КОСОГОРНЫЕ ВОДОПРОПУСКНЫЕ ТРУБЫ

В.С. Муромов
М.Х. Лившиц

В. С. МУРОМОВ,
М. Х. ЛИВШИЦ

КОСОГОРНЫЕ ВОДОПРОПУСКНЫЕ ТРУБЫ

Москва «Транспорт» 1975

Косогорные водопропускные трубы. Муромов В. С., Лившиц М. Х. М., «Транспорт», 1975, 144 с. Рис. 77, табл. 26, список лит. 22 назв.

В книге рассмотрены вопросы гидравлики, конструирования, расчета и строительства косогорных водопропускных труб под железные и автомобильные дороги. Изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных в ЦНИИСе в связи с разработкой типовых проектов труб, новые данные о гидравлическом эффекте повышенной шероховатости. Даны экспериментально проверенные схемы входных устройств трубы и гасителей энергии потока, методы их расчета, а также способ определения размеров местного размыва отводных русел. Описаны типовые конструкции и способы строительства косогорных труб.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников.

Книгу написали: введение, главы I—IV — канд. техн. наук доц. В. С. Муромов: главы V—VIII и приложения — инж. М. Х. Лившиц. В главе II вопросы сопряжения быстротоков с прямоугольными трубами изложены канд. техн. наук В. И. Климешовым.

М $\frac{3181\text{-}054}{049(01)\text{-}75}$ 54-75

© Издательство «Траиспорт», 1975

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее развитие транспорта, постоянное повышение мощности и маневренности транспортной системы необходимы для обеспечения бесперебойного и своевременного удовлетворения потребностей народного хозяйства и населения в перевозках, ускорения доставки грузов и передвижения пассажиров, а также для создания необходимых резервов пропускных и провозных способностей транспорта.

Одной из важнейших задач развития народного хозяйства нашей страны является дальнейшее ускоренное наращивание экономического потенциала восточных районов, где особо важное значение приобретает строительство Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Эта магистраль пересечет всю Восточную Сибирь и Дальний Восток, прорежет сибирский массив с его неисчерпаемыми природными богатствами и даст могучий толчок развитию новых обширных промышленных районов. Трасса Байкало-Амурской магистрали пройдет по труднодоступным районам Бурятской АССР, Иркутской, Читинской и Амурской областей, Хабаровского края и пересечет семь горных хребтов. Трудности строительства в этих районах обусловлены наличием крутых горных склонов, сейсмичности, вечной мерзлоты, оползней, подмываемых берегов, осыпей, наледей и других явлений, присущих горному рельефу и суровому климату.

Значительную долю новых и реконструируемых сооружений в нашей стране и в особенности на этой магистрали составят косогорные водопропускные трубы. К косогорным условно относят водопропускные трубы, устраиваемые на местности с уклоном более 0,02.

Хорошо организованный водоотвод — необходимое условие надежности земляного полотна и бесперебойного движения на дорогах. Трубы являются основным и наиболее распространенным массовым типом водопропускных сооружений. Они особенно эффективны при пересечении глубоких логов высокими насыпями. От правильного назначения размеров водопропускных труб во многом зависит дальнейшая эксплуатация как труб, так и дороги в целом.

Водный поток выше косогорной трубы уже приобретает бурное состояние, и поведение его определяется преобладанием кинетической энергии. Тело трубы с учетом таких условий обычно устраивают из звеньев, укладываемых горизонтально с уступами, которые при пропуске водотока гидравлически действуют как повышенная шероховатость. Иногда трубам или только быстротокам специально придают повышенную шероховатость для уменьшения скорости течения воды.

Гидравлика труб высокой шероховатости до недавнего времени была изучена недостаточно. Обычные способы расчета течений воды в быстротоках переменного сечения базировались на допущениях одномерной гидравлики, согласно которой при конкретных расходе и поперечном профиле русла характеристика потока исчерпывается одной величиной — глубиной потока. Поверхность воды в сечении считалась при этом горизонтальной. Однако к бурному потоку эта схема неприменима, так как в местах сужения его и на поворотах поверхность потока сильно деформируется, а иногда нарушается и сплошность течения. Теоретические решения задачи о движении бурного потока в сужениях и при изменении формы поперечного профиля русла, сопровождаемые такими допущениями, давали результаты недостаточной надежности. В 1964 — 1969 гг. ЦНИИС провел ряд лабораторных гидравлических исследований по уточнению характера работы косогорных водопропускных труб для использования данных Ленгипротрансмостом при разработке типовых проектов конструкции таких труб.

По форме поперечного сечения косогорные трубы сооружают прямоугольными или круглыми; овоидальные и другие сечения таких труб в последнее время не применяют в нашей стране. В зависимости от материала звеньев различают трубы железобетонные и бетонные, встречаются и каменные.

Проведенное в 1962 г. Ленгипротрансмостом обследование косогорных труб под железными и автомобильными дорогами показало, что трубы сооружались в основном по индивидуальным проектам. Отсутствие единых проектных решений порождало большую разнотипность элементов труб. Создание в последние годы типового проекта унифицированных косогорных водопропускных труб сыграло важную роль для их эффективного строительства.

В настоящее время для железных и автомобильных дорог разработаны единые конструкции круглых и прямоугольных косогорных труб. Конструкция средней части труб запроектирована с учетом возможности применения железобетонных круглых и прямоугольных звеньев, используемых в равнинных условиях. Такая унификация звеньев позволяет изготавливать их на заводах железобетонных конструкций по уже отработанной технологии. Кроме того, разработаны конструкции быстротоков и гасителей энергии потока из сборного железобетона и монолитного бетона.

Большое разнообразие климатических, топографических и геологических условий, характерное для горных и предгорных районов, требует повышенного внимания к определению необходимого отверстия трубы при использовании типовых конструкций. Занижение отверстия приводит к увеличению подпора перед трубой, в результате чего может возникнуть напорный режим работы трубы; при этом сквозь швы между звеньями вода будет проникать в насыпь, а на выходе из трубы скорость течения может превысить допустимую величину. Может также появиться опасность перелива воды через насыпь, а образование большого подпора перед трубой может привести к потере устойчивости насыпи вследствие фильтрации воды через нее.

Обычно косогорная водопропускная труба имеет следующие конструктивные части: быстроток с входным участком, переходное устройство от быстротока к трубе, среднюю часть или тело трубы, гаситель энергии потока на выходе из трубы и отводное русло с укреплением. В конкретных случаях устройства трубы некоторые из этих частей могут отсутствовать. Быстроток может располагаться как с верховой, так и с низовой стороны дороги. Кроме того, в состав косогорной трубы иногда входят также водоприемные колодцы, располагаемые перед входом в трубу. При размещении труб в узких логах с большим уклоном, когда необходимо сбросить воду с большой высоты, устраивают шахтные колодцы, которые располагают с верховой или с низовой стороны в зависимости от геологических условий и характера продольного профиля лога. Консольные сбросы применяют или как самостоятельные сооружения или как устройства для сопряжения с отводным руслом на крутых косогорах.

При проектировании косогорных труб исходят из следующих положений.

Расход, пропускаемый косогорной трубой, как правило, не должен превышать расчетного расхода равнинной трубы того же поперечного сечения. Косогорная труба должна обеспечить пропуск наибольшего расхода при безнапорном режиме протекания. Не допускается в расчетах учет аккумуляции воды перед насыпью. Если местные условия не позволяют применить типовую конструкцию, то в нее вносят необходимые изменения и в редких случаях прибегают к индивидуальному проектированию.

Избегают устройств, способствующих отложению наносов, а также застою и замерзанию воды. Например, в водобойных стенках, ребрах шероховатости и других аналогичных элементах конструкции предусматривают отверстия для стока воды, расширяющиеся в низовую сторону во избежание их засорения. В местах перехода от одного элемента конструкции к другому не допускают поперечных выступов в сторону потока и резких сужений. При необходимости изменить форму сечения

водопропускного тракта используют экспериментально проверенные схемы. Не применяют повышенную шероховатость на водотоках, несущих гравийно-галечные наносы. Обеспечение повышенной шероховатости устройством поперечных ребер допускают в быстротоках или трубах отверстием не менее 1,25 м, если это не вызовет больших затрат на очистку от льда и наносов в период эксплуатации. Боковые стенки открытых лотков (быстротоков) принимают не менее чем на 20 см выше расчетного уровня воды с учетом аэрации потока. Принимают специальные меры против засорения трубы, если поток приносит бурелом, карчи, камни и т. п.

Теоретические и экспериментальные основы гидравлических и статических расчетов сооружения, принципы его конструирования и строительства должны быть направлены на более рациональное обеспечение водоотвода в конкретных условиях строительства дороги.

Глава I

ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ В БЫСТРОТОКАХ

Обычно быстроток входит в состав водопропускного сооружения как элемент, подводящий воду от естественного лога или нагорных канав к полотну дороги, где расположена собственно труба, но иногда его применяют и как самостоятельное сооружение.

Равномерное движение воды. Движение жидкости в русле (канале) называется равномерным, если по длине потока форма и размеры его поперечного сечения, а также распределение скоростей в сечениях остаются неизменными. Если хотя бы одно из этих условий не соблюдено, движение считается неравномерным. При равномерном движении гидравлические элементы потока связаны между собой формулой Шези:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \qquad (1)$$

где Q — расход воды, м³/с; ω — площадь поперечного сечения потока, м²; C — коэффициент Шези, м^{0,5} с; R — гидравлический радиус сечения, равный $\frac{\omega}{\chi}$, м; χ — смоченный периметр, м; i — уклон русла, т. е. синус угла наклона к горизонту.

Коэффициенты Шези определяют по формуле Н. Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y \qquad (2)$$

при $$y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0{,}10), \qquad (3)$$

где n — коэффициент шероховатости.

Коэффициент шероховатости n зависит от характера поверхности дна и стенок русла, омываемых потоком (табл. 1).

Для определения коэффициента C имеются таблицы и номограммы в справочной литературе. Однако удобнее пользоваться графиком скоростной характеристики $W = C\sqrt{R}$ (рис. 1), определяя среднюю скорость течения как $v = W\sqrt{i}$, а расход $Q = \omega v = \omega W\sqrt{i}$.

Глубина h_0, при которой в данном русле обеспечивается равномерное движение заданного расхода воды Q, называется нормальной глубиной. Нормальную глубину определяют подбором по формуле Шези. Для этого вычисляют расходную характеристику $K_0 = Q:\sqrt{i}$, задаются рядом значений глубины h, вычисляют соответствующие им площади сечений ω, находят скоростные характеристики W и расходные характеристики $K = \omega W$. Значение h, при котором $K = K_0$, и будет нормальной

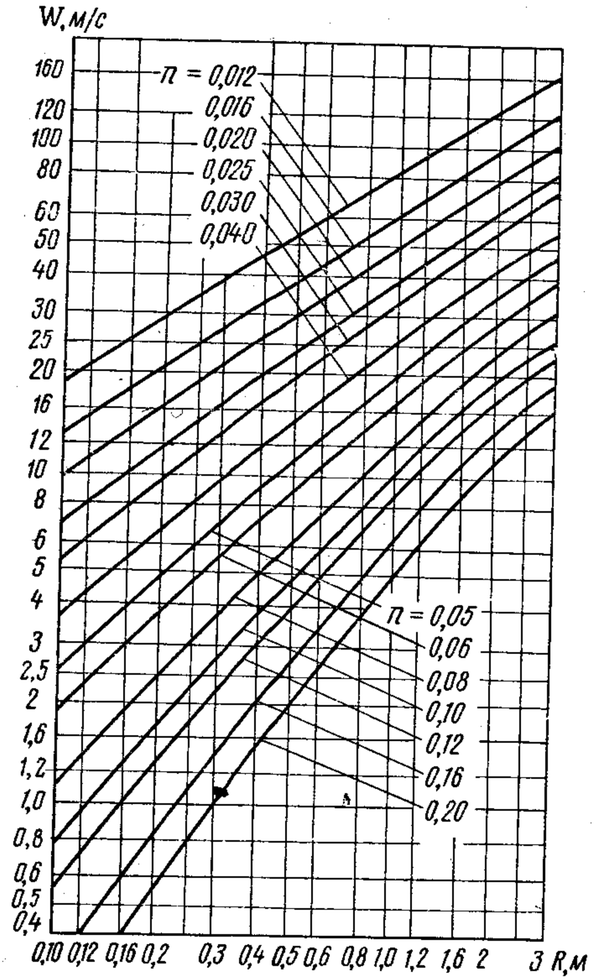


Рис. 1. График для определения скоростной характеристики

глубиной. Для ускорения подбора полезно строить график $K=f(h)$, по которому при $K=K_0$ отсчитывают искомое значение нормальной глубины h_0. Если глубина воды известна, средняя скорость течения легко находится по зависимости: $v=Q:\omega$ или $v=W\sqrt{i}$.

Удельная энергия сечения и критическая глубина. Если обозначим буквой z геодезическую отметку точки на поверхности потока (в некотором сечении его), то величина $E=z+\frac{\alpha v^2}{2g}$ будет гидродинамическим напором или удельной энергией потока в данном сечении, а множитель α — коэффициентом кинетической энергии; он выражается формулой

$$\alpha=\frac{\int_\omega u^3\,d\omega}{v^3\,\omega}\cong 1+3\,\frac{\int_\omega u^2\,d\omega}{v^2\omega},$$

где u — скорость воды в любой точке сечения, т. е. величина, различная для разных точек.

Так как второе слагаемое в правой части формулы не может быть отрицательным, то $\alpha\geqslant 1$; эту величину называют также коэффициентом Кориолиса. Числовое значение его можно вычислить, зная распределение скоростей по поперечному сечению потока (эпюру скоростей). Обычно принимают $\alpha=1{,}1$, а приближенно $\alpha=1$.

Величина $\Theta=h+\frac{\alpha v^2}{2g}$ называется удельной энергией сечения. Она линейного измерения и ее можно выразить определенным числом независимо от высотного положения сечения. Если при неизменном расходе Q в каком-нибудь сечении канала увеличить глубину воды, то увеличится и его площадь ω, а средняя скорость $v=Q:\omega$ уменьшится, и обратно. Поэтому удельная энергия сечения при постоянном расходе воды зависит от глубины, т. е. $\Theta=f(h)$; эта функция графически представлена на рис. 2.

При некоторой глубине $h=h_к$, называемой критической глубиной, удельная энергия сечения Θ имеет минимальное

Таблица 1

Характер поверхности, омываемой потоком	Коэффициент n при состоянии поверхности		
	хорошем	средием	плохом
Безнапорные трубы			
Поверхность из цементного раствора	0,011	0,013	0,015
Прямая бетонная труба без засорения	0,010	0,011	0,013
Бетонная труба с поворотами, соединениями и некоторым засорением	0,011	0,013	0,014
Бетонная необработанная поверхность, выполненная в стальной опалубке	0,012	0,013	0,014
Бетонная необработанная поверхность, выполненная в гладкой деревянной опалубке	0,012	0,014	0,016
Бетонная необработанная поверхность, выполненная в деревянной негладкой опалубке	0,015	0,017	0,020
Кирпичная кладка, покрытая цементным раствором	0,012	0,015	0,017
Бутовая кладка на цементном растворе	0,018	0,025	0,030
Открытые искусственные русла			
Стальная неокрашенная поверхность	0,011	0,012	0,014
» рифленая поверхность	0,021	0,025	0,030
Бетонная затертая поверхность	0,011	0,013	0,015
» поверхность, отделанная мастерком	0,013	0,015	0,016
Бетонная отделанная поверхность (на дне гравий)	0,015	0,017	0,020
Бетонная неотделанная поверхность	0,014	0,017	0,020
Торкрет, хорошо уложенный	0,016	0,019	0,025
» с волнистой поверхностью	0,018	0,022	0,025
Мощение из булыжного камня	0,020	0,022	0,027
» » рваного камня	0,022	0,027	0,030
» с «изюмом»	—	0,040	0,045
Земляные каналы правильной формы в плотном лёссе или мелком гравии с нлистым слоем	0,017	0,018	—
То же, в лёссе или гравни с илистой пленкой	0,017	0,020	0,025
Габионная кладка	0,025	0,027	0,029
Каналы в галечнике	0,025	0,030	0,033
Земляные каналы неправильной формы (с отвалами) заросшие; каменная наброска	0,027	0,030	0,035
Канавы с земляным дном и одернованными или сложенными сухой кладкой откосами	0,028	0,033	0,035
Канавы с одернованными откосами и мощеным дном или грубо высеченные в скале (неправильной формы)	0,025	0,035	0,040
Естественные водотоки шириной до 30 м			
Русла чистые прямые без перекатов и омутов	0,025	0,030	0,033
То же, но при наличии больших камней и растительности	0,030	0,035	0,040

Продолжение табл. 1

Характер поверхности	Коэффициент n при состоянии поверхности		
	хорошем	среднем	плохом
Русла чистые извилистые с заводями и омутами	0,033	0,040	0,045
То же, но при наличии камней и растительности	0,035	0,045	0,050
То же, но при низких уровнях воды, незначительных уклонах и малых живых сечениях	0,040	0,048	0,055
Русла чистые извилистые с заводями и омутами при большом количестве камней	0,045	0,050	0,060
Русла при наличии участков с медленным течением, зарослей и глубоких омутов	0,055	0,070	0,080
Русла с весьма заросшими участками, глубокими омутами или при наличии кустарника и завалов деревьями	0,075	0,100	0,150

значение. Если глубина потока больше критической, то в нем скорость сравнительно мала, и удельная кинетическая энергия $\frac{\alpha v^2}{2g}$ (иначе скоростной напор) невелика сравнительно с потенциальной удельной энергией h. В этом случае поток находится в спокойном состоянии. В обратном же случае, т. е. когда $h<h_к$, в энергетической структуре потока преобладает кинетическая энергия и поток находится в бурном состоянии. Бурный и спокойный потоки ведут себя качественно по-разному и их надо различать. Для суждения о том, является ли данный поток бурным или спокойным, надо знать критическую глубину.

