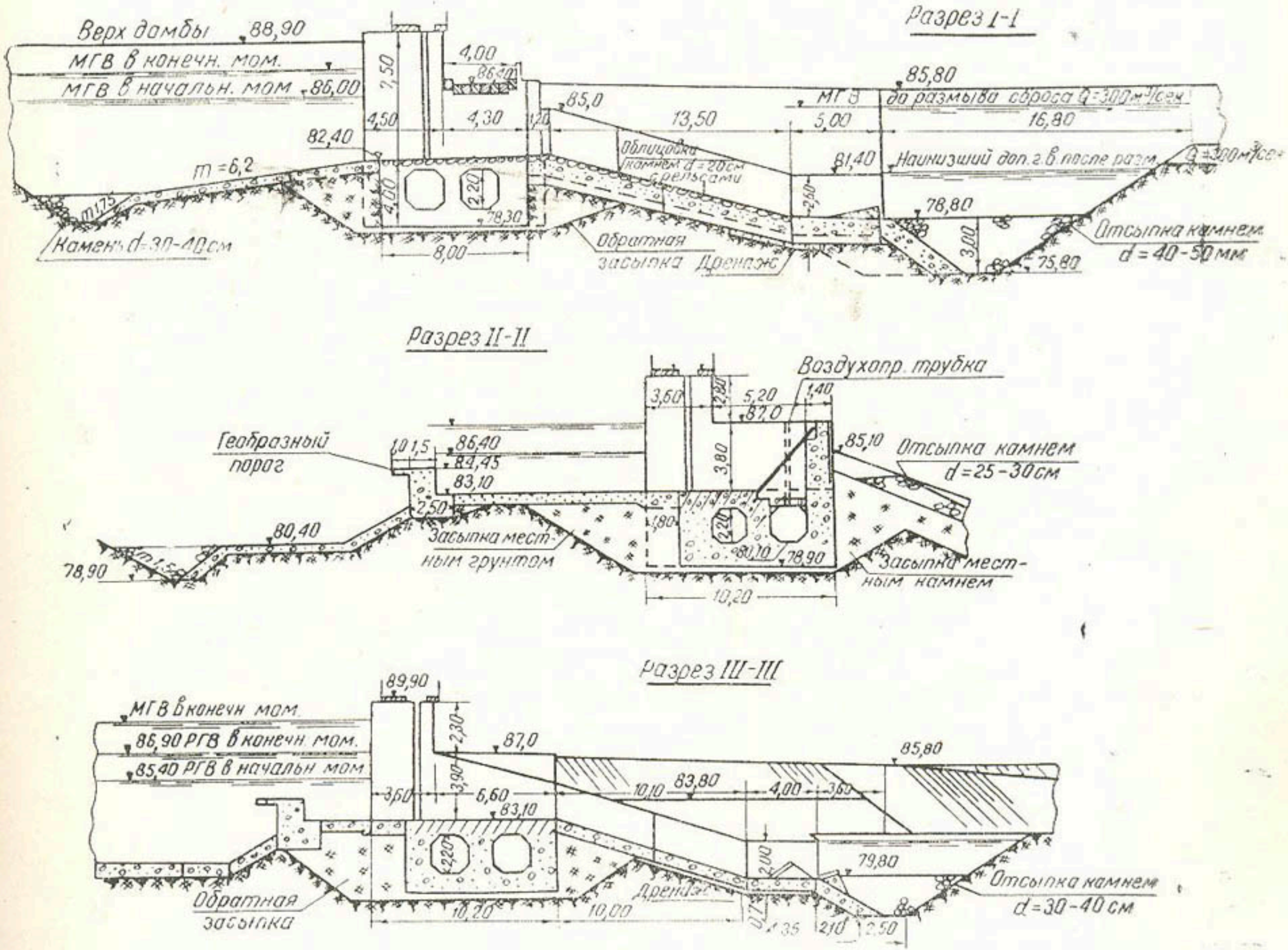


Рис. 26. Разрезы Сары-Курганского гидроузла.

Плотины на узлах с катастрофическим водосливом

Внезапность и быстрое нарастание расходов, свойственные источникам со снеговым и снегово-дождевым питанием, вызывают необходимость устройства на узлах катастрофических сбросов-водосливов,

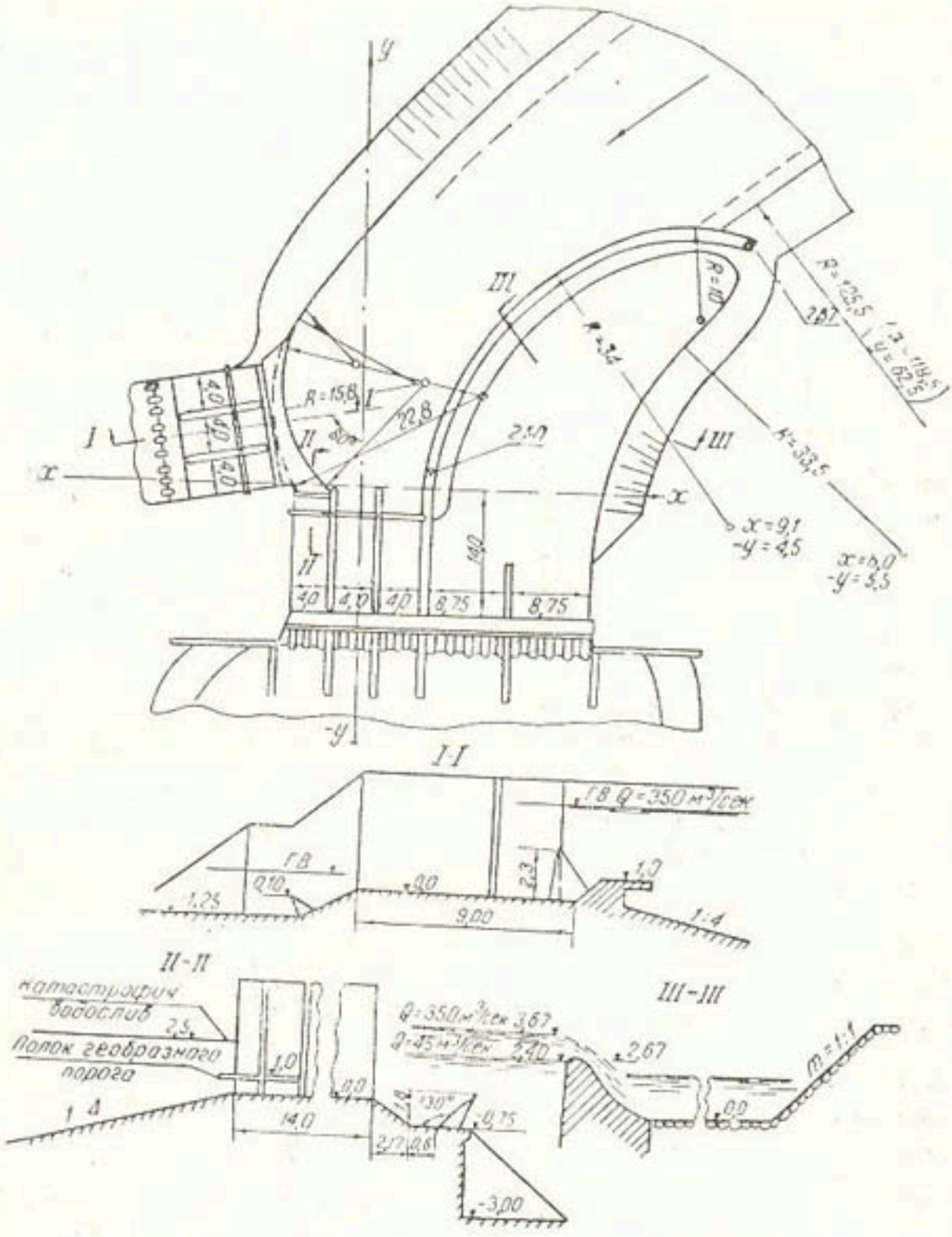


Рис. 28. Тупалангский гидроузел на р. Каратаг (план и разрезы модели).

за счет которых фронт разборной плотины сокращается, а это, в свою очередь, оказывает влияние и на ее местоположение в общей компоновке.

На Тупалангском гидроузле (модель) плотина расположена под некоторым углом к потоку и руслу (рис. 28).

К плотине справа под углом 100° примыкает регулятор водоприемника, слева — катастрофический водослив. Плотина состоит из 3 пролетов по 4 *м* в свету, перекрываемых плоскими щитами. Порог плотины заложен на 0,5 *м* выше среднего дна русла.

Напор перед щитами при НПГ принят $H = 2{,}4$ *м* и при пропуске максимального катастрофического расхода $H_{макс} = 4{,}3$ *м*.

Порог водоприемника с полком, примыкающий к правому пролету плотины, делит пролет по высоте на два самостоятельно регулируемых отверстия: галерею и пролет с повышенным порогом.

Пропускная способность плотины при НПГ составляет около 90 *м³/сек*, а при пропуске максимального расчетного расхода достигает ≈ 180 *м³/сек*. Флютбет в пределах бычков длиной 14 *м* горизонтальный, далее посредством откоса 1 : 3 на длине 2,17 *м* снижается на 0,75 *м* и сопрягается с горизонтальной площадкой длиной 2,43 *м*, заканчивающейся консолью. На конце консоли установлены гасители-трамплины, за которыми впритык к низовому вертикальному зубу, заложенному на 5,0 *м* ниже порога, примыкают контрфорсные стенки, разделяющие фронт слива на три равные части по 4,0 *м*. Понур длиной 6,0 *м* имеет обратный уклон 1 : 4. Подстилающие грунты аллювиальные.

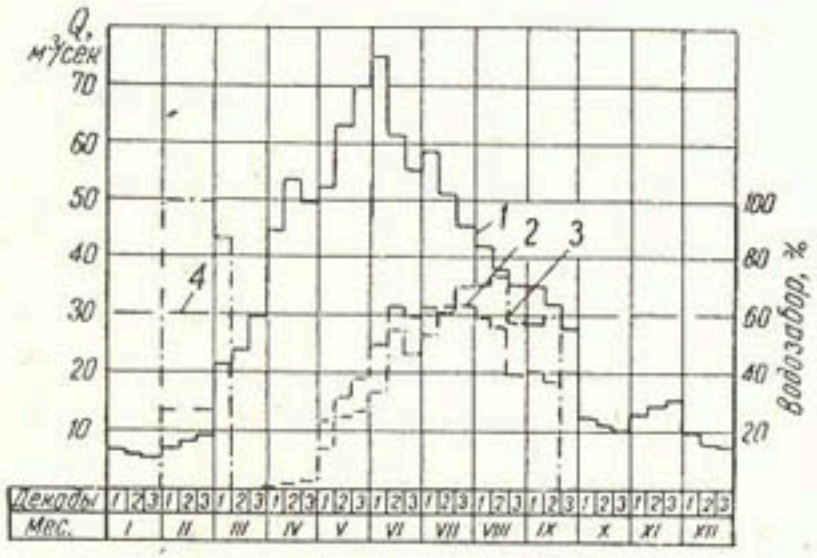


Рис. 29. Гидрографы р. Каратаг с подпитыванием из р. Дюшамбинки и водозабор в Тупалангский канал на гидроузле.

1—река; *2*—водозабор, *м³/сек*, *3*—водозабор, %; *4*—расход начала движения наносов.

Исследованиями установлено, что пропускная способность плотины была не равномерной. Через правые пролеты плотины проходила большая часть расхода воды и меньшая доля от общего расхода влекомых наносов; через левые пролеты, наоборот, проходило больше наносов и меньше воды. Такое распределение отражалось на гашении энергии и выражалось в несимметричных деформациях русла в нижнем бьефе. Величина речных расходов воды и водозабора видна из гидрографов на рис. 29.

На Ангренском гидроузле плотина, состоящая из трех пролетов по 6 *м* в свету, расположена перпендикулярно к оси подводящего русла. Справа к ней примыкает водоприемник и слева — катастрофический водослив. Угол между осями плотины и регулятора составляет 59°. Порог плотины заложен на 0,3 *м* выше среднего дна действующей части поймы в этом створе. Напор при НПГ равен 2,0 *м*.

Пропускная способность плотины: при НПГ 150 *м³/сек*, при максимальном расходе 750 *м³/сек* (0,1-процентной обеспеченности) 487 *м³/сек*.

Для создания плавного протекания и поддержания по возможности наибольшего коэффициента расхода через плотину оголовкам бычков придана обтекаемая форма, учитывающая направление подхода потока.

Флютбет плотины длиной 10,0 *м* оканчивается заглубленным низовым зубом. С целью уменьшения глубин размыва вдоль устоев на конце флютбета за крайними пролетами установлены косынки и сплошной трамплин — носок (рис. 30). Низовой зуб заложен на 9,0 *м* ниже порога плотины. Подстилающий грунт — аллювий. Понурная часть развита и заглублена под среднее дно на 5,7 *м*.

На модели данного узла, ввиду интенсивного возбуждения поперечной циркуляции в потоке при максимальных расходах, наблюда-

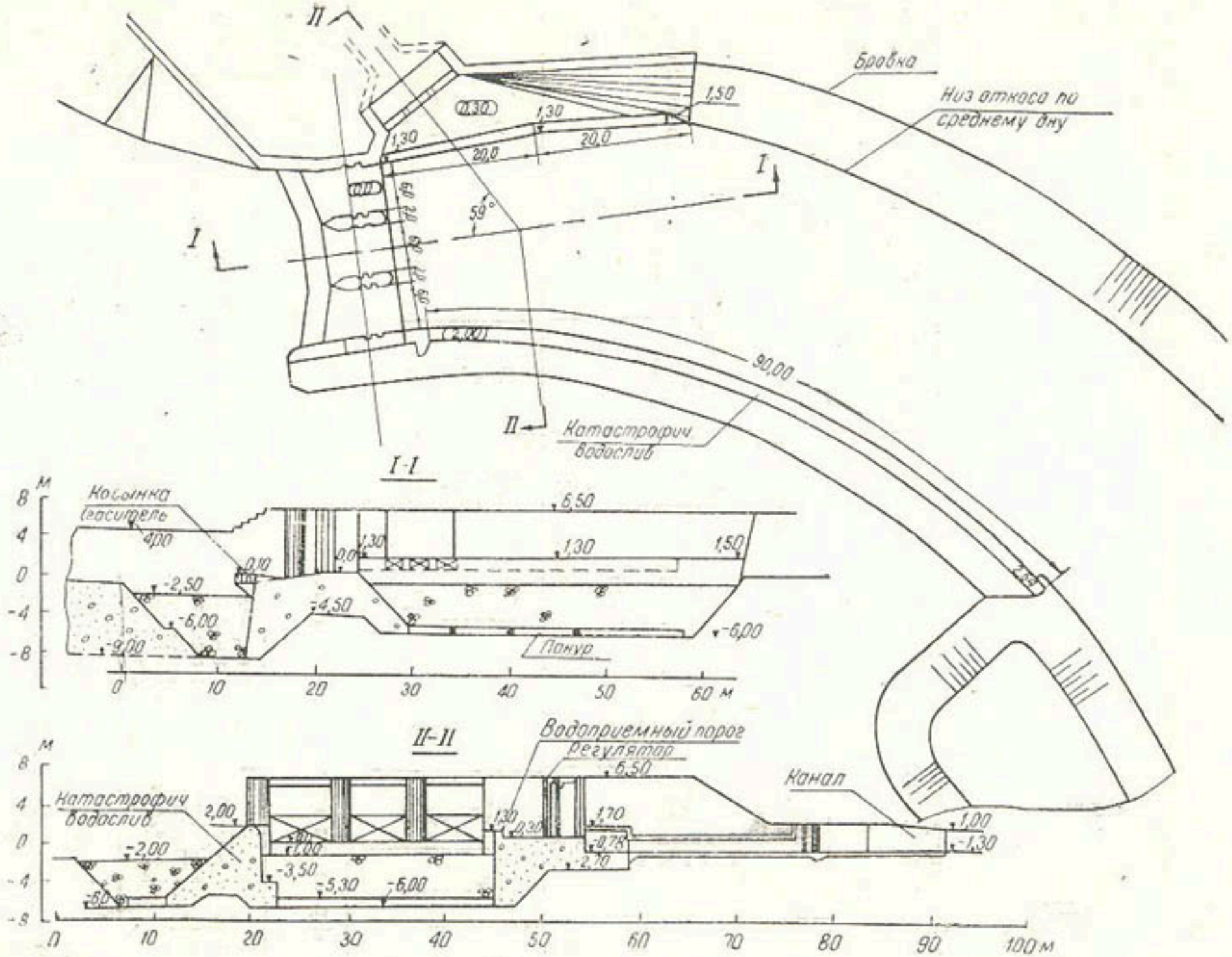


Рис. 30. Ангренский гидроузел (план и разрезы модели).

лись значительные перекосы горизонтов воды перед плотиной в поперечном профиле. В частности, при $Q=730$ *м³/сек* горизонт воды перед плотиной у правого берега превышал на 1, 87 *м* горизонт воды у левого (рис. 31, табл. 4). Соответственно этому пропускная способность

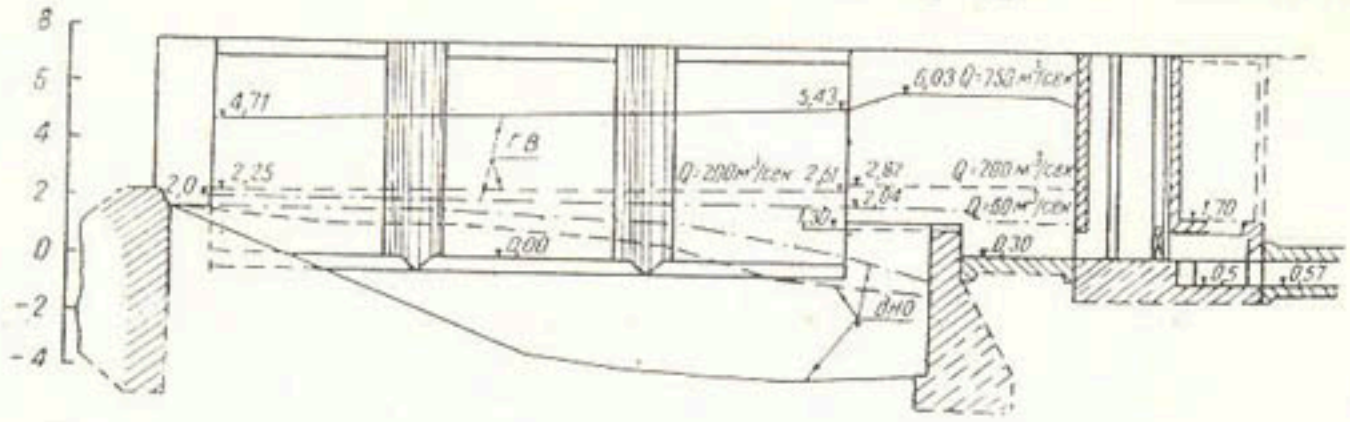


Рис. 31. Поперечные профили водной поверхности и дна в верхнем бьефе Ангренского гидроузла. Горизонты воды относятся к створу по линии носов бычков плотины.

Таблица 4

Расход реки Q, *м³/сек*	Ширина зеркала B, *м*	$\frac{R_0}{B}$	Глубина перед плотиной (считая от порога плотины), *м*			$\frac{H_{вогн}}{H_{вып}}$	$\frac{H_{вогн}}{H_{ср}}$	$H_{вогн}-H_{вып}$
			у выпуклого берега ($H_{вып}$)	у вогнутого берега ($H_{вогн}$)	$H_{ср}=\frac{H_{вып}+H_{вогн}}{2}$			
150	26	4,4	2,07	2,70	2,39	1,30	1,13	0,63
290	29	4,0	2,52	3,06	2,79	1,21	1,10	0,54
175	26	4,4	2,37	2,82	2,60	1,19	1,08	0,45
400	30	3,8	3,30	3,84	3,57	1,16	1,08	0,54
730	35	3,3	3,93	5,80	4,87	1,48	1,19	1,87

Примечание. $R_0=115$ *м*.

Таблица 5

Расход реки, *м³/сек*	Расход через плотину, *м³/сек*	Деление расхода между пролетами плотины соответственно напорам, %			Отклонения от наименьшего значения расхода, %			Отклонения от среднего значения расхода, %		
		лев.	средн.	прав.	лев.	средн.	прав.	лев.	средн.	прав.
160	136	30,5	34,0	35,5	—	11,4	16,4	−12,6	+2,5	+10,1
200	166	31,8	33,5	34,9	—	5,3	9,7	− 7,0	+0,5	+ 6,5
400	289	31,5	33,6	35,0	—	6,9	11,3	− 8,5	+1,2	+ 7,3
750	487	31,8	33,4	34,7	—	5,2	9,3	− 6,6	+0,1	+ 6,5

пролетов плотины была неодинаковой по фронту: наибольшей у правого пролета и наименьшей у левого (табл. 5).

Распределение влекомых наносов по фронту плотины было совершенно иным: наблюдалась недогрузка ими потока, проходящего через правую часть щитовой плотины, и относительная перегрузка потока, проходящего через левую часть плотины.

Такое протекание потока и неравномерная нагрузка его наносами приводили к несимметричной деформации русла в нижнем бьефе.

В варианте разрабатываемой реконструкции Кугартского гидроузла щитовая плотина представлена

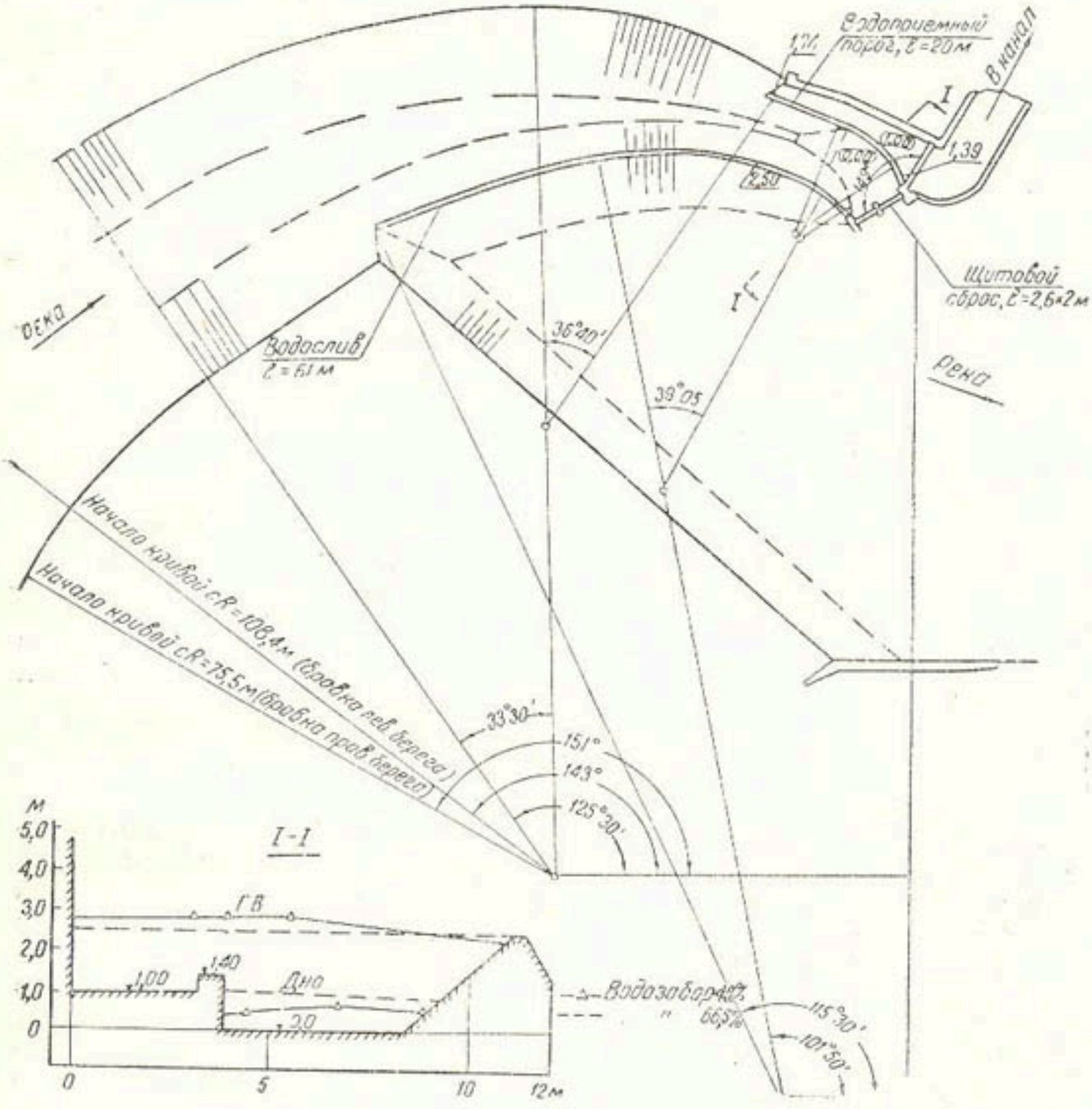


Рис. 32. Вариант реконструкции Кугартского гидроузла (план и разрез).

одним косо расположенным к руслу пролетом шириной 6 *м*, перекрываемым плоским щитом (рис. 14). Порог плотины оставлен на отметке первоначального осуществления сооружения (1931 г.), т. е. наинизшей отметке дна русла. Нормальный напор перед щитом 2,5 *м*. Пропускная способность при этом напоре $Q=30$ *м*³/*сек*. Водобойная часть рекомендовалась укороченной ($l = 7{,}0$ *м*) с заглубленным низовым зубом на 6,9 *м* от наинизшего дна. В пределах бычков ($l = 3{,}5$) флютбет горизонтальный и далее до зуба наклонный. Понур в прилегающей к плотине части на длине 8,0 *м* горизонтальный, на одной отметке с порогом плотины и выше наклонный, заглублен под дно.

В другом варианте, видоизмененном в процессе усовершенствования (рис. 32), плотина располагается перпендикулярно оси подводящего

русла. По ширине она разделена на два полупролета по 2,6 *м* в свету. Пропускная способность плотины в этом случае за счет поворота ее и некоторого уменьшения пролета в свету несколько снизилась.

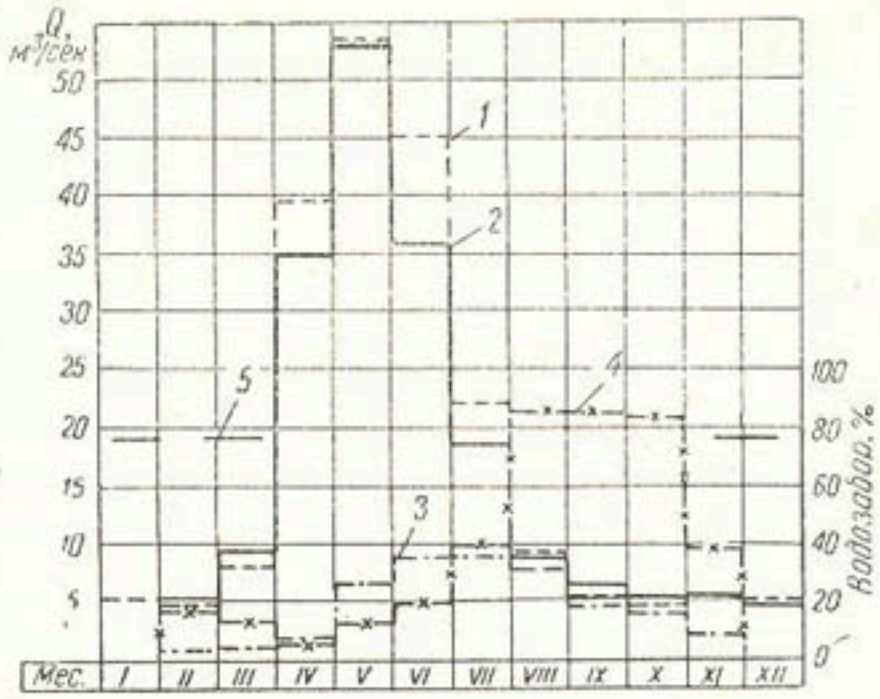


Рис. 33. Гидрографы р. Кугарт и водозабора на Кугартском гидроузле.

1—река (1945 г.); *2*—река (1925—1951 гг.); *3*—водозабор, *м³/сек* (1945 г); *4*—водозабор, % (1945 г.); *5*—расход начала движения наносов.

О делении воды на узле, в частности о величинах сброса ее через плотину, можно судить по гидрографам реки и водозаборам (рис. 33).

* *
*

1. Ширина и фронтальность щитовых плотин в составе узлов ферганского типа очень разнообразны, но в основном они диктуются пропускной способностью и гидрологическими условиями при всех прочих одинаковых условиях. В частности, при снеговом и снегово-дождевом питании источника плотины, как правило, располагаются перпендикулярно к оси русла и имеют наименьшую ширину за счет введения в схему бокового водослива.

При ледниковом типе питания источника в схемах обычно отсутствует водослив, и щитовая плотина в связи с этим имеет бо́льшую ширину, чем подводящее русло, что приводит к уширению сопрягающего участка или косому расположению и искривлению плотины в плане при увязке общей схемы.

2. Заложение порогов плотин практикуется в пределах от наинизшей отметки дна основного русла и поймы до выше средней.

Плотина	*Заложение порога относительно среднего дна*	
	основного русла	*поймы*
Кампыр-Раватская	—1,0 (наинизш.)	
Сары-Курганская	+1,3	≈(+0,20)
Тупалангская	≈(+0,5)	
Ангренская	≈(+0,5)	+0,3
Кугартская	—0,5(наинизш.)	

Следует отметить, что наинизший предел мало отражается на работе плотины только в условиях незначительного водозабора (Кугартская плотина). В случае же значительного водозабора (Кампыр-Раватская плотина в маловодные годы —1948—1949) отмечены повышенные отложения наносов в бьефах, что резко сокращает пропускную способность плотины и отражается на общих деформациях русла в бьефах. Заложение порогов на отметках, превышающих средние отметки русла и поймы (Сары-Курганская плотина), является благоприятным. Оно удлиняет общий срок службы сооружения, исключает местные завалы плотины наносами, а следовательно, и уменьшения пропускной способности. Отрицательным моментом в данном случае могут быть последствия значительных местных и общих размывов в нижнем бьефе и угроза разрушения плотины от подмыва с того же бьефа.

3. Глубина заложения низового зуба в концевой части водобойных частей плотин при напорах 2—5 *м*, в условиях песчано-гравелистого и галечного грунта, обычно принимается в пределах 5—9 *м*, считая от средней отметки русла.

4. Преобладающими конструкциями водобоя в плотинах данного типа являются: длинный горизонтальный пол в пределах быков с последующим переходом в наклонную часть и укороченные горизонтальные или со слабым наклоном (консольного типа). Эти конструкции при обильном стоке донных наносов подвергаются интенсивному их воздействию, что вызывает необходимость ежегодных ремонтов с использованием для защиты поверхности конструкций устойчивых против износа материалов (сталь, чугун и пластобетон[1]).

Рисбермные части за водобоями этих плотин, как правило, отсутствуют; практикуется присыпка низового зуба крупным рваным камнем, валунником, бетонитами.

5. Боковые сопряжения плотин с берегами отводящего русла осуществляются посредством откосов, примыкающих к обратным стенкам устоев: при коротких водобоях — ниже (по течению) концов последних или по линии их; при длинных — выше по течению, затягиванием откосов в пределы водобоев.

6. Гидравлика сооружений в условиях плотин ферганского типа, вследствие наличия в потоке поперечной циркуляции, характеризуется неравномерным распределением глубин, скоростей и расходов по фронту плотин, что, в свою очередь, приводит к несимметричным деформациям русла в бьефах и необходимости принятия запасов в сооружениях с учетом всех этих особенностей.

ВОДОПРИЕМНИК

В вопросе о завлечении наносов в отвод при наиболее изученном случае бокового водозабора из прямолинейного русла и, в частности, о роли порога при водозаборе много противоречий и неясностей (Д. Я. Соколов, Е. А. Замарин, И. И. Леви, А. Шоклич, С. А. Офицеров, В. А. Шаумян и др.).

Еще менее ясен вопрос о работе водоприемника на криволинейном участке русла. Для данного случая, если не считать лабораторных проработок, ограниченных узкопроизводственными задачами, методические исследования по определению влияния длины водоприемного фронта, высоты порога, его фронтальности и вообще компоновки водоприемника в схеме водозаборного сооружения еще не проводились.

---

[1] Данный материал находится в стадии освоения.

Поэтому, учитывая важность и необходимость составления рекомендаций по расчету сооружений ферганского типа, приходится воспользоваться только имеющимися результатами исследований узлов этого типа, как уже осуществленных в натуре, так и разработанных в лаборатории и находящихся в стадии проектирования и строительства.

Ниже приводятся некоторые результаты этих исследований (по выработке и улучшению конструкций водоприемников и их компоновке в составе узлов).

Расположение водоприемников в составе водозаборных узлов ферганского типа независимо от того, осуществляется ли водозабор с подачей на один или оба берега, выбирается на вогнутом берегу криволинейного подводящего русла. Это диктуется идеей, положенной в основу данной схемы. Однако при водозаборе на оба берега общая компоновка сооружений узла значительно усложняется.

Схемы при водозаборе с подачей на оба берега

Водоприемники располагаются на том берегу, где расход водозабора больше; вода на противоположный берег подается дюкером, акведуком или лотком.

По такому принципу скомпонованы водоприемники на Кампыр-Раватском и Сары-Курганском узлах и разрабатывалась реконструкция Кугартского водозаборного узла.

На Кампыр-Раватском гидроузле водоприемник осуществлен на левом берегу реки (i=0,004) в виде открытого регулятора, состоящего из 10 пролетов по 5 *м* в свету, перекрываемых деревянными шандорами. Регулятор примыкает к криволинейной плотине под углом 115° (рис. 22, 23). Он рассчитан на подачу через 9 левых пролетов 173 *м*³/*сек* в левобережный канал и через правый крайний пролет 15 *м*³/*сек* в правобережный.

Порог водоприемника, имеющий криволинейное очертание в плане с радиусом 70 *м* и длину 85 *м*, вынесен левым концом на 50 *м* вверх от регулятора и правым примыкает к правому устою водоприемника.

Порог устроен с превышением на 1,5 *м* над порогом плотины, заложенным на отметке наинизшего дна реки в этом створе. Расчетный рабочий напор у плотины при НПГ составляет 3,5 *м*. Фактически он колебался в пределах 2,5—3,7 *м*.