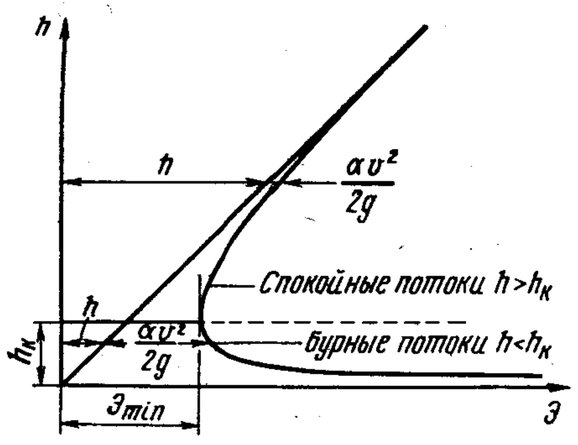


Рис. 2. Зависимость удельной энергии сечения от глубины воды $Э=f(h)$

Анализируя функцию

$$Э = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}$$

на минимум при постоянном расходе Q, можно доказать, что при $h=h_к$

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_к^3}{B_к}, \qquad (4)$$

где $B_к$ — ширина потока поверху.

Так как ω и B — функции глубины, то подбором можно найти значение глубины $h_к$, при котором формула (4) обращается в тождество.

Если русло прямоугольной формы, то ширина его B не зависит от глубины, а $\omega_к=Bh_к$. Поэтому для прямоугольного русла

$$h_к = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \qquad (5)$$

где $q = \frac{Q}{B}$ — удельный расход, м²/с или м³/с на 1 пог. м.

В случае непрямоугольного русла критическую глубину определяют с помощью графиков.

Условие минимума удельной энергии сечения из выражения (4) можно записать и так: $\frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3} = 1$. Безразмерную величину

$$Fr = \frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3} \qquad (6)$$

называют числом Фруда или параметром кинетичности потока. Если $Fr>1$ — поток бурный, если $Fr<1$ — поток спокойный.

Для потока с прямоугольным поперечным сечением $\omega=Bh$, и число Фруда может принимать любой из следующих видов:

$$Fr = \frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^2\omega} = \frac{\alpha Q^2}{g\omega^2 h} = \frac{\alpha Q^2}{gB^2h^3} = \frac{\alpha v^2}{gh}.$$

Иногда для упрощения принимают $\alpha=1$.

Когда $Fr=1$, то $h=h_к$ и поток находится в критическом состоянии.

Если увеличивать уклон русла, по которому равномерно течет вода с расхода Q, то будет увеличиваться и скорость, а глубина убывать. С уменьшением же уклона глубина потока возрастает. Можно подобрать такой уклон, что глубина станет критической. Этот уклон $i_к$ для данного русла и данного расхода воды будет критическим уклоном. Из формулы Шези имеем

$$i = \frac{v^2}{C^2R} = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}.$$

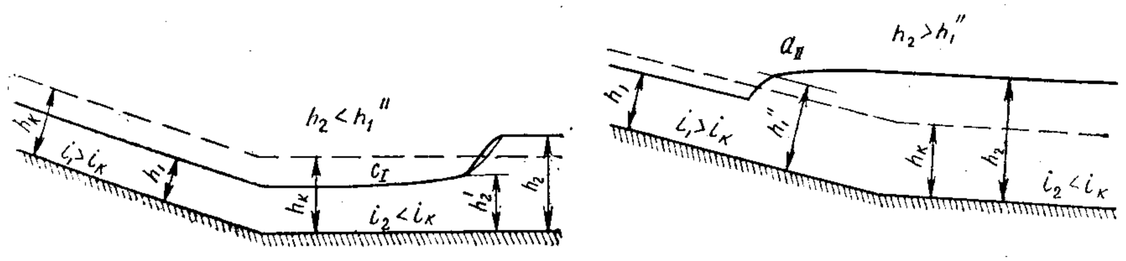


Рис. 3. Схемы образования гидравлического прыжка при уменьшении уклона русла

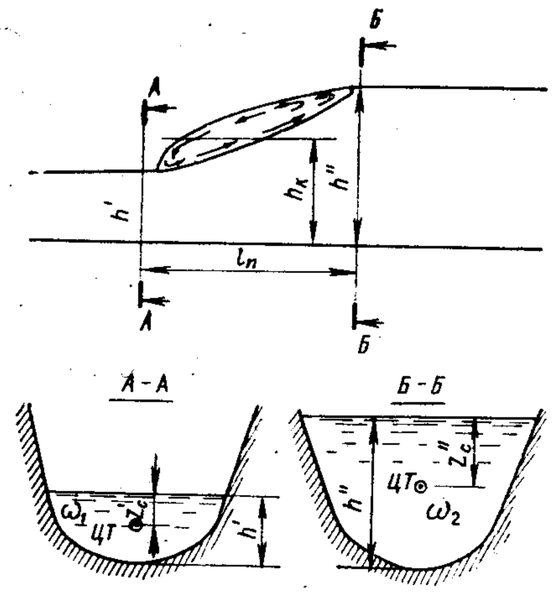


Рис. 4. Схема гидравлического прыжка

Подставляя сюда значения R, ω и C при критической глубине, получим критический уклон

$$i_к = \frac{g\varkappa_к}{\alpha C_к^2 B_к}. \qquad (7)$$

Эта формула удобна для расчетов, когда неизвестен расход.

Гидравлический прыжок. Рассмотрим течение в призматическом русле при резком уменьшении его уклона от $i_1 > i_к$ до $i_2 < i_к$. При равномерном движении на первом (более крутом) участке глубина потока будет меньше критической, а на втором (менее крутом) — больше критической. Это значит, что поток переходит из бурного состояния в спокойное. Такой переход может осуществиться лишь по двум схемам (рис. 3). По второй схеме ($h_2 > h''_1$) на первом участке перед изменением уклона устанавливается кривая подпора типа a_{II}, а сопряжение с бурным потоком происходит в виде гидравлического прыжка, т. е. резким увеличением глубин. По первой схеме ($h_2 > h''_1$) бурный поток распространяется во второй участок и его свободная поверхность приобретает здесь форму кривой подпора типа c_I, а далее глубина резко (прыжком) возрастает до h_2. Вообще переход потока из бурного состояния в спокойное в русле постоянного сечения всегда происходит гидравлическим прыжком.

Глубины бурного потока перед прыжком h' и спокойного за прыжком h'' называются сопряженными глубинами (рис. 4). В призматическом русле любой формы сопряженные глубины связаны уравнением прыжковой функции

$$\frac{Q^2}{g\omega_1} + z'_c\,\omega_1 = \frac{Q^2}{g\omega_2} + z''_c\,\omega_2, \qquad (8)$$

где z'_c и z''_c — глубина погружения центра тяжести соответственно первого и второго сечений; ω_1 и ω_2 — площади этих сечений. Остальные обозначения прежние.

Если глубина h' первого сечения известна, то можно вычислить z'_c, ω_1 и всю левую часть. Зная ее, можно подобрать и для правой части такое значение глубины h'', при которой уравнение (8) обратится в тождество. Это и будет вторая сопряженная глубина.

В случае прямоугольного сечения русла $\omega = Bh$ и $z_c = 0{,}5h$. Подставляя эти выражения в уравнение прыжковой функции и решая его относительно одной из сопряженных глубин, получим формулу

$$h'' = 0{,}5h'\left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1}\right), \qquad (9)$$

где Fr_1 — число Фруда при глубине h'.

Величины h' и h'' можно поменять местами, но тогда вместо Fr_1 под корнем надо написать Fr_2, т. е. число Фруда при глубине h''. Для ускорения расчетов рекомендуется использовать графики, составленные для русел определенных форм.

Неравномериое движеиие воды. Неравномерным движением жидкости называется движение, при котором гидравлические элементы потока вдоль русла не остаются постоянными. Движение будет неравномерным, даже если средняя скорость остается постоянной, но меняются размеры поперечного сечения (например, ширина) или распределение скоростей по сечению при изменении шероховатости смоченной поверхности. Типичный случай неравномерного движения — течение в призматическом русле с переменной глубиной.

Увеличение глубины воды вдоль потока называется подпором, а свободная поверхность воды при этом получает форму кривой (кривая подпора). Если же глубина убывает, т. е. происходит спад глубин, то устанавливается кривая спада. В гидравлике доказано и подтверждено наблюдениями, что в призматическом русле возможны лишь вполне определенные формы кривых свободной поверхности, показанные на рис. 5.

При критическом уклоне поток может быть либо равномерным, либо находиться в подпоре; кривые подпора при критическом уклоне выражаются горизонтальными прямыми; линии критических и нормальных глубин совпадают.

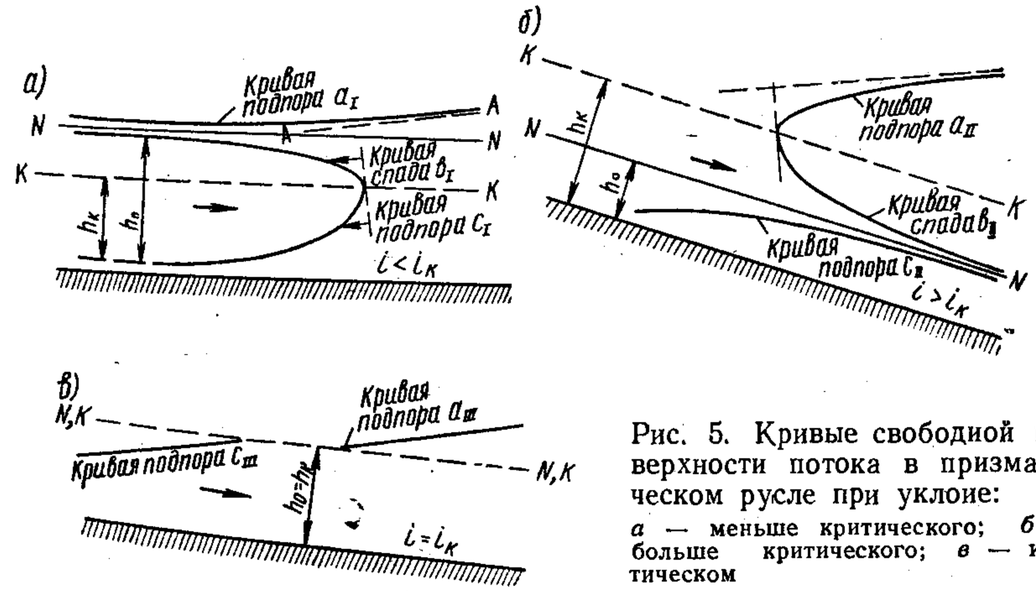


Рис. 5. Кривые свободиой поверхности потока в призматическом русле при уклоие:
а — меньше критического; *б* — больше критического; *в* — критическом

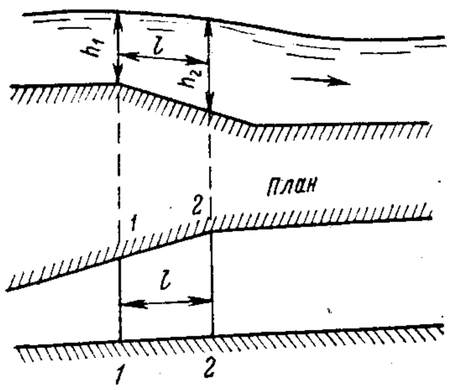


Рис. 6. Продольный профиль и план русла (к построению кривой свободной поверхности методом Чарномского)

Построение кривых свободной поверхности. Вода поступает в быстроток из водоема, образующегося перед насыпью дороги, или из нагорных канав. При этом истечение происходит по схеме водослива с широким порогом и приближенно можно считать, что в начале быстротока устанавливается критическая глубина. Так как уклон быстротока больше критического, то в быстротоке постоянной ширины глубина воды по мере продвижения вниз убывает и получается кривая спада типа b_{II} (см. рис. 5, *б*). Чтобы назначить необходимую и достаточную глубину быстротока и запас высоты его бортов, необходимо знать, как изменяется глубина потока по длине, т. е. построить кривую спада.

Любую кривую свободной поверхности потока, в том числе и кривую спада, можно построить по уравнению Бернулли с учетом потерь напора. Уравнение Бернулли для двух достаточно близких сечений *1—1* и *2—2* потока (рис. 6), находящихся одно от другого на расстоянии l, будет

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w ,$$

где z_1 и z_2 — отметки дна русла в рассматриваемых сечениях; v_1 и v_2 — соответствующие средние скорости; h_w — потеря напора между сечениями.

После подстановки $v = Q : \omega$ и $h_w = \frac{Q^2 l}{\omega^2 C^2 R}$ и переноса членов уравнение Бернулли получает вид

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2} = z_2 + h_2 + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_2^2} + \frac{Q^2 l}{\omega_{ср}^2 C_{ср}^2 R_{ср}} .$$

Отсюда

$$h_2 = h_1 + z_1 - z_2 - \frac{\alpha Q^2}{2g}\left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2}\right) - Q^2 \frac{l}{\omega_{ср}^2 C_{ср}^2 R_{ср}} . \quad (10)$$

Здесь $\omega_{ср}$, $C_{ср}$ и $R_{ср}$ — площадь сечения потока, коэффициент Шези и гидравлический радиус взяты средние для участка между сечениями; их можно принимать как полусумму соответствующих величин в рассматриваемых сечениях.

Учитывая, что $z_1 - z_2 = il$, уравнение (10) можно записать и так:

$$h_2 = h_1 + il - \frac{\alpha Q^2}{2g}\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) - \frac{Q^2 l}{\omega_{ср}^2 W_{ср}^2} , \quad (11)$$

где $W_{ср}$ — средняя скоростная характеристика.

Если русло имеет по длине переменный поперечный профиль (например, суживающийся), то уравнение Бернулли решают подбором. Для этого, выбрав некоторый участок длины l, задаются значением глубины $h_2 < h_1$ в конце его, вычисляют соответствующие h_1 значения величин, входящих в уравнение, подставляют их и проверяют, окажется ли при этом глубина h_2 равной той, которой задавались. Если вычисленное значение оказалось больше (меньше) принятого, пробуют новое большее (меньшее) значение h_2 и так до тех пор, пока оба значения не сойдутся с необходимой точностью. Этот прием расчета кривых свободной поверхности называют иногда методом В. И. Чарномского. Задача облегчается, если быстроток имеет постоянный поперечный профиль, т. е. представляет собой призматическое русло. Тогда расстояние l между сечениями с глубинами h_1 и h_2 будет из уравнения (11):

$$l = \frac{h_2 + \frac{\alpha Q^2}{2g}\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) - h_1}{i - i_f} . \quad (12)$$

Здесь средний уклон i_f трения между сечениями

$$i_f = \frac{Q^2}{\omega_{ср}^2 W_{ср}^2} .$$

Этот прием применим при любой форме поперечного профиля быстротока и удобен, когда нужно построить подробно по точкам всю кривую спада.

Если нет необходимости строить кривую спада подробно, но надо быстро определить, где установится заданная глубина, то пользуются способом акад. Н. Н. Павловского. Уравнение Павловского, связывающее гидравлические характеристики двух сечений, отстоящих на расстоянии l, записывается так:

$$l = \frac{a}{i}\left[\eta_2 - \eta_1 - (1 - j)\left[\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta)_1\right]\right] . \quad (13)$$

В этом уравнении:

$\eta = \frac{K}{K_0} = \frac{\omega W}{\omega_0 W_0} = \frac{\omega C\sqrt{R}}{\omega_0 C_0 \sqrt{R_0}}$; индекс «нуль» означает, что данная величина вычислена при глубине h_0, соответствующей равномерному движению (нормальной глубине);

$j = \frac{\alpha i C^2 B}{g\chi} = \frac{\alpha Q_0^2 B}{g\omega^3} = Fr_0$ — есть число Фруда при расходе воды, который протекает по руслу при данной глубине в предположении, что движение равномерное. В расчетах в качестве j

Таблица 2

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,64	0,714	0,79	0,983	0,920	1,412
0,05	0,050	0,65	0,729	0,80	1,006	0,925	1,440
0,10	0,100	0,66	0,744	0,81	1,030	0,930	1,469
0,15	0,150	0,67	0,760	0,82	1,055	0,935	1,500
0,20	0,201	0,68	0,776	0,83	1,081	0,940	1,534
0,25	0,252	0,69	0,792	0,84	1,109	0,945	1,570
0,30	0,304	0,70	0,809	0,85	1,138	0,950	1,610
0,35	0,357	0,71	0,826	0,86	1,169	0,955	1,654
0,40	0,411	0,72	0,844	0,87	1,202	0,960	1,702
0,45	0,468	0,73	0,862	0,88	1,237	0,965	1,758
0,50	0,527	0,74	0,881	0,89	1,275	0,970	1,820
0,55	0,590	0,75	0,900	0,90	1,316	0,975	1,896
0,60	0,657	0,76	0,920	0,905	1,339	0,980	1,985
0,61	0,620	0,77	0,940	0,910	1,362	0,985	2,100
0,63	0,699	0,78	0,961	0,915	1,386	0,990	2,264
						0,995	2,544

берут его значение, вычисленное для среднего значения глубины в рассматриваемом русле;

$$\varphi(\eta) = \frac{1}{2}\ln\frac{\eta+1}{\eta-1} \text{ при } \eta > 1;$$

$$\varphi(\eta) = -\frac{1}{2}\ln\frac{1+\eta}{1-\eta} \text{ при } \eta < 1.$$

Значения φ приведены в табл. 2.

Величину $a = \frac{h_2 - h_1}{\eta_2 - \eta_1}$ можно принимать постоянной для данного русла, вычислив ее для крайних значений глубины h, например между критической и нормальной глубинами.

Допускаемые скорости. Чтобы русло или сооружение не разрушалось потоком воды, скорость течения не должна превышать установленных величин, зависящих от прочности материала. Нормативные значения допускаемых (неразмывающих) скоростей течения воды в постояниых железнодорожных гидротехнических сооружениях приведены в табл. 3.

Повышенная шероховатость. Для уменьшения скорости течения в быстротоке можно создать повышенную шероховатость. Ее обеспечивают устройством выступов определенной геометрической формы на дне, а иногда и на боковых стенках быстротока. Наиболее хорошо изучен и наиболее прост способ осуществления повышенной шероховатости устройством поперечных ребер квадратного сечения.

В русле с такой повышенной шероховатостью (рис. 7, *а*) при очень малом расходе вода будет тонким слоем переливаться через ребро, не отрываясь от него, далее протекать по дну и вливаться в небольшой водоемчик перед следующим ребром. При

более значительных расходах вода переливается через ребра, как через водосливы, и перед ребрами образуются гидравлические прыжки, как перед водобойными стенками. Прыжки могут надвигаться на переливающуюся струю (рис. 7, *б*) или возможен их отгон. Такой режим течения называется перепадным; при этом сопротивление русла оказывается наибольшим.

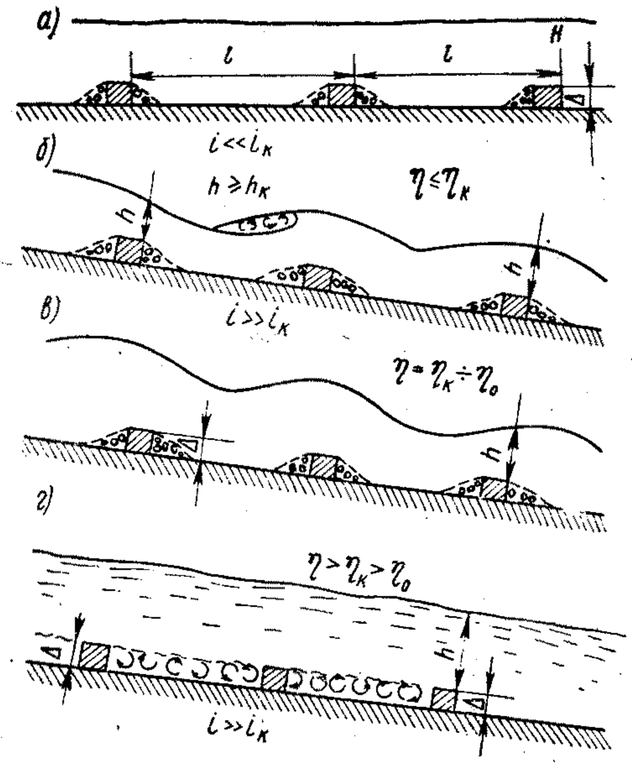


Рис. 7. Четыре вида режимов течения в русле повышенной шероховатости ($\eta = h:\Delta$)

С дальнейшим увеличением расхода и глубины h потока над ребром перепадный режим сменяется переходным (рис. 7, *в*), он характерен волнистой поверхностью, причем гребни волн находятся над ребрами, а между ними поток опускается до гладкого дна. При еще большем расходе устанавливается быстроточный режим (рис. 7, *г*); здесь поверхность потока почти прямая, параллельная дну, а пространство между ребрами на всю их высоту заполнено вихрями, по которым транзитная струя скользит, как по ровному дну.

При шероховатости иного типа эти режимы различаются менее четко, но их гидравлические свойства и законы сопротивления остаются в главных чертах те же. Если схематически показать график зависимости сопротивления русла высокой шероховатости от режима течения и относительной глубины $\eta = h:\Delta$ (рис. 8), то линия *1* будет соответствовать спокойному состоянию потока, который возможен при уклоне, меньшем критического: линии *2* и *2к* будут соответствовать прикритическим

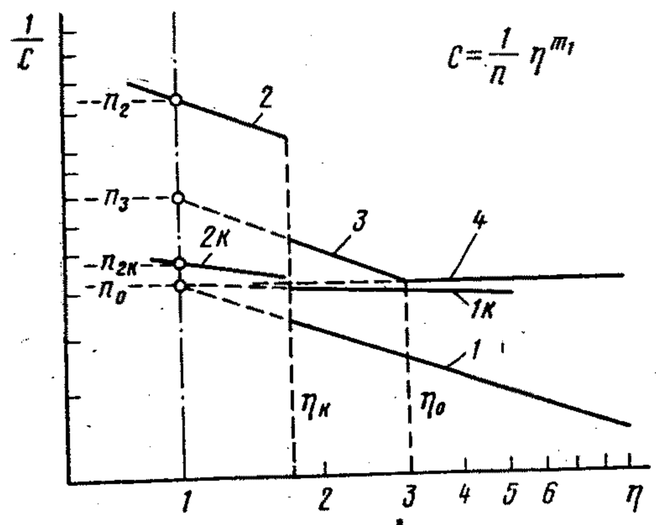


Рис. 8. Зависимость коэффициента Шези C от относительной глубины η в русле повышенной шероховатости

Таблица 3

Грунт	Размеры частиц грунта, мм	Средние грубины потока, м					
		0,4	1,0	2,0	3,0	5,0	10 и более
		Допускаемые средние скорости течения для несвязных грунтов, м/с					
Пыль и ил с мелким песком	0,005—0,05	0,15—0,20	0,20—0,30	0,25—0,40	0,30—0,45	0,40—0,55	0,45—0,65
Песок мелкий с примесью среднего	0,05—0,25	0,20—0,35	0,30—0,45	0,40—0,55	0,45—0,60	0,55—0,70	0,65—0,80
Песок мелкий с глиной, песок средний с примесью крупного	0,25—1,00	0,35—0,50	0,45—0,60	0,55—0,70	0,60—0,75	0,70—0,85	0,80—0,95
Песок крупный с примесью гравия, среднезернистый песок с глиной	1,0—2,5	0,50—0,65	0,60—0,75	0,70—0,80	0,75—0,90	0,85—1,00	0,95—1,20
Гравий мелкий с примесью среднего	2,5—5,0	0,65—0,80	0,75—0,85	0,80—1,00	0,90—1,10	1,00—1,20	1,20—1,50
Гравий крупный с песком и мелким гравием	5,0—10	0,80—0,90	0,85—1,05	1,00—1,15	1,10—1,30	1,20—1,45	1,50—1,75
Галька мелкая с песком и гравием	10—15	0,90—1,10	1,05—1,20	1,15—1,35	1,30—1,50	1,45—1,65	1,75—2,00
Галька средняя с песком и гравием	15—25	1,10—1,25	1,20—1,45	1,35—1,65	1,50—1,85	1,65—2,00	2,00—2,30
Галька крупная с примесью гравия	25—40	1,25—1,50	1,45—1,85	1,65—2,10	1,85—2,30	2,00—2,45	2,30—2,70
Булыжник мелкий с гравием	40—75	1,50—2,00	1,85—2,40	2,10—2,75	2,30—3,10	2,45—3,30	2,70—3,60
Булыжник средний с галькой	75—100	2,00—2,45	2,40—2,80	2,75—3,20	3,10—3,50	3,30—3,80	3,60—4,20
Булыжник средний с примесью крупного; булыжник крупный с мелкими примесями	100—150	2,45—3,00	2,80—3,35	3,20—3,75	3,50—4,10	3,80—4,40	4,20—4,50
Булыжник крупный с примесью мелких валунов и гальки	150—200	3,00—3,50	3,35—3,80	3,75—4,30	4,10—4,65	4,40—5,00	4,50—5,40
Валуны мелкие с примесью гальки	200—300	3,50—3,85	3,80—4,35	4,30—4,70	4,65—4,90	5,00—5,50	5,40—5,90
Валуны средние с примесью булыжника	300—400	—	4,35—4,75	4,70—4,95	4,90—5,30	5,50—5,60	5,90—6,00
Валуны особо крупные	400—500 и более	—	—	4,95—5,35	5,30—5,50	5,60—6,00	6,00—6,20

Примечания. 1. Табличные значения скоростей не следует интерполировать. При промежуточных глубинах водотока значения скоростей принимаются по глубинам, ближайшим к натурным.

2. В случае отсутствия специальных исследований и расчетов величины допускаемых скоростей течения при глубинах водотока, больших 3 м, принимаются по их значениям для глубины 3 м.

3. При проектировании поверхностных водоотводов в подверженных выветриванию плотных и очень плотных грунтах допускаемые скорости ограничиваются теми же значениями, что и для грунтов средней плотности (графы 8—11, табл. 4).

Таблица 4

Грунты	Содержание частиц, %		Допускаемые неразмывающие скоростн течення для связных грунтов, м/с															
			Грунты малоплотные (приведенная порозность 1,2—0,9) со средней плотностью грунтового скелета до 1,20 т/м³				Грунты среднеплотные (приведеиная порозность 0,9—0,6) со средней плотностью грунтового скелета 1,20—1,66 т/м³				Грунты плотные (приведенная порозность 0,6—0,3) со средней плотностью грунтового скелета 1,66—2,04 т/м³				Грунты очень плотные (приведенная порозность 0,3—0,2) со средней плотностью грунтового скелета 2,04—2,14 т/м³			
	Менее 0,005 мм	0,005—0,05 мм	Средняя глубина потока, м															
			0,4	1,0	2,0	3,0	0,4	1,0	2,0	3,0	0,4	1,0	2,0	3,0	0,4	1,0	2,0	3,0
Глиины	30—50	70—50	0,35	0,40	0,45	0,50	0,70	0,85	0,95	1,10	1,00	1,20	1,40	1,50	1,40	1,70	1,90	2,10
Тяжелые суглинки	20—30	80—70																
Тощие суглинки	10—20	90—80	0,35	0,40	0,45	0,50	0,65	0,80	0,90	1,00	0,95	1,20	1,40	1,50	1,40	1,70	1,90	2,10
Лёссовые грунты в условиях закончившихся просадок	—	—	—	—	—	—	0,60	0,70	0,80	0,85	0,80	1,00	1,20	1,30	1,10	1,30	1,50	1,70
Супеси	5—10	20—40	По табл. 3 в зависимости от крупности песчаных фракций.															

Примечание. См. табл. 3.

Таблица 5

Тип искусственного укрепления	Средняя глубина потока, м			
	0,4	1,0	2,0	3,0
	Допускаемые (неразмывающие) средние скорости течения, м/с			
Одерновка плашмя (на плотном основании)	0,9	1,2	1,3	1,4
Одерновка в стенку	1,5	1,8	2,0	2,2
Каменная наброска из булыжного или рваного камня в зависимости от его крупности	По табл. 3 с коэффициентом 0,9			
Каменная наброска в два слоя в плетнях в зависимости от крупности камня	По табл. 3 с коэффициентом 1,10			
Одиночное мощение на мху (слой мха не менее 5 см) из булыжника размером 15 см	2,0	2,5	3,0	3,5
То же, 20 см	2,5	3,0	3,5	4,0
То же, 25 см	3,0	3,5	4,0	4,5
Одиночное мощение на щебне (слой щебня не менее 10 см) из рваного камня размером 15 см	2,5	3,3	3,5	4,0
То же, 20 см	3,0	3,5	4,0	4,5
То же, 25 см	3,5	4,0	4,5	5,0
Одиночное мощение с подбором лица и грубым приколом на щебне (слой щебня не менее 10 см) из камней размером 20 см	3,5	4,5	5,0	5,5
То же, 25 см	4,0	4,5	5,5	5,5
То же, 30 см	4,0	5,0	6,0	6,0
Двойное мощение из рваного камня на щебне; нижний слой из камней 15 см, верхний—из камней 20 см (слой щебня не менее 10 см)	3,5	4,5	5,0	5,5
Хворостяная выстилка и хворостяные покрывала на плотном основании (для временных укреплений) при толщине выстилки $\delta=20\div25$ см	—	2,0	2,5	—
То же, при других толщинах выстилки	—	$0,4\sqrt{\delta}$	$0,4\sqrt{\delta}$	—
Фашинные тюфяки толщиной $\delta=50$ см	2,5	$3,0\sqrt{\delta}$	$3,7\sqrt{\delta}$	—
То же, при других толщинах тюфяков	$0,5\sqrt{\delta}$	$0,6\sqrt{\delta}$	$0,7\sqrt{\delta}$	—
Габионы (размерами не менее $0,5\times0,5\times\times1,0$ м)	$\leqslant4,0$	$\leqslant5,0$	$\leqslant5,5$	$\leqslant6,0$
Бутовая кладка из камня известковых пород (с пределом прочности не менее 100 кгс/см²)	3,0	3,5	4,0	4,5
Бутовая кладка из камня крепких пород (с пределом прочности не менее 300 кгс/см²)	6,5	8,0	10,0	12,0
Бетонная одежда для креплений;				
Бетон М=170	6,5	8,0	9,0	10
То же, М=140	6,0	7,0	8,0	9,0
То же, М=110	5,0	6,0	7,0	7,5
Бетонные лотки с гладкой поверхностью; бетон М=170	13	16	19	20
То же, М=140	12	14	16	18
То же, М=110	10	12	13	15

Продолжение табл. 5

Тип искусственного укреплеиня	Средняя глубина потока, м			
	0,4	1,0	2,0	3,0
	Допускаемые (неразмывающие) средние скорости течения, м/с			
Деревянные лотки гладкие при надежном основании и течении воды вдоль волокон	8	10	12	14

Примечание. См. табл. 3.

Таблица 6

Вид шероховатости	$\frac{l}{\Delta}$	Спокойный режим		Быстроточный режим	
		n_0	m_1	η_0	C
Ребра поперечные квадратные	10	0,0540	0,34	3,7	18,5
» прямоугольные	7,7	0,0590	0,23	—	—
То же	3,7	0,0248	—	2,4	40,3
Ступени по потоку прямоугольные	6	0,0440	—	1,5	22,7
То же	8	0,0339	—	1,2	29,5
Кубические шашки в шахматном порядке	1,5	0,0413	0,12	3	24,2
То же	4,5	0,0338		3,8	29,6
То же	1	0,0325	0,115	1,2	30,8
Рассредоточенные гранулированные частицы	1,4	0,020	—	—	50
Рваный камень	—	0,0434	0,25	2,4	23,0
Окатанный камень	—	0,0466	0,35	2,4	21,4
Песчаная шероховатость	—	0,044	0,204	—	—
Торкрет	—	0,031	0,11	—	—

режимам: линия *4* — быстроточному, *3* — переходному и *2* — перепадному. Из графика видно, что при быстроточном режиме ($\eta>\eta_0$) коэффициент Шези C не зависит от глубины потока. Это установлено П. И. Гордиенко и подтверждено опытами со ступенчатыми трубами, проведенными в ЦНИИСе. Исследования П. И. Гордиенко и некоторых зарубежных авторов показывают, что при бурном состоянии потока коэффициент C не зависит от глубины воды прн обычной шероховатости смоченной поверхности (например, для бетона, каменной кладки и т. п.).

Для определения коэффицнента C. П. И. Гордиенко рекомендует формулу

$$C=\frac{1}{n_0}\eta^{m_1}, \qquad (14)$$

где n_0 — особый вид коэффициента шероховатости, ио не тот, что в формуле Павловского; η — относительная глубина потока; m_1 — показатель, зависящий от вида шероховатости.

Быстроточный режим получается при $h:\Delta\geqslant\eta_0$, а спокойный — при уклоне менее критического $i<i_к$, что не характерно

для быстротоков. Для расчета русел с повышенной шероховатостью необходимые коэффициенты принимают по табл. 6. При отношениях $l:\Delta$ (иных, чем в табл. 6) характеристики шероховатости вычисляют по эмпирическим формулам:

для квадратных поперечных ребер при $3 \leqslant l/\Delta \leqslant 24$

$$n_0 = n_4 = 0{,}078 - 0{,}0012\frac{l}{\Delta} - 0{,}122\frac{\Delta}{l}; \qquad (15)$$

$$m_1 = 0{,}51 - 0{,}017\frac{l}{\Delta} - 0{,}4\frac{\Delta}{l}; \qquad (16)$$

для кубических шашек, расположенных в шахматном порядке, при $1{,}5 \leqslant \frac{l}{\Delta} \leqslant 5$

$$n_0 = n_4 = 0{,}0413 - 0{,}0012\left(\frac{l}{\Delta} - 1{,}5\right)^{1{,}33}; \qquad (17)$$

для ступеней по потоку при $4 \leqslant \frac{l}{\Delta} \leqslant 8$

$$C = \frac{1}{n_0} = 22{,}3 + 0{,}25\left(\frac{l}{\Delta} - 5\right)^3. \qquad (18)$$

Глава II

ГИДРАВЛИКА СОПРЯЖЕНИЙ БЫСТРОТОКОВ С ТРУБАМИ

Подвод воды к косогорным водопропускным сооружениям обеспечивается с помощью быстротока, ширина которого обычно равна или больше ширины малого водопропускного сооружения. Ширину подводящего быстротока назначают с учетом топографических и геологических условий, конструкции входного оголовка трубы и исходя из условия уменьшения удельного расхода потока. Ширину трубы в начальном сечении входного оголовка с целью обеспечения плавного втекания принимают больше отверстия трубы. Переход от быстротока к сооружению (сопряжение) в этом случае осуществляется плавным сужением, т. е. постепенным уменьшением поперечного сечения быстротока до сечения трубы.

Типы сужения зависят от геометрической формы сопрягающихся участков. Встречаются сопряжения быстротоков прямоугольного и трапецеидального сечения с прямоугольной и круглой трубой с помощью прямолинейных и криволинейных в плане боковых стенок (рис. 9). Наиболее распространено

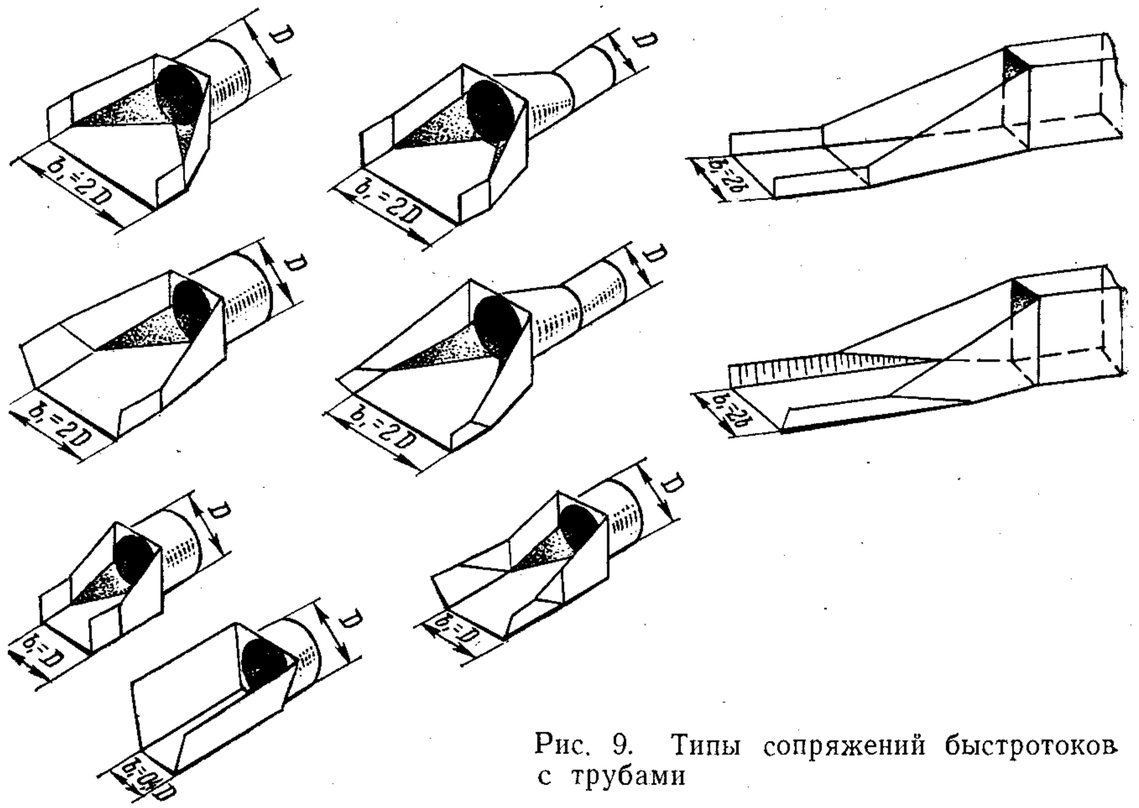


Рис. 9. Типы сопряжений быстротоков с трубами

сопряжение быстротока прямоугольного сечения с прямоугольной трубой с помощью прямолинейных и симметричных в плане вертикальных стенок. Этот основной тип сопряжения быстротока с водопропускной косогорной трубой наиболее удобен с точки зрения производства работ и минимальных затрат строительных материалов.