При таких напорах и расходах в реке 120÷400 *м*³/*сек* и водозаборе 60—40% средние скорости потока на пороге меняются в пределах 1,0—1,5 *м*/*сек*, а удельные расходы—1,0—3,0 *м*³/*сек*. Средняя скорость потока на подходе к водоприемнику при расходе 102 *м*³/*сек* была равной 1,0—1,5 *м*/*сек* и погонные расходы по участкам составляли 1—2 *м*³/*сек*.

Средние скорости при расходе в реке 618 *м*³/*сек* и водозаборе 24,3% следующие: на подходе к водоприемному порогу (v_0) 2,0 *м*/*сек*, на водоприемном пороге ($v_п$) 1,18, сбросной части потока ($v_с$) 2,13 *м*/*сек*. Отношения

$$\frac{v_с}{v_п}=1{,}8, \quad \frac{v_0}{v_п}=1{,}7.$$

Назначение повышенного порога водоприемника—усиление общей русловой поперечной циркуляции в речном потоке и отбор воды из верхних слоев речного потока, свободных от влекомых наносов.

Порог в правом крайнем пролете[1] регулятора, в целях дополнительной гарантии недопуска влекомых наносов в дюкер, выполнен с превышением на 0,5 *м* над порогом водоприемника.

За регулятором левобережного канала для гашения избыточной энергии в потоке сооружен водобойный колодец с боковым выходом в канал. В колодце против левых пролетов возведена водобойная стенка метровой высоты, усиливающая гашение (рис. 22, 23).

Описанная компоновка элементов водоприемника в общей схеме узла способствует предохранению каналов от поступления в них влекомых наносов, так как в период прохождения больших расходов воды возбуждаемая криволинейным подводящим руслом и усиливаемая порогом и боковым расположением плотины циркуляция в потоке обеспечивает сброс почти всей массы влекомых наносов (94—96%) через плотину. В первые годы эксплуатации это привело к размыву отдельных участков канала, и только после вымыва мелких составляющих отложений русла в канале и отмостки его оставшимися крупными фракциями дальнейший размыв прекратился.

В межень, когда циркуляция вследствие излишней для данного расхода ширины русла постепенно затухает, а сброс воды через плотину прекращается, в водоприемник с водой поступают и наносы, но уже в таком малом количестве, в котором они особого влияния на режим эксплуатации канала пока не оказывают. Значительным препятствием для поступления влекомых наносов в канал являются шандоры, устанавливаемые на пороге регулятора с целью регулирования расходов.

На рис. 34 приведен график, отображающий зависимость завлечения донных наносов в канал от водозабора, по данным исследования модели узла в 1941 г.

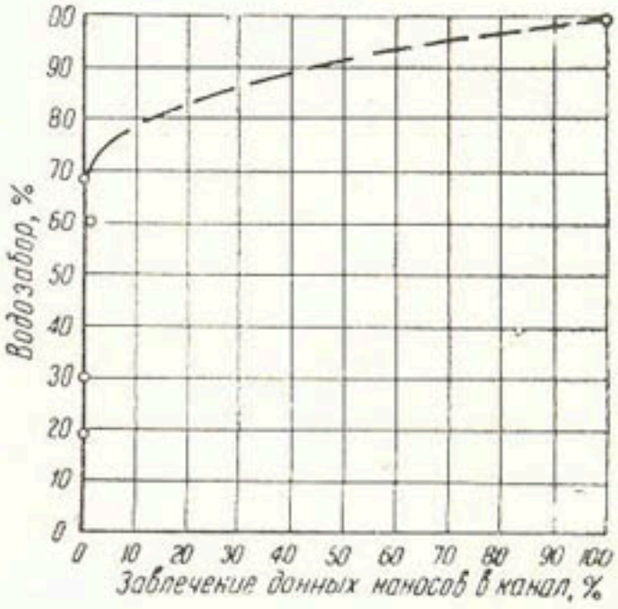


Рис. 34. Кривая зависимости завлечения донных наносов в канал от водозабора на модели Кампыр-Раватского гидроузла (1940—1941 гг.).

На Сары-Курганском гидроузле, осуществляющем водозабор на энергетику и орошение, водоприемник выполнен на вогнутом берегу подводящего русла у правого берега реки (i=0,01) в составе вынесенного вперед криволинейного в плане и Г-образного в профиле порога и примыкающего к щитовой плотине под углом 106° регулятора. Регулятор состоит из пяти пролетов по 5 *м* в свету, из которых три левых подают воду в правобережный канал, а два правых через дюкер—в левобережный[2] (рис. 25, 26). Пролеты регулятора оборудованы плоскими щитами. Расчетная пропускная способность его 98 $м^3/сек$, из них в левобережный канал—38, в правобережный—60.

---

[1] В настоящее время головная часть правобережного канала еще не прорыта и этот пролет закрыт.

[2] По первоначальному проекту эти два пролета размещались слева, однако в результате модельных исследований признано рациональным для наибольшей защиты от попадания наносов в дюкер разместить их справа.

Г-образный порог, предназначенный для усиления общей русловой циркуляции в речном потоке с целью отвлечения влекомых наносов в сторону плотины, имеет уклон 0,002 и переменную кривизну в плане, постепенно усиливающуюся по течению ($R_1=50$ *м*, $R_2=24$ *м*).

В верхней части порога, в 7,0 *м* от места сопряжения его с откосом правого берега, для ремонта и обеспечения водозабора в каналы в межень (зимой) сделана прорезь шириной 8,6 *м*, разделенная промежуточными стойками на 8 пролетов, перекрываемых металлическими шандорами. Порог длиной 60 *м* вынесен перед фронтом регуляторов каналов и возвышается на 1,35 *м* над их порогом и на 1,85 *м* над порогом плотины. Фактический напор над порогом плотины 2,0—2,8 *м*. Чтобы в дюкер не проникали крупные плавающие тела, вход в него оборудован крупной решеткой из рельс с просветом $l=1,0$ *м*.

Некоторое представление о гидравлике в пределах вододелительной части можно составить по данным табл. 6 и 7, из которых следует, что при пропуске через узел максимального расхода среднего паводка ($Q=183$ *м³/сек*) средняя скорость на пороге водоприемника была в 1,2 раза больше скорости подходящего речного потока и в 2,6 раза превышала среднюю скорость части потока, отводимой в сторону плотины для сброса.

Таблица 6

Дата замера (1949 г.)	Расход реки, *м³/сек*	Водозабор, %	v_0, *м/сек*	$v_п$, *м/сек*	$v_с$, *м/сек*	$\frac{v_с}{v_п}$
XI	30	23,3	1,0	2,33	0,77	0,33
13. VII	140	36,4	2,0	2,43	0,87	0,35
21. VII	183	42,7	2,39	2,74	1,02	0,37

Сопряжение регулятора каналов с нижним бьефом выполнено следующим образом: в двух правых пролетах водобой за щитами переходит в колодцы дюкера трехметровой глубины и далее, пройдя двумя трубами ($l\simeq110$ *м* и $i=0,0045$) тело плотины, сопрягается с левобережным каналом; три левых пролета с помощью наклонного

Таблица 7

Дата замера (1949 г.)	В подводящем русле на подходе к водоприемникам и плотине			Перед плотиной			На Г-образном пороге водоприемника		
	$Q_р$	$q_р$	$H_р$	$Q_п$	$q_п$	$H_п$	$Q_в$	$q_в$	$H_в$
21. VII	183	6,8	2,5	109 (60%)	2,7	1,5—1,7	74 (40%)	2,1	1,0
13. VII	140	—	—	87 (62%)	2,2	—	53 (38%)	1,5	0,7

водоската длиной 18 *м*, заглубленного под дно, сопрягаются с отстойником правобережного канала. На конце водобоя установлены зубья-гасители.

За последние девять лет эксплуатации водоприемник осуществлял регулирование и водозабор в каналы с допуском относительно небольшого количества влекомых наносов в них, если не считать на-

рушения, происшедшего в 1948 г. за счет срыва плиты, перекрывающей смотровой люк во втором пролете плотины. В результате труба и канал на участке длиной 300 *м* были забиты наносами через вскрытый люк и временно прекратилась водоподача в канал.

Установлено также, что при эксплуатации Г-образного порога с неполностью прикрытой прорезью в период паводка действие порога на отклонение наносов в сторону плотины ослабляется. Полезное действие его также уменьшалось при маневрировании затворами на плотине в порядке, отличном от рекомендованного. Отмеченные обстоятельства приводили к нежелательному характеру формирования русла перед порогом (рис. 35), при котором в критические периоды (при водозаборе 50—75%) создавалась угроза безнаносному водозабору в

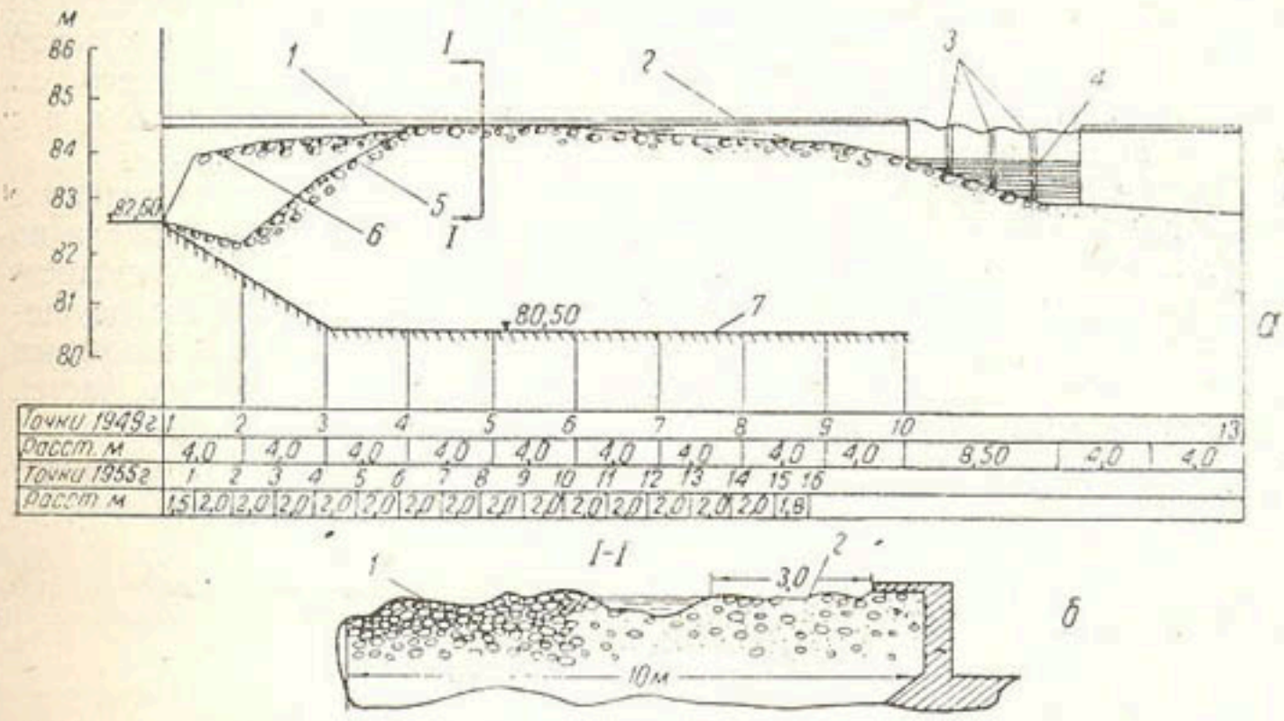


Рис. 35. Сары-Курганский гидроузел (по съемкам 1949 и 1955 гг.).

а—продольный профиль отложений вдоль Г-образного порога: *1*—порог; *2*—горизонт воды (1.XI 1949 г.); *3*—стойки из двутаврового железа в прорези порога; *4*—шандоры; *5*—отложения галечника, $d_{макс}$ =300 *мм* (1.XI 1949 г.); *6*—отложения галечника, $d_{макс}$ =250 *мм* (25.X 1955 г.); *7*—понур. *б*—поперечный профиль I—I: *1*—отсортированная галька, d=200—250 *мм*; *2*—отложения, d=20—150 *мм*.

каналы. Из отмеченного выше следует, что в подобных условиях эксплуатации повышение водозабора на узле может привести к значительному захвату наносов в каналы. Нарушений в нижнем бьефе регулятора за прошедший период не было. Несмотря на то что в канал поступал осветленный поток, местные размывы были вполне допустимыми. Это свидетельствует о нормальном гашении избыточной энергии потока в описанных устройствах.

Зимой в существующих условиях эксплуатации затруднений не отмечалось, что обусловлено незначительным количеством шуги и малым водозабором в этот период.

В варианте реконструкции Кугартского гидроузла[1] по ферганскому типу водозабор осуществляется на вогнутом берегу подводящего русла при уклоне реки i=0,012. В целях максимального использования существующего сооружения водозабор про-

[1]Реконструкция разрабатывалась по заданию института „Киргизгипроводхоз" путем лабораторного проектирования в гидротехнической лаборатории САНИИРИ в 1955 г. Описываемый вариант рекомендован для проектной проработки.

ектируется в двух точках (рис. 14). В связи с этим выработана расчетная конструкция водоприемника, состоящая из двух последовательно расположенных регуляторов, из которых первый по течению, шириной в свету 3 *м*, определен на расход 4,18 *м³/сек* для подачи в дюкер и в последующем на правый берег, и второй, шириной в свету 5 *м*—на расход 5,72 *м³/сек* в левобережный канал. Первый регулятор осуществляет лобовой водозабор, второй—боковой. Для защиты дюкера от плавающих тел вход в него оборудуется грубой решеткой. Регулирование водоподачи осуществляется плоскими щитами.

Порог регулятора правобережного канала на 1,10 *м* выше порога плотины, расположенного на наинизшей отметке бытового дна в этом створе. У регулятора левобережного канала собственному порогу предшествует вынесенный вперед и заложенный с превышением порога плотины на 1,45 *м* водоприемный порог длиной 8 *м*. Напор на узле переменный: до расхода среднемесячного многолетнего за период движения влекомых наносов (41 *м³/сек*) он равен 2,5 *м* и с дальнейшим возрастанием расхода увеличивается.

Сопряжение водоприемников с нижним бьефом осуществлено с помощью водобойных колодцев. Результаты исследований модели по описанному варианту свидетельствуют о том, что узел при существующем режиме источника и потребления (рис. 33) успешно осуществляет регулирование и водозабор в каналы с недопуском влекомых наносов. При этом полностью исключается забивка головных частей каналов наносами, что наблюдается на сооружении в натуре.

О распределении скоростей, наблюденных перед фронтом водоприемника и на его порогах, можно судить по данным табл. 8, из

Таблица 8

Расход реки, *м³/сек*	Водозабор, %	Средняя скорость: потока на подходе к водоприемнику v_0, *м/сек*	на пороге водоприемника $v_п$, *м/сек*	сбросной части потока $v_с$, *м/сек*	$\frac{v_с}{v_п}$
Регулятор правобережного канала					
41	10,2	—	1,21	2,58	2,1
106	4	—	0,78	4,7	6,0
251	1,7	—	0,53	5,52	10,4
Регулятор левобережного канала					
41	15,5	2,58	1,02	1,83	1,8
106	5,6	4,70	0,53	3,69	7,0
251	2,3	5,52	0,37	5,30	14,3

которых следует, что средние скорости на порогах водоприемников изменялись в больших пределах (0,5—1,2 *м/сек*) в зависимости от величины водозабора. По отношению к средним скоростям на подходе к водоприемнику и скоростям сбросной доли потока они были в 2—10 раз меньше. Нижний предел относится к максимальному водозабору, а верхний—к минимальному.

С целью разработки рекомендаций по проектированию водозабора этого типа для предгорных участков рек произведено усовершенствование данной схемы. Оно выразилось в объединении водозабора в одной точке, придании кривизны концевому участку русла, устройстве общего водоприемного порога, усиливающейся кривизне в плане и соответствующем кривизне русла расположении щитового сброса.

В выработанной компоновке схемы (рис. 32) регулятор водоприемника примыкает к разборной части плотины под углом 149°. Пролет регулятора имеет ширину в свету 6 *м*. Водоприемный порог за счет выноса вперед и бокового размещения удлинен до 20 *м* и соответственно этому повышен у плотины на 0,39 *м* от порога регулятора и на 1,39 *м* от порога плотины. В верхней части его превышения возрастают еще на 0,35 *м* за счет уклона (i=0,0175). В плане водоприемный порог имеет очертание: на длине 9,5 *м*—прямолинейное и на длине 10,5 *м*—переменной кривизны (R_1=15,2 *м*, R_2=3,2 *м*).

Таблица 9

Водозабор, %	Средняя скорость: потока на подходе к водоприемному порогу v_0, *м/сек*	на пороге водоприемника $v_п$, *м/сек*	сбросной части потока $v_с$, *м/сек*	$\frac{v_с}{v_п}$
40	2,40	0,82	1,94	2,37
50	2,22	1,05	1,80	1,71
60	2,40	1,43	1,41	0,99
66,5	2,48	1,65	1,31	0,79
67,5	2,37	1,65	1,28	0,78

Примечания. Расход реки 41 *м³/сек*. Данные получены по замерам в створе, удаленном на 5,5 *м* от плотины.

Моделирование этой схемы производилось при постоянном расходе 5,7 *л/сек*, соответствующем в натуре среднемесячному многолетнему за период движения наносов для реки с уклоном 0,011, при максимальной крупности влекомых наносов для этого расхода $d_м$ = 3—4 *мм* (натура $D_н$ =105÷140 *мм*) и удельном содержании их в потоке ρ=1,0 *г/л*.

Исследованиями установлена следующая гидравлическая картина. Средняя скорость потока на подходе к водоприемнику была более или менее постоянной и равной 2,5 *м/сек*; средние же скорости непосредственно перед водоприемным порогом и на нем изменялись в зависимости от величины водозабора (табл. 9).

Этими же исследованиями установлено, что для данной схемы по отношению к допустимому захвату наносов в каналы предельным является 65-процентный водозабор, при превышении которого захват наносов прогрессивно растет и является неприемлемым при эксплуатации.

Схемы при водозаборе с подачей на один берег

Примером компоновки по данной схеме могут служить водоприемники на Тупалангском и Ангренском гидроузлах.

На Тупалангском гидроузле на р. Каратаг (i=0,005) водоприемник запроектирован[1] в виде открытого регулятора из трех пролетов по 4 *м* каждый, с углом отвода 80° и порогом на одной отметке с плотиной (рис. 28). Кроме того, в 2—3 *м* перед регулятором устраивается водоприемный порог с переменной кривизной в плане, Г-образного сечения в профиле. Горизонтальная полка Г-образного порога имеет в начале ширину 0,4 *м* и с приближением к плотине расширяется до 4 *м*. Длина порога 19 *м*. Порог выполняется с уклоном i = 0,0068 и превышением на 1,0 *м* порога плотины, закладываемого на 0,5 *м* выше среднего дна русла в этом створе. Напор на плотине при рабочем уровне H = 2,4 *м* и пропуске максимального (катастрофического) расхода паводка равен 4,3 *м*. Гидрографы источника и потребления (рис. 29) показывают, что максимальный водозабор на узле достигает 70%. Исследованиями выработанной схемы установлено, что и при таком, относительно большом, водозаборе в водоприемник завлекается незначительное количество влекомых наносов. Это свидетельствует об удачной конструкции водоприемника в общей схеме узла. Средние скоростей потока при разных расходах в реке и водозаборах приведены в табл. 10. Из табл. 10 следует, что при малом водозаборе

Таблица 10

Расход реки, *м³/сек*	Водозабор, %	Средняя скорость			$\frac{v_c}{v_п}$
		потока на подходе к водоприемнику v_0, *м/сек*	на пороге водоприемника $v_п$, *м/сек*	сбросной части потока v_c, *м/сек*	
45	70	1,44	1,43	0,72	0,5
350	11,4	3,47	1,05	4,22	4,0

Примечание. Замеры произведены в створе в 9,0 *м* от плотины.

средняя скорость на водоприемном пороге была в 3,5 раза меньше скоростей на подходе и сбросной части потока и только при предельном водозаборе для данной схемы (70%) достигла величины, равной подходной скорости, и превысила в 2 раза среднюю скорость сбрасываемой части потока.

На исследованном на модели и построенном Ангренском гидроузле водозабор осуществляется на правом (вогнутом) берегу подводящего русла ($i_{ср}$ =0,0095). Водоприемник состоит из порога ломаного очертания в плане длиной 40 *м* и трехпролетного регулятора забрального типа (2,5 *м* в свету каждый), удаленного от порога на 3—9 *м*. Пролеты оборудованы плоскими щитами. Регулятор с каналом сопряжен тремя трубами сечением 1,3 × 1,2 *м*. Для улавливания плавающего мусора непосредственно на входе в регулятор (по линии забрала) предусмотрена установка грубой решетки. Угол отвода принят равным 59°.

Водоприемный порог у устоя плотины заложен выше на 1,0 *м* порога регулятора и на 1,30 *м* порога плотины. Порог плотины превы-

[1] Схема разработана путем лабораторного проектирования в гидротехнической лаборатории САНИИРИ и запроектирована Узводпроизом, но еще не осуществлена.

шает среднюю отметку поймы на 0,3 *м*. Вследствие приданного водоприемному порогу уклона $i = 0{,}006$ указанное превышение с удалением от плотины вверх возрастает, достигая в начале порога соответственно 1,2 и 1,5 *м*. Напор на узле переменный, при расходах до среднепаводкового многолетнего $Q = 160$ *м³/сек* он равен 2,0 *м* и при больших расходах возрастает. Схематический план и разрез по водоприемнику узла, отработанного при модельных исследованиях и рекомендованного к проектированию и осуществлению, приведены на рис. 30.

Результаты первоначальных исследований, проведенных с криволинейным в плане и Г-образным в профиле водоприемным порогом показали, что при водозаборе до 10 *м³/сек* и максимальном водозаборе, имевшем место при расходах в реке $Q = 30 \div 40$ *м³/сек* (расход, при котором уже отмечается подвижка наносов), завлечение наносов в канал не превышало 0,3% от общего расхода их (табл. 11).

Таблица 11

Номер опыта	Расход реки, *м³/сек*	Водозабор, %	Удельное содержание		Завлечение наносов в регулятор, %
			влекомых наносов в речном потоке, *г/л*	наносов в потоке, поступившем в канал, *г/л*	
3	160	6,25	1,0	0,020	0,10
3	160	6,25	1,0	0,037	0,23
3	160	6,25	1,0	0,031	0,19
4	80	12,50	1,0	0,011	0,06
4	80	12,50	0,5	0,005	0,12
4	80	12,50	0,5	0,004	0,11
4	80	12,50	0,5	0,007	0,15
5	40	25,00	0,2	0,002	0,28
6	30	33,30	0,2	0,001	0,08
I гидрограф	290	3,45	2,175	0,053	0,09
II гидрограф	600	1,66	13,9	0,305	0,04

Примечание. Расход в канал 10 *м³/сек*.

В дальнейшем, в связи с выявившейся необходимостью увеличения водозабора до 21 *м³/сек*, произведены дополнительные исследования водозабора, в результате которых признано необходимым понизить порог на 0,2 *м* и увеличить отверстия регулятора (за счет поднятия забрала) и следующих за ним сооружений, сопрягающих регулятор с каналом (раструб, трубы).

Понижение порога, естественно, привело к уменьшению глубин перед ним. Последнее обстоятельство, а также стремление к упрощению отдельных элементов сооружения вызвали необходимость проведения опытов по подбору более совершенной в данных условиях конструкции порога в плане. Наибольший эффект, в смысле формирования русла перед порогом, достигнут при конструкции с двумя прямолинейными участками и переломом, сужающими русло по мере приближения к плотине. Эта конструкция порога, с переломом в плане и без полки в профиле (рис. 30), рекомендована к осуществлению и более подробно описана выше.

При подаче в канал 21 *м³/сек* максимальный водозабор в период движения влекомых наносов в реке не превышает 60%, а в период паводка снижается до 7—5% (рис. 36).

С целью успешной борьбы с влекомыми наносами в данной схеме допустимым пределом является 50-процентный водозабор (рис. 37).

Приближенное представление о скоростном режиме на модели можно составить по данным табл. 12.

В данных условиях при водозаборе до 25% средние скорости на пороге водоприемника были наименьшими по сравнению со средними

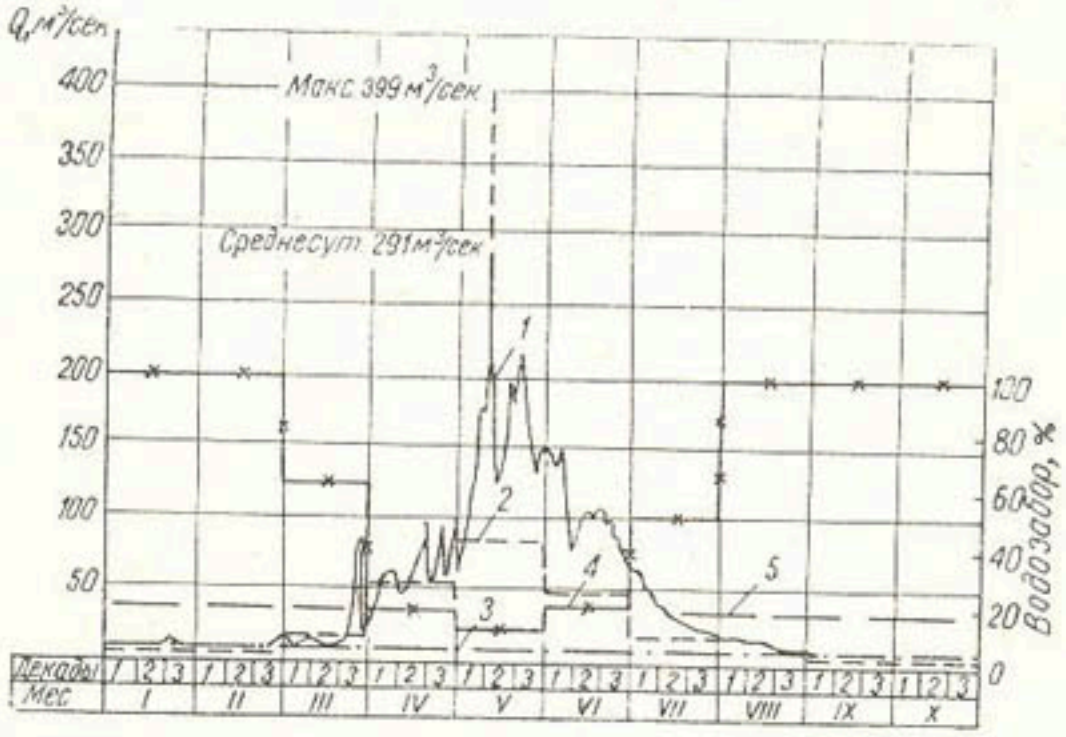


Рис. 36. Гидрографы р. Ангрен и водозабора в канал на Ангренском гидроузле.

1—река, 1949 г. (по среднесуточным расходам); *2*—река (по среднемесячным многолетним расходам 1927—1952 гг.); *3*—водозабор, *м³/сек*; *4*—водозабор, %; *5*—расход начала движения донных наносов.

скоростями на подходе к водоприемнику и скоростями речного потока, сбрасываемого через плотину и катастрофический водослив.

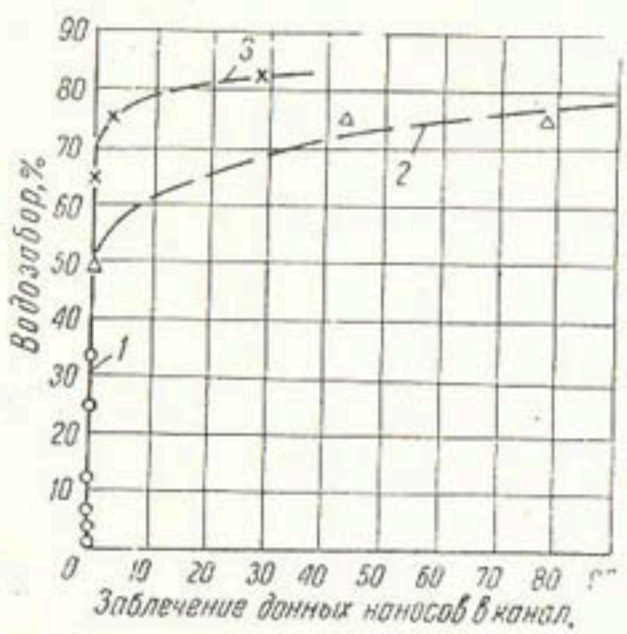


Рис. 37. Кривая зависимости завлечения донных наносов в канал от водозабора на модели Ангренского гидроузла.

1—по опытам 1953 г., *2* и *3*—1955 г.

Последующие исследования показали, что с увеличением фронтальности водоприемного порога и кривизны русла в пределах вододелительных устройств за счет сокращения правого пролета щитовой плотины, достигнутого изменением планового очертания водоприемного порога к правому бычку (рис. 38), безнаносный водозабор при данной схеме резко возрос, достигнув 70% (рис. 37).[1]

Распределение средних скоростей течения в пределах вододелительной части узла в этих опытах представлено данными табл. 13.

Из табл. 13 и рис. 37 следует, что предельному водозабору для этой схемы соответствует отношение средних скоростей сбросной доли потока к скоростям потока на пороге — $\frac{v_c}{v_п} = 0{,}6 \div 0{,}7$, т. е. преде-

[1] Эти результаты получены в опытах с постоянным речным расходом $Q = 80{,}0$ *м³/сек*.

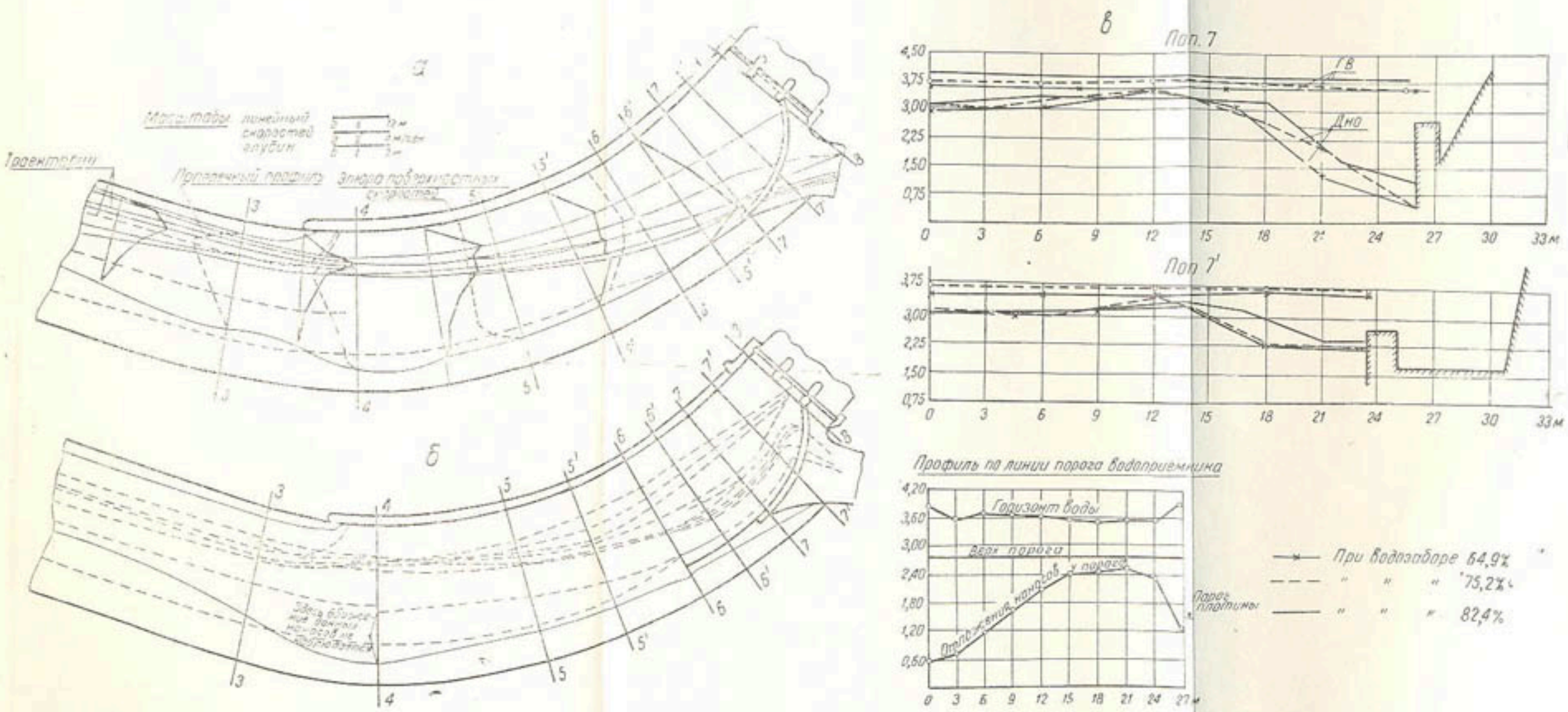


Рис. 38. План траекторий поверхностных струй и эпюры поверхностных скоростей в подводящем русле (*а*), направление глубинных токов (*б*), профили горизонтов воды и дна (*в*).

лом превышения скорости на пороге над скоростью сбрасываемой части должно быть отношение, равное 2. О характере распределения поверхностных и донных струй, поверхностных скоростей и деформаций в рус-

Таблица 12

Расход реки, $м^3/сек$	Водозабор, %	Средняя скорость: потока на подходе к водоприемному порогу v_0, $м/сек$	на пороге водоприемника $v_п$, $м/сек$	сбросной части потока $v_с$, $м/сек$	$\frac{v_с}{v_п}$
40	25	2,02	0,67	1,73	2,58
80	12,5	2,90	0,67	3,12	4,66
160	6,25	4,18	0,37	2,96	8,0
730	1,37	3,0	0,10	2,75	27,5
910	1,1	—	0,08	2,70	—

Примечание Результаты замеров в створе перед щитовой плотиной.

Таблица 13

Водозабор, %	Средняя скорость: потока на подходе к водоприемному порогу v_0, $м^3/сек$	на пороге водоприемника $v_п$, $м^3/сек$	сбросной части потока $v_с$, $м^3/сек$	$\frac{v_с}{v_п}$
64,9	3,00	2,23	1,64	0,74
75,2	3,10	2,38	1,03(1,02)	0,44
82,4	3,14	2,38	0,76(0,71)	0,32

Примечание. Расход реки 80 $м^3/сек$.