Сопряжения прямоугольных быстротоков с прямоугольными трубами. Протекание потока через сужение может происходить как в спокойном, так и в бурном состояниях. При входе бурного потока в сужение он отклоняется от первоначального направления боковыми стенками конструкции сужения, вызывая деформацию свободной поверхности в виде косых гидравлических прыжков; при этом глубина потока в прыжке значительно превышает его глубину перед сужением.

Косые прыжки AB, A^1B в сужении распространяются от вершины угла отклонения вниз по течению под некоторым углом β_1 к первоначальному направлению движения потока. Этот угол называется углом фронта волны или волновым углом. Косые прыжки, распространяясь к противоположным стенкам симметричного сужения, пересекаются на оси потока и создают сложную картину волн и прыжков (рис. 10, 11) с местными понижениями и повышениями свободной поверхности.

Применяют различные методы управления бурным потоком на входных сужающихся участках. Минимальную деформацию потока можно получить с помощью прямолинейных в плане стенок и плоского дна.

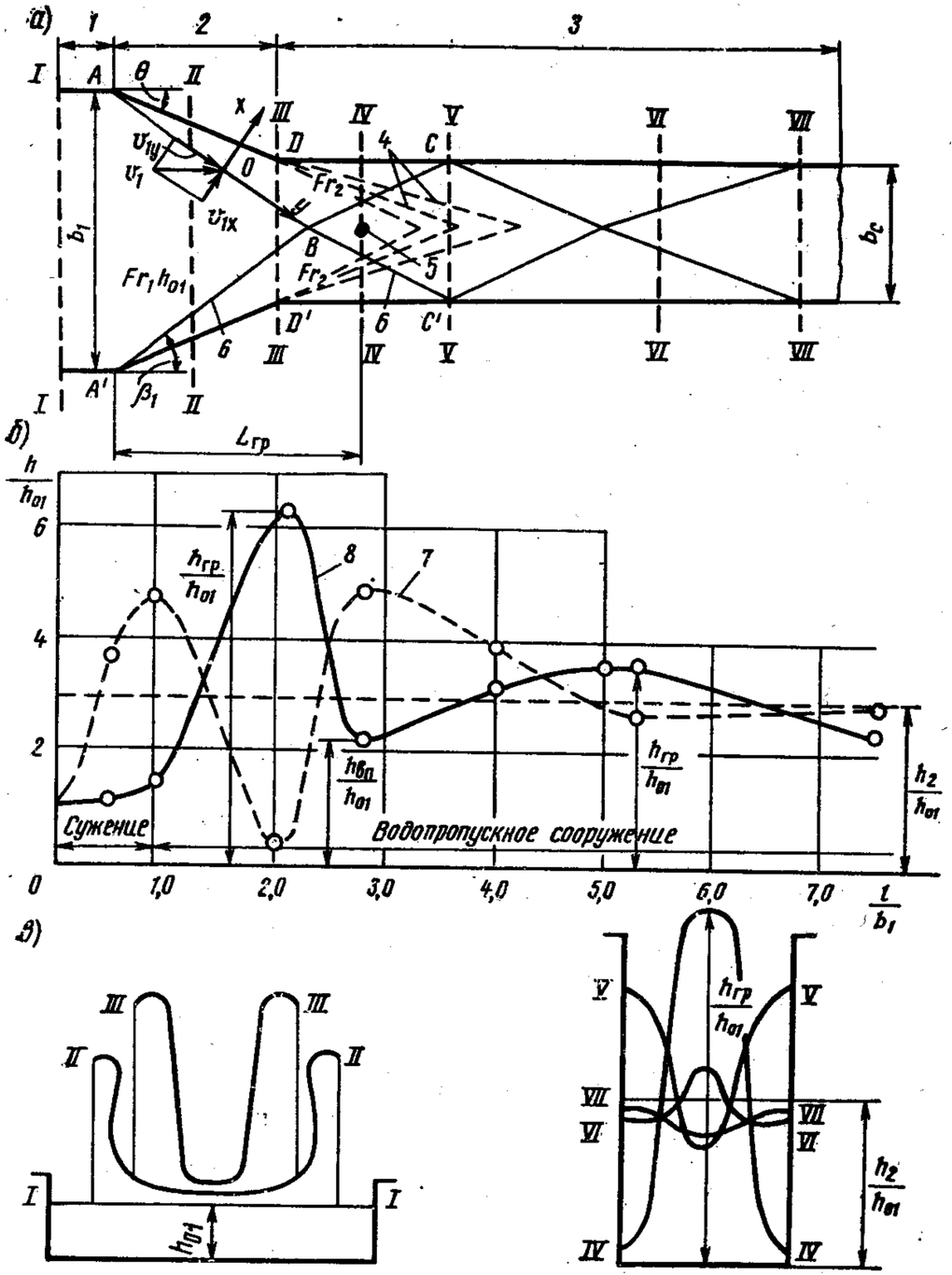


Рис. 10. Схема и профили сопряжения прямоугольного быстротока с прямоугольной трубой:

а — план-схема протекания потока; *б* — продольные профили потока при $l=0$; $\varepsilon=0{,}5$, $Fr_1 = 36{,}5$; *в* — поперечные профили потока; *1* — участок быстротока; *2* — участок сужения; *3* — участок водопропускной трубы; *4* — волны расширения; *5* — место гребня; *6* — косые прыжки; *7* — профиль вдоль стенок; *8* — профиль по оси потока

Существующие методы одномерной гидравлики для определения параметров бурного потока в сужении неприменимы из-за значительной деформации свободной поверхности.

Экспериментальные исследования. Исследования советских и зарубежных ученых [4, 7, 19] показали, что для определения

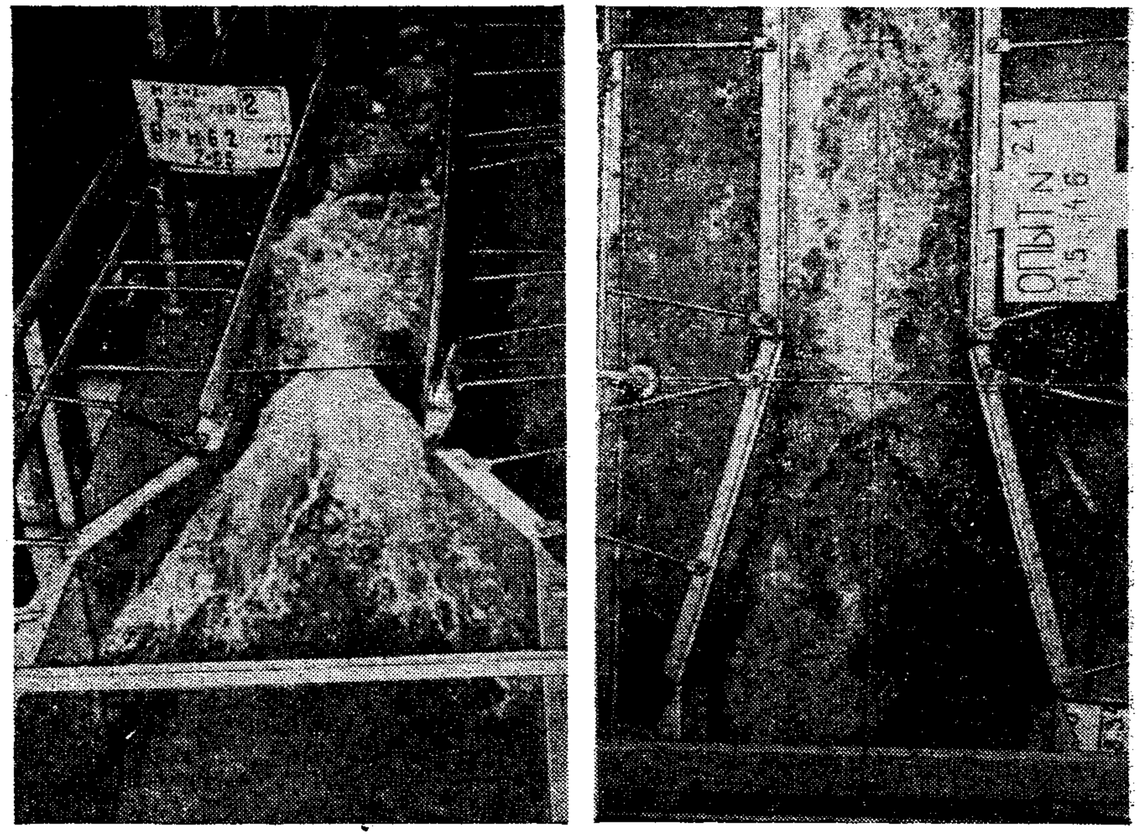


Рис. 11. Деформация бурного потока в сужении и на входе в трубу

параметров бурного потока в сужении можно применять основные положения двухмерной гидравлики, которой при движении жидкости учитывается изменение составляющих (в плане) скоростей v_{1x} и v_{1y} (см. рис. 10). Вертикальные составляющие скорости и ускорения очень малы по величине и их значением пренебрегают. Распределение скоростей по вертикали принимают равномерным. В то же время по двухмерной теории [7] предполагается, что изменение параметров потока при образовании косого прыжка происходит вдоль линии фронта косого прыжка AB и $A'B$ и глубина потока за прыжком h_2 постоянна, т. е. волнообразный профиль косого прыжка заменяется ступенчатым, а движение бурного потока до и после прыжка принимается равномерным. Это допущение сильно упрощает картину движения жидкости в сужении, и для проектирования входных участков дорожных водопропускных труб такие гидромеханические методы расчета неприменимы. Однако с помощью методов двухмерной теории можно получить только средние параметры косого прыжка в сужении, а действительные значения местных глубин на входном и отводящем участках [4] получить невозможно.

Так как состояние теории бурного потока не позволяет надежно рассчитывать входные сужающиеся участки, то пришлось прибегнуть к экспериментальным опытам и исследованиям, на

которых и основаны излагаемые рекомендации, учитывающие большое разнообразие геометрических и гидравлических характеристик потока и природных условий.

Начальная серия опытов при уклоне дна $i=0{,}05$ была выполнена в 1964—1965 гг. в лаборатории мостовой гидравлики и гидрологии ЦНИИСа под руководством В. С. Муромова и непосредственном участии В. И. Климешова. Были исследованы сопряжения прямоугольных и трапецеидальных быстротоков с круглыми и прямоугольными трубами (см. рис. 9). Результаты этих исследований послужили обоснованием соответствующих указаний и руководств [12, 15].

В этих исследованиях изучали работу типовых водопропускных труб при уклоне 0,05 и протекании расчетного расхода, определяемого так же, как и в равнинных условиях. Для каждого типового размера трубы была установлена величина допустимого расхода, под которым подразумевается расход воды, протекающей в трубе с сохранением просвета над наивысшей точкой свободной поверхности потока (см. СН 200-62 § 29). На основании результатов эксперимента были выработаны формы оголовков труб и сужающихся участков быстротока, обеспечивающих пропуск расчетного расхода в трубу. В процессе экспериментов было установлено, что протекание бурного потока в сужении и за ним имеет пространственный характер и двухмерная теория в этом случае неприменима; протекание через сужение может происходить как в бурном, так и в спокойном состояниях. Результаты проведенных экспериментальных исследований были получены только при одном значении продольного уклона быстротока и трубы, равном 0,05, степени сжатия[1] $\varepsilon=0{,}5$, а поэтому всего многообразия сочетаний природных условий, геометрических и гидравлических характеристик не охватывают.

Наиболее подробные рекомендации по проектированию входных сужающихся участков приведены в типовом проекте Ленгипротрансмоста. В этом проекте рассмотрены только подводящие быстротоки шириной 2,0 м для круглых и прямоугольных косогорных труб отверстием 1,0 и 1,25 м и шириной 3,0 м соответственно для труб отверстием 1,5 и 2,0 м. Приведенные в проекте рекомендации (см. гл. V) основаны на результатах тех же ограниченных экспериментальных исследований ЦНИИСа и ЛПИ имени М. И. Калинина [12, 19].

В период с 1967 по 1972 г. в гидравлических лабораториях МАДИ и НИС Гидропроекта были продолжены исследования бурного потока при более широком диапазоне условий с целью разработки типовых конструкций, учитывающих все особенности поведения бурного потока на входных сужающихся участках. Основная часть экспериментальных исследований была выполнена В. И. Климешовым. На экспериментальной установке (рис. 12) было исследовано сопряжение подводящего быстротока прямоугольного сечения с прямоугольной водопропускной трубой с помощью прямолинейных в плане вертикальных стенок. Продольные уклоны лотка были заданы равными 0; 0,05; 0,13 и 0,25; степень сжатия — 0,5; 0,35 и 0,2, а углы Θ сужения — 2, 5, 6, 10, 15, 20 и 30°.

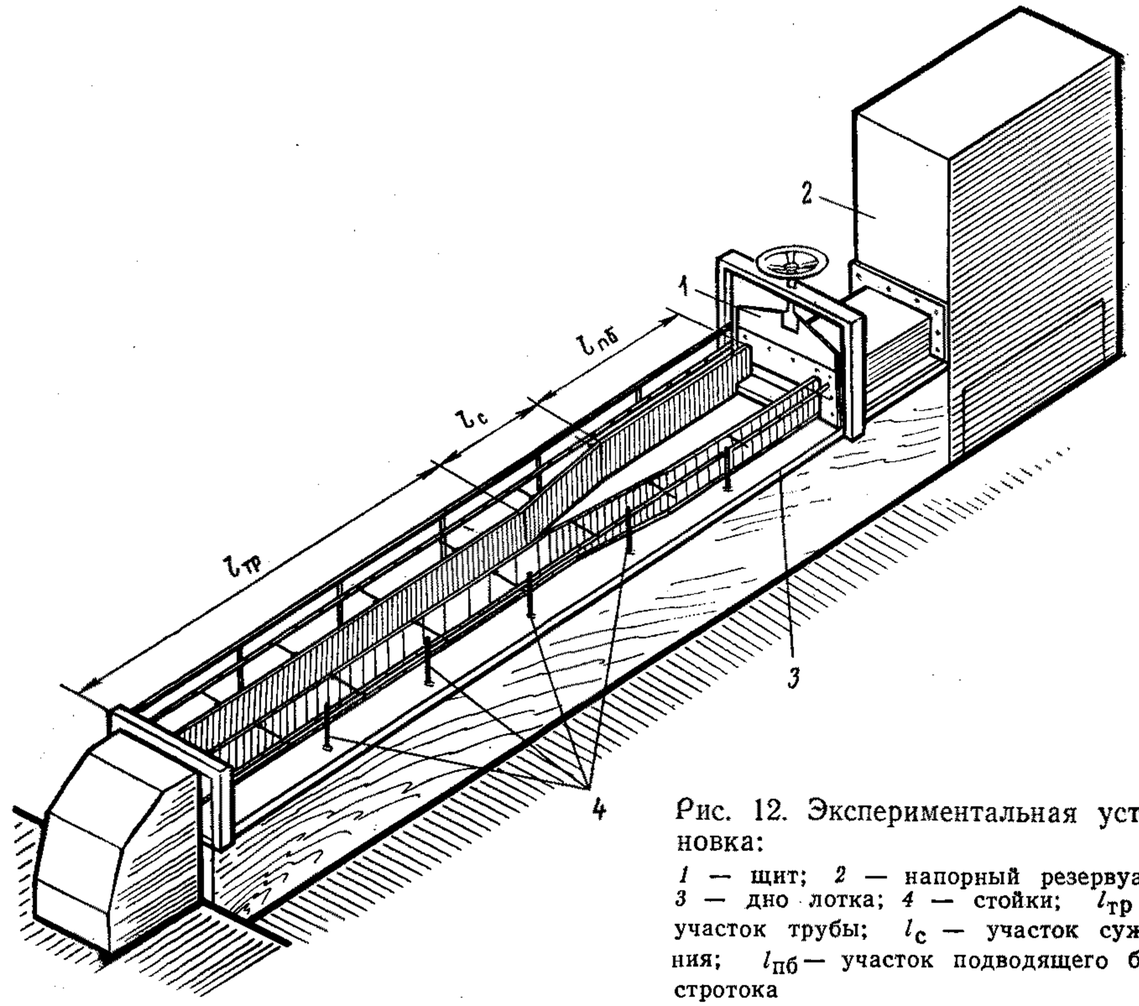


Рис. 12. Экспериментальная установка:

1 — щит; *2* — напорный резервуар; *3* — дно лотка; *4* — стойки; $l_{тр}$ — участок трубы; l_c — участок сужения; $l_{пб}$ — участок подводящего быстротока

Исследования были выполнены при значениях параметра кинетичности перед сужением, т. е. числа Фруда

$$Fr_1=\frac{Q^2}{gb_1^2h_{01}^3}=5\div110, \qquad (19)$$

где Q — расход воды; b_1 — ширина подводящего быстротока; h_{01} — глубина потока перед суженнем; g — ускорение силы тяжести.