ле перед водоприемным порогом, полученном в опыте с водозабором 64,9%, можно судить по рис. 38.

* *
*

Обобщение характеристик конструкций, условий и показателей работы водоприемников на описанных выше низконапорных узлах ферганского типа (табл. 14) дает основание для следующих выводов.

1. Кривизна русла в пределах вододелительных устройств и связанная с ней фронтальность играют существенную роль при осуществлении безнаносного водозабора. Эффект возрастает с увеличением фронтальности и кривизны русла или при усиливающем эту кривизну боковом расположении сбросных сооружений (водослив, щитовая плотина). На испытанных на модели и частично в натуре узлах фронтальность изменяется в пределах 0,4—1,0.

2. Геометрический угол отвода между осями регулятора и щитовой плотины в ферганском типе водозабора не показателен.

В данных условиях приобретает значение гидравлический угол отвода относительно порога водоприемника, который в рассмотренных

Таблица 14

Узел	Напор при НПГ H, м	Радиус кривизны русла перед порогом R_0, м	Фронтальность водоприемного порога	Угол отвода α, градусы		Превышение порога водоприемника над порогом плотины h, м	Максимальная крупность отложений в русле, в створе узла $d_{макс}$, мм	Относительная высота порога $\frac{h}{H}$
				геометрический между осями регулятора и плотины	гидравлический относительно порога			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кампыр-Раватский на р. Кара-дарья								
натура	2,5—3,7	200/600	0,44	65	65	1,5	300	0,6—0,4
модель								
Сары-Курганский на р. Сох								
натура	2,0—2,8	40/200	1,0	74	65	1,45	250	0,7—0,5
модель								
Кугартский на р. Кугарт								
модель	2,5	92/46			90	1,45	250	0,58
модель	2,5	92/46	0,50	31	88	1,39	200	0,56
Тупалангский на р. Каратаг								
модель	2,4	136/30	0,62	80	65	1,0	250	0,42
Ангренский на р. Ангрен								
модель	2,0	130/115	0,50	59	75(71)	1,30	300	0,65
модель							300	
Модель с увеличенной фронтальностью	2,0—2,25	115/65	0,58	59	70	1,5	300	0,75—0,67

Узел	Относительная высота порога $\frac{h}{d_{макс}}$	Длина порога, м	Радиус кривизны водоприемного порога $r_п$, м	Форма поперечного сечения порога	Предельный % водозабора без завлечения влекомых наносов	Отношение средней скорости течения сбросной доли расхода к средней скорости $\frac{v_с}{v_п}$ на пороге	Отношение средней скорости течения на подходе к средней скорости $\frac{v_о}{v_п}$ на пороге	Удельный погонный расход на водоприемном пороге при предельном коэффициенте водозабора q, м³/сек/пог.м
1	10	11	12	13	14	15	16	17
Кампыр-Раватский на р. Карадарья								
натура	5	85	70	Уступ	— (24,3)	(1,8)	(1,7)	1,5—3,4
модель					60			2,7—5,4
Сары-Курганский на р. Сох								
натура	6,2	60	50,24	Повышен. порог с горизонт. полкой	70 (42,7)	(0,4)	(0,9)	1,7—2,8
модель					50			
Кугартский на р. Кугарт								
модель	6,2	7+3	Прямол.	Повышен. прямоуг.	— (40)	1,8—14	2,5—15	0,8
модель	5,5	20	15	То же	65	0,8	1,5	2,66
Тупалангский на р. Каратаг								
модель	4	19	22,8	Повышен. порог с горизонт. полкой	70	0,5	1,0	2,0
Ангренский на р. Ангрен								
модель	4,3	40	Ломан.	Повышен. прямоуг.	— (25)	(2,6)	(3,0)	(0,4—0,7)
модель				То же	50	1,0	1,7	
Модель с увеличенной фронтальностью	5	27	26,1	Криволин. повышен. прямоуг.	70	0,6	1,35	2,8

Примечания. 1. В графе 3 числитель—радиус общей кривизны русла, знаменатель—радиус кривизны перед водоприемником.

2. За фронтальность (графа 4) принята величина проекции водоприемного порога на перпендикуляр к оси подводящего русла, отнесенная к ширине русла по урезу.

3. За гидравлический угол отвода (графа 6) принят угол, образуемый между перпендикуляром на середину водоприемного порога и осью речного потока.

4. Значения в скобках в графах 15, 16 и 17 соответствуют проценту менее предельного водозабора (в скобках в графе 14).

нами примерах изменялся в пределах 65—90° в зависимости от схемы компоновки.

3. Превышение водоприемных порогов над порогами плотин на рассмотренных узлах в предгорных условиях, характеризуемых большим песчано-галечниковым стоком, составляет 1,0—1,5 *м*, или относительно к напору (0,4—0,75) *H*.

4. Длина водоприемных порогов на узлах этого типа обусловлена главным образом выбранной высотой их, формой в плане, положением в общей схеме компоновки и требуемой пропускной способностью.

5. Основными разновидностями конструкций водоприемного порога являются: по форме в плане — прямолинейный, ломаный, криволинейный постоянной и переменной кривизны; по поперечному профилю — уступ, повышенный, с горизонтальной полкой, выдвинутой вперед.

6. Гарантирующим от завлечения в канал наносов на узлах чисто ферганского типа является 60—70-процентный водозабор. Однако это

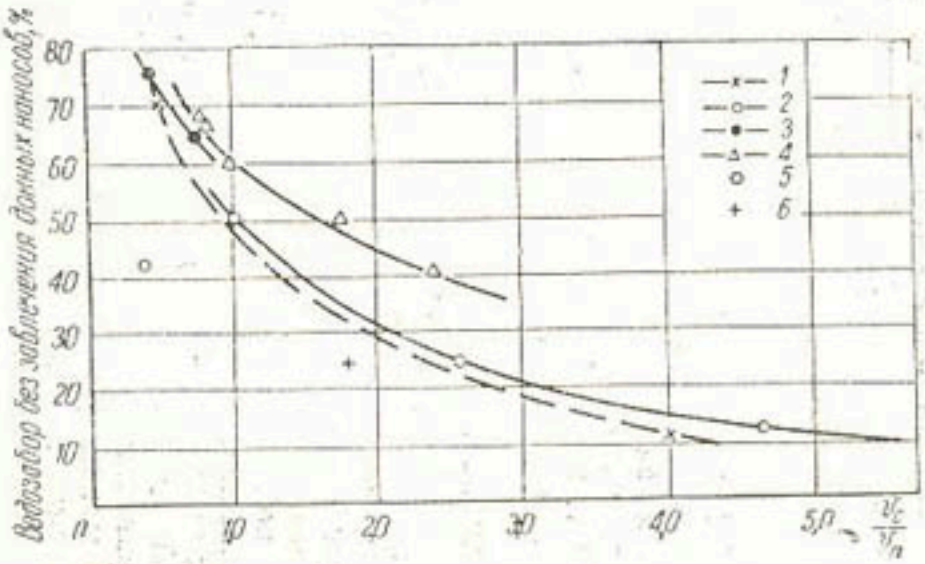


Рис. 39. Соотношение скоростей потока в зависимости от величины водозабора.

1—Тупалангский гидроузел (модель), *2* и *3*—Ангренский (модель), *4*—Кугартский (модель), *5*—Сары-Курганский (натура), *6*—Кампыр-Раватский (натура).

не предел, и в случае использования в борьбе с наносами при водозаборе дополнительных устройств этот процент возрастает до 95.

7. Соотношение скоростей потока в пределах вододелительной части находится в прямой зависимости от величины водозабора (рис. 39). При этом для предельного водозабора на рассмотренных нами узлах (табл. 14) средняя скорость на пороге водоприемника не превышает скорости на подходе и достигает двойного значения скорости сбросной доли расхода вдоль порога.

8. На узлах ферганского типа зоны поступления воды и влекомых наносов через пороги переменны. Через верхнюю по течению половину порога (при расходах в реке, равных и превышающих расчетный для подводящего русла), как правило, осуществляется водоотбор наиболее осветленной части из верхних слоев речного потока; влекомые наносы (при больших водозаборах) поступают через нижнюю половину порога на удалении (0,6—0,8) *l* от его начала (рис. 38). При расходах менее расчетного для русла отмеченная закономерность нарушается, в частности, зона поступления наносов перемещается на верхнюю половину порога.

9. В условиях большого изменения речных расходов, когда невозможно создать подводящего русла, возбуждающего общерусловую циркуляцию в течение всего периода движения наносов, становится ра-

циональным использование при прохождении малых расходов специальных дополнительных устройств по отвлечению влекомых наносов от фронта водозабора. В этом случае заслуживают внимания конструкции водоприемного порога, постепенно переходящего в галерею в своей концевой части (рис. 28), водоприемного порога в комбинации с галереей[1] (рис. 16, 17, 18), водоприемного порога в комбинации с регулируемой наносоперехватывающей галереей и др.

КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ВОДОСЛИВ

Для предгорных участков рек Средней Азии и Кавказа, особенно там, где возможно ожидать наступление снегового или ливневого паводка, переходящего в сель, обычная схема водозаборного узла ферганского типа (рис. 30) должна включать, кроме щитовой плотины, катастрофический водослив. Этот водослив хорошо увязывается со схемой данного типа, ибо он позволяет придавать подводящему руслу очертание в плане, допускающее вместо расширения русла перед плотиной, как это имеет место на Сары-Курганском узле (рис. 25), необходимое постепенное сужение его в районе водоприемных устройств (рис. 14, 28). Сужение русла (модель плотины Кугарт) или сохранение его почти постоянной ширины (модель плотины Ангрен) позволяет или сохранить полезную циркуляцию, или усилить ее постепенным сжатием потока, которое достигается устройством криволинейного катастрофического водослива на выпуклом берегу (рис. 32).

Впервые в гидротехнической лаборатории САНИИРИ водослив исследован в составе узла ферганского типа на р. Каратаг в 1951 г.

Каратаг, как отмечалось, по характеру питания относится к смешанному типу, и паводки в нем обычно проходят в мае — июне. Иногда отмечаются селевые паводки.

Щитовая часть плотины на р. Каратаг рассчитана на пропуск среднего многолетнего из максимальных расходов без вступления в работу катастрофического водослива. Плановое положение катастрофического водослива, его размеры и поперечное сечение представлены на рис. 28.

Начальная часть водослива очерчена по радиусу $R_{вод} < R_{русла}$ и в данном случае играет роль струенаправляющей дамбы, благодаря чему при малых расходах воды поток всегда направляется к криволинейному порогу регулятора; этим поддерживается необходимая поперечная циркуляция перед регулятором. Отводящее русло за водосливом выполнено в виде траншейного сброса нужной ширины. Создание зарегулированного сброса за водосливом позволило устроить через плотину мостовой переход.

Наличие траншейного сброса за водосливом и его относительная фронтальность, равная $\approx 0{,}24$, позволили в большие паводки транспортировать все донные наносы, которые в значительном количестве (до 50% всех речных наносов) сбрасывались через водослив в нижний бьеф плотины и далее транспортировались по руслу, т. е. водослив не заваливался наносами, как это было на Ангренской модели водозаборного узла, который выполнен также по ферганской схеме.

Щитовая часть плотины Ангренской ГРЭС рассчитана так же, как и предыдущая плотина, на пропуск среднего многолетнего из макси-

---

[1] Конструкция представляет собой порог с пристроенной перед ним галереей, входы в которую осуществлены через торец и равномерно размещенные по длине окна (предложение Я. А. Никитина).

мальных расходов без вступления в работу катастрофического водослива.

Основные размеры водослива и его конструкция представлены на рис. 30, 40. Водослив имеет длину 90 *м* и расположен на выпуклом берегу подводящего русла. Кривизна его в плане создана радиусом 100 *м*. Гребень возвышается на 2,0 *м* над порогом плотины и имеет уклон $i_{вод}=0{,}7\ i_б$. Этот уклон подобран на модели и соответствует уклону водной поверхности при пропуске средне-максимального рас-

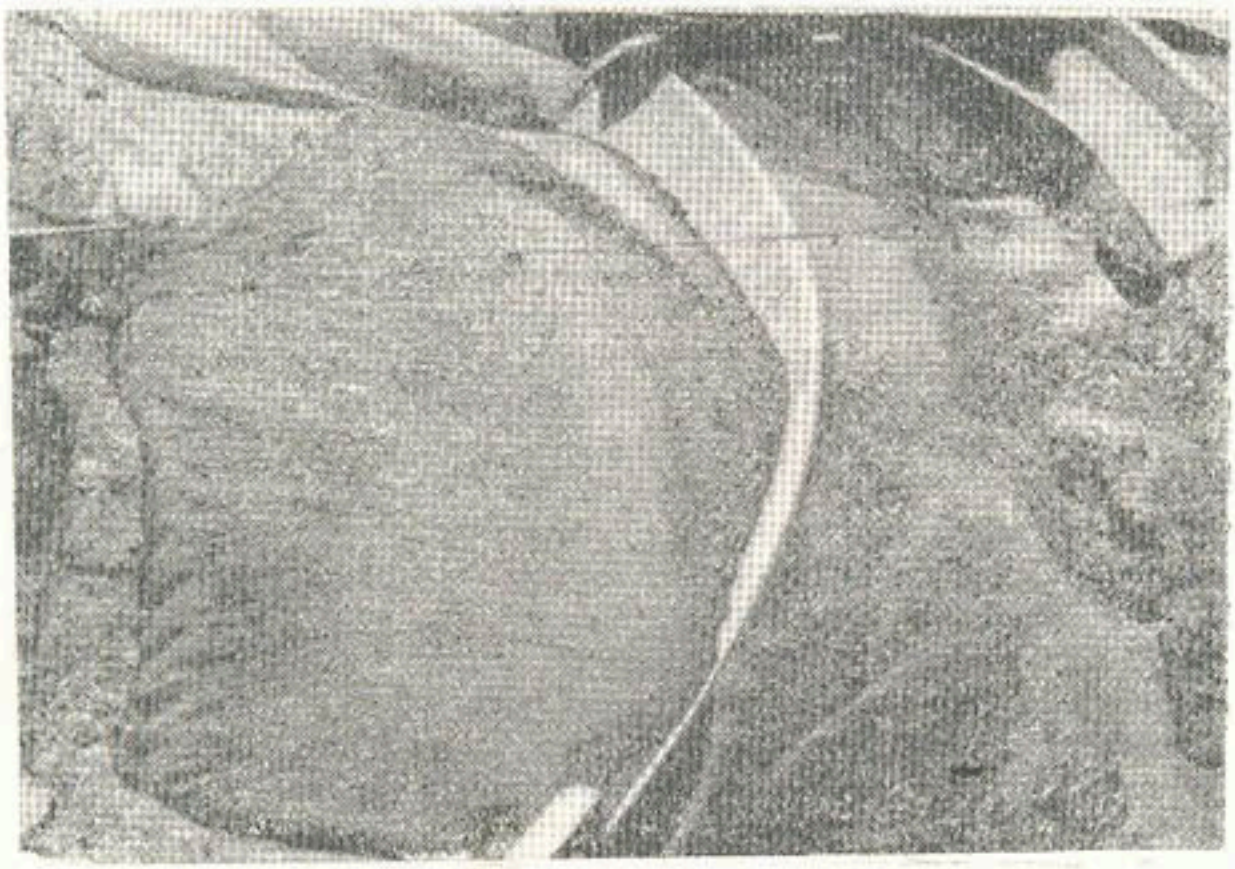


Рис. 40. Водослив на Ангренском гидроузле после пропуска катастрофического расхода (модель).

хода многолетней повторяемости $Q=150$ *м³/сек*. Соответственно этому приняты и отметки гребня водослива 34,14 в начале и 33,50 в конце.

Следует отметить, что в Ангренской плотине фронтальность катастрофического водослива равна нулю.

На рис. 41 даны полученные на модели в 1953 г. профили горизонта воды перед водосливом при пропуске по реке расходов 200, 400, 730 *м³/сек;* показана кривая тарировки водослива. Из рис. 41 обнаруживается непостоянство горизонта воды при одинаковых расходах и несоответствие этим горизонтам пропускной способности водослива: верхняя треть длины водослива пропускала малые расходы воды, и нижний бьеф его при расходах >400 *м³/сек* заваливался наносами (см. рис. 40).

Отмечаемое при расходах свыше 400 *м³/сек* постоянное увеличение завала верхней части водослива привело к почти полному выключению ее из работы при последующем пропуске значительно меньших расходов (200—300 *м³/сек*).

Вследствие завала наносами верхней трети водослива ($l=90$ *м*) проведены опыты с сокращенным по длине водосливом ($l=60$). Опыты с этим вариантом, заключавшиеся в основном в производстве тарировки водослива и выяснении степени увеличения подпора у плотины, проведены при расходах 200, 400 и 750 *м³/сек*. Результаты представлены профилями горизонтов воды и кривыми тарировки на рис. 41, где они

сопоставляются с водосливом длиной $l=90$ *м*. Из этого рисунка следует, что напоры воды над гребнем укороченного водослива ниже при расходах 200, 750 *м³/сек* и выше напоров над водосливом длиной 90 *м* при расходе 400 *м³/сек*. Общая же пропускная способность при водосливе $l=60$ *м* уменьшилась, изменяясь в зависимости от общих речных расходов воды. При этом наименьшее сокращение пропускной способности относится к наибольшим расходам, подтверждая тем са-

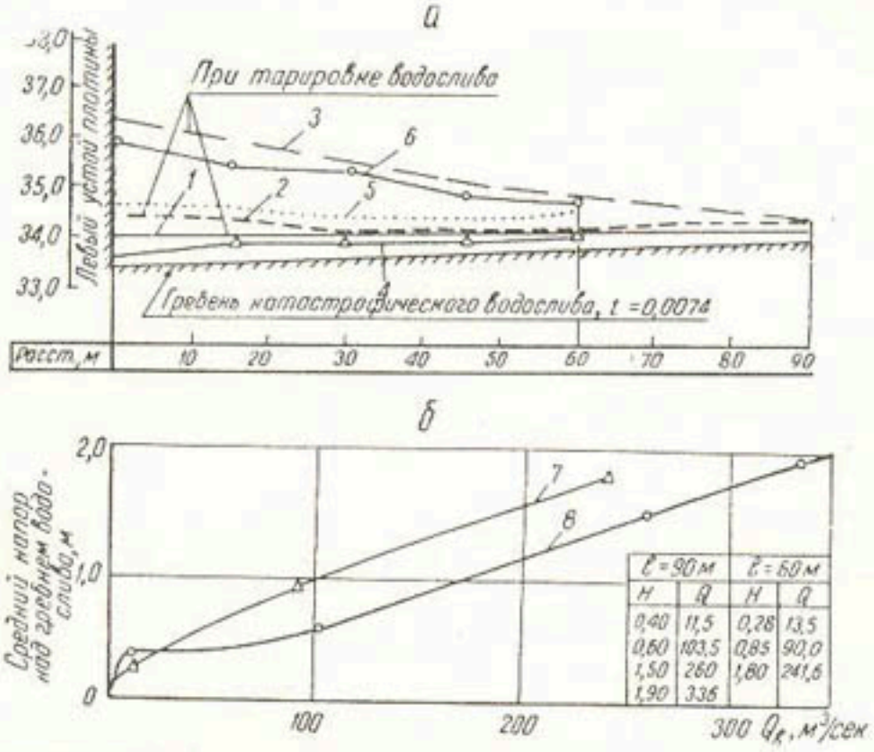


Рис. 41. Продольные профили горизонтов воды вдоль катастрофического водослива (*а*) и кривые тарировки катастрофического водослива (*б*).

Водослив занесен ($l=90$ *м*): *1* — горизонт воды при $Q=200$ *м³/сек*, *2* — при $Q=400$ *м³/сек*, *3* — при $Q=730$ *м³/сек*; водослив не занесен ($l=60$ *м*): *4* — при $Q=200$ *м³/сек*, *5* — при $Q=400$ *м³/сек*, *6* — при $Q=750$ *м³/сек*; *7* — $l=60$ *м* (не занесен); *8* — $l=90$ *м* (занесен на 50%).

мым незначительность расходов, сбрасываемых через заиленную часть при водосливе, равном 90 *м*, о чем говорилось выше. При отсутствии завала водослива с нижнего бьефа уменьшение пропускной способности составило около 20% при $Q=750$ *м³/сек;* со снижением речных расходов этот процент возрастал.

Характерно, что при расходе воды через катастрофический водослив более 10% от расхода реки значительная доля наносов проходила через водослив, а в щитовой плотине движение их наблюдалось только в левом крайнем пролете.

Относительное деление воды и наносов при водосливе $l=60$ *м* представлено в табл. 15.

Из табл. 15 следует, что процент проходящих через водослив донных наносов растет гораздо быстрее, чем увеличивающиеся при этом сбросные расходы воды.

Подпор, создаваемый при водосливе $l=60$ *м*, зафиксирован более выравненным вдоль водослива по отношению к существовавшему при водосливе $l=90$ *м*.

От описанных выше катастрофических водосливов на плотинах рек Каратаг и Ангрен несколько отличается водослив варианта реконструкции плотины на р. Кугарт (рис. 32).

Катастрофический водослив имеет длину 69 *м* и располагается в конце правобережной дамбы зарегулированного криволинейного русла длиной $L = 5B = 130$ *м* при длине левобережной дамбы 200 *м*, правобережной — 290.

В схеме реконструкции по рекомендуемому варианту, за счет придания постепенно сужающегося очертания в плане подводящему руслу

Таблица 15

Расход реки, $м^3/сек$	Деление расхода воды, %			Деление наносов, %		
	плотина	катастрофический водослив	регулятор	плотина	катастрофический водослив	регулятор
200	82,7	6,8	10,5	100	0	0
400	72,3	22,5	5,2	35,7	64,3*	
750	65,0	32,2	2,8	Данных нет	110,0**	0

*По данным улова.

**По данным измерений объемным способом. Видно, что происходит размыв подводящего русла.

и принятия в увязке с этим отметок водослива и других отметок сооружений, удалось получить и поддерживать требуемую по идее водозабора поперечную циркуляцию в потоке перед вододелительными устройствами при всех расходах в период движения донных наносов ($Q = 20$ $м^3/сек$).

При данном очертании подводящего русла в пределах расходов 20—41 $м^3/сек$ это достигается использованием русловой поперечной циркуляции, а в пределах расходов 45—251 $м^3/сек$ — комбинированным использованием русловой и местной поперечной циркуляции, возбуждаемой сбросом части речных расходов воды через катастрофический водослив.

Следует отметить, что интенсивность циркуляции по мере возрастания расходов и увеличивающегося сброса части их через катастрофический водослив также возрастала.

В результате подбора на модели отмеченных элементов подводящего русла, водослива и плотины деление наносов между щитовой и водосливной (без щитов) частями плотины происходило почти пропорционально сбрасываемым расходам воды. Это явление в значительной мере следует отнести за счет конструкции водослива, внутренний откос которого изменялся от 1 : 1,75 в начале до вертикальной стенки в конце. Такое очертание внутренней плоскости водослива способствовало созданию соответствующей структуры потока в русле, удержанию большей части наносов в русле и сбросу их через правую, противоположную фронту водозабора сторону щитового пролета плотины в нижний бьеф.

В целом удалось, во-первых, не допустить значительной перегрузки наносами потока, сбрасываемого через катастрофический водослив, и исключить возможность завала его со стороны нижнего бьефа, как это имело место на Ангренском узле, и во-вторых, выравнить удельные расходы воды и наносов, поступающих в нижний бьеф, и тем самым ослабить свойственные водозаборам ферганского типа сосредоточенные размывы у одного берега и отложение наносов у другого.

* *
*

1. Очень существенной и обязательной, в определенных условиях, составной частью в ферганской схеме является катастрофический водослив, примыкающий к плотине со стороны выпуклого берега.

2. Включение автоматически действующего катастрофического водослива обязательно при водозаборе из водотока с быстронарастающими паводками.

3. Водослив необходим и при большом коэффициенте водозабора в период влечения рекой наносов, когда трудно обеспечить надлежащее направление к водоприемнику потока, блуждающего в пойме в малую воду. В данном случае сбросной катастрофический водослив, уменьшая ширину подводящего русла в концевой части, помогает преодолеть это затруднение. Кроме того, сужение русла при помощи водослива поддерживает русловую циркуляцию, которая ослабевает при высоком проценте водозабора. В большую же воду через водослив вместе с потоком сбрасывается значительное количество донных наносов, что также в какой-то мере облегчает борьбу с ними при водозаборе и является благоприятным в смысле уменьшения местных размывов за водосливами.

Глава III

ЗАНЕСЕНИЕ ВЕРХНЕГО БЬЕФА ПЛОТИНЫ

Русловые процессы, вызываемые сооружением на реках плотин, характеризуются чрезвычайной сложностью из-за взаимодействия русла, потока и сооружения. Советские и зарубежные ученые достигли многого в изучении этих процессов, но все же исследования являются еще недостаточными. Общей теории расчета данных процессов не выработано. До настоящего времени при эксплуатации плотин создаются затруднения и выявляются вредные последствия, вызванные русловыми деформациями. В связи с этим уже давно возникла необходимость прогноза тех изменений, которые произойдут в реке после стеснения ее сооружениями, в частности плотиной. Только при более или менее точном прогнозе русловых процессов можно предотвратить или хотя бы ослабить ряд затруднений, возникающих при эксплуатации этих гидротехнических сооружений и прилегающих к ним русловых участков.

При современном уровне наших знаний о механизме движения наносов наибольшей разработанности достигла область, связанная со взвешенными наносами, в отношении же влекомых наносов еще много неясного. Это подтверждается и тем, что большинство предложенных методов расчета русловых процессов относится к первой области и используется в основном при расчетах заиления водохранилищ. Только некоторые из них учитывают в какой-то мере участие в занесении водохранилищ и влекомых наносов. Иными словами, в настоящее время наиболее полному анализу поддаются только процессы заиления, процессы же занесения оцениваются недостаточно полно, несмотря на то что в отдельных случаях они преобладают над первыми. Большую работу по изучению этих сложных процессов выполнил С. Т. Алтунин, который впервые осветил этот вопрос и дал рекомендации по расчету русел применительно к среднеазиатским условиям [1,2].

КРАТКИЙ ОБЗОР ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО РАСЧЕТУ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЕЛ, ПРИМЕНИМЫХ В УСЛОВИЯХ ПРЕОБЛАДАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАНЕСЕНИЯ

Ниже дается краткое обозрение только тех предложений, которые учитывают процессы занесения.

Предложение С. Т. Алтунина и И. А. Бузунова

Это предложение, выдвинутое авторами в последние годы [2], рекомендуется для использования при расчетах самоформирующихся, а также искусственно зарегулированных русел.

В основу методики таких расчетов положены два условия:

а) условие формирования русла с определенными скоростями, выражаемое зависимостью

$$v_{ср} = v_{ф} H_{ср}^{\alpha}, \tag{18}$$

где $v_{ср}$ — средняя скорость течения;

$v_{ф}$ — расчетная скорость формирования при глубине воды в 1,0 *м*, зависящая прежде всего от состава наносов;

$H_{ср}^{\alpha}$ — поправка на фактическую среднюю глубину потока;

α — некоторый показатель степени, меняющийся в пределах 1/3—1/5 в зависимости от состава донных наносов и глубины;

б) условие устойчивости русла, выражаемое формулой (7) С. Т. Алтунина

$$B = A \frac{Q^{0,5}}{I^{0,2}},$$

где A — параметр, характеризующий устойчивость ширины русла и зависящий от свойств грунта, слагающего русло, следовательно, от формирующей скорости.

В результате сопоставления зависимостей (18) и (7) с известной формулой гидравлики в общем виде, связывающей среднюю скорость с глубиной и уклоном,

$$v_{ср} = \frac{1}{n} H^{z} I^{x}, \tag{19}$$

авторами получен ряд выражений для определения элементов самоформирующихся русел:

средней глубины

$$H = \left(\frac{n \cdot v_{ср}}{I^{x}}\right); \tag{20}$$

среднего удельного расхода

$$q = H v_{ср}; \tag{21}$$

ширины устойчивого рукава

$$B = A^{2} \frac{q}{I^{0,4}}; \tag{22}$$

расхода устойчивого рукава

$$Q = \left(A^{2(z-\alpha)} \cdot v_{ср}^{2(1+z)} \cdot \frac{n^{2(1+\alpha)}}{I^{\eta}}\right)^{\frac{1}{z-\alpha}}, \tag{23}$$

где $\eta = 2x(1+\alpha) + 0,4(z-\alpha)$,

z, x — некоторые показатели степени;

уклона устойчивого протекания

$$I_{у} = \left(A^{2(z-\alpha)} \cdot v_{ср}^{2(1+z)} \cdot \frac{n^{2(1+\alpha)}}{Q_{x}^{z-\alpha}}\right)^{\frac{1}{\eta}}. \tag{24}$$

При определении транспортирующей способности потока предлагается использовать:
для взвешенных наносов формулу А. Н. Гостунского

$$\rho_k = \Gamma \frac{H_{\text{ср}}^{0,5} \cdot I^{1,5}}{W}, \tag{25}$$

где Γ — по данным натурных исследований на реках Средней Азии, равно $2038 \div 3300$,
W — осредненная гидравлическая крупность, *см/сек*;
для донных наносов формулу в следующем общем виде

$$g_t = k_H \cdot d \left(\frac{v}{v_0}\right)^3 \left(\frac{d}{H}\right)^{\tau} \left(v - v_0\right), \tag{26}$$

где g_t — удельный расход донных наносов, *кг/сек* на *пог.м*,
v_0 — непередвигающая (соответствующая началу влечения) скорость.

Зависимости (26) по структуре соответствуют формулы И. И. Леви, Г. И. Шамова, В. Н. Гончарова.

Из предположения, что кривая подпертого горизонта воды в верхнем бьефе представляет собой квадратичную параболу с вертикальной осью, выводятся зависимости:
длина кривой подпора

$$L = \frac{2\Delta H}{2I_б - (I_п + I_в)}, \tag{27}$$

где ΔH — подпор, *м*,
$I_б$ — бытовой уклон,
$I_п$ — уклон плеса в верхнем бьефе,
$I_в$ — уклон у плотины;
уравнение кривой подпора

$$\Delta H_x = \frac{2 - k_1(1+\eta) - k_2(1-\eta)}{2 - (k_1 + k_2)} (1 - \eta) \Delta H_п, \tag{28}$$

где ΔH_x — величина подпора над бытовым горизонтом,

$$k_1 = \frac{I_п}{I_б}, \quad k_2 = \frac{I_в}{I_б}, \quad \eta = \frac{l_x}{L}.$$

При практическом использовании вышеперечисленных, а также не приведенных здесь некоторых зависимостей авторами рекомендуется следующий порядок расчета: сначала производится расчет русла в бытовых условиях, а в последующем в соответствии с поставленной задачей — расчеты зарегулированного русла, формирования бьефов и других процессов.

Ниже (табл. 16, 17) приводятся результаты расчета по этому методу применительно к существующему объекту (Сары-Курганский гидроузел).

Из сопоставления результатов расчета по методу С. Т. Алтунина и И. А. Бузунова с натурными данными за прошедший период фор-

мирования (табл. 18, рис. 42) следует, что несмотря на близкую сходимость длин кривых подпора за I и II периоды формирования (расчетные превышают фактические на 12%) очертания их значительно разнятся. Так, толща отложений в зоне первоначального выклинивания

Таблица 16

Гидравлические элементы и твердый сток

Участок	$v_ф$, м/сек	I	H, м	$v_{ср}$, м/сек	q м³/сек	B, м	Q, м³/сек	g_t, кг/м	$G_п$, кг/сек	ΣG_t, тыс. т
Устойчивый рукав	2,3	0,008	1,2	2,41	2,89	26,1	75,4	—	—	—
Плес в верхнем бьефе	2,3	0,00712	1,4	2,50	3,51	33,1	116,0	0,66	17,5	144
Плес в нижнем бьефе	2,3	0,008	1,13	2,35	2,66	24,0	64,0	—	—	—

Таблица 17

Период	Подпор у плотины ΔH, м	Длина кривой подпора L, м	Ширина бьефа B, м	Объем отложений W, м³	Норма годовых отложений $W_{год}$, тыс. м³	Продолжительность периода $t = \frac{W}{W_{год}}$, годы
Конец I	2,7	732	30—600	144	75	2
II	"	2050	"	963	55	17,5
III	"	3065	"	2100	8	263

Таблица 18

Период	Длина кривой подпора, м			Объем отложений, тыс. м³			Средняя норма годовых отложений, тыс. м³			Продолжительность периода, годы		
	расчет.	фактич.	откл. от фактич., %	расчет.	фактич.	откл. от фактич., %	расчет.	фактич.	откл. от фактич., %	расчет.	фактич.	откл. от фактич., %
Конец I	732	650	+13	144	43	+235	75	129	—72	2	0,5	+300
II	2050	1900	+12	953	455	+112	55	57	—4	17,5	6	+192

подпора, полученная по расчету, превышает фактическую в конце I периода в 2,5 раза и в конце II в 2,3. Соответственно этому объемы занесения превысили фактические к концу I периода в 3,3 раза и к концу II в 2, а сроки в 4 и 3 раза.

Значительность расхождений в фактических и расчетных данных указывает на необходимость уточнения отдельных условий и зависимостей в рекомендуемом методе расчета.

Предложение И. Г. Есьмана и В. Н. Гончарова

Данное предложение, имеющее схематический характер [9], рекомендуется для использования при расчетах деформаций в верхних

бьефах крупных регулирующих водохранилищ, где предполагаются следующие процессы: заиление мелкими наносами, занесение головной части водохранилища наносами средних крупностей и поднятие русла выше водохранилища наносами наибольшей крупности.