В процессе эксперимента измеряли характерные глубины с помощью шпитценмасштаба (мерной иглы) и стереофотосъемки, а также скорости потока.

Модель переходного участка и водопропускного сооружения была геометрически подобна реальным дорожным объектам. Перед сужением на модели задавали геометрические и

[1] Под степенью сжатия подразумевается отношение ширины отводящего канала или размера водопропускного сооружения к ширине подводящего быстротока, т. е. $\varepsilon=b_c/b_1$.

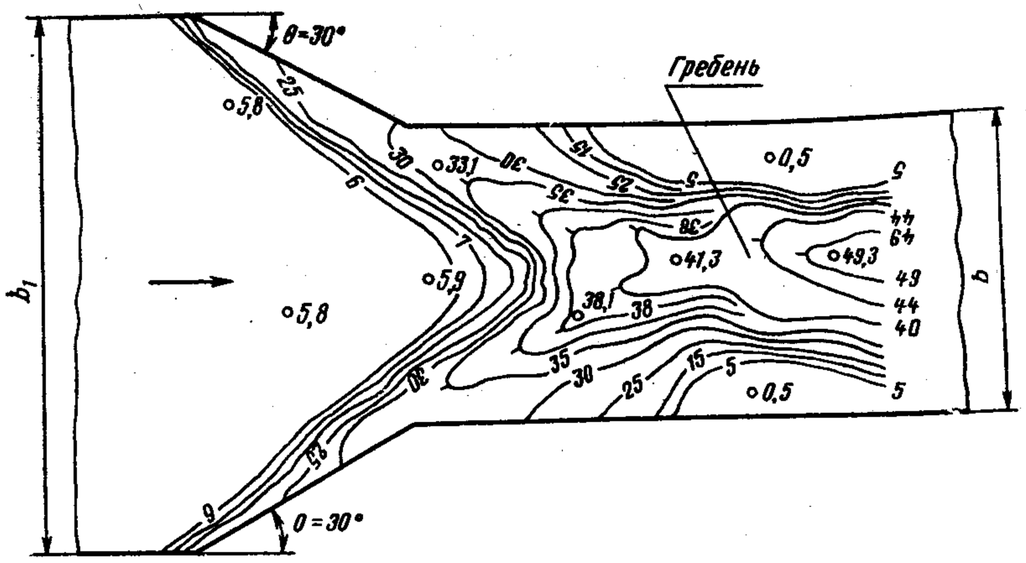


Рис. 13. Плаи свободиой поверхиости буриого потока на входе в трубу при $i=0{,}13$; $Fr_1=32$; $\varepsilon=0{,}5$

кинематические параметры, подобные параметрам реального потока. Исследования показали, что глубина потока в месте встречи первых косых прыжков $h_{гр}$ обычно оказывается максимальной и может превышать глубину h_{01} в 8—10 раз и больше (см. рис. 10, *б*). От глубины потока $h_{гр}$ и ее местоположения зависит необходимая высота водопропускного сооружения. Иными словами, самым характерным параметром бурного потока в сужении является глубина потока в первом гребне, т. е. высота гребня.

Свободная поверхность бурного потока в сужении и в трубе из-за образования косых прыжков имеет очень сложную форму и точность ее измерения шпитценмасштабом недостаточна. В связи с этим для изучения деформации свободной поверхности бурного потока В. И. Климешовым был впервые применен бесконтактный стереофотограмметрический метод. На увеличенных снимках участков сужения и трубы с помощью стереообрабатывающих приборов рисовали рельеф свободной поверхности потока в горизонталях (рис. 13). Для более полного отображения рельефа определяли глубины в характерных точках потока. По чертежу рельефа определяли высоту и угол фронта прыжка β_1, высоту гребня $h_{гр}$ и другие характерные величины.

Качественная картина движения бурного потока в сужении. При отклонении бурного потока стенкой сужения возникает деформация свободной поверхности, обусловленная косыми гидравлическими прыжками. Изменение параметров потока в косом прыжке происходит скачкообразно, с разрывом непрерывности. При малых же значениях Fr_1 и Θ изменение параметров потока до и после косого прыжка незначительно, но с возрастанием параметра кинетичности Fr_1 и угла сужения Θ эти изменения увеличиваются. Косые гидравлические прыжки, образующиеся в вершинах угла отклонения, пересекаются между собой на оси канала и далее взаимодействуют между собой и с волнами расширения, которые возникают в вершине углов D и D' (см. рис. 10), образованных стенками сужения и отводящего канала, т. е. в конце сужения или в начале отводящего канала или сооружения. Косой прыжок от вершины угла отклонения имеет фронт распространения по линии AB или $A'B$. При переходе через линию фронта прыжка поток отклоняется на угол Θ и, следовательно, поток движется примерно параллельно стенке сужения AD и $A'D'$. В отводящем канале поток двигается параллельно стенкам водопропускного сооружения. Переход потока к этому направлению происходит на линии второго косого прыжка BC или BC'. Пересекая фронт отраженного прыжка BC и BC', поток отклоняется на угол Θ и движется примерно параллельно стенкам водопропускного сооружения. Такую картину протекания бурного потока в сужении и за ним наблюдали многие исследователи при горизонтальном уклоне, малых числах Фруда и малых углах Θ.

Картина движения жидкости при условиях, соответствующих работе входных участков дорожных косогорных водопропускных сооружений, намного сложнее. Экспериментальные исследования показывают, что глубина косого прыжка в плоскости, перпендикулярной линии фронта прыжка, непостоянна. Наибольшая глубина потока вдоль оси OX наблюдается в первом гребне прыжка, а далее, приближаясь к стенкам сужения, глубина потока в последующих гребнях уменьшается.

Рассмотрение профиля косого прыжка показывает наличие двух резко выраженных форм: прыжка-волны и прыжка с вальцом, т. е. таких, как и у прямого гидравлического прыжка. Но за косым прыжком поток может быть как в бурном, так и в спокойном состоянии, а за прямым гидравлическим прыжком — только в спокойном. Глубина потока в гребне косого прыжка вдоль линии фронта постоянно возрастает по мере удаления от начала сужения (см. рис. 10). Но так как линия фронта прыжка иаправлена под углом β_1 к направлению движения, то на участке сужения поверхность потока изменяется в трех направлениях: по оси OX, вдоль линии фронта прыжка OY и по вертикали. Иначе говоря, движение жидкости имеет ярко выраженный пространственный характер.

На свободной поверхности бурного потока в месте пересечения косых прыжков образуется местное повышение свободной поверхности — гребень [5]. При малых числах Фруда гребень имеет сплошную структуру и устойчивое положение. С увеличением числа Фруда гребень теряет свою сплошность и устойчивость; появляются небольшие перемещения вдоль и поперек направления движения и он может сваливаться к любой из боковых стенок.

После пересечения косых прыжков за гребнем наблюдается интерференция стоячих волн, гребней и впадин. Локальные

Таблица 7

Продольный уклон сооружения	Угол сужения	Число Фруда при $i=0$ и $\varepsilon=0{,}5$		Продольный уклон сооружения	Угол сужения	Число Фруда при $i=0$ и $\varepsilon=0{,}5$	
		Fr_1	$Fr_{гр}=Fr_1\sin^2\beta_1$			Fr_1	$Fr_{гр}=Fr_1\sin^2\beta_1$
0	2°	34,1	1,4	0,13	10°	25,0	2,97
0	6°	22,1	1,99	0,13	15°	20,0	4,1
0	10°	14,44	2,5	0,25	2°	53,3	1,58
0	15°	12,5	3,45	0,25	6°	49,0	2,6
0,13	6°	28,1	2,1	0,25	10°	36,0	3,6

гребни образуются как на оси потока, так и около боковых стенок (см. рис. 10). Наибольшая глубина по оси потока обычно образуется преимущественно в первом гребне, глубина потока в последующих гребнях постепенно уменьшается и на некотором расстоянии от входа в водопропускное сооружение деформация свободной поверхности прекращается. Длина распространения деформации свободной поверхности зависит от числа Фруда Fr_1, длины участка сужения L_c, продольного уклона i и других факторов.

Картина протекания жидкости в сужении особенно усложняется при числе Фруда $Fr_1 > 25 \div 30$.

Отклонение бурного потока в этом случае приводит к образованию в сужении значительных всплесков косых прыжков (см. рис. 11), которые резко изменяют характеристики потока. При этом нарушается закономерность в распределении глубин, скоростей и особенно удельных расходов. Поток становится раздробленным и имеет ярко выраженный пространственный характер. Деформация свободной поверхности сохраняется на очень большой длине и движение потока за косым прыжком становится неравномерным. Такое протекание не соответствует тем упрощенным схемам, которые приняты в одномерной и двухмерной теориях.

Как показали эксперименты, в сужении может наблюдаться или косой прыжок-волна, или прыжок с вальцом, или постепенный переход от прыжка-волны к прыжку с вальцом. Структура косого прыжка при этом по мере удаления от начала сужения становится все более раздробленной. От формы косого гидравлического прыжка зависят его максимальная высота, высота первого локального гребня и степень деформации свободной поверхности бурного потока в сужении. Форму (тип) косого прыжка устанавливают по величине числа Фруда, соответствующего образованию прыжка с вальцом $Fr_{гр}$ (граничное число Фруда). При $Fr_1 < Fr_{гр}$ в сужении наблюдается косой гидравлический прыжок-волна, если же $Fr_1 > Fr_{гр}$, то возникает косой гидравлический прыжок с вальцом.

Результаты определения граничного числа Фруда $Fr_{гр}$, полученные экспериментальным путем (табл. 7), показывают, что

значение $Fr_{гр}$ зависит от уклона, угла сужения, степени сжатия потока.

Для проектирования входных сужающихся участков надо применять эмпирические зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований, а также и существующие методы расчета относятся исключительно к первому гребню на пересечении косых гидравлических прыжков.

Влияние кинетичности (числа Фруда) на характеристики бурного потока в сужении. Значительное влияние кинетичность потока оказывает на глубину, структуру косого прыжка и вместе с тем на глубину потока в первом гребне. При значениях $Fr_1 < Fr_{гр}$ в сужении образуются косые прыжки-волны, которые, взаимодействуя между собой и со стенками сужения, образуют гладкую сплошную свободную поверхность потока. С дальнейшим увеличением числа Фруда разрушение косого прыжка усиливается, его структура становится более раздробленной, и в сужении наблюдается резкое изменение характера свободной поверхности. С увеличением числа Фруда возрастает аэрация потока и особенно при образовании косого прыжка-вальца. Но в то же время степень аэрации потока как по глубине, так и по длине косого прыжка оказывается различной.

В процессе эксперимента можно установить, что при увеличении числа Фруда изменяется плановое положение косого прыжка, уменьшается угол фронта волны β_1 и координата точки слияния косых прыжков. Кроме того, можно заметить изменение структуры прыжка и удаление координаты максимальной высоты гребня от начала сужения. Относительное значение расстояния координаты слияния косых прыжков от начала сужения

$$\operatorname{ctg}\beta' = L_{гр} : 0{,}5b_1, \qquad (20)$$

где $L_{гр}$ — расстояние от начала сужения до сечения с максимальной высотой гребня.

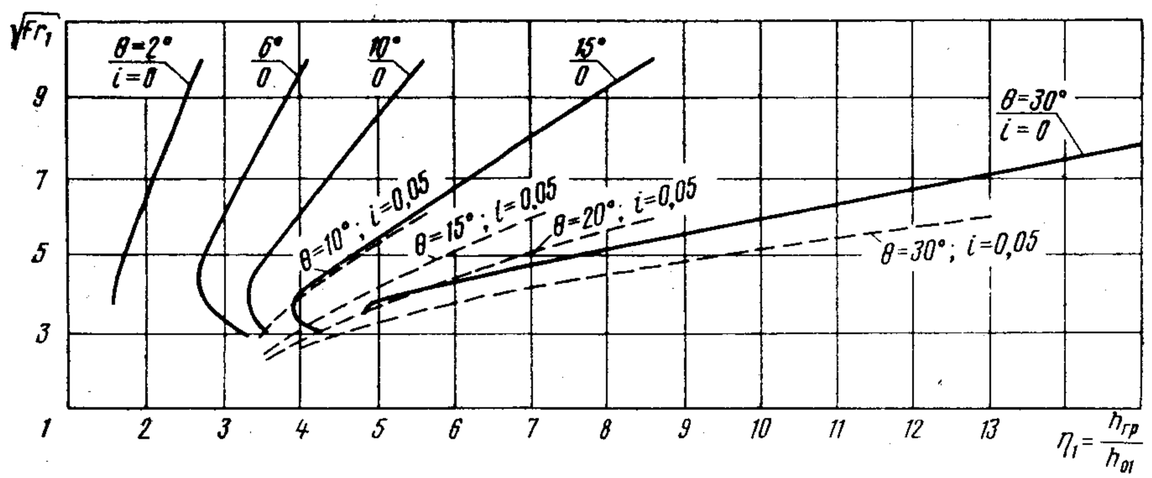


Рис. 14. Зависимость относительной глубины η_1 потока в гребне от числа Фруда при $\varepsilon=0{,}5$; $i=0$ и $i=0{,}05$

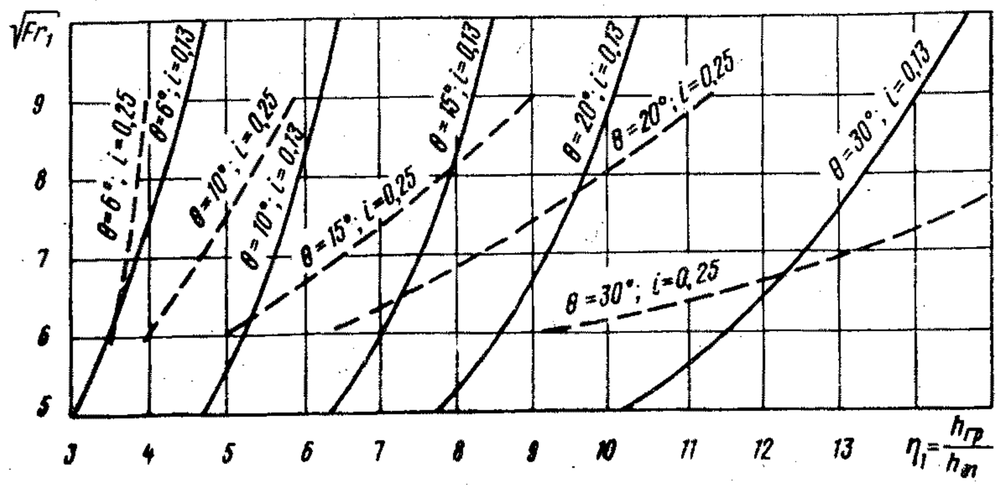


Рис. 15. Зависимость относительной глубины η_1 потока в гребне от числа Фруда при $\varepsilon=0{,}5$; $i=0{,}13$ и $i=0{,}25$

Экспериментальные исследования показали, что с увеличением числа Фруда Fr_1 длина участка деформации потока уменьшается, высота гребня и расстояние до него возрастают, а угол фронта прыжка β_1 уменьшается. По результатам экспериментальных исследований построены графики для определения относительной высоты гребня (рис. 14 и 15). Математическая обработка результатов эксперимента показала, что зависимость

$$\frac{h_{гр}}{h_{01}} = f(\sqrt{Fr_1})$$

наилучшим образом выражается формулой

$$\frac{h_{гр}}{h_{01}} = A + \frac{B}{\sqrt{Fr_1}} + \frac{C}{Fr_1}, \qquad (21)$$

где A, B, C — коэффициенты, учитывающие влияние Θ, ε, i и других неучтенных параметров (табл. 8).

Аналогично обработаны результаты и построены графики для определения $L_{гр}$ (расстояние от начала сужения до сечения с наибольшей высотой первого гребня) от числа Фруда Fr_1. Обработка показала, что зависимость $L_{гр}=f(Fr_1)$ выражается уравнением

$$\operatorname{ctg}\beta' = \frac{L_{гр}}{0{,}5b_1} = \frac{1}{A + B\sqrt{Fr_1} + CFr_1}, \qquad (22)$$

где b_1 — ширина быстротока; A, B, C — коэффициенты при $\varepsilon=0{,}5$ по табл. 9.

Результаты этой обработки для горизонтального дна и степени сжатия $\varepsilon=0{,}5$ приведены на рис. 16.

Влияние угла сужения на характеристики бурного потока в сужении. Если при небольших значениях Θ и Fr_1 в сужении образуется косой прыжок-волна или прыжок с вальцом, то при угле сужения $\Theta=30°$ даже при числах Фруда

Таблица 8

Уклон дна i	Угол сужения Θ	Степень сжатия ε	A	B	C
0,13	6	0,5	7,16	— 34,72	80,17
0,13	10	0,5	—36,72	483,4	—1405,96
0,13	15	0,5	17,05	— 104,79	268,84
0,13	30	0,5	18,38	— 40,95	0,00
0,13	10	0,35	—19,41	306,78	— 895,37
0,13	10	0,2	47,71	— 427,38	1129,9
0,25	2	0,5	99,88	—1330,5	4513,6
0,25	6	0,5	4,92	— 8,38	0,0
0,25	10	0,5	— 2,63	104,56	— 466,53
0,25	15	0,5	19,73	114,3	147,36
0,25	20	0,5	24,16	113,59	156,30
0,25	30	0,5	20,30	58,13	761,27
0,25	10	0,2	1,5	625,09	— 3,633
0,25	15	0,2	38,39	725,11	—2645
0	2	0,5	4,644	— 24,12	47,65
0	6	0,5	6,90	— 35,63	74,19
0	10	0,5	9,20	— 45,87	88,72
0	15	0,5	14,72	— 77,43	138,10
0	30	0,5	37,86	—232,68	409,85
0	6	0,35	9,185	— 22,66	0,0
0	10	0,35	—2,67	123,53	—380,7
0	15	0,35	7,54	— 5,24	0,0
0,05	10	0,5	10,22	— 37,42	51,07
0,05	15	0,5	12,553	— 42,47	47,26
0,05	20	0,5	25,36	—121,78	169,33
0,05	30	0,5	37,15	—177,53	236,26

Таблица 9

Уклон дна i	Угол сужения Θ	A	B	C	Уклон дна i	Угол сужения Θ	A	B	C
0	2	0,301	— 0,043	0,002	0,13	6	0,189	0,003	—0,002
0	6	0,543	— 0,114	0,008	0,13	10	0,528	—0,1	0,007
0	10	0,855	— 0,225	—0,002	0,13	15	0,093	0,06	—0,006
0	15	1,815	— 0,6	0,054	0,13	30	0,31	0,1	—0,015
0,05	10	2,91	— 1,185	0,141	0,25	2	0,996	—0,24	0,016
0,05	20	21,94	—11,98	1,674	0,25	6	1,122	—0,29	0,002
0,05	30	—1,81	2,223	—0,417	0,25	30	—1,398	0,627	—0,052

$Fr_1 \geqslant Fr_{min}$ невозможно образование косого прыжка-волны. При угле сужения $\Theta = 30°$ косой гидравлический прыжок сильно раздроблен (см. рис. 11).

Угол сужения также оказывает влияние на высоту гребня, его местоположение и на степень деформации свободной поверхности потока.

По графикам (см. рис. 14 и 15) видно, как с увеличением угла Θ возрастает глубина потока в гребне для одинаковых значений Fr_1. Можно проследить изменение местоположения и структуры гребня при одинаковых значениях числа Фруда в зависимости от угла сужения Θ. Протекание потока в сужении может происходить как в бурном ($Fr_2 > 1$), так и в спокойном ($Fr_2 < 1$) состояниях. Если в подводящем быстротоке поток находится в бурном состоянии, то его переход в спокойное состояние происходит с помощью прямого гидравлического прыжка.

При образовании прямого гидравлического прыжка в сужении, которое наблюдается при угле сужения $\Theta \cong \Theta_{max}$, резко

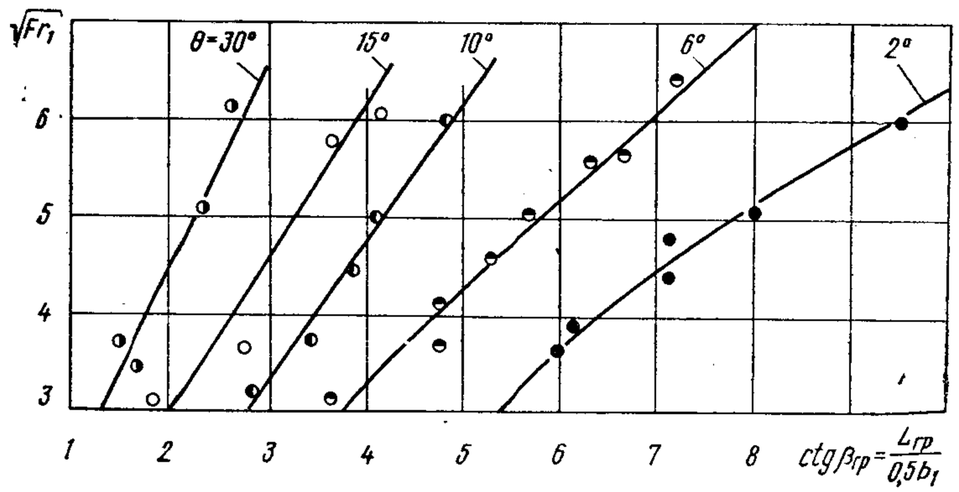


Рис. 16. График для определения расстояния от начала сужения до гребня при $\varepsilon = 0{,}5$ и $i = 0$

уменьшаются скорости и увеличиваются глубины потока, что, в свою очередь, может привести к напорному режиму работы трубы и образованию перед ней водоема. Такое явление для косогорных сооружений весьма опасно, так как при этом возможно разрушение насыпи, резервов, кюветов и других водоотводных сооружений, а также элементов дороги, которые не рассчитаны на пропуск расчетного расхода воды в спокойном состоянии. Для обеспечения протекания расчетного расхода в бурном состоянии потока угол сужения должен быть меньше Θ_{max} и его необходимо определять по экспериментальным данным (см. рис. 14 и 15) или по эмпирическим зависимостям.

Для горизонтального русла и степени сжатия $\varepsilon = 0{,}5$

$$Fr_{min} = 12 - \frac{23{,}3}{\Theta} + \frac{50{,}6}{\Theta^2}, \qquad (23)$$

а для $\varepsilon = 0{,}35$

$$Fr_{min} = 27 - \frac{178{,}0}{\Theta} + \frac{780}{\Theta^2}. \qquad (24)$$

Для продольного уклона $i = 0{,}05$ и степени сжатия $\varepsilon = 0{,}5$

$$Fr_{min} = 7{,}55 - \frac{19{,}2}{\Theta} + \frac{25{,}1}{\Theta^2}, \qquad (25)$$

где Θ — угол сужения в градусах.

Эмпирические зависимости (21)—(25), а также и приведенные графики были получены в результате математической обработки экспериментальных данных на ЭЦВМ методом аппроксимации с помощью способа наименьших квадратов.

При больших углах сужения деформация потока затухает быстрее, чем при малых. Длина распространения деформации уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением угла сужения возрастают потери энергии потока.

Зависимость $\frac{h_{гр}}{h_{01}} = f(\Theta)$ для $i = 0$ и $\varepsilon = 0{,}5$ графически представлена на рис. 17.

Влияние степени сжатия на характеристики бурного потока. Исследования показали, что степень сжатия или длина сужения L_c, которая определяется по формуле

$$L_c = \frac{b_1 - b_c}{2 \operatorname{tg} \Theta}, \qquad (26)$$

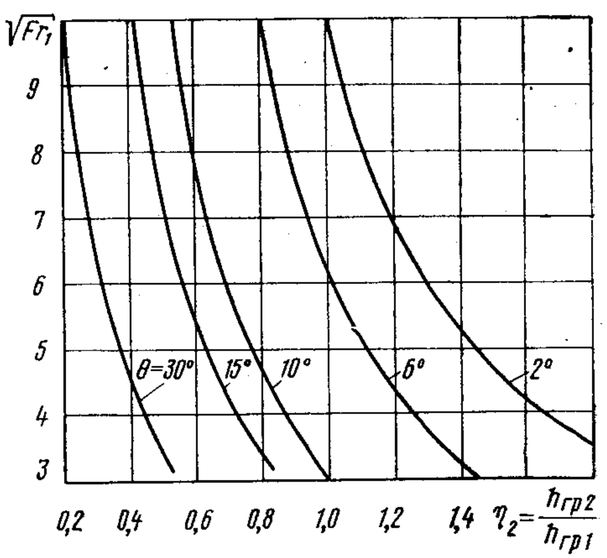


Рис. 17. График для определения относительной высоты второго гребня $\eta_2 = h_{гр2} : h_{гр1}$; $i = 0$; $\varepsilon = 0{,}5$

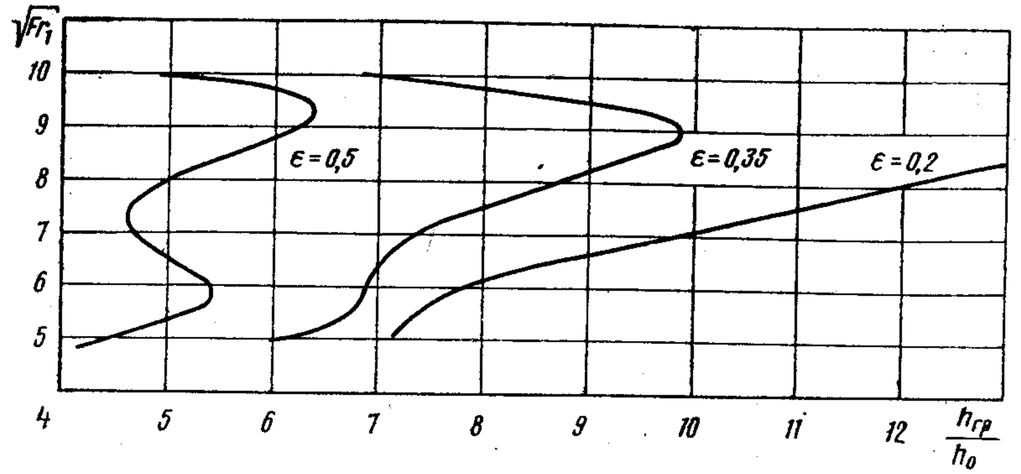


Рис. 18. График для определения относительной высоты гребня $\eta_{гр}=h_{гр}:h_{01}$ при $\Theta=10°$ и $i=0{,}13$

и параметр кинетичности Fr_1 влияют на характер деформации свободной поверхности (рис. 18). Если при степени сжатия $\varepsilon=0{,}5$ для уклонов $i=0$; 0,05; 0,25 с увеличением числа Фруда глубина потока в гребне за слиянием прыжков постоянно увеличивается, то при уклонах $i=0$ и 0,13 степени сужения $\varepsilon=0{,}35$ зависимость глубины $h_{гр}$ от числа Фруда Fr_1 иная. Это объясняется особенным взаимодействием косых гидравлических прыжков между собой и с волнами расширения, которые возникают в вершине угла, образованного стенкой сужения и стенкой отводящего канала или водопропускиого сооружения. Кроме того, это объясняется тем, что с увеличением степени сжатия происходит уменьшение ширины водопропускного сооружения, которое, в свою очередь, приводит:

1) к уменьшению длины и увеличению высоты отраженных гидравлических прыжков;

2) к возрастанию нормальной глубины потока в водопропускном сооружении;

3) к иному характеру интерференции косых прыжков и волн расширения;

4) к возрастанию удельного расхода в сооружении.

При уменьшении коэффициента сжатия от 0,5 до 0,2 и тех же Θ и Fr_1 возрастает длина сужения, что приводит к увеличению потерь энергии, уменьшению скорости потока и соответственно к возрастанию глубины косого прыжка. Получается, что с уменьшением ε высота косого прыжка перед его слиянием с противоположным прыжком увеличивается, соответственно возрастает и глубина потока в локальном гребне $h_{гр}$.

Таким образом, при тех же Θ и Fr_1, но при различных ε, деформации в отводящем канале будут различные. При увеличении сжатия увеличивается угол фронта отраженных прыжков, уменьшается длина отраженных косых гидравлических прыжков, которая зависит от скорости потока и ширины канала. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению деформации свободной поверхности бурного потока.

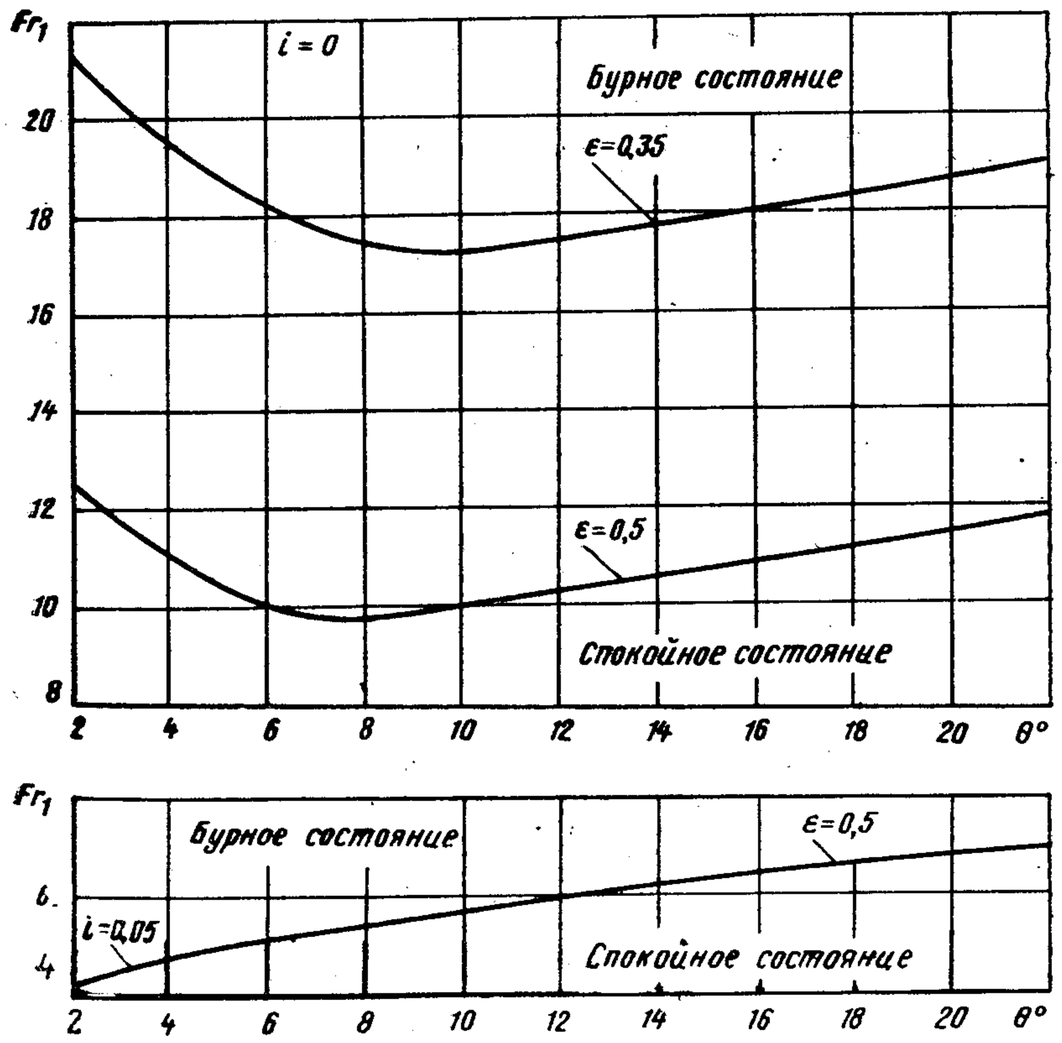


Рис. 19. График для определения типа втекания потока в трубу

Экспериментальные исследования показали, что степень сжатия не влияет на величину угла линии фронта прыжка β_1 и положение гребня, а следовательно, длина $L_{гр}$ от степени сжатия не зависит. Результаты анализа влияния ε на формирование потока для различных степеней сжатия приведены на рис. 18, а также на рис. 19 и 21.

Особенности движения бурного потока через сужение при уклоне $i>0$. Влияние продольного уклона (силы тяжести) и сил трения противоположно, и при определенных значениях уклона силы сопротивления частично или полностью компенсируются действием силы тяжести. Известно, что если число Фруда за косым прыжком $Fr_2<1{,}0$, то в сужении образуется прямой гидравлический прыжок. Число Фруда потока перед сужением при $Fr_2=1$ называется минимальным (Fr_{min}) и оно всегда больше единицы. Значение Fr_{min} зависит от угла сужения, степени сжатия и продольного уклона.

Возможны два типа протекания через сужение: 1) в бурном состоянии; 2) в спокойном с образованием прямого гидравличе-

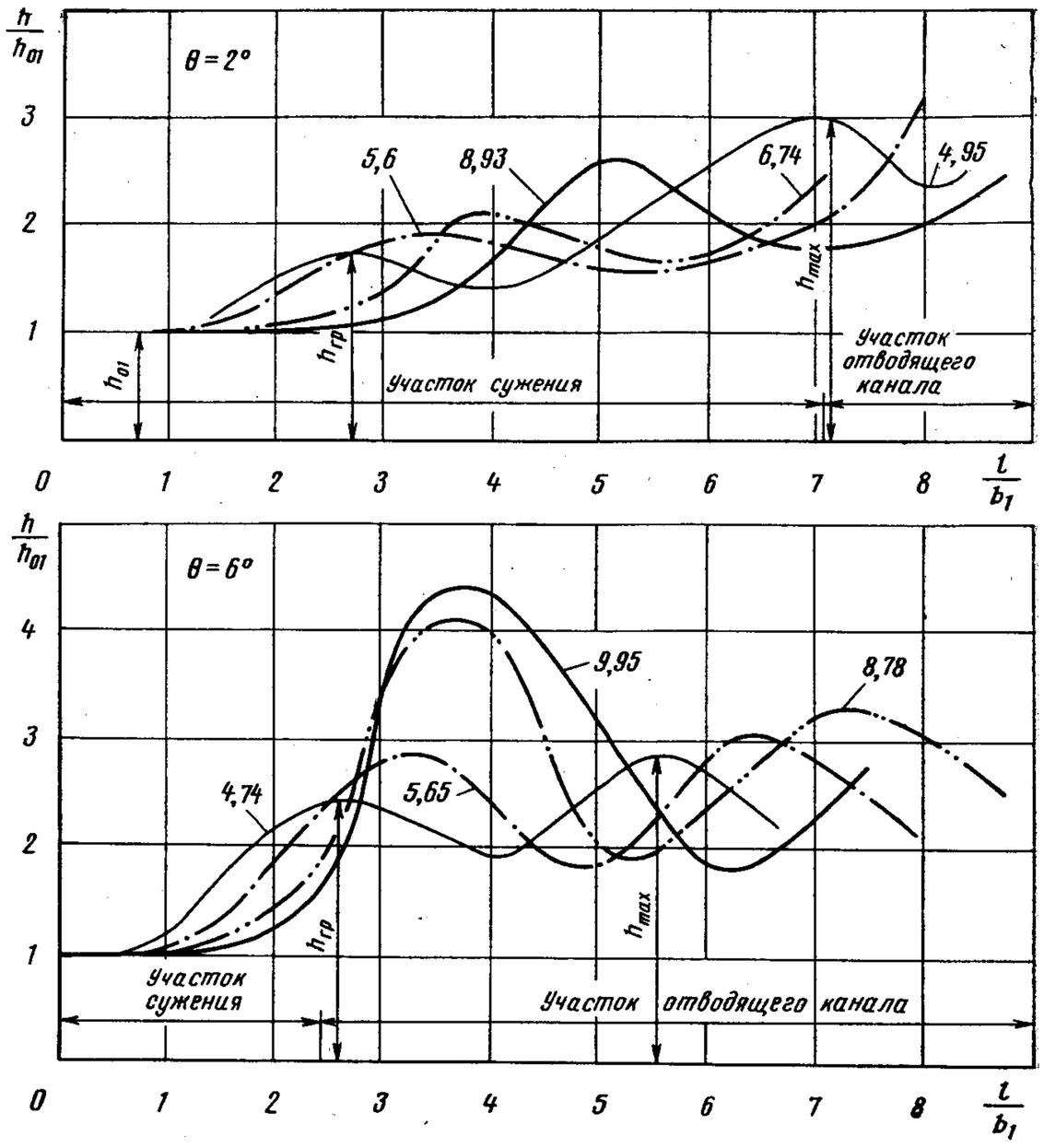


Рис. 20. Продольные профили по оси потока при уклоне дна $i=0$ и степени сужения $\varepsilon=0{,}5$. Цифрами на кривых показаны величины $\sqrt{Fr_1}$

ского прыжка перед сужением. В последнем случае вход работает как в равнинных условиях. Тип протекания устанавливают с помощью графика (см. рис. 19). В условиях, соответствующих верхней зоне графика, поток сохраняет бурное состояние.