Авторы рассматривают русло в поперечном профиле прямоуголь-

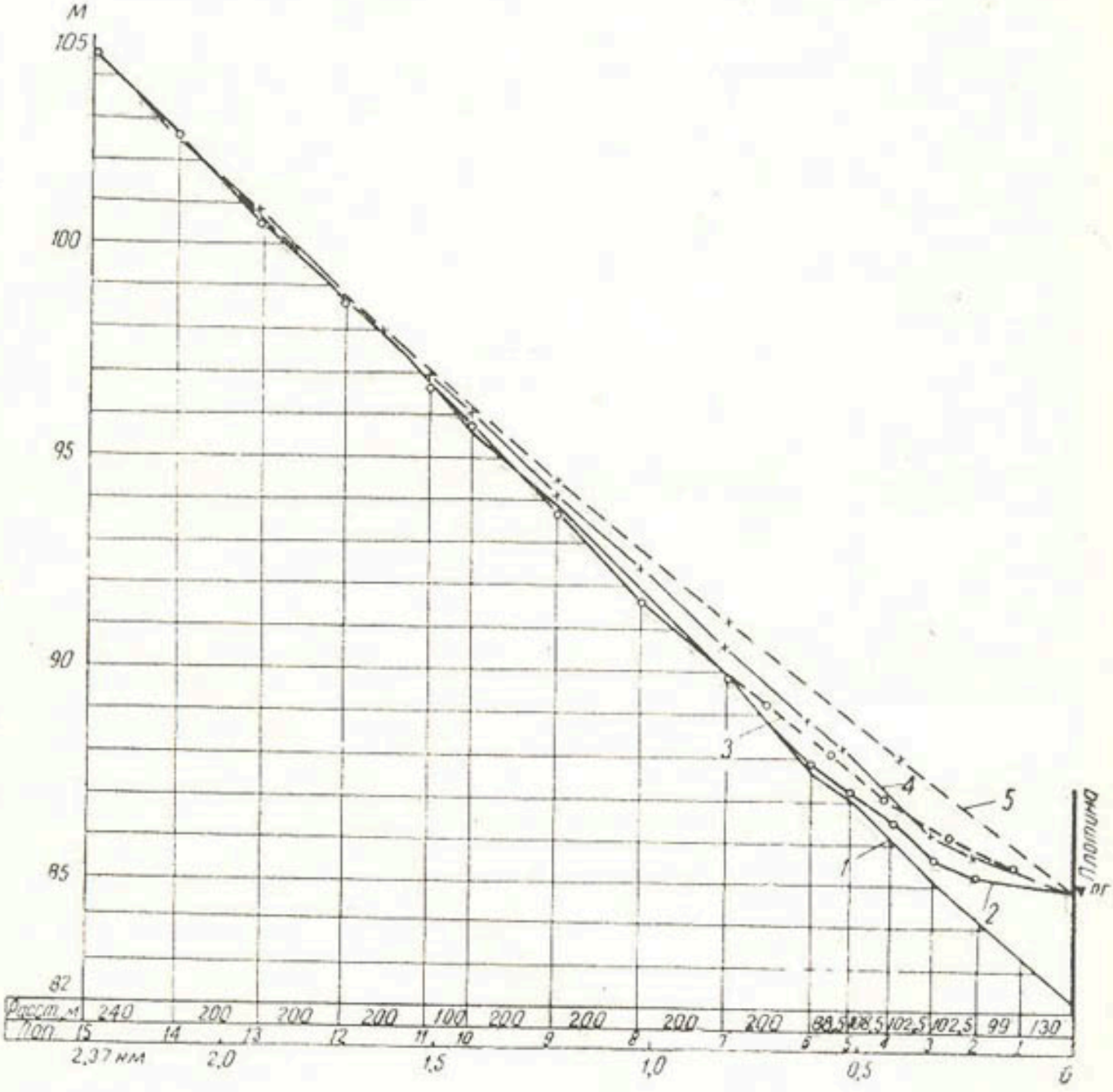


Рис. 42. Фактические и расчетные (по предложению С. Т. Алтунина и И. А. Бузунова) профили кривых подпора в верхнем бьефе Сары-Курганского гидроузла на р. Сох.

1—бытовое дно реки по средним отметкам, *2*—фактическая кривая подпора в конце I периода, *3*—расчетная кривая подпора в конце I периода, *4*—фактическая кривая подпора в конце II периода, *5*—расчетная кривая подпора в конце II периода.

ным, а водохранилище в плане — коническим с параболическими поперечными сечениями (рис. 43).

Для количественной оценки вышеперечисленных процессов даются связи между элементами, характеризующими водохранилище и русло.

Поскольку мы рассматриваем верхние бьефы низконапорных плотин на горно-предгорных участках рек, где преобладают процессы занесения, ниже приводим те зависимости, которые касаются только этих процессов.

Объем занесения водохранилища

$$W_в = \frac{2}{3}\frac{\alpha (T_0 - 0{,}5H_1)^2}{\left(l_0 + \frac{H_1}{2i_0}\right)^2}\left(l_2 + \frac{H_1}{2i_0}\right)^3, \tag{29}$$

где T_0 — глубина водохранилища у плотины,
H_1 — глубина русла на баре,
l_0 — длина водохранилища от места первоначального выклинивания подпора до плотины,
l_2 — переменная длина от места первоначального выклинивания подпора до бара,
i_0 — уклон реки (бытовой),
α — коэффициент ширины.

Объем занесения участка русла выше водохранилища

$$W_р = \frac{r(l_1 + l_2)b}{2}, \tag{30}$$

где r — высота наибольшего повышения дна русла реки в месте выклинивания подпора,
l_1 — длина распространившегося вверх по реке повышения русла выше водохранилища от места выклинивания подпора,
b — ширина реки.

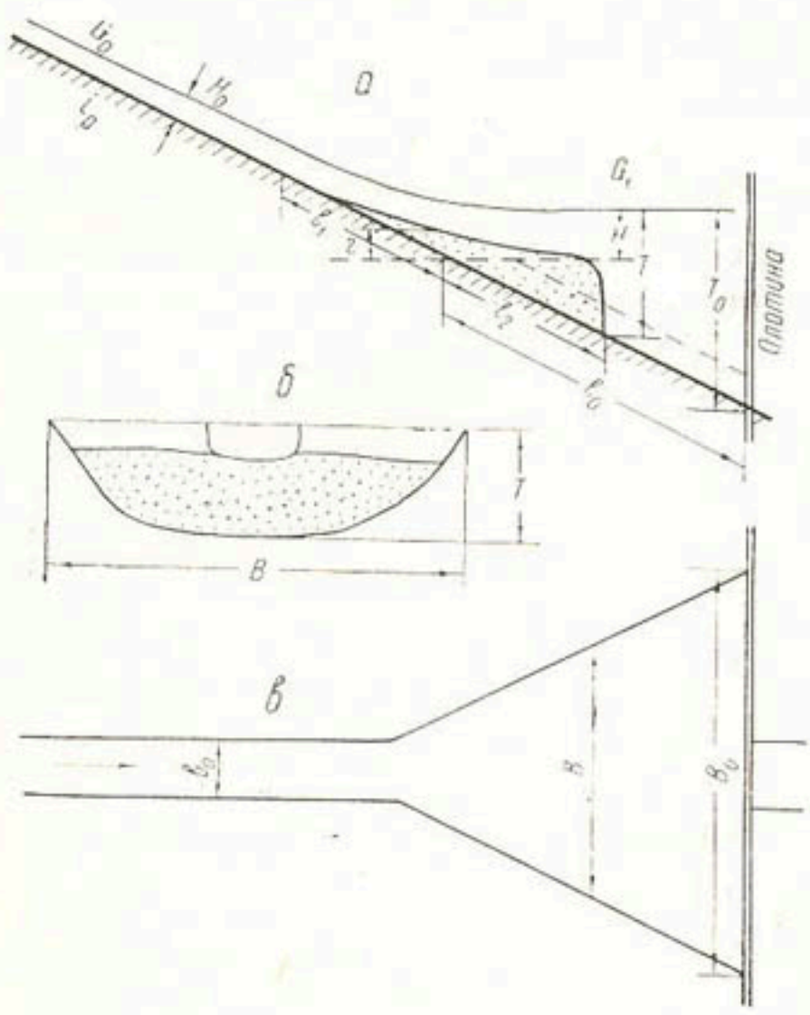


Рис. 43. Расчетная схема.
а — продольный разрез, *б* — поперечный разрез, *в* — план.

Приравнивая сумму двух объемов $W_в$ и $W_р$ за время t количеству аккумулированных за это же время наносов на длине $l_1 + l_2$, равному $(G_0 - G_1)bt$, авторы получают равенство

$$(G_0 - G_1)bt = \frac{2}{3}\frac{\alpha(T_0 - 0{,}5H_1^2)}{\left(l_0 + \frac{H_1}{2i_0}\right)^2}\left(l_2 + \frac{H_1}{2i_0}\right)^3 + \frac{r(l_1 + l_2)b}{2}, \quad (31$$

которое после подстановки в него значений

$$l_1 = l_2 \frac{H_0(H_0 + H_1)}{2H_1^2 - H_0(H_0 + H_1)} \quad (32)$$

и

$$r = \frac{\alpha_3 i l_1 l_2}{l_1 + l_2} \quad (33)$$

является уравнением для определения l_2,

где G_0 — секундный расход руслообразующих наносов на единицу ширины потока в реке,

G_1 — то же на баре,

t — время,

H_0 — глубина бытовая при равномерном режиме,

α_3 — коэффициент.

Порядок расчета авторами рекомендуется следующий.

По выражению (32) определяется значение l_1, которое совместно с выражением (33) подставляется в равенство (31). Из последнего находится l_2. При этом G_1 и H_1 определяются в стадии расчетов заиления, а все другие элементы берутся из данных изысканий и проекта.

Авторы полагают, что рассчитанные объемы занесения при наличии данных о стоке наносов позволят приближенно установить процесс занесения во времени.

Ввиду того что в условиях низконапорных узлов точное определение некоторых параметров из предлагаемых зависимостей, в частности величины H, невозможно и принятие их будет значительной условностью, расчета занесения в данном случае мы не производили. Мы ограничились рассмотрением на основе экспериментальных данных зависимости (33), которая для определения α_3 может быть переписана в виде

$$\alpha_3 = \frac{r\ (l_1 + l_2)}{i_0\ l_1\ l_2}.$$

Из нижеприведенных данных следует, что α_3 не является постоянной величиной для различных условий и периодов формирования.

Объект	*Период формирования*	*Высота поднятия дна русла реки в месте выклинивания подпора (r), м*	$\alpha_3 = \frac{r\ (l_1 + l_2)}{i_0\ l_1\ l_2}$
Сары-Курганский узел (натура)	I	0,3	0,2
	II	1,30	0,52
Модель узла на предгорном участке	I	0,85	0,63
	II	2,0	,98
Газалкентский узел (натура)	I	1,6	0,79
	II	2,5	0,83
Среднее значение	I		0,54
	II		0,81

Следовательно, схематизированный подход, рекомендуемый данным предложением, при определении занесения крупных водохранилищ в условиях низконапорных плотин может внести неточность в

расчет, которая, несомненно, скажется не только на искажении объемов, сроков занесения, но и на прогнозе затопления.

В порядке общей оценки вышеописанных предложений по расчету занесения бьефов плотин необходимо отметить следующее.

Первое предложение, основывающееся на ряде эмпирических зависимостей и допущений преследует цель оценки русловых процессов по периодам формирования. Однако ввиду того что эмпирические зависимости требуют уточнения, а некоторые допущения являются довольно условными, естественно полагать, что конечные результаты расчета будут приближенными.

Второе предложение представляет собой только схему расчета, а рекомендуемые для этого отдельные коэффициенты являются, как отмечается в предложении, переменными в процессе формирования бьефа. В частности, это относится к коэффициенту α_3, точность определения которого оказывает значительное влияние на общую точность расчета занесения, особенно если его производить для бьефа низконапорной плотины, где процессы занесения выше водохранилища часто количественно преобладают над всеми прочими.

Один из основных вопросов в рассмотренных предложениях по расчету русел — определение кривой свободной поверхности и поверхности призмы отложений по мере формирования русла в подпертом бьефе.

В курсах гидравлики и специальных работах кривые подпора в естественных руслах обычно рекомендуется рассчитывать для условий несформированного ложа реки. Известны рекомендованные для этой цели способы и приемы Б. А. Бахметева, Н. Н. Павловского, А. Н. Рахманова, В. И. Чарномского, Н. М. Бернадского, обобщенный способ Батикля, Дюпои — Рюльмана, Толкмитта, способ непосредственного суммирования на основе уравнения Бернулли и др. Применение данных способов, очевидно, возможно и для русел, подвергающихся занесению наносами, если заранее известен характер изменения русел. Однако изменение, являющееся следствием сложного взаимодействия потока и русла, количества и характера движущихся наносов, само по себе не определяется. Кроме того, сложность комплекса рекомендуемых для указанных расчетов уравнений тем бо́льшая, что многие из них не могут быть представлены в дифференциальной форме и наличие большого числа независимых переменных заставляет искать на данном этапе более простые приближенные, но оправдываемые практикой решения.

ДИНАМИКА ЗАНЕСЕНИЯ БЬЕФА

Общая картина занесения и существующая периодизация формирования

После возведения плотины в зоне подпора сразу же начинают откладываться наносы, приносимые речным потоком. Ввиду переменной структуры скоростей по длине бьефа условия откладывания наносов на отдельных участках подпертого бьефа разнообразны. В первую очередь выпадают крупные фракции, а далее, соответственно уменьшению скорости течения по длине бьефа, оседают более мелкие. Постепенно дно в верхнем бьефе как в пределах первоначального подпора, так и выше по течению наростится и приблизится к уклону, характеризующему данный участок до подпора. После этого выпадение наносов почти прекратится, восстановится сопутствуемый местными переформи-

рованиями транзит почти всех наносов вниз по течению. В итоге регулирующая и аккумулирующая способности бьефа будут исчерпаны.

По характеру направленности и степени выраженности русловых процессов верхний бьеф может быть разбит на два основных участка:

1) участок между плотиной и зоной первоначального выклинивания кривой подпора,

2) участок выше зоны первоначального выклинивания кривой подпора.

Участок между плотиной и зоной первоначального выклинивания кривой подпора

Рассматриваемый участок подпертого бьефа представляет собой водохранилище, объем которого зависит от величины подпора, падения реки и строения русла и поймы.

При плотинах, осуществляющих водозабор для целей орошения, часто работающих с переменным подпором, этот участок изменяется по длине. На некоторых плотинах, эксплуатируемых в паводок почти без подпора, он сводится на нет. И только при плотинах, осуществляющих водозабор для ГЭС, где требуются постоянный подпор и значительная аккумулирующая и регулирующая способность, эти участки бьефа представляют собой водохранилища озерного и речного типа с более или менее постоянным зеркалом.

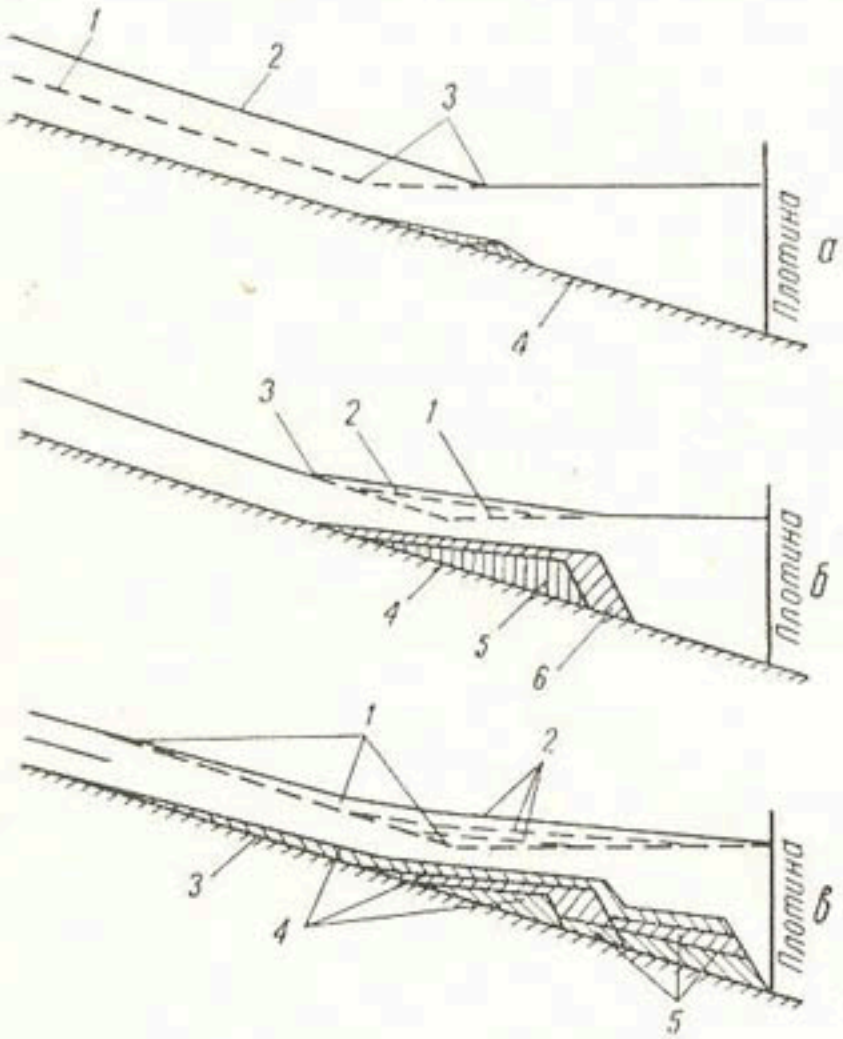


Рис. 44. Схемы занесения подпертого бьефа низконапорной плотины.

а. *1*—горизонт воды при малом расходе, *2*—при большом расходе, *3*—участок выклинивания кривой подпора, *4*—дно до подпора. *б*. *1*—участок выклинивания кривой подпора в первоначальный момент, *2*—после I периода; *3*—после II периода, *4*—дно до подпора, *5*—занесение в I периоде, *6*—занесение во II периоде. *в*. *1*—участки выклинивания кривой подпора по мере занесения бьефа, *2*—изменения горизонта воды по мере занесения бьефа, *3*—дно до подпора, *4*—отложение влекомых наносов по мере занесения бьефа, *5*—участки временных отложений взвешенных наносов, постепенно вытесняемых надвигающейся грядой влекомых наносов.

Заносятся участки главным образом влекомыми наносами, продвигающимися к плотине грядой или наслоением с сортировкой по крупности. В ходе этого общего процесса происходят различные местные переформирования, сопровождающиеся вымывом первичных отложений и заменой их вторичными, вновь поступающими с вышележащих участков. Взвешенные наносы участвуют в занесении в различной степени и часто временно, так как часть их при определенных условиях вымывается из бьефа и заменяется влекомыми (рис. 44 *в*). Занесение этого участка происходит довольно быстро и часто (при напорах 1—2 *м*) на 80—90% осуществляется в течение одного-двух паводковых периодов.

Необходимо иметь в виду следующее. Если рассматриваемый участок заключается в пределах зарегулированной части узла, то вышеописанный характер формирования бьефа будет нарушаться под влиянием этой части. В данном случае, в целях достижения нормальной работы отдельных сооружений, русловые процессы необходимо увязывать с конструкцией и компоновкой сооружений. В противном случае, например при неправильной или недостаточной зарегулированности подводящего русла, может произойти полный или частичный завал водозаборных отверстий, что, в свою очередь, поведет к выключению из работы отдельных отверстий или сооружений в целом и перегрузке других.

Все перечисленное указывает на важность и необходимость достижения правильного взаимодействия сооружений с потоком и руслом на данном участке бьефа.

Участок выше зоны первоначального выклинивания кривой подпора

Данный участок характеризуется непостоянством длины во времени. В первоначальный момент его протяженность незначительна (рис. 44 *а*). В последующем, по мере занесения бьефа наносами, этот участок начинает увеличиваться по длине, распространяясь вверх по течению (рис. 44*б*).

Если учесть, что напор в этих условиях по сравнению с падением реки незначителен, то теоретически верхняя граница данного участка должна отодвинуться до истоков реки. Последнее должно произойти в момент окончания восстановления нарушенного подпором бытового режима реки. При перемещении верхней границы кривой подпора, связанном с изменением уклона потока, происходит и соответствующая сортировка отложений, в результате которой наиболее крупные из них задерживаются на этом участке и входят в состав растущей вверх по течению призмы отложений. Наносы же мелких фракций проходят на нижележащий участок бьефа.

Распространение вверх по течению дополнительного подпора от отложений и связанной с этим зоны выклинивания кривой жидкого подпора совершается быстрее в первый период, одновременно с занесением нижележащего участка бьефа. В последующем этот процесс постепенно замедляется.

С. Т. Алтунин [2] на основании изучения переформирования верхних бьефов водозаборных узлов предложил данный процесс разделить на три периода.

1. В верхнем бьефе откладываются донные наносы и выпадает значительная часть взвешенных наносов. В начале периода происходит почти полное осветление воды, к концу выпадают только наиболее крупные фракции взвешенных наносов. Концом периода является почти полный транзит взвешенных наносов и начало движения донных наносов через плотину.

2. В верхнем бьефе продолжается дальнейшее отложение донных наносов при полном транзите взвешенных наносов через плотину. Интенсивность транзита донных наносов через плотину к концу периода, быстро увеличивается. Концом его считается момент, когда расход донных наносов, сбрасываемых в нижний бьеф, становится равным транспортирующей способности нижнего бьефа в бытовых условиях.

3. В верхнем бьефе плотины происходит дальнейшее отложение донных наносов с постепенно затухающей интенсивностью. К концу

периода в верхнем бьефе формируется русло, обеспечивающее полный транзит всех взвешенных и донных наносов в нижний бьеф, с условиями, близкими к бытовым.

Изменение длины влияния подпора С. Т. Алтунин приближенно оценивает зависимостью

$$L = k \frac{\Delta H}{I}, \tag{34}$$

где L — длина подпора, *м*;

ΔH — подпор у плотины над бытовым горизонтом воды, *м*;

I — бытовой уклон водной поверхности;

k — коэффициент длины кривой подпора, зависящей от степени занесения подпертого бьефа, принимаемый для конца I периода формирования равным 1,2, II — 5,5, III — 10.

Приведенные рекомендации С. Т. Алтунина не противоречат основным положениям: подпертый бьеф, образуемый при возведении низконапорных плотин на горно-предгорных участках рек, в первоначальный момент подпора невелик; незначительные размеры по длине подпертого бьефа обусловливаются небольшими напорами, создаваемыми этими типами плотин (1,5—6,0 *м*), а также большими уклонами участков рек, изменяющимися в пределах 0,001—0,02. Тем не менее, из дальнейшего изложения видно, что отдельные рекомендации, в частности коэффициенты длины кривой подпора в вышеприведенной зависимости и рекомендуемая С. Т. Алтуниным периодизация, требуют уточнения.

Описанный выше ход формирования отдельных участков подпертого бьефа представляет собой схему очень сложного процесса взаимодействия потока, русла и сооружения. Практически нас, кроме того, интересует и количественная оценка этих процессов, в тесной связи с которой находится срок занесения подпертого бьефа, а следовательно, и срок службы плотин по своему прямому назначению.

Для более детального освещения занесения подпертого бьефа, что позволит в какой-то степени уточнить и выявить имеющиеся при этом закономерные связи, ниже приводятся результаты полевых и лабораторных исследований по занесению подпертых бьефов некоторых плотин на предгорных участках рек.

Сары-Курганский гидроузел (натура)

Узел построен в 1947 г. Компоновка сооружений узла учитывает использование поперечной циркуляции, возбуждаемой криволинейным подводящим руслом и усиливаемой криволинейным порогом Г-образного профиля (описание см. в гл. I и II).

Проектом узла учтено занесение верхнего бьефа. Срок, в который произойдет полное занесение, исходя из принятого в проекте стока влекомых наносов в 60 тыс. $м^3$ в год, установлен при расчетах в 20 лет.

Работа узла и переформирования в его бьефах в натурных условиях изучались путем замера стока воды и влекомых наносов, проходящих через плотину, периодической фиксации состояния русла, горизонтов воды, скоростной структуры потока и других элементов при различных режимах работы сооружения.

Накопленный в процессе исследований с 1948 по 1954 г. материал по узлу приводится ниже[1]. Замеры и наблюдения показали, что начиная

[1] Исследования узла производились по договорам с Министерством водного хозяйства УзССР и институтом «Средазгипроводхлопок» под руководством научного сотрудника САНИИРИ Я. А. Никитина [15, 21].

с первого года работы узла на прилегающем к нему участке реки происходит транзитное движение части песчано-гравелистых и галечных наносов. Передвижение наносов этой категории в течение года происходит лишь при расходах воды в реке, превышающих 40—50 $м^3/сек$, что охватывает период около 5 мес. (май — сентябрь).

Взвешенные наносы при исследовании не учитывались, так как вследствие больших скоростей на участке они с первоначального момента после подпора в основной своей массе проносились через участок транзитом, в незначительной доле и лишь временно участвуя в формировании. Данные о жидком и твердом (влекомые наносы) стоках, а также о некоторых элементах русла и потока приведены в табл. 19,

Таблица 19

Состояние реки	Год наблюдений	Замеренный сток за период движения влекомых наносов (июнь — сентябрь)		Наибольший наблюденный расход воды, $м^3/сек$	Наибольший расход и удельное содержание влекомых наносов		Размер наибольшего камня, *мм*		Средний диаметр наносов, *мм*	
		вода, млн. $м^3$	влекомые наносы, тыс. $м^3$		*кг/сек*	*г/л*	в трех измер.	средн. из трех измер.	за период замера	за период пика паводка
Свободное	1935	987,19	32,6	177	49,6	0,35	250 (макс.)	167	50	53
	1936	1082,59	80,9	167	33,7	0,58	320×190×140	183	45	50
	1937	1058,62	146,3	170	82,2	0,49	260×120×120	170	49	51
Среднее		1042,8	86,6	—	—	—	—	173	48	51
Подпертое	1947	840,0	—	157	—	—	—	—	—	—
	1948	915,0	—	210	—	—	—	—	—	—
	1949	1077,5	216,9	214	95,6	0,88	290×205×165	220	48	50
	1950	993,17	98,9	230	43,7	0,38	300×170	185	—	49
	1951	711,14	56,7	—	92,2	0,81	210×160	158	—	44
	1953	—	—	201	26,6	0,37	235×195×103	178	—	—
	1954	857,8	119,0	188	85,9	0,83	260×170×150	193	49	54
Среднее		899,1	128,4	—	—	—	—	187	48	49

Примечания. 1. При свободном состоянии реки замеры производились в створе на 2 *км* выше узла, при подпоре — на 0,2 *км* ниже.
2. Сток наносов в условиях подпора определен суммированием замеренного прибором стока и отложений в подпертом бьефе.
3. Наибольшие наблюденные расходы в период свободного состояния по ст. Сараканда (по данным УГМС).

в которой для сравнения и обобщения показаны и данные исследования 1935—1937 гг.

Из табл. 19 следует, что колебания величины стока наносов достигали семикратного значения. Изменения в величинах жидкого стока не превышали полуторного размера. Стоки пяти лет (1936, 1937, 1949, 1950 и 1954) были больше проектного (60 тыс. $м^3$) в 1,1—3,5 раза.

Ниже мы даем результаты сопоставления замеренного стока влекомых наносов реки в створе узла в 1949 г. и расчета стока наносов по некоторым эмпирическим зависимостям, применяемым в инженерной практике.

Автор	*Сток наносов за июнь — сентябрь, $м^3$*	*Отклонение от замеренного*
По данным полевых исследований	217 000*	1,0
По формуле Я. А. Никитина	235 000**	1,1
М. Ф. Патрушева	153 000**	0,7
А. Шоклича	151 000**	0,7

* Замеры прибором и объемным способом.
** Подсчитаны по среднедекадным расходам в створе Сары-Кургана.

Из приведенных данных следует, что наибольшая сходимость с результатами расчета отмечается по формуле Я. А. Никитина [13], выведенной им по материалам многолетних исследований горно-предгорных участков рек Средней Азии.

$$G = 530\ I^{2,2}\ (Q - Q_0)^2\ кг/сек.$$

Здесь I — бытовой уклон реки;

Q — расход реки, для которого определяется расход наносов;

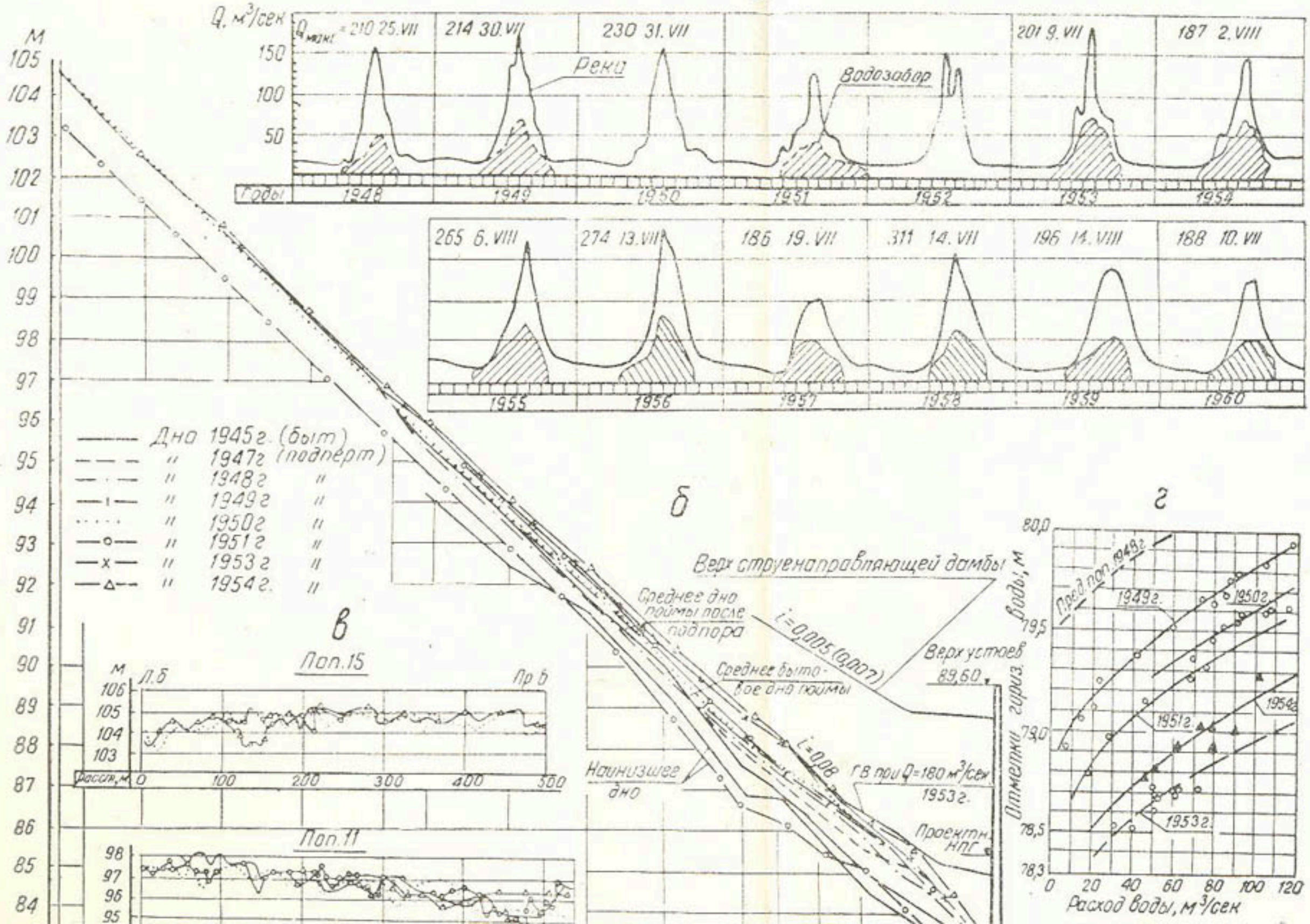
Q_0 — расход, при котором начинается движение донных наносов.

Простота зависимости и наибольшая возможность использования ее при обычной ограниченности гидрологических и других данных в основном делает эту формулу наиболее приемлемой при расчетах стока влекомых наносов на предгорных участках рек данного типа.

О характере и динамике русловых процессов, происшедших под влиянием построенного сооружения, можно судить по табл. 20 и рис. 45—47.

Ввиду большого количества наносов подпорная призма небольшого объема была быстро занесена. Так, уже к концу паводка 1947 г. отмечалось поступление крупных наносов в нижний бьеф. Процесс формирования при этом был следующий: в первые два года после подпора отмечался смыв отложений с вышележащего участка верхнего бьефа (рис. 45, поп. *7*, *8*, *9*) и накопление их на нижележащих участках. В последующие годы размывы в бьефе прекратились и занесение его происходило за счет наносов, поступающих с вышележащих участков.