При уклонах $i=0{,}13$ и более образование прямого гидравлического прыжка не наблюдается. При значениях уклона от 0,05 до 0,13 пользуются графиком для $i=0{,}05$, что дает некоторый запас. С увеличением уклона дна значение Fr_{min}, соответствующее образованию прямого гидравлического прыжка, уменьшается. Это подтверждается результатами экспериментов (см. рис. 18).

Для изучения влияния уклона дна на деформацию бурного потока были проведены эксперименты при уклонах $i=0$; 0,05; 0,13 и 0,25. Результаты эксперимента показали, что высота первого гребня с увеличением уклона существенно возрастает. Это вызывается изменением взаимодействия косых прыжков и структуры косого прыжка в сужении. Как известно, эпюра скоростей по вертикали существенно изменяется с возрастанием уклона. Вместе с тем увеличивается раздробленность, аэрация потока и длина локального гребня. Увеличение длины гребня объясняется тем, что траектория падения частиц жидкости, расположенных в верхней части гребня, удлиняется с увеличением уклона дна и расстояния от вершины первого гребня до первой впадины возрастает.

При некоторых сочетаниях продольного уклона, угла сужения и числа Фруда максимальная глубина потока наблюдается не в первом гребне, а в одном из последующих гребней (см. рис. 20). Образование максимальной глубины потока h_{max} не в первом, а в одном из последующих гребней объясняется рядом обстоятельств. Как известно, свободная поверхность бурного потока в сужении и в отводящем канале представляет собой затухающую систему волн, и свободная поверхность образуется в результате наложения волн на кривую подпора, сопрягающую потоки перед сужением с глубиной h_{01} и в отводящем канале, глубина которого h_{02}. Соотношение глубин h_{01} и h_{02} зависит от числа Фруда. С уменьшением числа Фруда крутизна кривой подпора возрастает. Поэтому, когда волны накладываются на кривую большей кривизны, глубина потока в одном из последующих гребней становится больше, чем в первом.

Кроме того, из двухмерной теории известно, что при уменьшении числа Фруда и постоянных значениях других параметров угол β_1 возрастает, следовательно, уменьшаются расстояние между гребнями и высота косого прыжка. Эксперименты показали, что при продольных уклонах, равных 0,13 и 0,25, для всех значений чисел Фруда максимальная глубина соответствует первому гребню. Но при $i=0$ и 0,05 имеет $h_{max}>h_{гр}$ в большом диапазоне чисел Фруда. Следовательно, на величину и положение максимальной глубины большое значение оказывает продольный уклон. Установлено также, что при нулевом уклоне характерной глубиной потока является максимальная глубина h_{max}, а не высота первого гребня $h_{гр}$, и проектировать размеры сужения и средней части трубы надо с учетом величины h_{max}.

Наличие глубины потока, превышающей расчетную, приводит к захлебыванию трубы и к резкому изменению режима протекания воды. Это учитывают при проектировании с помощью табл. 10, где приведены значения h_{max}: $h_{гр}$ для различных чисел Фруда и углов сужения при уклонах от 0 до 0,10. В табл. 10 показана область условий, при которых расчетной глубиной является h_{max}.

Таблица 10

$\sqrt{Fr_1}$	Углы сужения Θ°				$\sqrt{Fr_1}$	Углы сужения Θ°			
	2	6	10	15		2	6	10	15
	h_{max}: $h_{гр}$ при $i=0$ и $\varepsilon=0,5$					h_{max}: $h_{гр}$ при $i=0$ и $\varepsilon=0,5$			
3,2	2,10	1,2	1,5	1,10	6,0	1,58	1,03	1,00	—
3,6	2,03	1,17	1,35	1,08	7,0	1,42	1,0	—	—
4,0	2,01	1,14	1,23	1,05	8,0	1,25	—	—	—
4,5	1,92	1,10	1,10	1,03	9,0	1,10	—	—	—
5,0	1,79	1,06	1,06	1,00	10,0	1,00	—	—	—

Расчет сужений для прямоугольной трубы. Расчет прямоугольной трубы при сопряжении с прямоугольным подводящим быстротоком (см. рис. 9) ведется в следующем порядке.

По расчетному расходу $Q_р$ предварительно подбирают отверстие трубы с нормальным входным звеном, задаются степенью сжатия, равной 0,5 или 0,35, и определяют ширину подводящего быстротока b_1. Затем по размерам быстротока и значениям $Q_р$, гидравлической шероховатости n и i определяют нормальную глубину потока h_{01} и число Фруда. С помощью графика (см. рис. 19) для уклонов дна $i=0$ и $i=0,05$, степеней сжатия $\varepsilon=0,5$ и $\varepsilon=0,35$ и заданных гидравлических характеристик определяют наибольший угол сужения Θ_{max}, при котором еще сохраняется бурное состояние потока. На графиках (см. рис. 19) области, расположенные ниже кривой заданной степени сжатия, соответствуют спокойному состоянию потока, а области выше этой кривой — бурному состоянию. Для уклона $i\geqslant 0,13$ поток в сужении всегда находится в бурном состоянии. При уклонах от 0,5 до 0,1 угол сужения подбирают по графику для $i=0,05$, что обеспечивает некоторый запас.

По графикам (см. рис. 14 и 15) для $i=0,05$ и $\varepsilon=0,5$ определяют расчетную глубину потока ($h_{гр}$ или h_{max}). Если за расчетную глубину принимают h_{max}, то по табл. 10 определяют отношение $h_{max}:h_{гр}$, а затем h_{max}. По величине h_{max} назначают высоту трубы с нормальным входным звеном; при этом необходимо соблюдать, чтобы высота трубы была больше максимальной глубины h_{max} и соответствовала типовым размерам.

Если за расчетную глубину принято $h_{гр}$, то по значениям i, Fr_1, ε и углу сужения $\Theta<\Theta_{max}$ с помощью уравнения (19) определяют относительную высоту гребня $\eta=h_{гр}:h_{01}$ и затем наибольшую высоту гребня $h_{гр}=\eta h_{01}$. Если уклоны быстротоков отличаются от принятых в графиках, то величину $h_{гр}:h_{01}$ берут по линейной интерполяции между ближайшими значениями уклонов.

Таким же образом поступают при определении относительного расстояния гребня. Вначале по уравнению (20) определяют относительное расстояние от начала сужения до максимальной высоты гребня $\operatorname{ctg}\beta'=\dfrac{L_{гр}}{0,5b_1}$, а затем расстояние от начала сужения до гребня $L_{гр}=0,5b_1\operatorname{ctg}\beta'$.

По принятым величинам Θ, b_1 и b_c определяют длину участка сужения $L_c=0,5(b_1-b_c)\operatorname{ctg}\Theta$. При $L_c<L_{гр}$ необходимо устройство трубы с повышенными входными звеньями.

Далее проверяют правильность выбора отверстия трубы. Если глубина гребня $h_{гр}<h_т-\Delta_{зап}$, то расчет произведен правильно. Если $h_{гр}>h_т-\Delta_{зап}$, но при этом $h_{гр}-(h_т-\Delta_{зап})<0,5$ м и $L_{гр}>L_c$, то применяют прямоугольную трубу с повышенным входным звеном. При $h_{гр}-(h_т-\Delta_{зап})>0,5$ расчет сужения повторяют для этих же отверстий трубы и степени сжатия ε, уменьшая угол сужения Θ или располагая участок сужения выше по течению. Величину $\Delta_{зап}$ принимают по СН 200-62, § 29.

Определяют длину участка с повышенными входными звеньями $l_{пз}$. Для этого по графикам (рис. 21 и 22) находят высоту второго гребня. Если $h_{гр\cdot1}-h_{гр\cdot2}>0,5$ м, то длина участка $l_{пз}=L_{гр}-L_c+\Delta_{зап}$. Здесь $\Delta_{зап}=2$ м — запас, принимаемый для устранения встречи бурного потока со стенкой закладного блока. При $h_{гр\cdot1}-h_{гр\cdot2}<0,5$ м по графику (см. рис. 22) определяют расстояние λb_1 и длину участка принимают равной $l_{пз}=L_{гр}-L_c+l_2+\Delta_{зап}$. Если длина участка выражается не целым числом метров, то ее округляют в бо́льшую сторону.

Затем строят продольный профиль потока по максимальным глубинам косого прыжка в сечениях и по нему определяют высоты стенок сужения. При этом принимают, что глубина потока вдоль фронта прыжка на участке от начала сужения до гребня меняется линейно от h_{01} до $h_{гр\cdot1}$. Высоту стенок сужения назначают с учетом запаса $\Delta_{зап}=0,25$ м. Если $h_{гр\cdot1}$ располагается перед трубой, то на участке от $h_{гр\cdot1}$ до трубы высота стенок изменяется от $h_{гр.1}+0,25$ м до высоты трубы. При устройстве подводящего быстротока угол сужения Θ принимают минимальным. При отсутствии подводящего быстротока и наличия только сужения величину угла Θ и размер отверстия водопропускного сооружения определяют на основе технико-экономического сравнения.

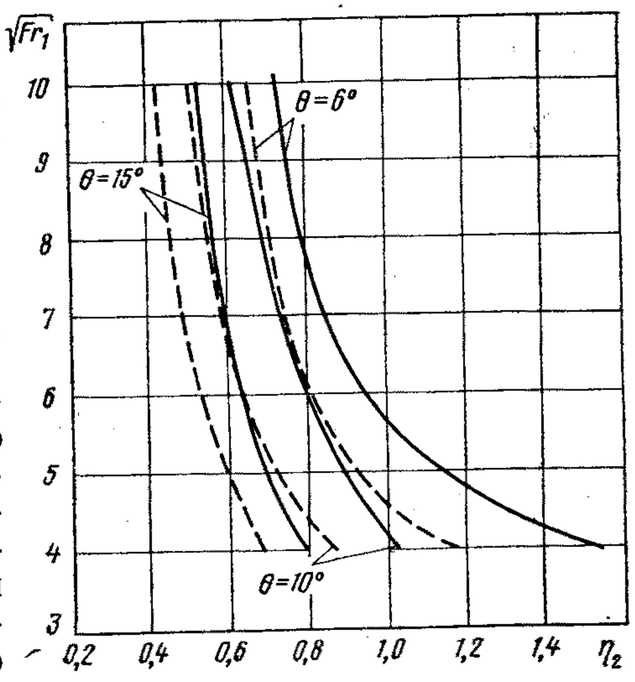


Рис. 21. График для определения относительной высоты второго гребня $\eta_2=h_{гр2}:h_{гр1}$. Сплошными линиями показаны величины при $\varepsilon=0,35$ и $i=0$, пунктирными — при $\varepsilon=0,5$ и $i=0,13$

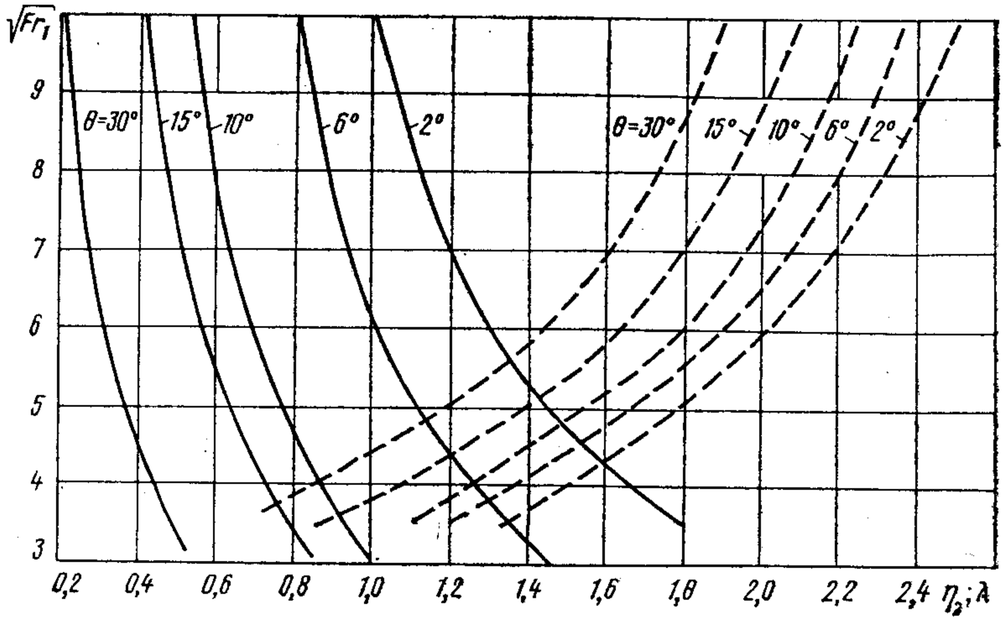


Рис. 22. График для определения характеристик второго гребня при $i=0$ и $\varepsilon=0{,}5$. Сплошными линиями даны величины для $\eta_2=h_{гр2}:h_{гр1}$, пунктирными — относительное расстояние между гребнями, т. е. $\lambda=l_2:b_1$

Примеры гидравлического расчета сужений

Пример 1. Дано: расчетный расход воды $Q_р=12{,}0$ м³/с; продольный уклон быстротока и трубы $i=0{,}05$. Требуется определить размеры входного сужающегося участка и трубы.

По заданному расходу принимаем прямоугольную трубу отверстием $b=1{,}5$ м с нормальным входным звеном и с быстротоком шириной 3,0 м прямоугольного сечения из сборных железобетонных блоков. По уравнению Шези при коэффициенте гидравлической шероховатости $n=0{,}016$ определяем нормальную глубину в быстротоке $h_{01}=0{,}56$ м и число Фруда $Fr_1=9{,}3$. Принимаем угол сужения $\Theta=10°$. При $Fr_1=9{,}3$ и $i=0{,}05$ по графику (рис. 19) убедимся, что этот угол меньше предельного. Если бы график не позволил точно определить Q_{max}, то пришлось бы находить Fr_{min} для принятого $\Theta=10°$ по формуле (25)

$$Fr_{min}=7{,}55-\frac{19{,}2}{\Theta}+\frac{25{,}1}{\Theta^2}=5{,}9.$$

Так как $Fr_1=9{,}3>5{,}9$, то поток в сужении протекает в бурном состоянии.

Из графика (см. рис. 14) видно, что для угла $\Theta=10°$ и $Fr_1=9{,}3$ за расчетную глубину нужно принять h_{max}. Имея по табл. 10 отношение $h_{max}:h_{гр}=1{,}5$, получаем $h_{max}=1{,}5\,h_{гр}$. По графику (см. рис. 14) отношение $h_{гр}:h_1=3{,}4$, следовательно, высота гребня $h_{гр}=0{,}56\cdot3{,}4=1{,}90$ м и $h_{max}=1{,}90\cdot1{,}5=2{,}85$ м.

Для пропуска расхода необходима прямоугольная труба с нормальным входным звеном высотой 3,35 м. Типовая прямоугольная труба отверстием 1,5 м имеет высоту 2,0 м и для пропуска заданного расхода недостаточна. Поэтому необходимо увеличить размеры трубы и подводящего быстротока или уменьшить угол сужения Θ. Для определения $h_{гр}$ надо применить зависимости:

$$\frac{h_{гр}}{h_{01}}=f(\Theta)\quad\text{и}\quad\frac{h_{гр}}{h_{01}}=f(i).$$

Принимаем прямоугольную трубу отверстием 2,0 м. При степени сжатия $\varepsilon=0{,}5$ ширина подводящего быстротока равна 4,0 м.

Далее поверочный расчет повторяется в такой же последовательности.

При $Q_р=12{,}0$ м³/с; $i=0{,}5$; $n=0{,}016$ и $b_1=4$ м получаем $h_{01}=0{,}42$ м;

$$Fr_1=\frac{12^2}{9{,}8\cdot4^2\cdot0{,}42^3}=12{,}3\quad\text{и}\quad\sqrt{Fr_1}=3{,}51.$$

Для угла $\Theta=10°$ и $Fr_{min}=5{,}9$, следовательно, $Fr_1>Fr_{min}$ и движение потока происходит в бурном состоянии.

За расчетную глубину по графику (см. рис. 14) принимаем h_{max}. Отношение

$$h_{max}:h_{гр}=1{,}4,$$

а отношение $h_{гр}:h_1=3{,}8$ при $Fr=12{,}3$; $\Theta=10°$ и $i=0{,}05$.

Отсюда $h_{гр}=3{,}8\cdot0{,}42=1{,}60$ м; $h_{max}=1{,}60\cdot1{,}4=2{,}24$ м.

Высота нормального звена принятой трубы составляет 2,0 м и, следовательно, пропуск заданного расхода воды $Q_р$ при безнапорном режиме не обеспечивается. Если местные топографические и геологические условия позволяют увеличить длину участка сужения, то принимаем угол $\Theta=6°$, в противном случае надо увеличить отверстие трубы. Расчет сужения и сооружения в этом случае повторяется.

Уменьшение угла сужения позволяет снизить вертикальный размер трубы, но в то же время потребуется увеличить длину участка сужения. Оптимальные размеры водопропускного сооружения и входного сужающегося участка надо определять на основе технико-экономического сравнения.