Объемы отложений в соответствии с происходящими внутри бьефа переформированиями первоначально были незначительными — 32 тыс. $м^3$ в 1947 г. и 10 тыс. $м^3$ в 1948 г. с распространением призмы вверх по течению в первом году на 650 *м*, т. е. с той же скоростью, с какой передвигалась гряда вниз по течению, и во втором — на 750 *м* (см. табл. 20). В 1949 г. объем отложений увеличился на 134 тыс. $м^3$, а призма удлинилась до 1150 *м*. В 1950—1954 гг. от-


а
Q, м³/сек
Q макс = 210 25.VII
214 30.VII
230 31.VII
201 9.VII
187 2.VIII
Река
Водозабор
Годы
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
265 6.VIII
274 13.VIII
186 19.VII
311 14.VII
196 14.VIII
188 10.VII
1955
1956
1957
1958
1959
1960
М
Дно 1945г. (быт)
" 1947г (подпёрт)
" 1948г "
" 1949г "
" 1950г "
" 1951г "
" 1953г "
" 1954г. "
б
Верх струенаправляющей дамбы
Среднее дно поймы после подпора
i=0,005 (0,007)
Среднее быто-вое дно поймы
Верх устоев 89,60
i=0,08
Наинизшее дно
ГВ при Q=180 м³/сек 1953г.
Проектн. НПГ
в
Пон.15
Л.Б
Пр.Б
Расст.,м
Пон.11
г
Пред.пон. 1949г.
1949г.
1950г.
1951г.
1953г.
1954г.
Отметки гориз. воды, м
Расход воды, м³/сек

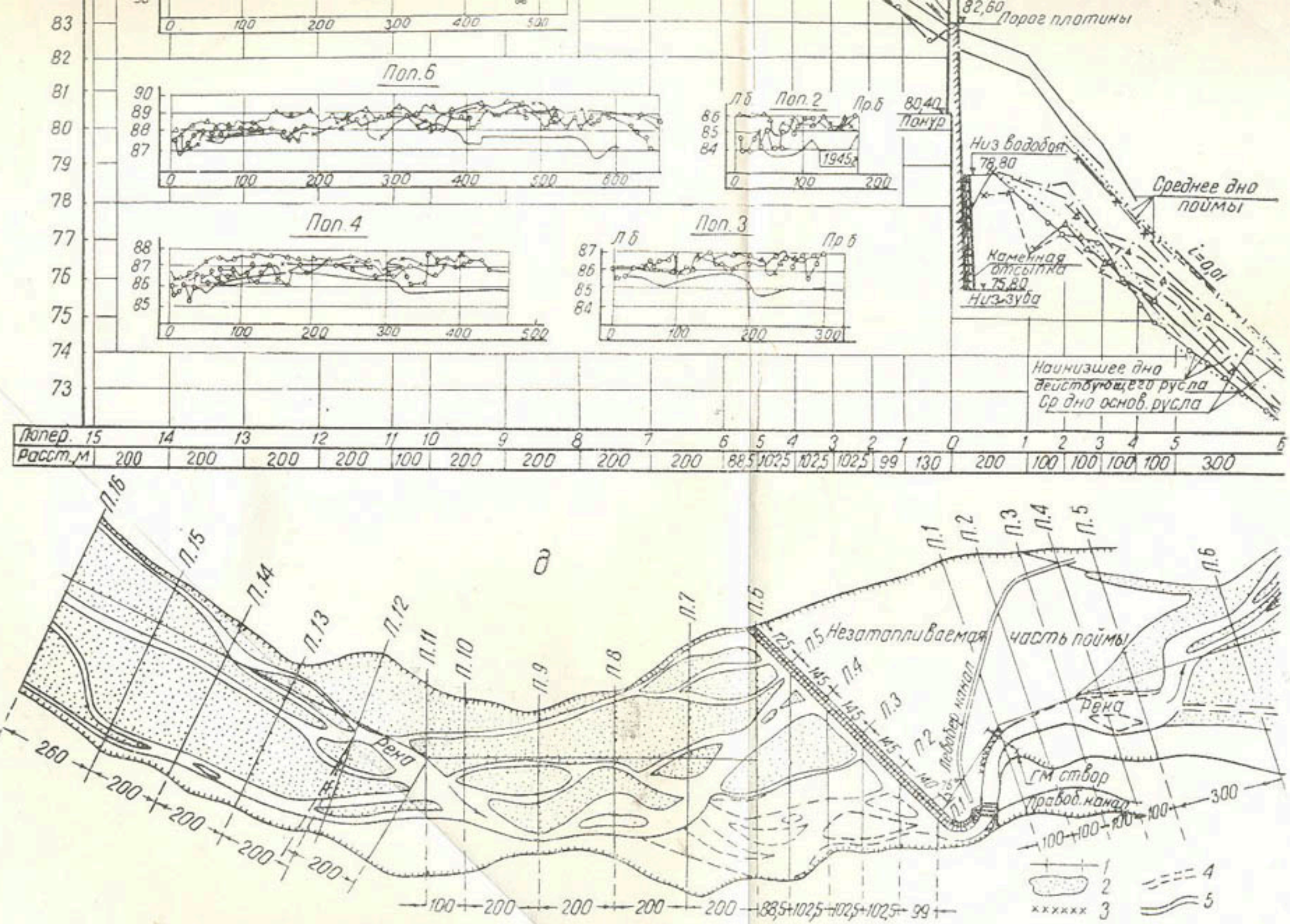


Рис. 45. Сары-Курганский гидроузел.

а—гидрографы р. Сох и водозабора в створе узла по пятидневным расходам; *б*—продольные профили дна и горизонтов воды в бьефах узла; *в*—поперечные профили в верхнем бьефе узла; *г*—графики зависимости расхода воды от горизонта в реке в створе на 150 *м* ниже узла; *д*—план руслового участка: *1*—магистральный ход с поперечниками, *2*—пойма реки (затапливаемая), *3*—таштуганная кладка на сипайном каркасе, *4*—русло 1949 г., *5*—русло 1953 г.

Таблица 20

Формирование бьефов Сары-Курганского узла (натура)

Дата	Объем деформации, тыс. $м^3$			Превышение отложений в верхнем бьефе над объемом первоначального подпора*	Длина распространения твердого подпора в верхнем бьефе	Коэффициент удлинения призмы отложений в верхнем бьефе	Объем** влекомых наносов, вынесенных в нижний бьеф плотины, тыс. $м^3$	Вынос влекомых наносов в нижний бьеф плотины, % от общего стока	Сброс воды в нижний бьеф плотины за период движения наносов, %	Коэффициент загрузки наносами потока в нижнем бьефе плотины, % выноса наносов / % сброса воды	Период формирования
	в верхнем бьефе на длине 2,5 *км* (занесение)	в нижнем бьефе на длине 3,0 *км*									
		занесение	размыв								
V. 1947	—	—	—	—	350	1,0	—	0	—	—	I
VIII. 1947	—	—	—	—	—	—	—	Начало выноса	—	—	II
V. 1948	32,3	—	—	0,65	650	1,9	Незамерен	—	—	—	
IX. 1948	9,7	0	72,4***	0,84	750	2,1	10,0****	—	64,4	—	
X. 1949	134,4	0	31,3	3,5	1150	3,3	82,5	38	59,0	0,65	
XII. 1950	57,6	0	45,9	4,7	1500	4,3	41,3	41,8	60,0	0,70	
XII. 1951	38,6	0	15,1	5,3	1500	4,3	28,1	49,5	52,5	0,94	
VI. 1953	166,8	10,7	0	8,6	1900	5,4	90,0****	49,5	—	—	
IX. 1954	59,5	47,6	0	9,8	1900	5,4	59,5	50	47,2	1,06	III
Итого	498,4	58,3	164,7	—	—	—	311,4	—	—	—	

* Объем подпора в первоначальный момент составил 50 тыс. $м^3$.
** Влекомые наносы в каналы не поступали.
*** Размыв на участке между поперечниками 1—5.
**** Определены по кривой зависимости граф 2 и 8.

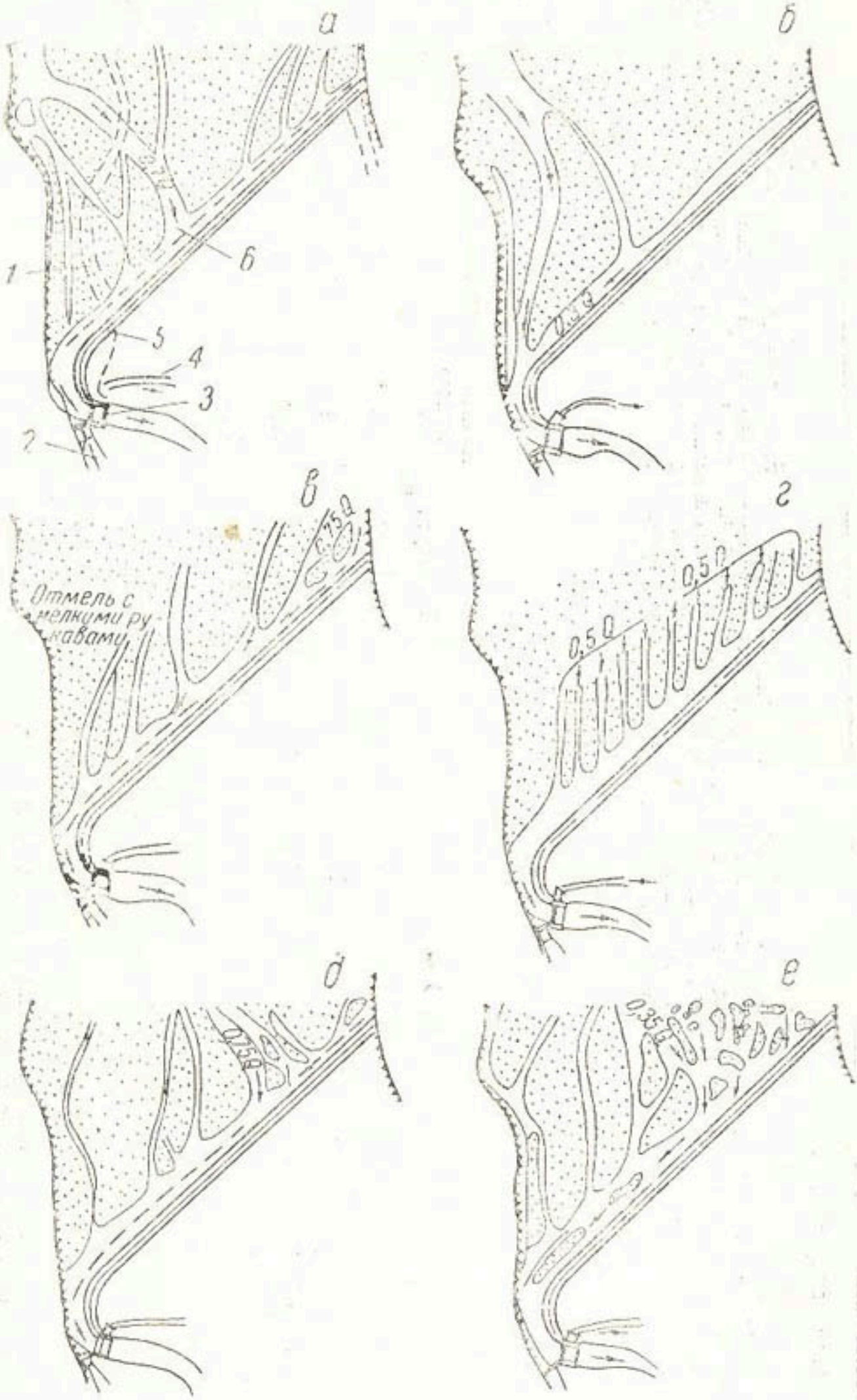


Рис. 46. Схемы подхода речного потока к Сары-Курганскому гидроузлу.

а—19.VII 1949 г., Q=185 *м³/сек*: *1*—русло 1945 г., *2*—правобережный канал, *3*—плотина, *4*—левобережный канал, *5*—струенаправляющая дамба, *6*—подход основного потока (подобный подход наблюдался в 1948 г.); *б*—7.IX 1949 г., Q=69 *м³/сек*; *в*—26.VII 1950 г., Q=150 *м³/сек*; *г*—10.VIII 1950 г., Q=165 *м³/сек*; *д*—28.V 1953 г., Q=50 *м³/сек*; *е*—15.VIII 1953 г., Q= 95 *м³/сек*.

ложения возросли на 312 тыс. $м^3$ с распространением до 1,9 *км* вверх от узла. Всего до 1955 г. длина призмы отложений превысила первоначальную подпорную призму в 5,4 раза. Таким образом, за 8 лет работы узла в верхнем бьефе отложилось 489 тыс. $м^3$ при колебании объемов отложений от 10 до 136 тыс. $м^3$ и среднегодовой величине 61 тыс. $м^3$. Занесение бьефа продолжается.

Протекание речного потока в верхнем бьефе узла с самого начала подпора носит многопроточный характер. Число рукавов зависит от расхода воды в реке и изменяется от 2—3 в межень до 10—15 в паводок (рис. 46). Исследованиями установлено, что речной поток,

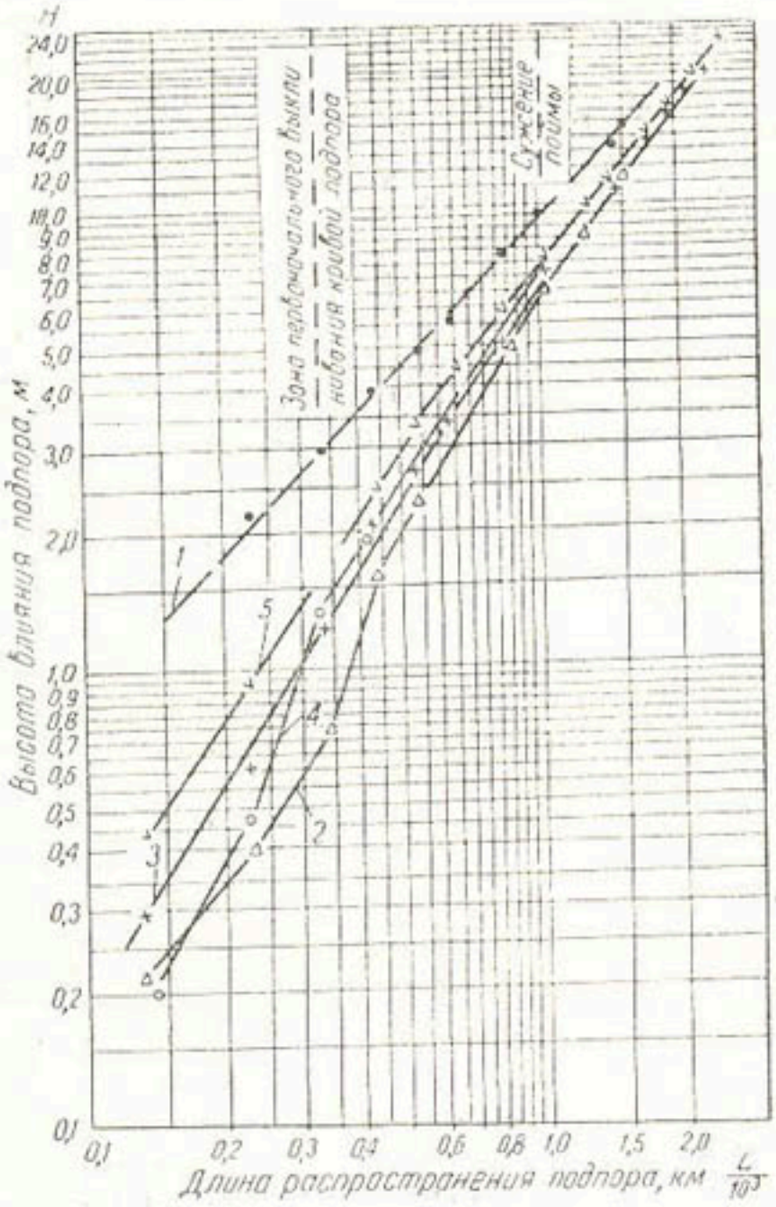


Рис. 47. Кривые изменения среднего дна поймы в подпертом бьефе Сары-Курганского гидроузла по мере его формирования; $I_б = 0{,}01$, $\Delta H = 3{,}0$ *м*, подпертый бьеф с широкой поймой (натура).

1—1945 г. (бытовое состояние), *2*—1947 г. (подпертое состояние), *3*—1949 г., *4*—1951 г., *5*—1954 г.

формируя себе русло в собственных отложениях, периодически маятникообразно перемещается с одного участка на другой.

Изменение уклона русла, формирующегося в пределах верхнего бьефа, представлено графиками в средних отметках на логарифмической сетке (рис. 47). За начало координат принята точка, фиксируемая створом плотины и отметкой подпертого горизонта воды у

плотины. Из анализа графиков следует, что основная закономерность в формировании подпертого бьефа — повышение дна по годам — определенно отмечается только на участке выше зоны первоначального выклинивания кривой подпора. Спрямленные профили на этом участке подчиняются зависимости

$$H = kL^n,$$

где H и L — координаты точек на продольных профилях, k и n — параметры, значения которых для разных периодов формирования при $H = 1{,}5 \div 6{,}5$ *м* и $L = 350 \div 1000$ *м* представлены ниже.

Момент съемки	$k \times 10^3$	n	*Период формирования*
Бытовое состояние — 1945 г.	6,8	1,06	
В год подпора — 1947	0,051	1,7	I
В начале выноса влекомых наносов в нижний бьеф — 1948г.	0,11	1,61	II
Вынос в нижний бьеф 38% от годового стока влекомых наносов — 1949 г.	0,13	1,58	
42% — 1950 г.	0,24	1,48	
50% — 1954 г.	0,94	1,3	III

На участке же первоначального подпора вследствие значительного сжатия реки в подводящем русле наращивания дна не происходило, а отмечались размывы, степень выраженности которых, ввиду поддержания переменного подпора у плотины, была различной.

Горизонты воды в соответствии с отмеченным характером протекания речного потока в широкой пойме (многорукавность, блуждание, свалы) на участке верхнего бьефа, выше первоначального выклинивания кривой подпора, изменялись, колеблясь около отметок среднего дна действующей части поймы: в межень они были ниже, а в паводок несколько выше среднего дна, т. е. практически свободная поверхность потока на этом участке бьефа в среднем почти совпадала с профилем русла поймы в средних отметках. На нижележащем участке в пределах первоначального выклинивания кривой подпора, ввиду зарегулированности подходного к узлу участка русла, уклоны свободной поверхности значительно отличались от уклонов дна русла.

Элементы русла и потока	Степень сформированности	
	начало поступления влекомых наносов в нижний бьеф	прекращение общего понижения русла в нижнем бьефе; транспортирующая способность потока в нижнем бьефе соответствует количеству наносов, поступающих из верхнего бьефа
Ширина зеркала в пойме при среднем из максимальных наблюденных расходов	100 — 300	
Ширина зеркала в подводящем русле при среднем из максимальных наблюденных расходов	35	

Уклон потока, бытовой	0,009	
Уклон при среднем из максимальных наблюденных расходов	0,0018	0,0035

Одновременно с занесением верхнего бьефа происходил транзит через него части наносов и вынос их в нижний бьеф. Годовые объемы выноса изменялись от 10 до 100 тыс. $м^3$, а коэффициент загрузки потока в нижнем бьефе—от 0,65 до 1,06 (табл. 20), т. е. в начальный период наносы в нижний бьеф поступали не пропорционально количеству сбрасываемой воды, а в количестве, в 1,5 раза меньшем. В связи с этим, а также за счет возросших по сравнению с бытовыми

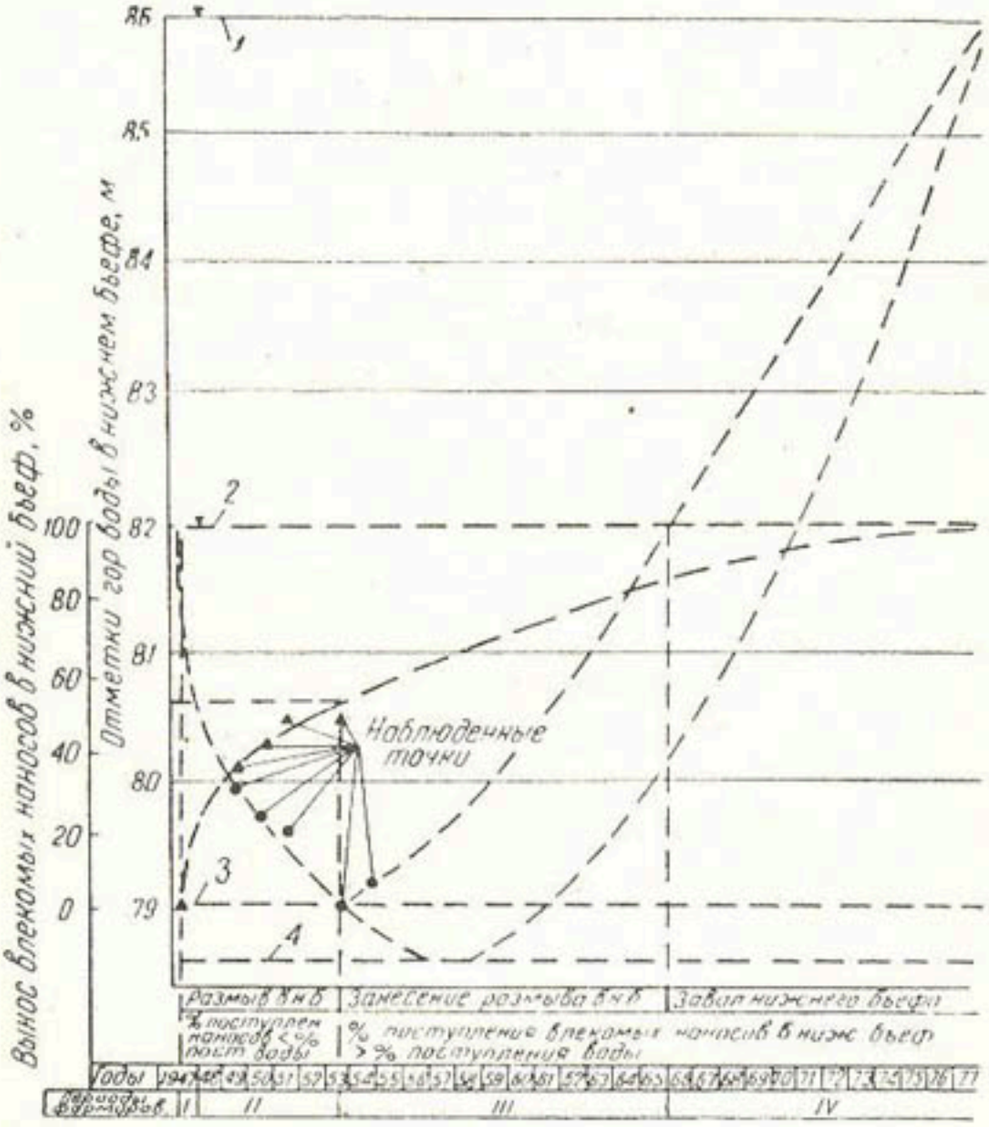


Рис. 48. Кривые выноса влекомых наносов в нижний бьеф Сары-Курганского гидроузла и хода формирования нижнего бьефа.

1—горизонт воды в нижнем бьефе в момент наступления затруднения в регулировании на узле (предельно возможная отметка подпора в верхнем бьефе после наращивания порогов сооружения на 1,5 *м*—86,90); *2*—горизонт воды в нижнем бьефе при $Q=120$ $м^3/сек$; *3*—фактический наименьший горизонт воды в нижнем бьефе узла при $Q=120$ $м^3/сек$ и отметке подпертого горизонта в верхнем бьефе 84, 80; *4*—предполагаемый горизонт воды в нижнем бьефе при подпержании НПГ в верхнем бьефе на отметке 85,40.

удельных расходов поступающей в сброс части потока русло за плотиной в течение этого периода работы узла размывалось и горизонт воды понижался

Установлено, что с 1949 по 1953 г. размыв русла в нижнем бьефе произошел на длине около 1,0 *км* с заглублением до 1,0 *м* в начале

и 0,1 *м* в конце участка. Горизонт воды за плотиной снизился на 1,0 *м*. С учетом же снижения до 1949 г., составившего $\approx$1,0 *м*, общее снижение в 1954 г. выразилось в 2,0 *м*. В 1954 г. горизонт воды в нижнем бьефе плотины повысился на 0,2 *м*, что свидетельствует об окончании понижения. Таким образом, общее снижение горизонта воды в нижнем бьефе с момента постройки узла до прекращения понижения, т. е. за 7 лет, составило $\approx$2,0 *м*[1]. Это снижение ухудшило сопряжение бьефов, которое в 1954 г. происходило в виде пульсирующего гидравлического прыжка на нижней части водобоя плотины.

Динамика выноса влекомых наносов из верхнего бьефа в нижний и снижения горизонта воды за плотиной в прокопе представлена на рис. 48. Правая ветвь графика горизонтов воды изображена приближенно, с учетом, что длительность восстановления размытого русла в нижнем бьефе несколько превысит период его размыва. Последнее подтверждается и зарубежными данными. Так, на некоторых низконапорных плотинах в Индии и Пакистане (Khanki на р. Ченаб, Rasul на р. Джелюм и др.) [28] периоды восстановления размыва русла в нижних бьефах превысили периоды понижения от 1,5 до 4 раз. В случае предположения, что период восстановления в 2 раза превысит период понижения, общая продолжительность нормальной работы узла с учетом предусмотренного проектом наращивания порогов сооружений и увеличения подпора на 1,5 *м* составит около 30 лет.

Газалкентский гидроузел (натура)

Целевое назначение узла — односторонний водозабор для ГЭС. Построен в 1940 г. В узел входит плотина с напором 7,0 *м*, состоящая из щитовой части длиной 94,0 *м* и глухой (земляной) части длиной 200 *м*, 12 водоприемных отверстий размером 7,65×3,0 *м*, 6-камерного отстойника общей шириной 125,8 *м* и длиной 130. Под водоприемником параллельно оси плотины проходят 6 промывных донных галерей разной длины и сечением[2] 3,8×1,7 *м*. Уклон реки 0,0030. Кривая подпора в первоначальный момент распространилась на 2,2 *км* от плотины. Объем подпора $1{,}8\times10^6$ *м*^{3}.

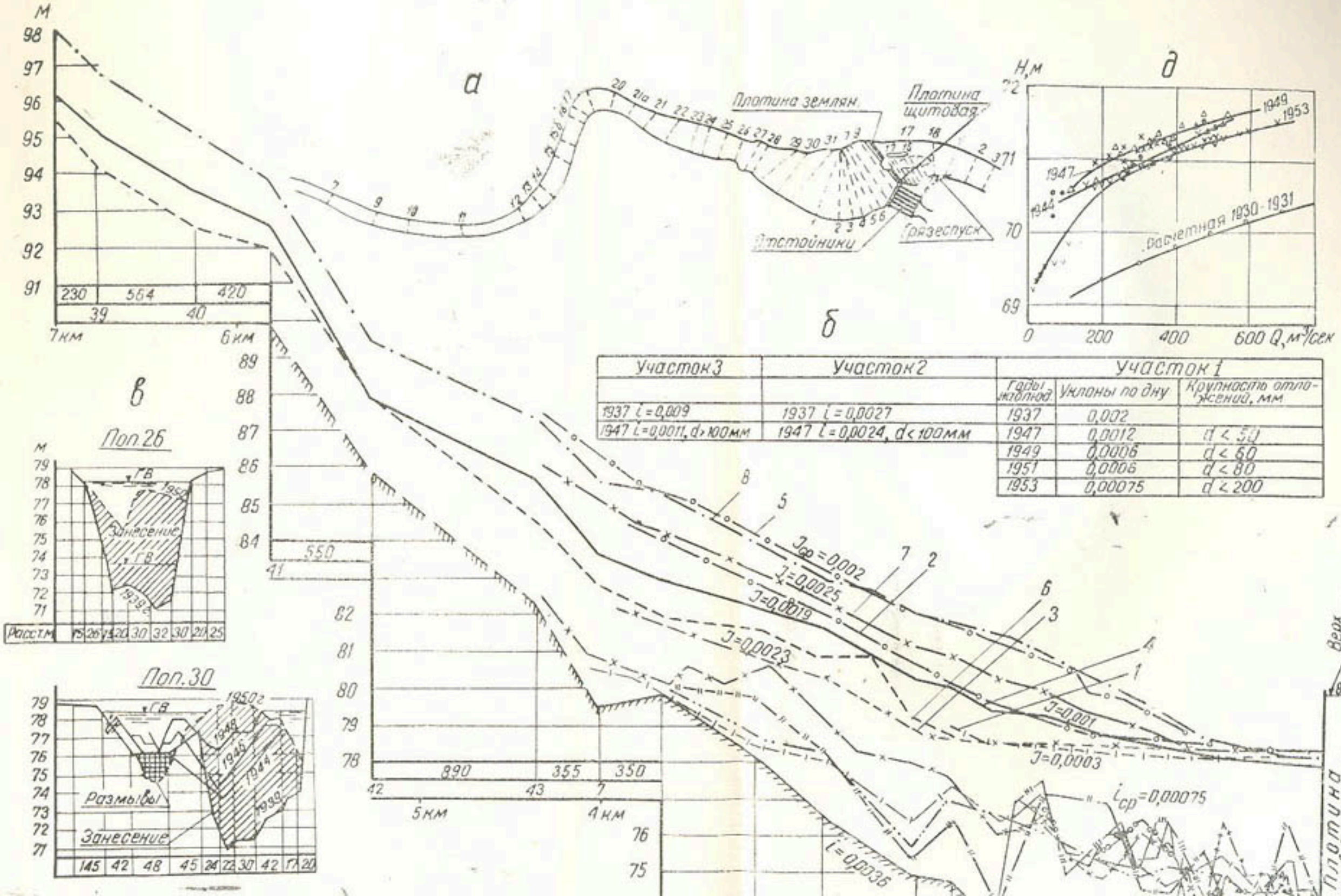
Ход заиления и занесения верхнего бьефа за 14 лет эксплуатации представлен на рис. 49—51 и характеризуется данными табл. 21.

Из рис. 49—51 и табл. 21 следует, что к 1945 г. заиление и занесение бьефа на участке первоначального подпора (поп. *8—20*) произошло уже на 60% объема первоначального подпора и с этого же года мелкие фракции влекомых наносов стали поступать в нижний бьеф. Наиболее интенсивно бьеф заилялся в первые три года за счет взвешенных наносов. Отложения за этот период составили 45% от полного объема водохранилища. К началу поступления влекомых наносов в нижний бьеф годовые отложения в нем составили в среднем 9,1% от первоначального объема водохранилища. В последую-

---

[1] Указанное снижение оценено относительно бытового состояния русла. Снижение же относительно горизонта воды в прокопе, дно которого в момент пуска сооружения выполнено с превышением дна бытового русла, составило $\approx$2,8 *м*.

[2] В период проектирования данного узла предлагался и другой вариант компоновки сооружений, содержащий элементы, нашедшие позднее применение при разработке конструкций сооружений ферганского типа. Вариант был разработан под руководством Н. А. Григоровича (ГИДЭП) и исследован в МИСИ при консультации М. М. Гришина и В. Н. Кузнецова в 1934 г. [8].



Участок 3	Участок 2	Участок 1		
		Годы наблюд.	Уклоны по дну	Крупность отложений, мм
1937 i=0,009	1937 i=0,0027	1937	0,002	
1947 i=0,0011, d>100мм	1947 i=0,0024, d<100мм	1947	0,0012	d<50
		1949	0,0006	d<60
		1951	0,0006	d<80
		1953	0,00075	d<200

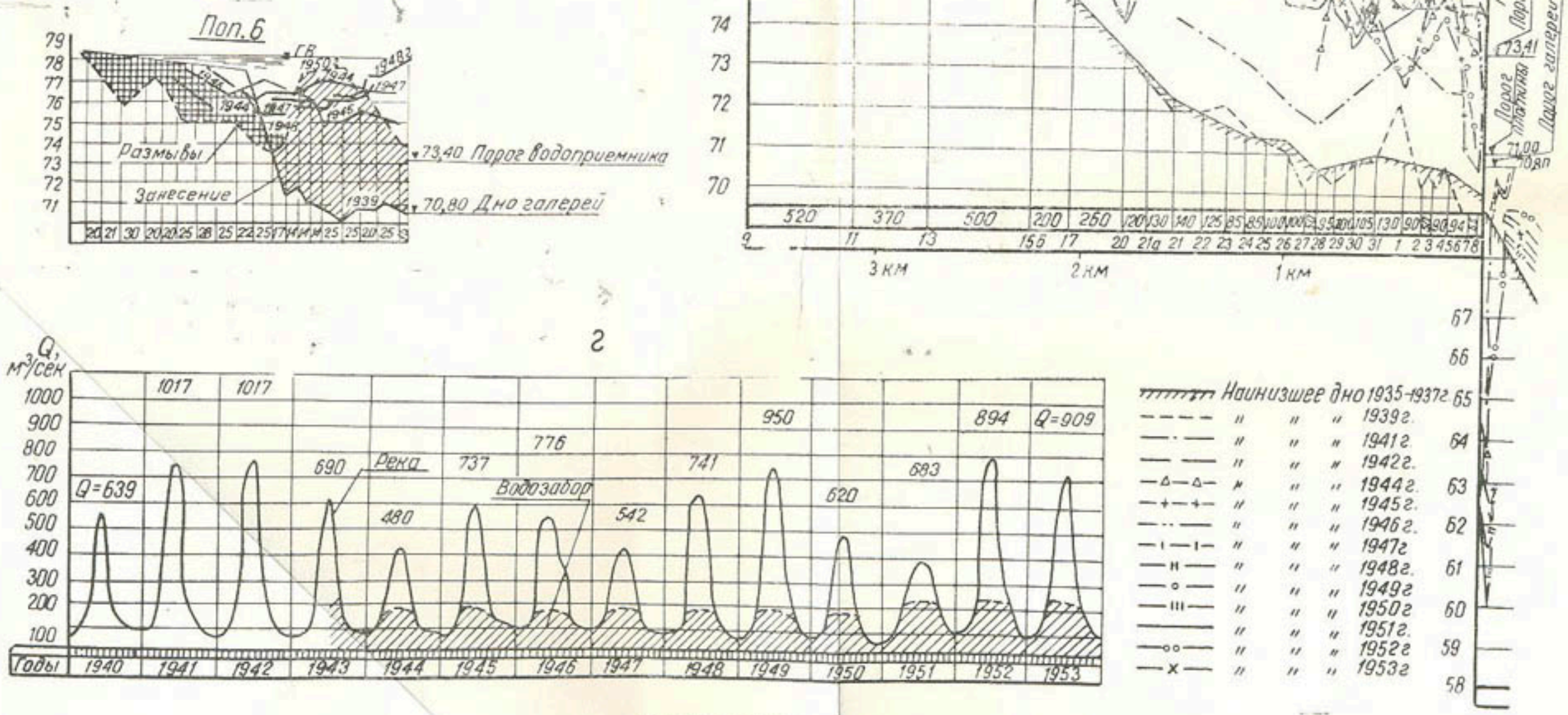


Рис. 49. Газалкентский гидроузел.

а — план руслового участка узла; *б* — продольные профили горизонтов воды мгновенной съемки и русла по наинизшим отметкам в бьефах за 1939—1953 гг.: *1* — горизонт воды 5.VIII 1942 г. при $Q=283$ *м³/сек*, *2* — 11.V 1944 г. при $Q=552$ *м³/сек*, *3* — 7.VII 1944 г. при $Q=73$ *м³/сек*, *4* — 16.IV 1949 г. при $Q=275$ *м³/сек*, *5* — 24.VI 1949 г. при $Q=885$ *м³/сек*. *6* — 6.III 1950 г. при $Q=74$ *м³/сек*. *7* — 7.V 1952 г. при $Q=516$ *м³/сек*, *8* — 21.VI 1952 г. при $Q=886$ *м³/сек*; *в* — поперечные профили; *г* — гидрографы реки и водозабора на узле по среднемесячным расходам; *д* — кривая зависимости $Q=f(H)$ в нижнем бьефе узла в створе на 170 *м* ниже плотины. Расчетная кривая приведена по уклону с Яман-Джарского створа к створу наблюдений последних лет.

Таблица 21

Объемы деформаций в верхнем бьефе Газалкентского гидроузла

Период между съемками	Количество месяцев	Отложения						Объем смыва, $м^3$	Дата промывки
		на участке от плотины до поп. *20*		на участке выше поп. *20*		всего			
		$м^3$	% от объема водохранилища	$м^3$	% от объема водохранилища	$м^3$	% от объема водохранилища		
XI. 1939 – X. 1941	23	624 410	35,0			624 410	35,0	0	
X. 1941 – VIII. 1942	10	117 564	6,5	50 000	2,8	167 564	9,3	0	
VIII. 1942 – III. 1944	19	148 882	8,2	58 000	3,2	206 882	11,4	6042	
III. 1944 – X. 1945	19	164 475	9,1			164 475	9,1	0	
X. 1945 – VII. 1946	9	38 640	2,2			38 640	2,2	50 744	VI–VII. 1946
VII. 1946 – X. 1947	15	120 519	6,7	40 000	2,2	160 519	8,9	0	
X. 1947 – XI. 1948	13	7657	4,3			76 757	4,3	0	
XI. 1948 – III. 1950	16	42 785	2,4	41 000	2,3	83 785	4,7	91 100	VI. 1949
III. 1950 – IX. 1950	6	81 145	4,5			81 145	4,5		
IX. 1950 – IX. 1952	24	90 324	5,0	16 200	0,9	106 524	5,9		
IX. 1952 – IX. 1953	12	11 072	0,6	19 800	1,1	30 872	1,7	27 501	1952–1953
Итого	166	1 516 573	84,5	225 000	12,5	1 741 573	97,0	175 387	

щем среднегодовой процент отложений их колебался в пределах 9,1—1,7. В объемном выражении 9,1% соответствовало 164 тыс. $м^3$, что несколько превысило сток влекомых наносов, замеренный приборами в средний по водоносности год в створах, расположенных в 3 — 12 *км* от узла.

Исходя из этого объема можно считать, что за первые три года отложения влекомых наносов составили 164×3=492,0 тыс. $м^3$, а взвешенных — 792,0 — 492,0 = 300,0 тыс., т. е. 17% от объема бьефа и 37% от общего количества отложившихся наносов за трехлетний период. В 1946—1947 гг. гравелисто-галечная гряда продвинулась вплотную к сооружению. К этому моменту отложения распространились вверх от плотины до 4,0 *км*, т. е. превысили первоначальную длину подпора в 2 раза.

Характер изменения свободной поверхности речного потока при $Q=500 м^3/сек$ по мере занесения верхнего бьефа представлен на рис. 50, из профилей[1] которого следует, что наибольшее нарастание го-

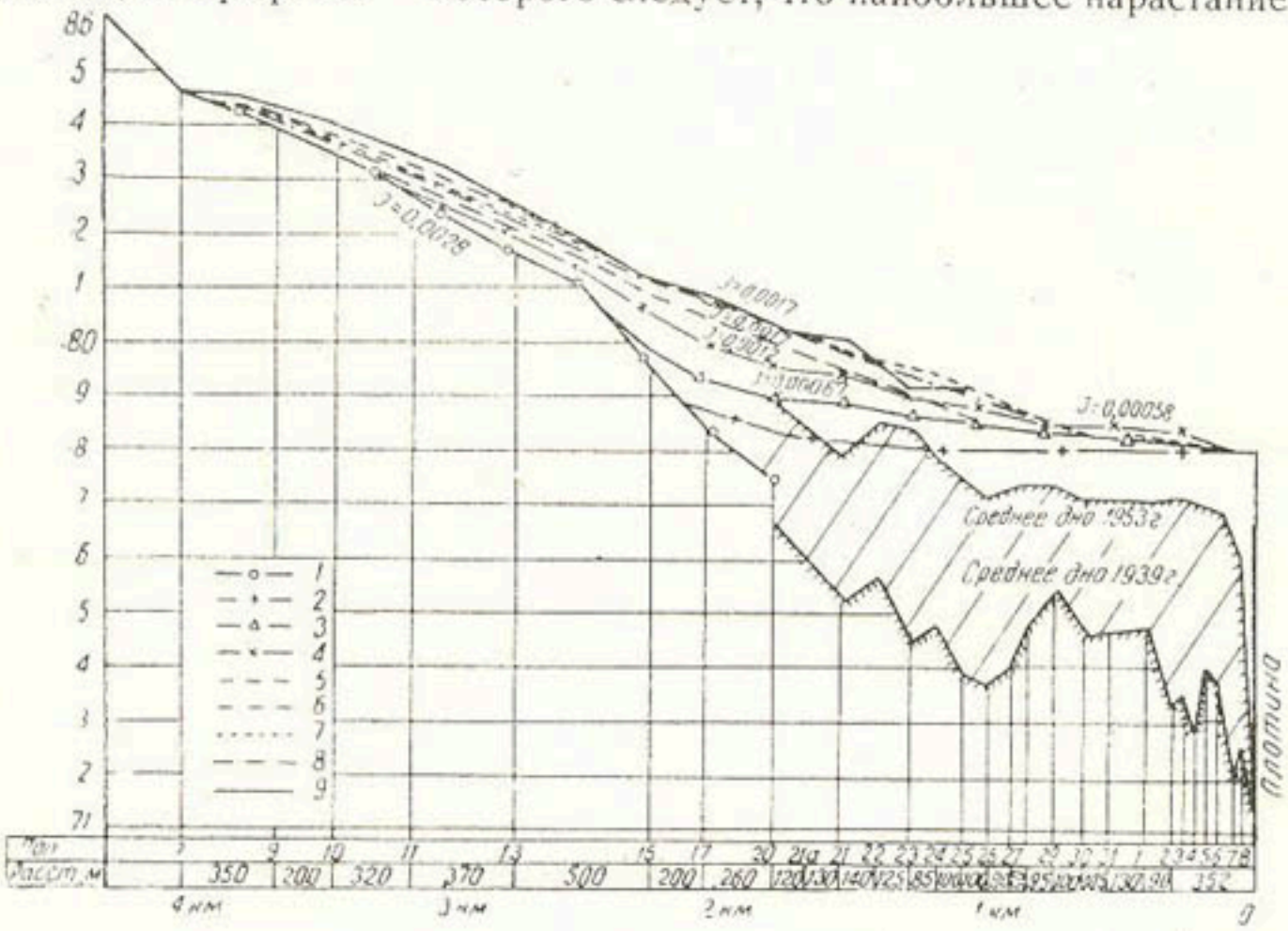


Рис. 50. Профили дна и свободной поверхности, изменяющейся по мере занесения верхнего бьефа Газалкентского гидроузла при $Q = 500$ $м^3/сек$.

1—горизонт воды 1935 г., *2*—1939 г., *3*—1942 г., *4*—1944 г., *5*—1947 г., *6*—1949 г., *7*—1950 г., *8*—1952 г., *9*—1953 г.

ризонтов воды (до 2 *м*) произошло на участке первоначального выклинивания кривой подпора. С удалением от этого участка вниз и вверх по течению нарастание уменьшается, сходя на нет у плотины и в 2 *км* вверх от нее. Закономерное наращивание горизонтов воды при этом отмечается только в зоне выклинивания кривой подпора и на вышележащем участке. На участке же, прилегающем к плотине, ввиду колебания подпора в пределах до полуметра и периодически производимых промывок, указанная закономерность нарушалась.

[1] Профили составлены по данным мгновенных съемок горизонта воды на участке длиной 4÷9 *км*, произведенных Узбекэнерго.

Аналитическое выражение очертаний горизонтов воды на участке выше выклинивания подпора, как это следует из рис. 51, отвечает зависимости $H = kL^n$.

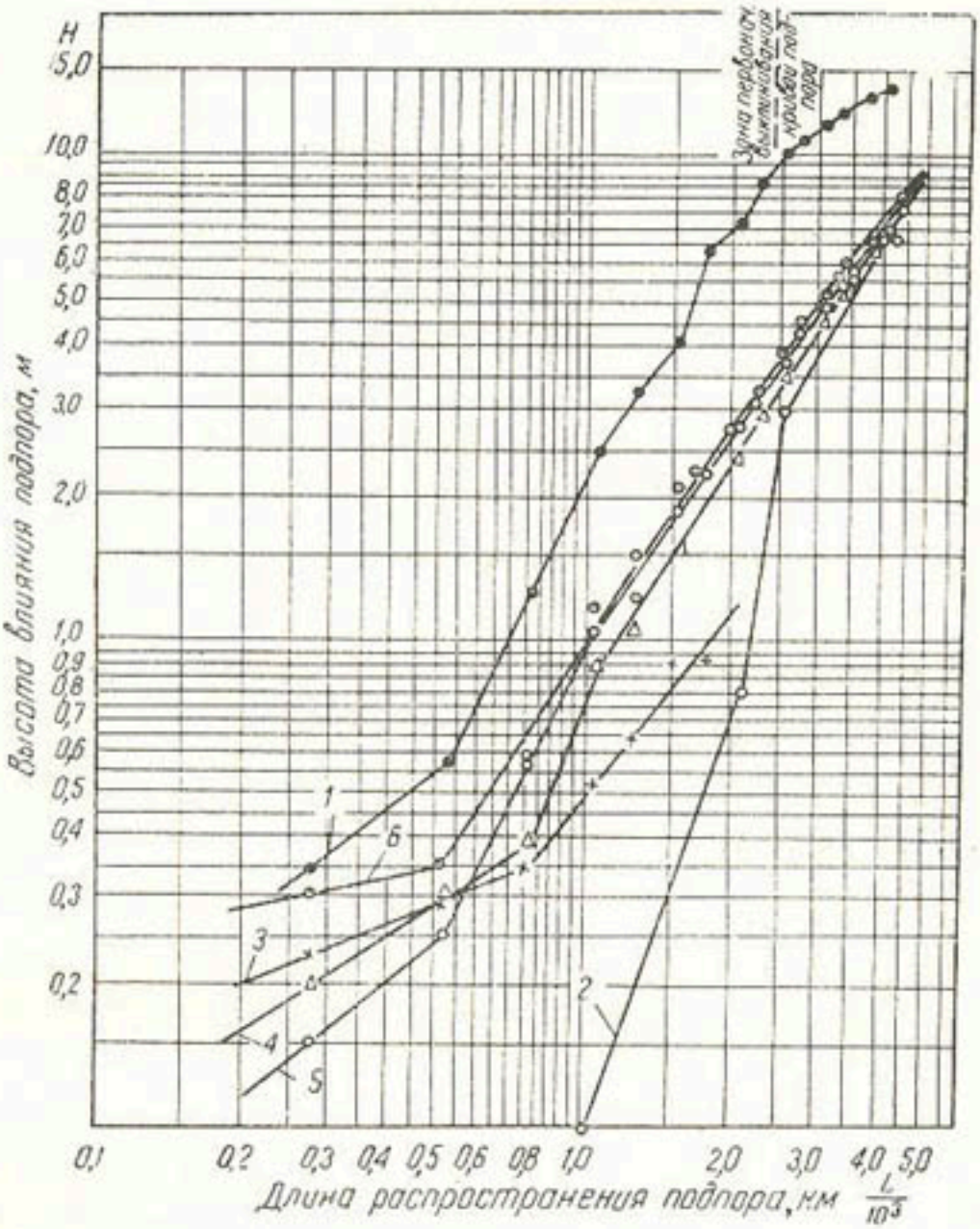


Рис. 51. Кривые изменения горизонтов воды в подпертом бьефе Газалкентского гидроузла при $Q = 500$ $м^3/сек$ по мере его формирования; $I_б = 0{,}003$, $\Delta H = 6{,}5 м$, подпертый бьеф озерного типа (натура).

1—1935 г. (бытовое состояние), *2*—1939 г. (момент первоначального подпора), *3*—1942 г., *4*—1947 г., *5*—1949 г., *6*—1953 г.

Значения параметров k и n в указанной зависимости для участков графиков с $H \geqslant 3$ *м* и $L \geqslant 2500$ *м* следующие.

Момент съемки	$k \times 10^3$	n	*Период формирования*
Бытовое состояние — 1935г.	8,4	0,68	I
Первоначальный подпор — 1939г.	0,0028	1,76	
В нижний бьеф узла выносилось 36% годового стока влекомых наносов — 1947г.	0,016	1,56	II
1949г.	0,051	1,42	
55% — 1953г.	0,051	1,42	

Русло непосредственно перед плотиной, вследствие расширения бьефа на этом участке, уже к 1945 г. стало носить многопроточный характер (три основных протока). Если в бытовых условиях и в

первый период эксплуатации узла речной поток протекал главным образом у правого берега, то в 1945 г. наибольшая доля расхода приходилась на центральный поток (40—60%), чему в некоторой степени способствовали периодические промывы[1].

Переходя к оценке процессов формирования в нижнем бьефе узла, следует отметить, что за прошедший период значительные деформации наблюдались только непосредственно за плотиной, величины местных размывов за которой изменялись в больших пределах и достигали 10-метровой глубины (рис. 49).

Общие деформации русла в нижнем бьефе, как это следует из кривых $Q = f(H)$, приведенных на рис. 49, незначительные и не превышают 0,5 *м* (понижение). Отсутствие общих деформаций и особенно незначительность понижения дна в нижнем бьефе в первый период работы узла, вероятно, следует отнести за счет бетонного барража, сооруженного раньше на 2 *км* ниже узла в составе головных сооружений арыка Зах, и последующей отмостки русла крупным камнем.

Специальные исследования по формированию верхнего бьефа (пространственная модель)

Целью исследований было уточнение существующих и установление новых закономерностей в процессах занесения верхнего бьефа низконапорной плотины на предгорном участке реки [21]. Модель выполнена в масштабе 1/30 н. в. существующего руслового участка ($i \cong 0{,}0094$).

Моделирование производили по методу гравитационного подобия. Моделировали участок верхнего бьефа 1,5 *км* длины и сооружения узла. В качестве размываемого материала на модели принята песчано-галечная смесь. Так, при $q = 32{,}6$ *л/сек*, соответствующем в натуре среднему расходу из максимальных наблюденных за многолетний период, в опыте с бытовым режимом установлены насыщение $\rho = 1{,}0$ *г/л* и крупность $d_{ср} = 3{,}4$ *мм*. В дальнейшем произведены опыты с подпором. Ниже приводятся результаты исследований модели с подпором на 12,7 *см* над его бытовым горизонтом (в натуре $\Delta H = 3{,}8$ *м*).

Динамика формирования представлена в табл. 22, 23 и на рис. 52, 53, из которых следует, что в первоначальный момент подпора кривая выклинилась в 10 *м* (нат. 300 *м*) от плотины. Перераспределение скоростей течения на этом участке привело к откладыванию всех поступающих с вышележащего участка наносов, которые по мере накопления стали распространяться вниз и вверх по течению; при этом скорость распространения их вначале была неодинаковой во времени. К моменту же надвижки гряды к плотине она выравнилась, о чем свидетельствует равноудаленность отложений к этому моменту от зоны выклинивания в ту и другую сторону (табл. 22).

Изменение средних скоростей течения в подпертом бьефе носило закономерный характер только на участке, прилегающем к плотине (рис. 52), где отмечалось увеличение скоростей по мере формирования бьефа и вынос наносов постепенно возрастающей крупности. На вышележащем участке указанной закономерности не наблюдалось.

Уклоны свободной поверхности на участках ниже и выше зоны выклинивания разнились по величине (табл. 23). Если на участке распространявшейся вверх призмы отложений уклон довольно быстро

---

[1] Вопросы промыва верхнего бьефа узла детально освещены А. М. Мухамедовым [12].

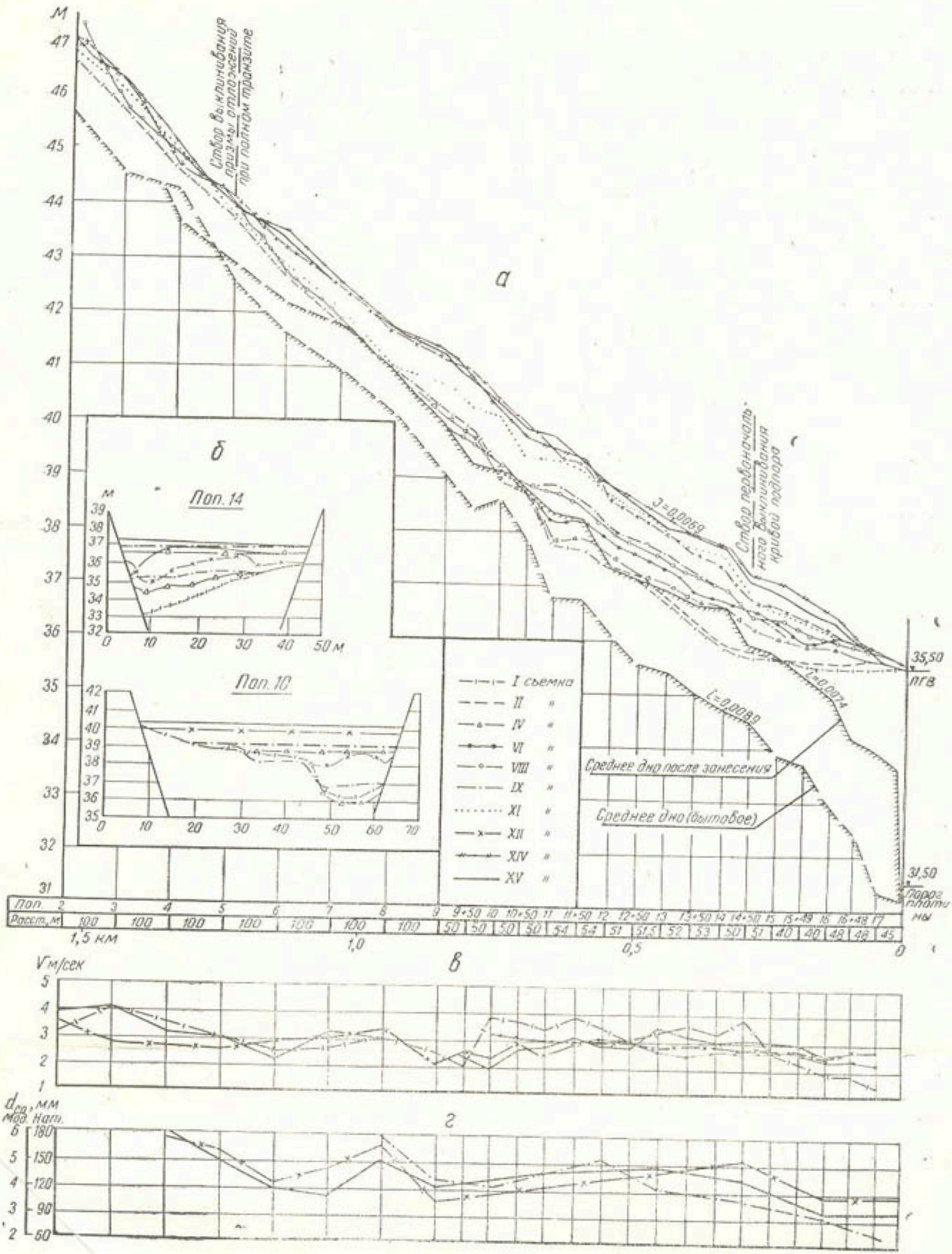


Рис. 52. Модель подпертого бьефа.

а—продольные профили горизонтов воды и дна по средним отметкам; *б*—поперечные профили; *в*—кривые изменения средних скоростей течения по мере занесения подпертого бьефа; *г*—кривые изменения средней крупности отложений в подпертом бьефе по мере его занесения.

Таблица 22

Показатели занесения подпертого бьефа низконапорного узла (пространственная модель)

Номер опыта и замера	Уклон водной поверхности	Отложение наносов в подпертом бьефе, % к пущенным	Длина призмы отложений L, *м*	Коэффициент удлинения призмы отложений $k=\frac{L \cdot I_б}{\Delta H}$	Средняя крупность смеси (наносов), *мм*		Характер переформирований
					подаваемой	улавливаемой	
I	0,009	—	—	—	3,3	3,0—3,5	Бытовой режим (без подпора)
II-1	0,00067	—	10,0	0,72	—	—	В верхнем бьефе от зоны выклинивания кривой подпора влекомые наносы распространяются вверх и вниз по течению
2	0,0012	100	—	—	—	—	
3	0,0033	100	13,0	0,93	3,34	—	
4	0,0039	100	16,7	1,2	»	—	
5	0,0044	100	18,3	1,82	»	—	
6	0,0045	88	20,0	1,44	»	1,78	Гряда наносов подошла к плотине
7	0,0049	88	21,7	1,56	»	1,65	В верхнем бьефе наносы откладываются во все уменьшающемся количестве, а в нижнем—поступление их увеличивается
8	0,0047	74	21,7	1,56	»	2,23	
9	0,0051	78	23,3	1,67	»	2,27	
10	0,0057	56	35,0	2,51	3,6	2,43	В зависимости от водозабора и наносозахвата в каналы наступают периоды: вначале—восстановления размытого дна в нижнем бьефе, а затем и завала его.
11	0,0063	47	37,3	2,68	»	2,71	
12	0,0067	48	40,0	2,87	3,67	2,89	
13	0,0068	66	40,0	2,87	»	3,37	
14	0,0067	40	41,7	3,0	3,04	2,39	
15	0,0069	4	38,4	3,0	»	3,39	

Примечания.

1. Созданный подпор на модели $\Delta H=0,12$ *м*, что соответствует в натуре 3,8 *м*.
2. Опыты производились при расходе воды 32,6 *л/сек*, соответствующем в натуре среднему из максимальных наблюденных за многолетний период.
3. Периоды времени между замерами изменялись в пределах 2,75—9 час.

приблизился к бытовому, то ниже зоны первоначального выклинивания он имел наименьшее значение и характеризовался более медленным ростом.

Таблица 23

Номер замера	Уклоны водной поверхности в подпертом бьефе			Отношение уклонов по участкам
	от плотины до участка первоначального выклинивания (поп. *14-5*)	от участка первоначального выклинивания до выклинивания в момент съемки	от плотины до участка выклинивания в момент съемки (средн.)	
1	0,00067		0,00067	
2	0,0010	0,002	0,0012	2,00
3	0,0023	0,0053	0,0039	2,30
4	0,0023	0,0054	0,0030	2,35
5	0,0027	0,0057	0,0044	2,10
6	0,0034	0,0051	0,0045	1,50
7	0,0040	0,0057	0,0049	1,42
8	0,0032	0,0057	0,0047	1,78
9	0,0033	0,0065	0,0051	1,97
10	0,0040	0,0064	0,0057	1,60
11	0,0044	0,0070	0,0063	1,60
12	0,0043	0,0075	0,0067	1,75
13	0,0043	0,0075	0,0068	1,75
14	0,0057	0,0071	0,0067	1,25
15	0,0053	0,0074	0,0069	1,40

Для участка выше первоначального выклинивания кривой подпора на рис. 53 представлена связь между координатами точек профилей водной поверхности $H=kL^n$. Параметры этой связи при $H \geqslant 3$ *м* и $L \geqslant 300$ *м* изменялись в следующих пределах.

Момент съемки	$k \times 10^3$	*n*	*Период формирования*
Бытовое состояние	10	1,0	
Первоначальный подпор—съемка I	0,035	1,73	I
Вынос в нижний бьеф 12 % влекомых наносов от общего их стока —съемка VI	0,38	1,38	II
44%—съемка X	1,90	1,19	
96%—съемка XV	2,57	1,13	III

В процессе занесения бьефа происходила пересортировка наносов, отложившихся в первоначальный период; она заключалась в промыве и выносе из подпертого бьефа наиболее мелких отложений и замене их более крупными.

С надвижкой гряды наносов к плотине началось и постепенно возрастало поступление наносов в нижний бьеф.

Характеристика подаваемой и улавливаемой смеси видна из табл. 22: в начале выноса наносов в нижний бьеф их крупность была в два раза меньше подаваемых и только с приближением к транзиту, близкому к полному, она достигала бытового значения.

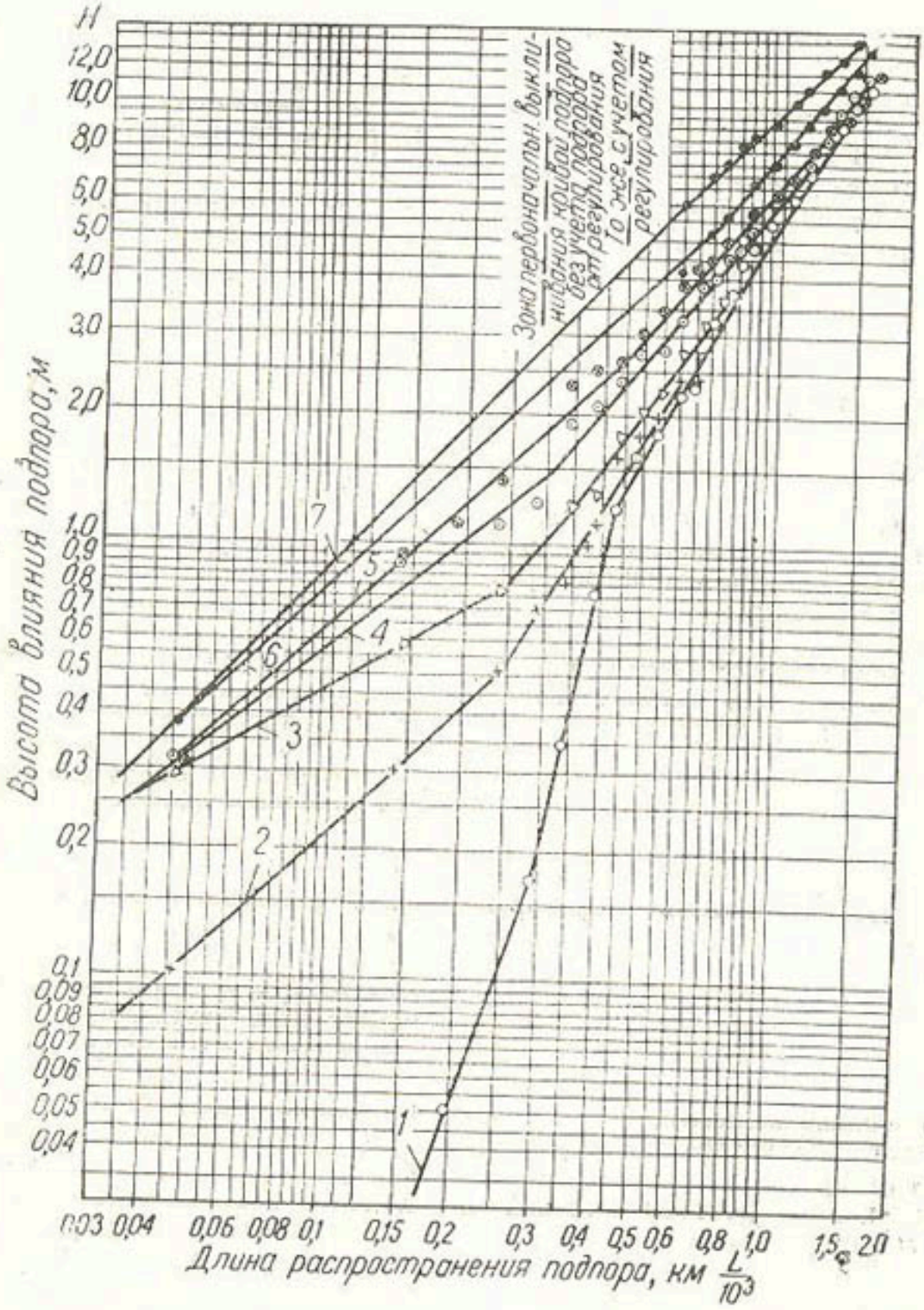


Рис. 53. Кривые изменения горизонтов воды в подпертом бьефе при среднепаводковом расходе ($Q = 160$ *м³/сек*) по мере его формирования; $I_б = 0{,}0034$, $\Delta H = 3{,}80$ *м*, подпертый бьеф руслового типа зарегулирован, $B = 30-60$ *м* (модель).

1—момент первоначального подпора, съемка I, *2*—съемка III, *3*—съемка VI, *4*—съемка X, *5*—съемка XV, *6*—состояние при подпоре от регулирования (без щитов), *7*—бытовое состояние (до подпора).

* * *

Вышеизложенные данные по трем узлам, а также материалы по 12 натурным и 4 модельным объектам, исследовавшимся с различными целями с 1930 по 1955 г., послужили основанием для нижеприведенных выводов и обобщений.

1. Характерные моменты при формировании бьефов следующие:

1) начало поступления влекомых наносов в нижний бьеф;

2) максимальные размыв и общее понижение русла в нижнем бьефе;

3) восстановление размытого русла до бытового;

4) завал русла в нижнем бьефе до размера, вызывающего затруднения в регулировании на узле.

В соответствии с этим считается целесообразной такая периодизация процессов формирования русла[1].

Период	*Процессы в верхнем бьефе*	*Процессы в нижнем бьефе*
I	Откладываются влекомые наносы и часть взвешенных. Концом периода является начало поступления в нижний бьеф мелких фракций влекомых наносов и полный транзит взвешенных	Наиболее интенсивный размыв русла и понижение горизонта воды. В конце периода начинают поступать в бьеф мелкие фракции влекомых наносов
II	Отложение влекомых наносов постепенно убывает, вынос их в нижний бьеф возрастает	Поступление влекомых наносов возрастает и достигает доли, соответствующей транспортирующей способности сбросного потока в новых условиях. Размыв русла к концу периода достигает максимума
III	Отложение влекомых наносов все убывает. Происходит пересортировка ранее отложившихся наносов	Поступление влекомых наносов в бьеф превышает соответствующую по траспортирующей способности долю сбросного расхода. Дно наращивается, и к концу периода восстанавливается полностью ранее существовавшее (бытовое русло)
IV	Отложение влекомых наносов постепенно затухает. К концу периода наступает почти полный транзит их, по характеру близкий к бытовым условиям	Отложение крупных фракций влекомых наносов сверх восстановленного бытового русла и самоотмостка его. К концу периода занесение приводит к затруднениям в регулировании и вызывает необходимость увеличения подпора и наращивания порога и верха сооружения

2. Первоначальное место отложений влекомых наносов в подпертом бьефе—зона выклинивания кривой подпора, от которой отложения в течение первого периода формирования бьефа распространяются в среднем с одинаковой скоростью в обе стороны (табл. 20, 22).

3. Длина распространения отложений в подпертых бьефах, несмотря на незначительность подпора, создаваемого этими типами плотин, обычно велика. На относительно выравненных по профилю участ-

---

[1] Впервые подобная периодизация, только с разбивкой на три периода, предложена С. Т. Алтуниным.

ках она составляет в узких (русловых) бьефах в конце I периода 1,8—2 длины первоначального подпора, определяемой по зависимости $L=\frac{\Delta H}{I_б}$, в конце II—3—4 длины; в широких бьефах в конце I периода 2 длины, в конце II—5,5 длины, в конце IV—8—10 длин.

Для участков бьефа с невыравненными профилями или резко отличающимися по длине формами в плане перечисленные коэффициенты имеют отклонения.

В таких случаях влияние плотин с подпором 1—2 *м*, особенно при малом водозаборе (<25%), иногда сводится на нет крупноструктурными формами рельефа (переломы профиля и др.).

4. Продолжительность I периода формирования зависит главным образом от четырех факторов: величины подпора, уклона участка, формы бьефа в плане и величины твердого стока.

Для плотин с подпором до 4 *м* на горных участках и в верхней части предгорных этот период не превышает 2—3 лет; для плотин с подпором до 4 *м* в средней части предгорных участков и подпором более 4 *м* в средней и нижней частях предгорных участков он возрастает до 5—6 лет. II период также зависит от упомянутых факторов и величины водозабора на узле и по продолжительности значительно превышает I. Для двух натурных объектов (Сары-Курганский и Газалкентский гидроузлы) при водозаборе 45—55% он равнялся 7 и 9 годам, что превысило продолжительность I периода в 2 и 7 раз.

5. Существенный фактор в формировании бьефов узлов—ширина действующей поймы, поочередное занесение отдельных участков которой приводит к маятникообразному перемещению речного потока. На Сары-Курганском узле ($b = 400 \div 600$ *м*) период такого перемещения составил 5 лет.

6. Роль взвешенных и влекомых наносов в заилении и занесении подпертых бьефов плотин на горно-предгорных участках рек различна (табл. 24). Первые наиболее активно участвуют в заилении бьефов плотин на нижнепредгорных участках (Чумышский узел) и в случае значительных подпоров (>6*м*), в средней и верхней частях предгорных участков (Газалкентский узел), причем это участие имеет существенное значение только в первоначальный период и к концу его сходит на нет. В отдельных случаях доля участия взвешенных наносов уменьшается вследствие вытеснения их из отложений движущейся грядой влекомых наносов. На верхне- и среднепредгорных участках в бьефах с подпором до 4 *м* участие взвешенных наносов является временным и практически к концу I периода формирования исключается. В этих условиях основную роль в занесении бьефов выполняют влекомые наносы.

7. Накопление отложений в различных по типу подпертых бьефах происходит разнообразно. Например, на узле с подпором 3 *м* и широким верхним бьефом (Сары-Курганский узел) период занесения первоначальной призмы не превысил одного года. Начиная со второго года отложения, распространяющиеся вверх, стали интенсивно возрастать, превысив через 7 лет (в конце II периода) объем первоначальной призмы подпора в 10 раз. На узле с подпором 3,8 *м* и узким бьефом (модель) объем отложений по достижении 96% транзита наносов через бьеф превысил первоначальный вес в 2,5 раза. На узлах с напором до 1,5 *м* и водозабором <25% (Пальманский и Кугартский) объемы отложений выше первоначальной призмы подпора незначительны.

8. По характеру, степени выраженности русловых деформаций и изменению горизонтов воды в процессе формирования подпертый

бьеф низконапорной плотины может быть разделен на два участка: участок в пределах первоначальной кривой подпора и вышележащий.

9. Нарастание отложений в зоне выклинивания кривой подпора происходит пропорционально созданному подпору у плотины и в среднем (табл. 25) к концу I периода составляет 0,2 ΔH, к концу II — 0,5 ΔH.

Таблица 24

Гидроузел	Уклон реки	Подпор у плотины, *м*	Длина кривой подпора, *км*	Ширина затопления, *м*	Участие взвешенных наносов в заилении подпертого бьефа
Газалкентский на р. Чирчик	0,003	6,5	2,2	500	Откладывались частично только в первые 3 года после подпора, объем достиг 300 тыс. $м^3$, что составило к емкости водохранилища 17% и от полного объема отложений — 37
Чумышский на р. Чу	0,0017	3,0	2,0	700	В первом году после подпора отложения взвешенных наносов составили 36% от полного объема отложений и 62 от годового стока их
Бозсу ГЭС на ар. Бозсу	0,0021	12,2	6,0	До 50	За первые 4 года участие выразилось в 88,5% от общего объема отложений. В последующий 4-летний период оно снизилось до 68%, причем в этот объем вошли вытесненные 60% из отложений прошлых лет с вышележащего участка
Мало-Кабардинский на р. Терек	0,0018	2,6	—	500	После года эксплуатации взвешенные наносы стали проноситься через бьеф транзитом
ДЗОРа ГЭС на р. Дзорагет	0,0065	6,5	—	(1000)	В первый год эксплуатации взвешенные наносы составили 90% от общего объема отложений и 13,5% от годсвого стока
Сары-Курганский на р. Сох	0,01	3,0	0,35	100	Взвешенные наносы проносятся через подпертый бьеф транзитом
Пальманский на р. Исфайрам	0,011	1,5	0,14	30—50	То же
Кугартский на р. Кугарт	0,012	1,2	0,15	100	То же

Увеличение уклонов водной поверхности по мере формирования русла происходит наиболее заметно только на нижнем участке подпертого бьефа. По средним относительным величинам этот процесс выражается следующими цифрами (табл. 26): к концу I периода уклон достигатеет $0{,}3I_б$, к концу II — 0,5, в III периоде — 0,57.

На вышележащем участке вследствие влияния формы бьефа в плане, профиля русла и других факторов указанная закономерность (увеличение уклона) не всегда явно выражена, отмечаются случаи временного постоянства в уклонах, несмотря на распространение призмы отложений вверх по течению.

Ввиду значительности приведенных величин нарастания дна и горизонтов воды возникает необходимость учета их при проектировании, в частности при назначении отметок верха дамб, зоны подтопления, дренажных и других сооружений.

Таблица 25

Вид исследований	Подпор у плотины над бытовым горизонтом ΔH, *м*	Подпор в зоне первоначального выклинивания кривой Δh		Соотношение продолжительности I и II периодов формирования	$\frac{\Delta h}{\Delta H}$	
		к концу I периода	к концу II периода		к концу I периода	к концу II периода
Натурные						
Сары-Курганский гидроузел на р. Сох	3,0	0,30	1,30	1:7 (1 год и 7 лет)	0,10	0,43
Модельные						
на примере предгорного участка р. Ангрен, М 1:30 н. в.	3,8	0,85	2,0	1:4,4 (71 и 312 час.)	0,22	0,53
Натурные						
Газалкентский узел на р. Чирчик	6,5	1,60	2,5	1:1,8 (5 и 9 лет)	0,25	0,39
Среднее					0,2	0,5

Таблица 26

Объект	Период формирования	Вынос влекомых наносов в нижний бьеф, %	Средний бытовой уклон	Средний уклон водной поверхности			
				участок ниже первоначального выклинивания кривой подпора		участок выше первоначального выклинивания кривой подпора	
				абс.	относит.	абс.	относит.
Модель (специальные исследования)	Конец I	0	0,0094	0,0034	0,36 $I_б$	0,0051	0,54 $I_б$
	„ II	44	0,0094	0,0040	0,43 $I_б$	0,0064	0,68 $I_б$
	Начало III	96	0,0094	0,0053	0,53 $I_б$	0,0075	0,80 $I_б$
Сары-Курганский узел (натура)	Конец I	0	0,0093	0,0018	0,20 $I_б$	0,0075	0,69 $I_б$
	„ II	49,5	0,0093	0,0035	0,38 $I_б$	0,0088	0,94 $I_б$
Газалкентский узел (натура)	„ I	0	0,003	0,001	0,33 $I_б$	0,0023	0,77 $I_б$
	„ II	55	0,003	0,0015	0,50 $I_б$	0,00185	0,62 $I_б$

10. Понижение русла в нижнем бьефе также следует считать общей закономерностью и для горно-предгорных условий, но степень ее проявления зависит от ряда факторов; важнейшие из них — величина стока влекомых наносов, степень водозабора в каналы, водоносность года или ряда лет и характер профиля русла.

На Сары-Курганском узле ($\Delta H = 3$ *м*), осуществляющем в паводок 40—45-процентный водозабор при достижении 50% выноса влекомых наносов, размыв дна и общее понижение горизонта воды в нижнем бьефе достигли 2 *м*.

11. Установленные связи между накоплением отложений в подпертом бьефе и выносом наносов в нижний бьеф (рис. 54), хотя и нуждаются в дополнительных данных, особенно для III и IV периодов формирования, но уже носят общий характер и могут быть использованы при приближенных расчетах для случаев с 50—90-процентным во-

дозабором. При водозаборе менее 50% пока необходимо пользоваться экстраполяцией.

12. Анализом профилей свободной поверхности на участках бьефа выше зоны выклинивания подпора установлено, что они представляют собой параболические кривые, выражаемые зависимостью вида $H=kL^n$,

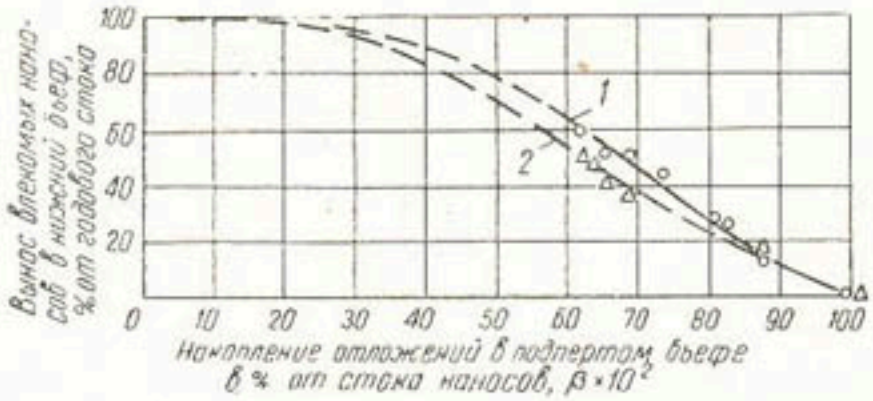


Рис. 54. Кривые зависимости выноса влекомых наносов в нижний бьеф низконапорных плотин от накопления отложений в их подпертом бьефе (считая от начала поступления их в нижний бьеф).

1—модель, *2*—натура.

с переменной степенью. Для участков рек с уклонами 0,003 ÷ 0,009 эта степень изменяется в пределах средних значений — 1,3 — 1,73, из которых верхний предел соответствует первоначальному состоянию после подпора, а нижний — концу II периода формирования. Следовательно, в I и II периоды формирования подпертого бьефа значения степени являются в среднем близкими к степени полукубической параболы (табл. 27).

Таблица 27

Период формирования	n			
	натура (Сары-Курганский узел)	натура (Газалкентский узел)	модель предгорного участка реки	среднее
Момент первоначального подпора	1,7	1,76	1,73	1,73
Конец I периода (начало поступления влекомых наносов в нижний бьеф)	1,61	1,61	1,38	1,50
Конец II периода (количество транспортируемых потоком наносов в нижнем бьефе возрастает до бытового)	1,3	1,42	1,19	1,3

13. Анализ данных по уклонам свободной поверхности в подводящих руслах узлов (табл. 28) свидетельствует о том, что уклоны гораздо меньше бытовых, притом тем меньше, чем больше сжатие зарегулированных участков. Аналитически уклон в подводящем русле при среднем расходе из максимальных наблюденных для трех периодов формирования выражается зависимостью

Таблица 28

Гидроузел	Принцип компоновки	Период формирования	Ширина, м			Уклон				
			действующей поймы реки $B_п$	зеркала в пойме при среднемаксимальном расходе (50% обеспеч.) $B_б$	зеркала в подводящем русле при среднемаксимальном расходе (50% обеспеч.) $B_з$	поймы (русла) i	поверхности воды в пойме $I_б$	в подводящем русле: при среднемаксимальном расходе (50 % обеспеч.) I_1	в подводящем русле: при расчетных расходах: $\geqslant 1$ % обеспеч. I_2	в подводящем русле: при расчетных расходах: $\geqslant 0{,}1$ % обеспеч. I_3
Араван-Сайский (модель)	Использование общей циркуляции и послойный водозабор	III	150	80—90	15	0,014	0,013	0,005	0,008	0,008
Баграм-Тапинский (модель)	То же	III	800—1000	150—200	125	0,0013	0,0012	0,00075	—	0,0012
Ангренский (модель)	Использование общей циркуляции	I II III	140—180	70—90	40	0,01	0,0094	0,0034 0,0040 0,0053	0,007	0,0074
Сары-Курганский (натура)	Использование общей и местной циркуляции	I II	300—600	100—300	35	0,01	0,009	0,0018 0,0035		
Кампыр-Раватский (натура)	То же	III	400—500	200—300	140	0,0045	0,004	0,0028	—	0,004
Пальманский (натура)	Использование местной циркуляции и послойный водозабор	III	150—160	30	30	0,014	0,013	0,008	—	—
Беш-Алышский (натура)	Использование местной циркуляции	III	30	20	15	0,0078	0,0075	0,006	—	—
Кугартский (натура)	Боковой водозабор	III	600	80—100	80	0,012	0,0011	0,007	—	—
Газалкентский (натура)	Послойный водозабор с галереями	I II	600	400—500	400—500	0,003	0,003	0,001 0,0015	—	—
Средние Максимальные Минимальные										

Гидроузел	Принцип компоновки	Период формирования	$\frac{B_з}{B_п}$	$\frac{B_з}{B_б}$	$\frac{l_1}{l_б}$	$\frac{l_2}{l_б}$	$\frac{l_3}{l_б}$	Отношение амплит. колеб. гориз. воды к амплит. колеб. средн. дна		
								при ср. макс. расходе (50 % обеспеч.)	при расчетных расходах	
									≥ 1 % обеспеч.	≥ 0,1 % обеспеч.
Араван-Сайский (модель)	Использование общей циркуляции и послойный водозабор	III	0,10	0,17	0,39	0,62	0, 2	0,2	0,5	1,0
Баграм-Тапинский (модель)	То же	III	0,13	0,62	0,62	—	1,0	1,5	2,0	2,2
Ангренский (модель)	Использование общей циркуляции	I II			0,36 0,43					
Сары-Курганский (натура)	Использование общей и местной циркуляции	III I II	0,25 0,082	0,5 0,18	0,57 0,2 0,39	0,75	0,89	2,3	2,4	2,5
Кампыр-Раватский (натура)	То же	III	0,27	0,56	0,7	—	1,0	—	—	—
Пальманский (натура)	Использование местной циркуляции и послойный водозабор	III	0,2	1,0	0,62	—	—	—	—	—
Беш-Алышский (натура)	Использование местной циркуляции	III	0,5	0,75	0,8	—	—	—	—	—
Кугартский (натура)	Боковой водозабор	III	0,13	0,89	0,63	—	—	—	—	—
Газалкентский (натура)	Послойный водозабор с галереями	I II	0,7	0,9	0,33 0,5					
Средние			0,26	0,62	0,58	0,7	0,86	—	—	—
Максимальные			0,5	1,0	0,8	—	1,0	—	—	—
Минимальные			0,082	0,18	0,2	—	0,62	—	—	—

$$I_1 = kI_б \sqrt{\frac{B_з}{B_б}}, \qquad (35)$$

где I_1 — уклон свободной поверхности в зарегулированном подводящем русле;

$I_б$ — бытовой уклон свободной поверхности;

$B_б$ — ширина зеркала в бытовом состоянии при среднемаксимальном расходе (50% обеспеч.);

$B_з$ — ширина зеркала в подводящем русле при том же расходе;

k — коэффициент пропорциональности, равный к концу I периода 0,35, к концу II—0,50, в III периоде 0,70.

14. Кроме общей направленности в изменениях горизонтов воды и деформациях русла, являющейся следствием занесения бьефа наносами, в зарегулированной части верхнего бьефа происходят чередующиеся вторичные процессы, связанные с изменением расходов и горизонтов воды в течение года (табл. 28).

Несмотря на ограниченность экспериментальных, а также отсутствие натурных данных, имеющиеся результаты исследований позволяют установить общую закономерность в этих процессах: уменьшение амплитуды колебания горизонтов воды по отношению к амплитуде колебаний среднего дна с увеличением степени зарегулированности подводящего русла к узлу, что свидетельствует о самопромываемости зарегулированных подводящих русел в период паводков. Следовательно, на низконапорных узлах, где возможность снижения горизонта воды невелика, преобладающее влияние на эффективность промывок, при всех прочих равных условиях, оказывает ширина бьефа: промыв бывает тем эффектнее, чем у́же бьеф.

Глава IV

ЭКСПЛУАТАЦИЯ НИЗКОНАПОРНОГО ВОДОЗАБОРНОГО УЗЛА

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ УЗЛА

Правильная организация эксплуатации водозаборного узла позволяет получить от него максимум хозяйственного эффекта; она не менее важна, чем выбор правильной схемы, качественное проектирование и строительство сооружений узла. Практика показывает, что неумелая эксплуатация может свести на нет преимущества хороших сооружений. До сего времени вопросам эксплуатации водозаборных узлов не уделяется должного внимания.

В задачу эксплуатации водозаборных устройств входит поддержание сооружений в сохранности, рабочем состоянии при непрерывном стремлении к их улучшению и оперирование водозаборными устройствами для бесперебойного выполнения водозабора по графику потребления.

Большое разнообразие естественных условий, а также индивидуальных особенностей даже у водозаборных узлов только ферганского типа и требований водопотребления вносит много индивидуального в эксплуатацию каждого узла. Относительно сложный механизм действия водозаборных узлов требует искусного управления ими.

Тщательно составленная инструкция по технической эксплуатации с учетом всех особенностей сооружений и условий их работы по отдельным периодам времени — важный элемент успешного выполнения водозабора.

В настоящей главе рассматриваются в основном вопросы технической эксплуатации водозаборного узла применительно к ферганской схеме.

Оборудование водозаборного узла

Для успешной эксплуатации необходимо, чтобы сооружения водозаборного узла были оборудованы плановыми и высотными знаками и другими устройствами для наблюдения за состоянием и работой сооружений, обнаружения и учета возможных повреждений, а также выполнения основного назначения узла — заданного водораспределения.

Наблюдения за осадками сооружений, деформациями русел, фильтрацией и пр. осуществляются с помощью реперов, марок и пьезометров в элементах сооружений.

Надежный основной репер, обеспеченный от осадки, увязывает высотные знаки узла сооружений с государственной сетью высотных знаков.

Для фиксации уровней и учета расходов воды оборудуются по соответствующим правилам водомерные посты, минимум по одному на каждом отводе и на реке в нижнем бьефе плотины. В нужных местах устанавливаются дополнительные водомерные рейки для наблюдения за уровнями.

В бьефах с перекосом водной поверхности наблюдения за уровнями надо вести по обоим берегам.

Если по условиям работы и значимости узла требуются систематические наблюдения за деформациями русел, то они оборудуются закрепленными створами для промеров и нивелировок. Створы привязываются к магистралям, разбиваемым по берегам реки. Частота створов обусловливается желаемой точностью определения объемов размывов и отложений и обычно принимается из расчета расположения их на расстояниях от четверти до половины и, реже, полной ширины заливаемой водою поймы реки[1].

Узел должен снабжаться передвижной контрольно-измерительной аппаратурой соответственно объему наблюдений по расходам, наносам, деформациям, ледово-шуговым явлениям и др.

Обслуживание водозаборного узла

При обслуживании водозаборного узла сооружений можно различать наблюдения за состоянием сооружений с регистрацией замечаемых дефектов, мероприятия по поддержанию сооружений в рабочем состоянии (ремонт), операции по выполнению заданного вододеления и пропуска расходов.

Работу по обслуживанию можно еще разбить по характерным и ответственным (критическим) периодам работы сооружений на 1) пропуск паводков, 2) водозабор в межень при недостатке в реке воды, 3) преодоление ледово-шуговых затруднений.

Наблюдения за сооружениями водозаборного узла разнообразны и важны и не могут быть в полном объеме предусмотрены инструкцией. Поэтому от работников эксплуатации требуется большая инициатива и непрерывное стремление к улучшению работы узла. Необходимо, чтобы люди, которым вверяется эксплуатация водозаборного сооружения, основательно изучили его и относящиеся к нему инструкции, в составлении и улучшении которых они должны принимать самое деятельное участие. Кроме того, они обязаны хорошо знать проектно-строительные документы по узлу и результаты модельных исследований, если они проводились.

Количество и состав наблюдений изменяются в процессе эксплуатации сооружений и по временам года. Следует определить минимальное количество необходимых наблюдений и строго выполнять их. Особенно важны периодические контрольные осмотры (глазомерные) с простейшими зарисовками и записями не только необычных или угрожающих явлений, но и обычного состояния сооружений, что является ценным дополнением к инструментальным замерам.

Не рассматривая всего комплекса необходимых наблюдений и работ, ограничимся некоторыми замечаниями.

---

[1] На участках наблюдения местных явлений, например размывов в нижнем бьефе или отложений наносов перед сооружениями в верхнем бьефе, может потребоваться более частое расположение створов.

В критические периоды работы (паводки, период шугохода) эксплуатация водозаборного узла должна проводиться по специально разработанной для данного узла схеме мероприятий по инструкции, ежегодно (при надобности) пополняемой. Следует заблаговременно, до наиболее раннего возможного срока наступления критического периода, ознакомить работников эксплуатационного штата с принятой схемой мероприятий и проинструктировать для четкого и быстрого выполнения их.

Если рабочая сила колхоза (или совхоза) может быть привлечена для преодоления возможных аварий, то в колхозах (или совхозах) должны быть заранее организованы соответствующие бригады, средства связи и оповещения. Необходимо также установить связь с гидрологическими станциями и пользоваться прогнозами гидрометслужбы.

Меры мобилизационной готовности должны сохраняться до наиболее поздних возможных проявлений критического периода.

Обслуживание сооружений следует организовать так, чтобы «неожиданных» явлений не происходило. Перед паводками важно подготовиться к пропуску плавника, особенно на селеносных реках. Обычно плавающие предметы пропускаются и проталкиваются в нижний бьеф плотины. Это относится не только к речному водозабору, но и к внутрисистемным водовыпускам при перегораживающих сооружениях. Многие реки (саи) Средней Азии в значительной мере, а некоторые и полностью, даже в паводки используются на орошение. Труд, затраченный на пропуск (проталкивание) плавника через верхние водозаборные створы, не облегчает работу расположенных ниже сооружений. Следует организовать вылавливание плавника из реки на верхней по порядку плотине. Для этого требуется оснастить головной вододелитель на реке необходимыми средствами (лебедки, багры и пр.).

Маневрирование затворами и промывы русловых участков

Маневрирование затворами — самая важная и ответственная операция при обслуживании водозаборного узла сооружений.

С целью правильного регулирования водозабора приходится определять не только число открываемых затворов для распределения (деления) воды при разных расходах реки и разном водозаборе, но и порядок и скорости оперирования затворами. При этом обнаруживаются противоречивые требования к маневрированию затворами со стороны разных элементов сооружений узла и русел.

Н. Н. Павловский рекомендовал маневрировать затворами с равномерным открытием их ступенями так, чтобы всегда было обеспечено затопление прыжка для достижения минимума размывов нижнего бьефа. Его рекомендацию можно использовать в первый период эксплуатации сооружений, когда крупные наносы не подошли еще к узлу и когда вопросы размыва нижнего бьефа стоят особенно остро. Такой метод маневрирования затворами хорошо противодействует образованию опасных для устойчивости русел сбойных течений.

Однако пропуск расходов постепенным, равномерным открытием всех отверстий далеко не всегда приемлем по условиям эксплуатации и, в первую очередь, условиям борьбы с наносами. Чтобы отклонить наносы от водоприемника, часто требуется пропустить расходы через определенные и полностью открытые пролеты плотины при наличии других закрытых пролетов. Такой пропуск речных расходов через часть пролетов плотины обычно применяется в схемах, работающих

по принципу поперечной циркуляции с криволинейными подводящими руслами.

Лучшее формирование русел по данным схемам получается при пропуске расходов через пролеты, примыкающие к вогнутому берегу (к водоприемнику), через которые преимущественно и производится сброс воды. При нарастании сбросных расходов пролеты на этих узлах открываются от вогнутого берега к выпуклому, а закрываются в обратном порядке. Лишь первое отверстие, примыкающее к водоприемнику, не рекомендуется открывать полностью. Это исключение из общего правила для такого типа сооружений способствует поддержанию некоторого подпора перед водоприемником (гидравлическое экранирование и отвлечение наносов). Одним из показателей, обусловливающих число открываемых пролетов плотины, является обеспечение определенного соответствия при каждом сбросном расходе ширины работающего фронта плотины ширине естественного русла.

Отступления от правила равномерного открытия пролетов вызываются и другими условиями работы узла:

1) частичное или полное закрытие береговых пролетов за счет пропуска увеличенных расходов по средней части русла иногда оказывается рациональным для предохранения берегов от подмыва;

2) неравномерное открытие пролетов требуется для пропуска плавника, шуги и льда, не говоря уже о случаях аварийного состояния отдельных пролетов, что иногда наблюдается на практике.

В разные периоды работы узла к нижнему бьефу предъявляются противоположные требования. Так, в первый период работы узла отводящее русло подвергается размывам. Для уменьшения их требуется вступление из верхнего бьефа распластанного потока с рассеянной энергией. При угрозе завала нижнего бьефа наносами необходим сброс расходов через малое число отверстий с сосредоточенной энергией. Такой поток с увеличенными удельными расходами способен отбросить наносы дальше от сооружения и дольше сохранять центральное положение стрежня. Широко распластанный поток, вступающий в нижний бьеф, в условиях перегрузки наносами, наоборот, стремится к образованию осередка со свалом к берегам и подмыву их у самого сооружения. Благодаря пониженной транспортирующей способности распластанного потока ускоряется завал отводящего русла.

Следовательно, при конструировании водозаборного узла следует руководствоваться главным образом не минимумом строительных затрат, а идти (что часто и делается) на дополнительные затраты по усилению конструкции сопряжения бьефов для удовлетворения запросов эксплуатации и упрощения обслуживания (пропуск расходов через малое число отверстий проще, чем через все отверстия, равномерно открываемые).

На низконапорных плотинах и, в особенности, на плотицах, работающих с использованием поперечной циркуляции, равномерному пропуску расходов соответствует неравномерное открытие пролетов в зависимости от характера подхода речного потока (угол и скорости подхода, перекос уровней). Поэтому высота открытия пролетов для равномерного пропуска расходов по длине фронта плотины не может быть одинаковой, она должна определяться для каждого пролета тарировкой.

На узлах, работающих без запасной емкости верхнего бьефа (низконапорная плотина, заиленный бьеф) и без автоматических сбросов, очень важно, чтобы скорость открытия отверстий обеспечивала пропуск быстро нарастающего расхода паводка. Быстрое открытие

затворов способствует усилению эффективности неустановившегося режима для промыва бьефов.

С другой стороны, для сохранности сооружений важно соблюдать постепенность при наполнении и опорожнении бьефов; это смягчает эффект неустановившегося режима. Известны случаи повреждения сооружений при резком изменении режима работы. Необходимо строго соблюдать устанавливаемые проектом и опытом и закрепляемые в инструкциях (индивидуальных для каждого узла) темпы и порядок маневрирования затворами.

Продуманным маневрированием затворами и общими периодическими промывками руслового участка можно ослабить вредные размывы и завалы. Этому, к сожалению, уделяется мало внимания; обычно затруднения возникают как бы внезапно.

Не производя своевременных промывов, завалы бьефов иногда доводят до крайних пределов. Некоторые специалисты рекомендуют избегать промыва с целью удлинения срока подхода основной гряды донных наносов к плотине. Такие рекомендации основываются на ложном представлении, ибо в действительности срок общего занесения и заиления подпертого бьефа при отсутствии промывов сокращается за счет выпадения мелких наносов, прикрываемых затем крупными наносами, затрудняющими смыв первых.

Кроме того, периодические промывы способствуют более правильному формированию подводящего русла. При длительном отсутствии больших паводков и использовании одних и тех же затворов для пропуска расходов часть пролетов оказывается «лишней». Затворы этих пролетов приходят в нерабочее состояние, заваливаясь иногда доверху наносами. Открыть пролеты, поднять заваленные наносами затворы очень трудно, а иногда и невозможно. Внезапное наступление большого паводка при таком состоянии узла может причинить разрушения.

Большое препятствие рациональному маневрированию — несовершенство затворов. Здесь уместно упомянуть о балочных (шандорных) затворах, применяемых, к сожалению, на некоторых крупных и ответственных сооружениях.

Преодоление ледово-шуговых затруднений

Борьба с ледовыми затруднениями на водозаборном узле заключается в предохранении сооружений узла от повреждений и обеспечении планового водозабора без допуска в каналы льда и шуги в количествах, опасных для сооружений.

Много внимания должно уделяться сохранению маневренности затворов в морозное время. При наличии электроэнергии эффективно применение электрообогрева пазовых конструкций. При отсутствии специального оборудования прибегают к различным примитивным мерам. Могут быть использованы временные утепляющие покрытия (палатки, будки и т. д.) с установкой в них печей, жаровен и пр. Применяются паяльные лампы, кипяток, производятся околка льда, частые пробные подвижки затворов и др.

Для предохранения от обмерзания с низовой стороны закрытых затворов принимаются меры к уничтожению фильтрации. Чтобы предохранить затворы от примерзания ко льду подпертого бьефа, рекомендуется в некоторых случаях делать вдоль затворов проруби шириной 0,5—1,0 *м* с утеплением их соломой, снегом и т. п. Не следует

перенапрягать подъемники сверх допускаемых нагрузок для сдвига примерзших затворов.

Эксплуатация головных водозаборов в зимних условиях более полно рассмотрена в другой работе гидротехнической лаборатории САНИИРИ [4].

Состав типовой инструкции по технической эксплуатации

Приведенные выше соображения и рекомендации по эксплуатации применительно к схемам компоновки по ферганскому типу охватывают только часть вопросов, количество и характер которых очень разнообразны даже в условиях одного типа сооружений. Это должно быть учтено при составлении каждой индивидуальной инструкции.

В основном же инструкция по технической эксплуатации узла должна включать следующие разделы и параграфы.

I. Описание водозаборного головного узла сооружений и его назначение

II. Служебное оборудование участка головного сооружения
- § 1. Определение границ и ограждение участка
- § 2. Подъездные дороги на участке
- § 3. Служебные и жилые помещения
- § 4. Водоснабжение
- § 5. Связь и сигнализация
- § 6. Освещение
- § 7. Противопожарное оборудование
- § 8. Оборудование по технике безопасности
- § 9. Санитарно-техническое оборудование
- § 10. Оборудование для культурного обслуживания

III. Оборудование для наблюдений за работой сооружений
- § 1. Общие положения
- § 2. Высотные знаки
- § 3. Габаритные знаки
- § 4. Оборудование для наблюдения за горизонтами и учета расходов и стока воды
- § 5. Оборудование для учета деформации русел
- § 6. Оборудование для учета наносов

IV. Организация эксплуатационного обслуживания
- § 1. Задача эксплуатации
- § 2. Штат для обслуживания участка головного сооружения
- § 3. Права и обязанности эксплуатационного штата

V. Обслуживание головного узла сооружения
- § 1. Охрана
- § 2. Надзор

VI. Правила технической эксплуатации

1. Водоподача
   - § 1. Общая организация водоподачи
   - § 2. План водоподачи
   - § 3. Контроль за проведением плана
2. Эксплуатация верхнего бьефа в паводок
   - § 1. Общие положения
   - § 2. Работа верхнего бьефа в паводок
3. Забор воды
   - § 1. Общие положения
   - § 2. Забор воды в межень

§ 3. Забор воды в паводок
§ 4. Забор воды зимой
4. Пропуск воды через плотину
§ 1. Общие положения
§ 2. Пропуск воды через плотину (межень, паводок и зимой)
5. Эксплуатация нижнего бьефа плотины
6. Эксплуатация затворов
§ 1. Маневрирование затворами
§ 2. Уход за затворами и подъемниками
§ 3. Работа при порче затворов и подъемников

VII. Ремонтные работы и запасы материалов для ремонта и аварийных случаев на участке головных сооружений
§ 1. Общие положения о ремонте и порядке его осуществления
§ 2. Запасы и склады материалов для ремонта

VIII. Контрольные производственно-исследовательские работы

IX. Учет работы (паспорт головного сооружения, дневник работы, генеральный план участка головного сооружения и другие материалы).

Глава V

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

КОМПОНОВКА СХЕМЫ

1. Рациональное проектирование водозаборных узлов должно производиться после детального изучения естественного режима источника и учета всех изменений в этом режиме, которые произойдут после сооружения проектируемого узла. Это касается характера руслоформирования в бьефах узлов, находящегося в прямой зависимости от наносного режима источника, величины водозабора на узле, конструкции и компоновки его сооружений и других условий.

Практикой проектирования, лабораторного экспериментирования и эксплуатации низконапорных ($H \leqslant 6$—7 *м*)[1] водозаборных узлов в предгорной зоне Средней Азии установлено, что наилучшие показатели работы наиболее присущи ферганскому типу водозабора, в основу компоновки которого положена идея использования поперечной циркуляции.

2. К существенным преимуществам этой схемы относится простота и надежность в эксплуатации благодаря отсутствию, как правило, закрытых водоводов при малом числе затворов и только поверхностных.

3. Зона распространения данного типа водозабора — предгорные участки рек — характеризуется большой разнотипностью питания, разнообразием в режимах прохождения паводков, большим стоком взвешенных и донных наносов, своеобразием зимнего режима с возможностью усиленного шугообразования на отдельных участках и др.

Большое разнообразие в режимах источника и потребления вызывает необходимость выработки разновидностей ферганского типа водозабора.

Водозаборные узлы могут быть разбиты на две основные группы: а) с водосливными (катастрофическими) сбросами и б) без водосливов. В основу деления узлов на эти группы принимается тип питания, накладывающий основной отпечаток на режим источника в отношении степени равномерности жидкого и твердого стока.

Катастрофические водосливы-автоматы в составе узлов на источниках с снегово-ливневым питанием являются обязательными.

Режим потребления и, особенно, условия водозабора на один или оба берега также вызывают необходимость группирования узлов, но в большей степени в зависимости от конструкции, а не по принципиаль-

[1] При напорах более 6—7 *м* ферганская схема нуждается в специальных лабораторных проработках.

ной схеме их. В данном случае узлы могут быть с водозабором на один или на оба берега. В последнем варианте конструкция сооружений узла в значительной степени усложняется дополнительными сооружениями по передаче части потока на другой (противоположный точке водозабора) берег.

4. Основной отличительный признак водозабора ферганского типа — борьба с наносами путем водоприема у вогнутого берега из криволинейного подводящего русла.

Главные элементы водозабора описываемого типа следующие:

а) криволинейное подводящее русло,

б) щитовая плотина,

в) водоприемный порог, примыкающий к плотине со стороны вогнутого берега.

Существенной и обязательной составной частью в некоторых условиях, как отмечалось выше, является катастрофический водослив, примыкающий к плотине со стороны выпуклого берега[1]. Включение автоматически действующего катастрофического водослива в состав гидроузла обусловливается расположением водозабора на водотоке с быстро нарастающими внезапными паводками. При большом коэффициенте водозабора в период влечения рекой наносов трудно обеспечить надлежащее направление к водоприемнику потока, имеющего тенденцию к блужданию в малую воду. Сбросной катастрофический водослив, уменьшая ширину подводящего русла в концевой части, помогает преодолеть это затруднение. Если водослив выступает в подводящее русло, он может выполнять роль шпоры, направляющей поток малого расхода к водоприемнику. Иногда для этой цели в подводящем русле ставятся специальные шпоры, затопляемые высокими водами.

5. Ферганская схема — по существу схема одностороннего водозабора, так как поперечная циркуляция, отметая наносы от вогнутого берега, перегружает поток у выпуклого, где водоприем недопустим, за исключением особых случаев.

Использование схемы для двустороннего водозабора осуществляется переброской части принятой воды на другой берег дюкером в плотине. Возможна подача и акведуком как самостоятельным сооружением в нижерасположенном створе реки.

6. Ответственные функции водозабора в ферганской схеме выполняются крупномасштабными конструкциями простых форм (подводящее русло, открытый катастрофический водослив, открытый водоприемный порог). Действие этих элементов, естественно, гармонирует с гидрологическим режимом и режимом водопотребления. Действительно, влечение наносов резко возрастает с расходом реки, но так же автоматически возрастает защитное действие циркуляции пропорционально квадрату скорости в реке. При малых расходах, когда циркуляция ослабевает, резко снижается и количество как наносов, так и плавника. Если в этот период потребуется усиление противонаносных мероприятий, для борьбы с наносами могут быть рекомендованы и более сложные конструкции в виде промывников, лотков, а также нанососбросных порогов-галерей типа рекомендованного для Арысь-Туркестанского, Куйлюкского (I вариант) и Навоинского гидроузлов.

---

[1] На Куршабской плотине этот принцип нарушен (водослив осуществлен на вогнутой стороне), вследствие чего плотина работает не совсем удовлетворительно за счет перегрузки донными наносами сбросных отверстий.

ПОДВОДЯЩЕЕ РУСЛО

7. Вопрос о регулировании русла реки при водозаборе в условиях Средней Азии неотделим от общей схемы водозаборного узла. Зарегулированное подводящее русло — одна из основных частей водозабора ферганского типа; оно должно иметь криволинейное очертание в плане для обеспечения при всех расходах устойчивого (в определенном направлении) подхода воды к водоприемнику.

8. Подводящее русло должно удовлетворять следующим общим требованиям:

а) пропускать все расчетные расходы реки без нарушения прочности ограждающих его берегов;

б) предохранять поток от блуждания, особенно в концевой части перед водоприемным порогом, при малых расходах;

в) обеспечить постоянство подхода потока к водоприемнику под расчетным углом, чтобы сбросная часть речного потока получала необходимый изгиб перед водоприемником для отвлечения наносов.

9. Подводящие русла могут быть одиночной и двойной кривизны, с катастрофическим водосливом или без него. В первом случае различаются две части подводящего русла: до катастрофического водослива и в его пределах. К подводящему руслу, в широком смысле, кроме него самого, образованного более или менее параллельными берегами, относятся и сооружения, сопрягающие это русло с коренными берегами поймы для направления потока в него и предупреждения обхода плотины рекой. Сопряжение рекомендуется выполнять струенаправляющими дамбами, косо располагаемыми в пойме под углом около 45° к направлению поймы и ее берегов. Струенаправляющие дамбы сопрягаются с подводящим руслом по плавным кривым, так как угловатые выступы создают неплавное обтекание с фокусами размыва. По тем же соображениям не рекомендуется устройство водоотбойных шпор. Исключением могут быть лишь затопляемые шпоры непосредственно у водоприемника, если другими конструкциями не удается направить речной поток к водоприемнику при малых расходах.

В отношении планового расположения подводящие русла могут иметь значительные различия в зависимости от общих схем гидроузлов. Простое решение может быть получено при расположении плотины у одного из берегов поймы. При плотине в средней части ее очертание берегов подводящего русла более сложно.

10. Для определения проектной ширины криволинейного подводящего русла по урезу воды в метрах рекомендуется использовать формулу С. Т. Алтунина (7) с некоторыми изменениями числовых значений.

$$B = A\frac{Q^{0,5}}{I^{0,2}},$$

где Q — расход обеспеченностью не 3—10%, как рекомендовалось автором, а максимальный расход обеспеченностью от 3 до 50%; расчетный расход с наибольшим процентом обеспеченности принимается для участка русла со значительным сужением (при введении в схему катастрофического водослива).

I — бытовой уклон водной поверхности реки;

A — коэффициент, характеризующий устойчивость ширины; меньшие значения берутся для участков рек с большими уклонами [1].

При расходах обеспеченностью >10% коэффициент A подлежит уточнению.

По среднему расходу $q = \frac{Q}{B}$ для устойчивого по глубине русла определяются средние расчетные глубина и скорость из выражения (9)

$$q = hv.$$

Необходимо, чтобы средняя скорость v на вертикали была руслоформирующей, определяемой уравнением (10)

$$v = v_ф h^{\alpha},$$

где $v_ф$ — руслоформирующая скорость при глубине $h = 1$ *м*, принимаемая по нормам допускаемых неразмывающих средних скоростей течения для несвязных грунтов, отнесенная к самым крупным наносам русла;

h — искомая глубина;

α — коэффициент, зависящий от относительной шероховатости русла. Для расчетных условий α может быть принята, по С. Т. Алтунину, равной $\frac{1}{5}$. По зависимостям (9) и (10) получаем соотношение $q = v_ф h^{1+\alpha}$, из которого определяем h.

11. Ширина подводящего русла в пределах катастрофического водо слива должна быть переменной соответственно переменному расходу. Ширина его концевой части определяется по величине расчетного расхода, пропускаемого через плотину с учетом, что концевая часть, примыкающая к плотине, конструктивно выполняется в прочных берегах.

12. Подобранное сечение русла проверяется на пропуск катастрофического расчетного расхода путем наращивания дамб соответственно классу гидроузла с учетом, что при нарастании расхода в наносном русле глубина увеличивается на 0,70—0,3 вследствие размыва дна и на 0,3—0,70 благодаря повышению уровня в зависимости от зарегулированности.

13. Сопротивления, а следовательно, и уклон зарегулированного криволинейного подводящего русла при равномерном режиме определяются при коэффициенте шероховатости, учитывающем материал дна и берегов и степень зарегулированности. Дополнительные сопротивления от кривизны русла приобретают практическую значимость лишь при больших скоростях и кривизне. В узком с бетонированными берегами русле умеренной кривизны ($\rho = \frac{r}{B} = 5 \div 6$) уклон может снижаться до двух раз против бытового уклона реки.

14. При назначении радиуса кривизны подводящего русла должны учитываться потребная интенсивность циркуляции, благоприятность гидравлики русла и лучшее приспособление к топографии и геологии места. Нежелательно использование величины относительного радиуса по оси ($\rho = \frac{r}{B}$) менее $3 \div 4$. Хорошие результаты получены при $\rho = 4 \div 6$. Меньшее значение относится к руслам с большими скоростями, когда поток менее способен к изгибу, а циркуляция становится интенсивнее.

15. Длина криволинейного подводящего русла, выражаемая в безразмерных единицах $\lambda = \frac{L}{B}$, зависит от местных условий. При пониженных требованиях к отвлечению наносов и благоприятном подходе реки (устойчивый участок прямой или положительной кривизны) длина русла минимальна.

Для средних условий пойменности относительная длина подводящего русла $\lambda = 4 \div 6$ способна обеспечить выправление потока на подходе к водоприемнику. В случае прямолинейного входа в зарегулированную часть минимальная длина приближенно выражается равенством $\lambda = \sqrt{2\rho}$.

16. Глубины размыва как у береговых дамб подводящего русла, так и у струенаправляющих, перекрывающих пойму реки, зависят от погонного расхода потока, угла его свала на дамбу, величины заложения откоса дамбы и его шероховатости. При блуждании потока по пойме разные участки струенаправляющих дамб подвергаются воздействию навалов речного потока периодически. Участки входа в подводящее русло — наиболее угрожаемые места, так как здесь значительные массы воды могут подходить под большим углом к направлению дамбы.

17. К дамбам применим обычный расчет крепления речных берегов.

18. Криволинейное подводящее русло, обладающее свойствами плесового участка реки, заносится наносами при малых расходах реки и самопромывается с нарастанием этих расходов в рабочих условиях, т. е. без выключения водозабора, что является одним из больших преимуществ водозабора ферганского типа.

ЩИТОВАЯ ПЛОТИНА

19. Положение щитовой плотины в общей схеме узла принимается в тесной увязке с размещением всех других вододелительных сооружений.

При наличии в схеме бокового водослива щитовая плотина размещается почти фронтально к движению речного потока, а в схемах без катастрофических водосливов (при ледниковом или смешанном типе питания) — под углом к речному потоку и в такой степени, чтобы по возможности отсутствовало расширение подводящего русла при сопряжении.

20. Заложение порога плотины при относительном водозаборе[1] более 30%, как правило, производится не ниже отметки среднего дна основного русла. При водозаборе больше 50% он может быть заложен с превышением среднего дна основного русла на 0,8—1,0 *м*.

Точный выбор отметки заложения порога диктуется характером профиля русла (вогнутый, выпуклый), условиями гашения избыточной энергии потока в нижнем бьефе, режимами источника и потребления, а также другими особенностями участка (наличие карьеров по разработке грунтов и пр.) и соображениями экономики.

В условиях обильного стока донных наносов и большого относительного водозабора целесообразно предусмотреть наращивание порога плотины. При превышении уклона русла на нижележащем участке над уклоном вышележащего порог закладывается на более пониженных отметках.

---

[1] Процент водозабора исчисляется от среднего по водности года за период движения донных наносов.

21. Ширина плотины определяется пропускной способностью, стремлением успешной борьбы с влекомыми наносами при водозаборе и экономикой. В узлах с катастрофическими водосливами ширина щитовой части принимается только с учетом поддержания русловой поперечной циркуляции и является наименьшей; в схемах без водослива она определяется главным образом обеспечением требуемой пропускной способности, а поддержание общерусловой циркуляции в потоке достигается косым расположением плотины.

Ширина пролетов плотины принимается в соответствии с принятым типом щитового устройства и гидрологическим режимом источника, но так как в данном типе узла маневрирование затворами играет существенную роль в общей борьбе с наносами при водозаборе, количество пролетов в схеме без катастрофического водослива не должно быть менее трех.

22. Косое расположение плотин сопровождается значительным ухудшением гидравлики и резким снижением пропускной способности (определяемым подбором), что и лимитирует применение подобного расположения. В отдельных случаях, для достижения приемлемой гидравлики и сохранения требуемой пропускной способности, можно переходить на криволинейное или ломаное очертание плотины в плане, сочетающееся с кривизной подводящего русла.

Если при предельно косом расположении и криволинейности плотины не обеспечивается успешной борьбы с наносами, будет целесообразным в условиях ледникового питания включить в схему узла водослив без щитов с возможностью его работы ежегодно, в паводок.

23. При расчетах пропускной способности и конструировании отдельных элементов плотины особое внимание должно уделяться обтекаемости бычков, плавности сопряжения с понурной частью и сопряжениям плотины с примыкающими сооружениями. В частности, форма оголовка бычка должна учитывать условия подхода потока при максимальных расчетных расходах, что в значительной степени компенсирует понижение пропускной способности от косого расположения плотины по отношению к руслу и потоку.

Пропускная способность пролетов плотины рассчитывается по обычным рекомендуемым формулам гидравлики с учетом неравномерности протекания потока по фронту и выбора соответствующих коэффициентов расхода.

24. Отметки верха устоев и быков плотины, а также примыкающих к ней участков дамб должны устанавливаться по существующим нормам для гидротехнических сооружений соответственно с классом их и возможным повышением напора у вогнутого берега за счет циркуляции.

В отдельных случаях на участках вогнутого берега вместо общего поднятия дамб можно ограничиваться устройством парапетов высотой не более 0,5 *м*. При этом необходимо обеспечение прочного стыка с креплением откосов, особенно при разнотипности строительных материалов.

25. Конструкцию флютбета плотины рекомендуется принимать согласно требованиям гашения избыточной энергии и достижению наилучшей защиты его поверхности от износа донными наносами.

В условиях размываемого русла и обильного стока крупных донных наносов наиболее рациональной является конструкция флютбета с коротким водобоем и заглубленным низовым зубом. С уменьшением крупности и величины стока донных наносов водобой удлиняется, а заложение низового зуба повышается.

В соответствии с требованиями гидротехнического расчета особое внимание следует уделять конструкции и глубине заложения понура, чтобы при необходимости его можно было удлинять и тем самым компенсировать укорочение водобоя.

26. Профиль флютбета рекомендуется принимать обеспечивающим безотрывное протекание потока и по возможности исключающим движение наносов большими скачками. При этом понур необходимо выполнять с обратным уклоном и сопряжение его с порогом плотины производить без уступа, протяженность водосливного порога плотины (горизонтальной части) принимать наикратчайшей с размещением перехода к наклонному водоскату в непосредственной близости от пазовых устройств для рабочих затворов.

Длина наклонной части диктуется оптимальным значением ее уклона и заглублением концевой части. В условиях прохождения крупных донных наносов и при напорах перед плотиной 2÷6 *м* уклон водоската необходимо принимать не более чем 1 : 3, а длину концевой горизонтальной части по возможности наикратчайшей. Благоприятным в смысле повышения эффекта гашения кинетической энергии потока является заложение концевой части на пониженных отметках.

27. Глубина заложения низового зуба устанавливается с учетом величин местного и общего размыва. Эти виды размыва рассчитываются по наиболее подходящим по условиям сопряжения методам: Е. А. Замарина, М. С. Вызго, А. Н. Патрашева, И. И. Леви, С. Т. Алтунина, И. А. Бузунова, Н. Т. Смольянинова и др.

Ввиду трудности учета всех условий при расчетах размывов и особенно сбойности потока на отдельных участках нижнего бьефа желательна пригрузка низового зуба крупным отборным камнем, вплоть до специально изготовленных бетонитов, блоков.

28. Конструкции гасительных устройств в нижнем бьефе плотин на источниках с крупными донными наносами и большим стоком их, несколько в ущерб гасительным свойствам, должны приниматься более простыми и наилучшим образом поддающимися защите от износа наносами. Заслуживают внимания сплошной трамплин и водосливной носок.

Распределение гасительных устройств по ширине водобоя должно учитывать характерную для данного типа водозабора неравномерность прохождения расходов воды и наносов по ширине плотины.

29. Основным стремлением при проектировании конструкций боковых сопряжений должно быть полное или частичное устранение вредного действия боковых вальцов и связанных с ними местных размывов, для чего необходимо 1) исключить отрыв потока от боковых стенок или откосов ниже зуба и тем самым недопустить образования боковых вальцов, или 2) ослабить вредное действие боковых вальцов за счет их нейтрализации, изменения формы и положения, или 3) перевести зону отрыва потока, а следовательно, и боковые вальцы на водобой.

Первое, как известно, достигается устройством длинных боковых стенок, шпунтового или свайного ряда или откоса из каменной наброски, что не всегда выгодно и возможно. Второе выполняется постепенным, в зависимости от напора, а следовательно, и скорости течения на водобое, расширением водобоя в плане (10÷24°), установкой на боковых частях его косых струенаправляющих стенок, предназначенных для ускорения растекания потока и нейтрализации боковых вальцов, резким отворотом боковых сопряжений (70÷90°), сделанных в виде откосных креплений. Третье может быть достигнуто устранением бо-

ковых направляющих стенок на водобое, являющихся продолжением устоев плотины и придвижки боковых откосных сопряжений к щитовой линии.

В случае невозможности по тем или иным причинам осуществления вышеперечисленных рекомендаций по сопряжению водобоя с берегами представляется целесообразным искусственное изменение деформаций русла в нижнем бьефе в желаемом направлении. В частности, заслуживает внимания идея перераспределения потока и донных наносов, сходящих с водобоя, с таким расчетом, чтобы донные струи потока за концевым зубом водобоя были направлены к берегам и увлекали бы в том же направлении донные наносы. Это достигается придванием пространственного изгиба или излома концевой части водобоя. Конструктивно это выполняется установкой на конце водобоя гасителей разного размера в плане и по высоте (трамплины и виражные плоскости), устройством по краям конца водобоя косынок или вообще путем придания концевой грани водобоя (зуба) вогнутых очертаний в плане и профиле. При значительной неравномерности сбрасываемого потока и наносов по фронту плотины необходимо введение асимметрии в пространственный изгиб (излом) конца водобоя.

30. Защита поверхностей бетонных флютбетов от износа их донными наносами должна производиться с учетом возможного местоположения, степени и характера износа.

Обязательно и в первую очередь должны защищаться участки, по которым проходит наибольшая доля донных наносов. На узлах ферганского типа эти участки составляют около половины поверхности флютбета (часть, прилегающая к выпуклому берегу подводящего русла). Гасители в виде зубьев, трамплинов, пирсов или стенок, в случае установки на противоположном крае водобоя, также должны быть защищены с напорной стороны. При наличии в реке крупных донных наносов желательно защищать всю поверхность водобоя. Это осуществляется с одновременным стремлением выработки по возможности наиболее короткой конструкции водобоя.

31. Облицовочный материал для защиты подбирается не только в зависимости от величины стока и крупности проходящих донных наносов, но и с учетом вида механического воздействия наносов на поверхность флютбета, что в основном зависит от компоновки сооружений, профиля водобоя и в какой-то степени от условий эксплуатации сооружения. Наиболее интенсивный износ бетонных и облицовочных поверхностей происходит при воздействии наносов, сочетающем удар с трением. В условиях воздействия на поверхность флютбета крупных донных наносов рекомендуется применять:

из металлических облицовок — чугун и сталь;

из каменно-бетонных — бетон с большим заполнением камнем из плотных и твердых пород (базальты, граниты и др.), бутовую кладку из камня тех же пород;

из деревянных — брусчатку, кругляк из лиственницы и другого дерева, менее всего подверженного гниению и разрушению в условиях переменного воздействия воды, воздуха и солнца.

При износе бетона только истиранием (без удара) для облицовки бетонных поверхностей могут быть применены плиты из литого базальта на анкерах. Стале-, асбесто- и пластобетоны требуют изучения и проверки в натурных условиях.

32. При проектировании того или иного типа облицовки необходимо уделять особое внимание стыкам как наиболее уязвимым участкам при движении донных наносов.

33. В условиях сбойного протекания потока и интенсивного движения влекомых наносов возможны повреждения не только флютбета, но и стенок быков и устоев (включая и пазы для затворов). В связи с этим необходимо распространять защитную облицовку от износа и на нижнюю часть вертикальных элементов на высоту 0,5—1,0 *м*, в зависимости от величины стока, крупности наносов и степени участия элемента в общей работе по сбросу их. В этой же связи следует считать также обязательным устройство ремонтных пазов в бычках и устоях.

ВОДОПРИЕМНИК

34. Водоприемники в составе узлов ферганского типа располагаются на вогнутом берегу с целью наилучшей борьбы с наносами и плавающими телами.

35. В случае подачи воды на оба берега точка водозабора размещается на стороне наибольшего расхода, а передача меньшего расхода на противоположный берег производится с помощью дюкера или другого, более удобного в каждом конкретном случае, водовода.

36. Водоприемник и его сопрягающие участки, во избежание значительного сжатия струй и потерь напора, должны быть по возможности с плавными очертаниями.

37. Элементы водоприемника необходимо конструировать и рассчитывать в первую очередь в зависимости от величины водозабора и достижения успешной борьбы с наносами.

38. Высота водоприемного порога принимается $0,4 \div 0,75$ от нормального напора над порогом плотины, где верхний предел соответствует водозабору, достигающему в период движения влекомых наносов более 70%.

39. Длина порога диктуется в основном принятой высотой порога, пропускной способностью, правильным расположением по отношению к речному потоку и плавным сопряжением с регулятором водоприемника в пределах аванкамеры.

40. Форма порога в плане и профиле при водозаборе до 30% на эффективность борьбы с наносами не влияет.

41. Понижение пола аванкамеры за водоприемным порогом (если это увязывается с заложением дна канала) является желательным, так как позволяет принять более суженную конструкцию регулятора и связанное с этим плавное сопряжение откоса вогнутого берега русла с регулятором, а также допускает более надежную работу из-под щита при повышенных расходах в реке.

42. Гидравлический угол отвода, принимаемый относительно участка водоприемного порога, характеризуемого прохождением наибольших удельных расходов, может быть рекомендован в пределах 60—90°. Нижний предел отвечает водозабору менее 70%, а верхний — менее 30.

43. Фронтальность[1] водозабора (водоприемного порога) —существенный фактор для безнаносного водозабора. Эффективность его возрастает с увеличением фронтальности, которая по данным рассмотренных при обобщении узлов находится в пределах 0,4—1,0.

44. Соотношение средних скоростей потока в вододелительной части узла должно быть таким, чтобы при предельном водозаборе скорость на водоприемном пороге не превышала скорости подхода и полуторного значения скорости сбросной доли расхода вдоль порога.

---

[1] За фронтальность принята величина проекции водоприемного порога на перпендикуляр к оси подводящего русла, отнесенная к ширине русла по урезу.

45. Сопряжение верхнего бьефа с нижним в водоприемниках осуществляется обычными методами путем устройства водобойных колодцев или других конструкций соответственно потребностям.

46. Пропускная способность водоприемного порога и регулятора рассчитывается по существующим формулам гидравлики с учетом своеобразия компоновки этих элементов в общей схеме гидроузла данного типа. Особому учету подлежат фронтальность и коэффициенты расхода.

47. Дюкер, в целях недопуска в него влекомых наносов и крупных плавающих тел (при подаче воды на оба берега), подключается к верхним по течению пролетам регулятора, оборудованным на входе грубой решеткой. Кроме того, желательно устройство у этих пролетов второго порога, если это не приведет к расширению общего фронта регулятора и, главное, к ухудшению плавности его сопряжения с береговым откосом.

48. Для получения наиболее полного эффекта от водоприемного порога как усилителя поперечной циркуляции в потоке сопряжение порога с понуром необходимо осуществлять вертикальной стенкой, а с откосом ведущего берега — предельно возможной из условий производства работ наклонной стенкой ($m = 1{,}0—1{,}25$) с постепенным переходом к основному откосу берега.

49. Конструкцию водоприемника, если это не диктуется условиями транспорта, рекомендуется принимать открытой.

50. Меры борьбы с шугой и льдом выбираются в соответствии с принятой для головного узла схемой зимнего режима. Возможные схемы следующие:

1) аккумулирование шуги в верхнем бьефе;
2) сброс через плотину;
3) транзит через водоприемник и по каналу со сбросом в наиболее удобном месте.

В зависимости от принятой схемы зимнего режима принимаются и разные устройства по борьбе с шугой и льдом.

51. Борьба с проникновением шуги и льда в водоприемник может осуществляться устройством забральных стенок перед пролетами регуляторов, лотков перед регуляторами или над водоприемными порогами и запаней.

Заслуживают внимания (в борьбе с шугой при водозаборе) оборудуемые щитами прорези в примыкающей к плотине части водоприемного порога. Водозабор через прорезь производится из-под щита (при пониженном горизонте в верхнем бьефе) с одновременным сбросом шуги через открытый клапан в ближайшем пролете плотины. На летний период прорези надежно перекрываются на высоту полного профиля порога.

52. В условиях большого насыщения потока плавающими телами и сором, кроме грубых решеток на входе в регулятор, вдоль водоприемного порога устраиваются запани, позволяющие сбрасывать плавник через плотину.

При необходимости предусматриваются приспособления для ручной или механизированной очистки решеток и запаней от плавника.

ЗАНЕСЕНИЕ ВЕРХНЕГО БЬЕФА

53. При расчетах занесения бьефа в первом приближении (рис. 55) могут быть использованы вышеизложенные обобщения (гл. III). Эти расчеты производятся с учетом формы бьефа в плане и схемы ком-

поновки сооружений узла. Подпертый бьеф разбивается на два участка: нижний, в пределах первоначальной длины кривой подпора $L_I = \frac{\Delta H}{I_б}$, и вышележащий. Далее на каждом участке определяются средние уклоны свободной поверхности, причем на первом (нижнем) по зависимости

$$I_I = kI_б \left(\frac{B_з}{B_б}\right)^{0,2}, \tag{36}$$

где L_I — длина первого (нижнего) участка подпора, *м*;

ΔH — подпор у плотины над бытовым горизонтом воды при среднем расходе из максимальных наблюденных, *м*;

$I_б$ — бытовой уклон;

I_I — уклон свободной поверхности на первом (нижнем) участке подпора;

$B_з$ — ширина зеркала в зарегулированном (подводящем) русле при среднем расходе из максимальных наблюденных;

$B_б$ — то же в бытовых (естественных) условиях;

k — параметр, принимаемый к концу I периода формирования равным 0,35, к концу II — 0,50, в III — 0,70.

На втором, вышележащем участке профиль подпора принимается прямолинейным, продолженным от конца первого участка (зона пер-

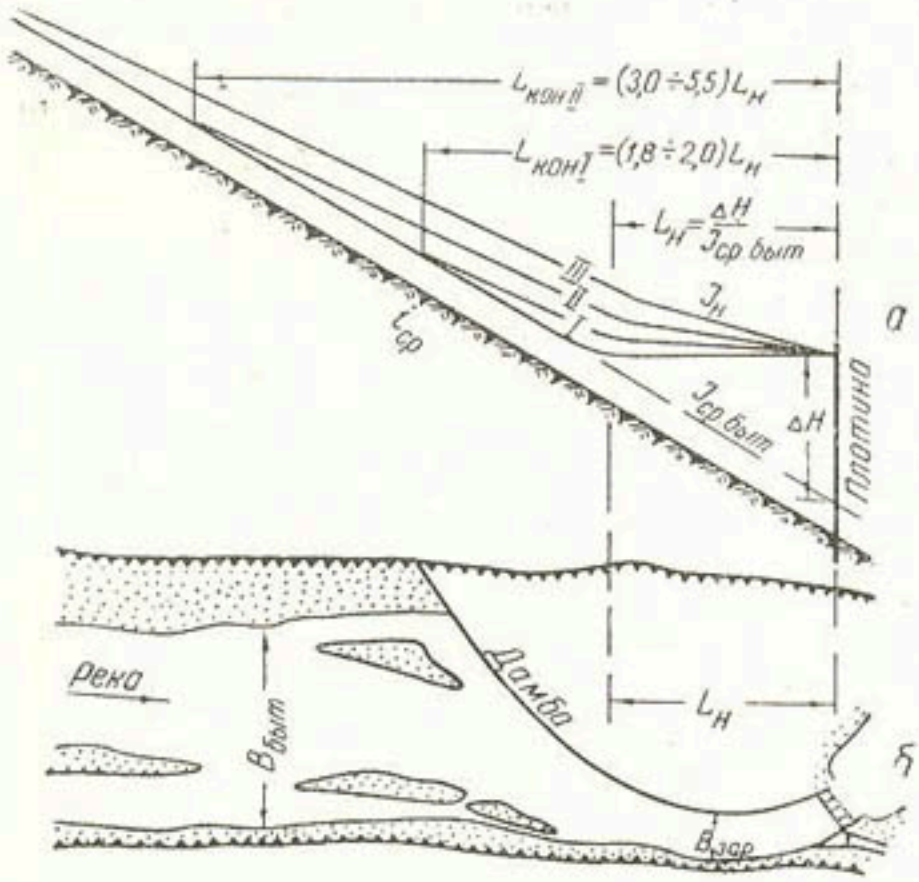


Рис. 55. Схемы к расчету занесения подпертого бьефа по предложению автора (*а* — профили, *б* — план).

$B_{быт}$ — ширина зеркала реки в бытовом состоянии при среднем расходе из максимальных наблюденных; $B_{зар}$ — ширина зеркала в зарегулированном подводящем русле при этом же расходе.

воначального выклинивания подпора) до пересечения с бытовым горизонтом воды. Длина второго участка представляет собой разницу между общей длиной кривой подпора и длиной первого участка и может определяться по зависимости

$$L_{II} = (k_0 - 1)\frac{\Delta H}{I_б}, \qquad (37)$$

где L_{II} — длина второго (верхнего по течению) участка подпора, *м*;

k_0 — коэффициент удлинения подпора, принимаемый равным для узких (русловых) бьефов в конце I периода формирования $1{,}8 \div 2{,}0$, в конце II — $3{,}0 \div 4{,}0$; для широких бьефов в конце I периода 2,0, в конце II — 5,5, в конце IV[1] — $8{,}0 \div 10{,}0$.

54. По рассчитанным профилям и длинам кривой подпора и материалам топосъемок русла (бьефа) определяются объемы занесения по периодам (W).

55. По данным фактических замеров или расчетным зависимостям устанавливается твердый сток для максимального, минимального и среднего по водности года (G).

56. Длительность периодов формирования определяется по формуле

$$T = \frac{W}{\alpha_{ср}\beta_{ср}G}, \qquad (38)$$

где T — длительность занесения, годы;

W — объем занесения, тыс. $м^3$;

G — среднегодовая норма стока влекомых наносов, тыс. $м^3$;

$\alpha_{ср}$ — доля участия взвешенных наносов в занесении подпертого бьефа (в I период формирования 1,9—2,0 — на нижнепредгорных участках, 1,0—1,9 — на среднепредгорных, 1,0 — на вышележащих; 1,0 — во II, III и IV периоды);

$\beta_{ср}$ — коэффициент накопления отложений в подпертом бьефе, зависящий от процента выноса наносов в нижний бьеф (в I период формирования $\beta = 1$, во II, III и IV — $\beta < 1$ и принимается соответственно проценту водозабора средним за период; рис. 54).

Средние значения коэффициента α, учитывающего участие взвешенных наносов в заилении подпертого бьефа в первый период формирования, приведены в табл. 29 (составлена по материалам исследований существующих объектов), а величины $\beta_{ср}$ во II, III и IV периоды — в табл. 30.

57. Относительная простота предлагаемого приближенного метода расчета занесения верхнего бьефа низконапорного узла, проверенного фактическими данными, дает основание считать, что этот метод является приемлемым для приближенных практических расчетов, особенно при отсутствии подробных гидрологических характеристик руслового участка, когда применение иного метода, по точности превышающего точность и достоверность используемых при расчете данных, приведет к излишним и, возможно, громоздким, не достигающим цели расчетам.

Данные в основе зависимостей, используемых в настоящем методе расчета, несмотря на ограниченность, дают возможность производить

---

[1] Значения коэффициента для этого периода формирования приближенные, так как точных данных натурных и лабораторных экспериментов не имеется.

приближенную оценку и корректировать в той или иной мере известные нам отдельные моменты руслоформирования. При этом, конечно, остается необходимость дополнения и уточнения их в процессе натурных и лабораторных исследований. Это касается главным образом III и IV периодов формирования бьефов и особенно нижнего бьефа, в

Таблица 29

Участок реки	Средний уклон участка	Подпор у плотины над бытовым горизонтом, *м*	Ширина затопления в пределах первоначального подпора, *м*	α
Нижнепредгорный	0,0021	12,2	До 50	2,0
	0,0017	3,0	До 700	1,93
Среднепредгорный	0,003	6,5	150—500	1,59
	0,0065	6,5	До 1000	1,82
Верхнепредгорный	0,01	3,0	30—100	1,0
	0,011	1,5	30—50	1,0
	0,012	1,2	100	1,0

Таблица 30

II период			III—IV периоды		
водозабор, %	к концу периода ($\beta_{кон.\ II}$)	$\beta_{ср}$	водозабор, %	к концу IV периода ($\beta_{кон.\ IV}$)	$\beta_{ср} = \frac{\beta_{кон.\ II} + \beta_{кон.\ IV}}{2}$
90	0,88	0,94	90—60	≈0,37	Принимается соответственно значениям граф 2-й и 5-й
80	0,82	0,91	60—30	≈0,30	
70	0,76	0,88	30—5	≈0,1	
60	0,70	0,85			
50	0,65	0,825			
40	0,60	0,80			
30	0,52	0,76			
20	≈0,46	≈0,73			
10	≈0,36	≈0,68			
5	≈0,30	≈0,65			
2	≈0,20	≈0,60			

Примечание. При водозаборе <30% во II период и при любом водозаборе в III, IV периоды формирования значения коэффициента β приближенные, так как определены путем экстраполяции.

значительной мере влияющего на общий ход формирования на всем участке русла, находящегося под воздействием плотины. В частности, от величины общего понижения русла в нижнем бьефе в прямой зависимости находится степень выраженности и продолжительность периодов формирования. Все вместе взятое вызывает необходимость рассматривать данные процессы в комплексе.

58. При достаточном количестве и качестве гидрологических характеристик руслового участка в целях уточнения и сопоставления рекомендуется метод расчета занесения подпертого бьефа узла, предложенный С. Т. Алтуниным и И. А. Бузуновым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин С. Т. Регулирование русел при водозаборе, М., Сельхозгиз, 1950.
2. Алтунин С. Т., Бузунов И. А. Вопросы формирования и расчета русел при водозаборе, Труды Института сооружений АН УзССР, вып. 7, Ташкент, 1955.
3. Боголюбова И. В., Макринова О. В. Экспериментальные исследования естественного потока на закруглении русла, Труды ГГИ., вып. 2 (56), 1947.
4. Вавилов А. С., Захаров В. П., Ушаков А. П. Эксплуатация гидротехнических сооружений Средней Азии в зимних условиях, Ташкент, Госиздат, 1950.
5. Валентин Л. А., Дерлятка Т. И., Науменко Ю. Г., Шишорина Г. И. «Гидротехника и мелиорация, 1961, № 9.
6. Вызго М. С., Исследования Сары-Курганского узла на р. Сох в Ферганской области УзССР, Доклады научной сессии АН УзССР 2—5 сентября 1949 г. в г. Фергане, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1950.
7. Вызго М. С., Никитин Я. А., Шолохов В. Н. «Гидротехническое строительство», 1951, № 11.
8. Егоров С. А. «Гидротехническое строительство», 1934, № 10.
9. Есьман И. Г., Гончаров В. Н. О деформации русел, вызываемых крупными регулирующими водохранилищами, Труды энергетического института им. И. Г. Есьмана АН АзССР, Баку, 1947.
10. Ишаев Ф. Ш. «Гидротехника и мелиорация», 1953, № 9.
11. Леви И. И. Динамика русловых потоков, Л., Энергоиздат, 1948.
12. Мухамедов А. М. Результаты полевых исследований по формированию русла и промыву наносов верхнего бьефа гидроузла на предгорном участке реки, Труды Института сооружений, вып. 7, Изд-во АН УзССР, 1955.
13. Никитин Я. А. «Гидротехника и мелиорация», 1951, № 10.
14. Никитин Я. А. Лабораторные исследования вариантов компоновки водозаборного узла Арысь-Туркестанского канала на р. Арысь, Бюллетень НТИ, № 3, САНИИРИ, 1958.
15. Никитин Я. А., Шолохов В. Н. «Гидротехника и мелиорация», 1954, № 10.
16. Офицеров А. С. Вопросы гидравлики водозабора, М., 1952.
17. Петров А. Г. Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути, Стройиздат, 1951.
18. Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла, Киев, Изд-во АН УССР, 1957.
19. Ушаков А. П., Шолохов В. Н. Ферганский тип водозабора применительно к условиям снегово-дождевого питания источника, Труды САНИИРИ, вып. 91, Ташкент, 1958.
20. Ушаков А. П., Шолохов В. Н., Якштас И. А. Исследование рациональных конструкций плотинных низконапорных узлов, Бюллетень научно-технической информации, № 5, Ташкент, 1959.
21. Шолохов В. Н. К вопросу о формировании русел в бьефах низконапорных плотин на горно-предгорных участках рек, Труды САНИИРИ, вып. 84, Ташкент, 1957.
22. Шолохов В. Н., Тушманов Н. Ф. Результаты гидравлических исследований плотины на р. Кугарт в связи с ее реконструкцией, Труды САНИИРИ, вып. 97, Ташкент, 1959.
23. Якштас И. А. О водозаборе в предгорной зоне (ферганский тип водозабора), Труды САНИИРИ, вып. 91, Ташкент, 1958.
24. Якштас И. А., Прасолова А. Т. «Гидротехника и мелиорация», 1952, № 2.
25. Habermass F. Geschiebeenwanderung in Wärkkanäle und deren Verhinderung, Wasserkraft und Wasserwirtschaft. N 9 und 10, 1935.
26. Müller R. Wasserfassungen in geschiebeführengen Flussen, Wasser und Energiewirtschaft, 9/10/11, 1955.
27. River training and bank protection, Flood control series, N 4, United nations economic commission for Asia an the far east, Bangkok, 1953.
28. The sediment problem, Flood control series, N 5, United nations economic commission for Asia an the far east, Bangkok, 1953.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5
Введение. 6

Глава I. Элементы криволинейных подводящих русел и компоновка схемы водозаборного узла. 8
Поперечная циркуляция и ее роль при водозаборе. . . . 8
Компоновка схемы и подводящее русло. 13
Глава II. Планово-высотная компоновка элементов вододелительной части узла. 43
Щитовая плотина. 43
Водоприемник. 55
Катастрофический водослив. 69
Глава III. Занесение верхнего бьефа плотины. 74
Краткий обзор предложений по расчету формирования русел, применимых в условиях преобладания процессов занесения. . . 74
Динамика занесения бьефа. 81
Глава IV. Эксплуатация низконапорного водозаборного узла. . . . 108
Основные вопросы и рекомендации по технической эксплуатации сооружений узла. 108
Глава V. Общие выводы и рекомендации. 115
Компоновка схемы. 115
Подводящее русло. 117
Щитовая плотина. 119
Водоприемник. 123
Занесение верхнего бьефа. 124
Литература. 128

Редактор *А. Н. Астахов*
Технический редактор *З. П. Горьковая*
Корректор *Л. И. Волковская*

Р03374 Сдано в набор 31/VII-62 г. Подписано к печати 26/IX-62 г. Формат 70×108 1/16 = 4,0 бум. л.—10,96. печ. л. Изд. л. 10,2 (5 вкл.) Изд. № 517. Тираж 650. Цена 86 к. Переплет 15 к.

Типография Изд-ва АН УзССР: Хорезмская, 9. Заказ 809.
Адрес Изд-ва: Куйбышева, 15.