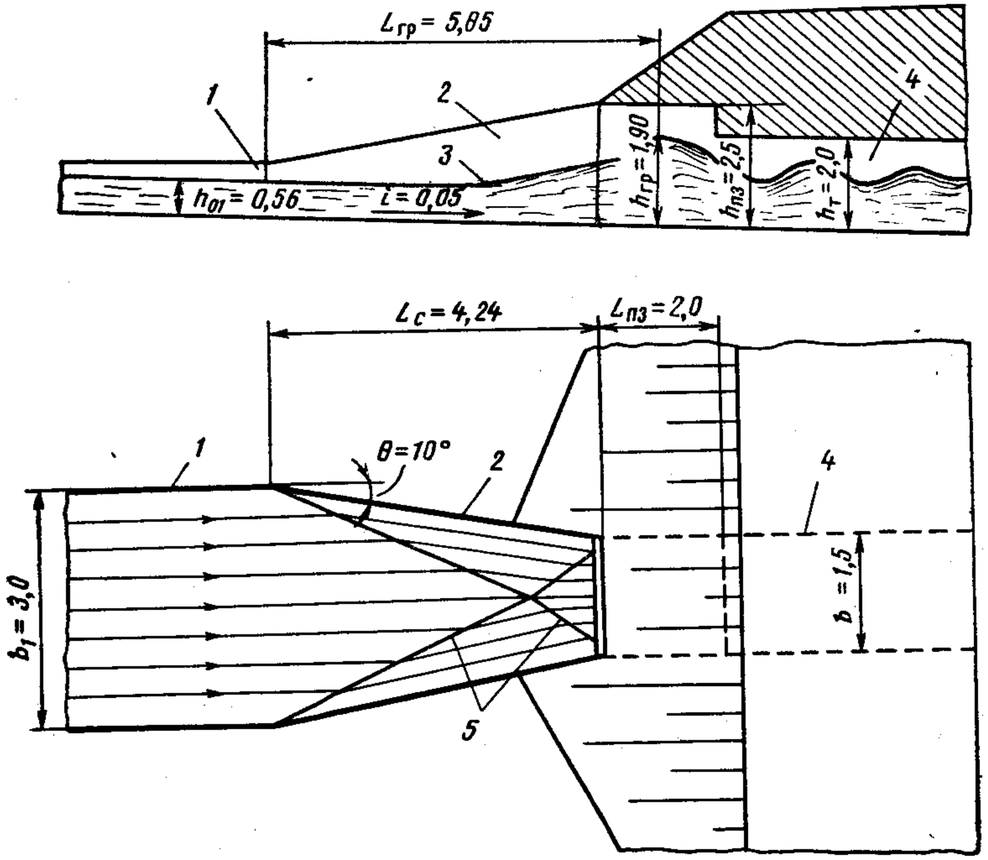


Рис. 23. Продольный разрез и план сужения косогорной трубы:

1 — подводящий быстроток; *2* — сужение; *3* — поверхность потока; *4* — водопропускная труба; *5* — косые прыжки

Пример 2. Дано: расчетный расход воды $Q_р = 12{,}5$ м³/с; средний уклон быстротока и трубы $i = 0{,}13$. Подводящий быстроток прямоугольного сечения шириной $b = 1{,}5$ м принят сборной конструкцией из железобетонных блоков. Требуется рассчитать сопряжение быстротока с трубой.

По заданному расходу принимаем прямоугольную трубу отверстием $b = 1{,}5$ м с нормальным входным звеном (рис. 23). Степень сжатия $\varepsilon = b_с : b_1 = 0{,}5$. Для заданных характеристик потока и размеров быстротока определяем нормальную глубину, считая коэффициент гидравлической шероховатости $n = 0{,}016$. Имеем $h_{01} = 0{,}42$ м, соответственно $Fr_1 = 24{,}0$ и $\sqrt{Fr_1} = 4{,}9$.

При уклоне $i = 0{,}13$, как показали экспериментальные исследования, протекание происходит всегда в бурном состоянии, и поэтому минимальное число Фруда или наибольший угол отклонения определять не нужно.

По графику (см. рис. 15) при $\varepsilon = 0{,}5$ для заданного угла сужения определяем отношение $\eta = h_{гр} : h_1$, а затем $h_{гр} = h_1\eta$.

Для сравнения рассчитываем при углах сужения Θ, равных 10 и 20°: для $\Theta = 20°$ имеем $\eta = 7{,}7$ и $h_{гр} = 3{,}24$ м, а для $\Theta = 10°$ получаем $\eta = 4{,}64$ и $h_{гр} = 1{,}95$ м.

Как показали экспериментальные исследования, при заданном уклоне расчетной глубиной всегда является глубина потока в первом локальном гребне $h_{гр}$ и для пропуска заданного расхода при угле сужения $\Theta = 20°$ принятая труба не подходит. Поэтому для пропуска этого расхода при угле $\Theta = 10°$ принимаем прямоугольную трубу отверстием 1,5 м с повышенным входным звеном (высота трубы на входе $h_т = 2{,}5$ м) в этом случае сохраняется условие безнапорного протекания в трубе.

Определяем относительное расстояние от начала сужения до наибольшей высоты гребня по уравнению (22):

$$\operatorname{ctg}\beta' = \frac{1}{A + B\sqrt{Fr_1} + CFr_1} = \frac{1}{0{,}53 - 0{,}1 \cdot 4{,}9 + 0{,}007 \cdot 24} = 4{,}82;$$

$$\operatorname{ctg}\beta' = \frac{L_{гр}}{0{,}5b_1}; \quad L_{гр} = \operatorname{ctg}\beta' \cdot 0{,}5b_1 = 4{,}82 \cdot 0{,}53 = 7{,}23 \text{ м}.$$

Для угла $\Theta = 10°$ и заданных размеров быстротока и трубы определяем длину $L_с$ участка сужения:

$$L_с = 0{,}5(b_1 - b_с)\operatorname{ctg}\Theta = 0{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 5{,}67 = 4{,}26 \text{ м}.$$

Так как расстояние $L_{гр} = 7{,}23$ м, что больше длины участка сужения, то для размещения гребня в трубе необходим участок с повышенными звеньями.

По графику (см. рис. 21) находим $\eta'' = h_{гр.2} : h_{гр.1}$ и затем $h_{гр.2} = \eta'' h_{гр.1} = 0{,}72 \cdot 1{,}95 = 1{,}4$ м. Высота второго гребня на 0,55 м меньше первого и длина участка $l_{пз}$ с повышенными звеньями будет $l_{пз} = L_{гр} - L_с + 2$ м $= 7{,}23 - 4{,}26 + 2 = 4{,}97$ м.

Принимаем $l_{пз} = 5{,}0$ м.

Таким образом, для пропуска расчетного расхода воды $Q_р = 12{,}5$ м³/с при $\varepsilon = 0{,}5$ и $\Theta = 10°$ принимаем прямоугольную трубу отверстием 1,5 м с повышенным входным звеном. Длина участка с повышенными входными звеньями составляет $l_{пз} = 5$ м. На остальном протяжении труба имеет нормальные звенья (см. рис. 23).

Сужения трапецеидальных быстротоков. Для выяснения работы трапецеидальных быстротоков были выполнены в ЦНИИСе экспериментальные исследования ограниченного объема. На их основании представилось возможным рекомендовать аналогичный порядок расчета и для случая трапецеидальных русел, заменяя их в расчете прямоугольными с той же глубиной и той же площадью живого сечения перед сужением. Это дает некоторый запас.

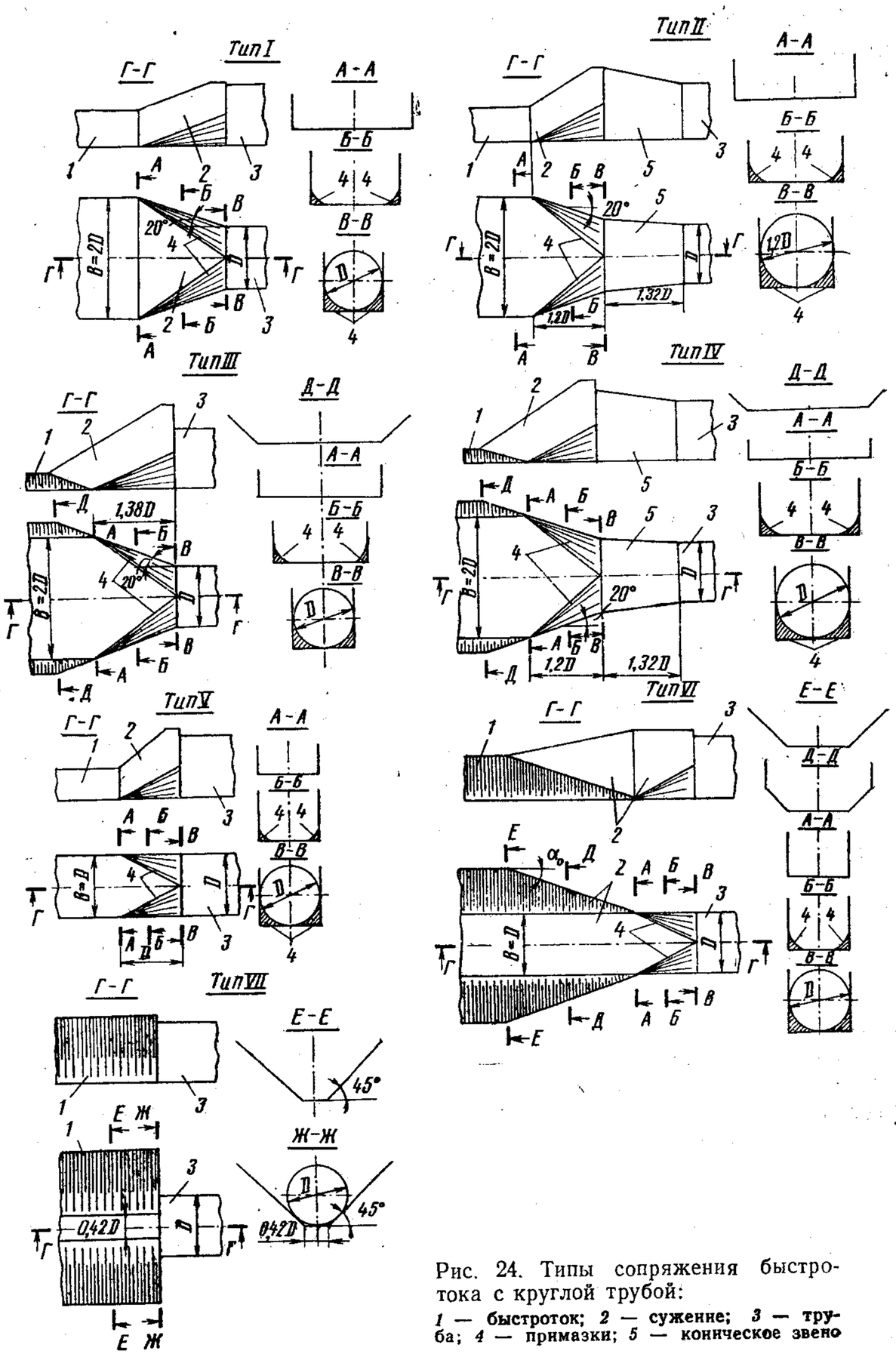


Рис. 24. Типы сопряжения быстротока с круглой трубой:
1 — быстроток; *2* — сужение; *3* — труба; *4* — прижазки; *5* — коническое звено

Сопряжение быстротоков с круглыми трубами. На основе проведенных в ЦНИИСе экспериментальных исследований гидравлической работы сопряжений круглых труб с быстротоками были рекомендованы к применению типы сопряжения быстротока с круглой трубой (рис. 24):

тип I — прямоугольный быстроток шириной вдвое больше отверстия трубы с нормальным входным звеном;

тип II — то же, но труба с коническим входным звеном:

тип III — трапецеидальный быстроток шириной по дну вдвое больше отверстия трубы с нормальным входным звеном;

тип IV — то же, но труба с коническим входным звеном;

тип V — прямоугольный быстроток шириной, равной отверстию трубы с нормальным входным звеном;

тип VI — трапецеидальный быстроток шириной по дну, равной отверстию трубы с нормальным входным звеном;

тип VII — трапецеидальный быстроток, одиночные откосы и дно которого касательны к очертанию трубы с нормальным входным звеном.

В этих схемах конструкция основных и конических звеньев принята по типовым проектам равнинных труб. Ввиду того что в косогорных трубах наиболее распространен угол сужения раструба оголовков 20°, эксперименты были проведены при этом угле раструба.

Принцип устройства сопряжений, кроме типа VII, следующий. Сужение осуществляется с помощью вертикальных прямолинейных стен, расстояние между которыми перед входом в трубу равно диаметру ее входного отверстия; в начале же сужения расстояние между стенами равно ширине быстротока поверху. Для более плавного втекания потока перед трубой на участке сужения устроены дополнительные обтекатели в виде примазок, поверхность которых получается в результате перемещения прямолинейной образующей с неподвижным одним концом на дне в начале сужения и другим, движущимся по нижнему квадранту входного звена.

Наиболее сложный — это тип VI, в котором сначала прямолинейным сужением осуществляется переход от наклонного откоса трапецеидального быстротока к вертикальному, а затем — на участке (длиной, равной диаметру трубы) от прямоугольного сечения к круглой трубе. Примазки даны только на втором участке. Тип VII сопряжения наиболее прост и примазок не имеет.

Исследования имели целью установить: характер протекания воды при расчетном расходе; допустимый расход, при котором выполняется требование СН 200-62, § 29 о просвете над потоком в трубе; условия возникновения и характеристику гидравлического прыжка в сужении или перед ним; влияние типа входного звена на характер протекания потока; режим протекания потока при форсированном расходе $Q_ф = 1{,}5\ Q_р$.

Опытная установка и методика эксперимента в основном были те же, что и при исследовании сопряжений с прямоугольными трубами. Модель круглой трубы диаметром 20 см с нормальным и коническим входным звеном из органического стекла моделировала в масштабе 1:5 круглую трубу диаметром 1,0 м с расчетным расходом 1,4 м³/с. На участке быстротока измеряли отметки поверхности потока и дна. В трубе же картину протекания наблюдали визуально через прозрачные стенки и по результатам наблюдений составляли схемы протекания потока.

При сопряжении быстротока с круглой трубой также возможны две схемы протекания: с образованием перед сужением гидравлического прыжка и с сохранением бурного состояния потока. Большое влияние на протекание оказывает устройство примазок, благодаря которым сопротивление значительно уменьшается.

Например, опыты с сопряжением типа III показали, что при наличии примазок и числах Фруда от 8 до 25 протекание проходило плавно, и максимальная глубина на входе в трубу была $(0{,}6 \div 0{,}74)\ D$. Непосредственно за входом поток сжимается и здесь происходит слияние струй, за слиянием струй максимальная глубина несколько возрастает, а дальше начинает уменьшаться. На расстоянии, равном $(4 \div 5)\ D$, поверхность потока становится спокойной и ровной. Труба работает хорошо и с большим запасом пропускной способности. При устранении примазок картина протекания значительно ухудшается и даже при небольших расходах в сужении образуются вальцы; глубина потока на входе и в трубе резко возрастает, поэтому примазки следует считать обязательными.

При расчетном расходе на участке сужения образуются косые прыжки, которые встречаются между собой в трубе на расстоянии от входа, равном $(0{,}1 \div 2)\ D$ в зависимости от типа сопряжения. Втекание потока в трубу плавное. Максимальная глубина устанавливается в трубе в зоне боковых отжимов. С увеличением числа Фруда место слияния струй смещается незначительно, а область боковых отжимов заметно увеличивается. Сужение потока на входе незначительно, протекание расчетного расхода проходит хорошо, и есть возможность увеличения расхода.

На протекание бурного потока влияет тип входного звена. При коническом входном звене глубина на входе на 20—30% меньше, чем при нормальном звене. Коническое звено способствует более плавному втеканию потока.

При пропуске расхода в 1,5 раза больше расчетного $Q_ф = 1{,}5 Q_р$ картина протекания также хорошая; сохраняется безнапорный режим и имеется возможность увеличить пропускаемый расход. При пропуске расхода, большего, чем 1,5 $Q_р$, глубина потока около стенок становится больше $0{,}5D$, а так как примазки имеют высоту $0{,}5D$, то в этом случае боковые

струи ударяются о верхнюю часть портала и выплескиваются из сооружения. Глубины потока и неравномерность глубин в поперечном сечении сильно возрастают, и допустимый по СН 200-62 § 29 зазор над поверхностью воды не сохраняется. Поэтому пропускать расход более 1,5 $Q_{расч}$ не следует.

Чтобы на основе исследований выделить наиболее выгодные в гидравлическом отношении сопряжения, составлена табл. 11, в которой приведены глубины на входе в трубу диаметром 1 м (при иных диаметрах глубины пропорциональны диаметрам) при расчетном расходе. Наименьшие глубины получаются при типе VII сопряжения. Далее в порядке убывания следуют типы V, VI, II, IV, I и III.

Протекание потока по схеме с гидравлическим прыжком возможно для сопряжений:

Типов I и IV	при числе Фруда	. . . . .	до 7
Типа II	» »	. . . . .	» 6
Типа III	» »	. . . . .	» 8

Протекание потока по схеме бурного состояния возможно для сопряжений:

Типов I и IV	при числе Фруда	. . . . .	не менее 10
Типа II	» »	. . . . .	» 9
Типа III	» »	. . . . .	» 12

При промежуточных значениях чисел Фруда возможны обе схемы протекания. При типах V, VI и VII сопряжений и числах Фруда от 7 до 25 гидравлический прыжок не возникает.

Так же, как и при сопряжении быстротоков с прямоугольной трубой, расчет неравномерного движения в сужении по Чарномскому является приблизительным, так как отражает поведение средних, а не фактических глубин в поперечных сечениях потока. Однако фактические глубины потока в сужении существенно отличаются от средних (см. табл. 11).

Таблица 11

Тип сопряжения быстротока с круглой трубой диаметром 1 м (см. рис. 24)	Числа Фруда								
	12	18	25	12	18	25	12	18	25
	Максимальная глубина, м			Минимальная глубина, м			Средняя глубина, м		
I	0,63	0,51	0,51	0,22	0,25	0,21	0,48	0,39	0,31
II	0,50	0,46	0,42	0,09	0,12	0,16	0,34	0,33	0,30
III	0,74	0,67	0,52	0,19	0,27	0,28	0,51	0,48	0,41
IV	0,53	0,46	0,48	0,12	0,19	0,17	0,39	0,32	0,28
V	0,35	0,37	—	0,11	0,10	—	0,29	0,26	—
VI	0,50	0,45	—	0,08	0,09	—	0,34	0,31	—
VII	0,32	0,35	0,33	0,05	0,05	0,05	0,20	0,21	0,20

Примечание. При диаметре трубы D, не равном 1 м, глубины пропорциональны D.

Для сопряжений быстротоков с круглыми трубами характерны следующие положения:

1) на участке сужения глубина по бокам поперечного сечения больше, а на оси потока меньше средней, но неравномерность слабее, чем при сопряжении быстротоков с прямоугольной трубой;

2) пропускная способность косогорной круглой трубы при безнапорном режиме в 1,5—2 раза больше такой же трубы в равнинных условиях;

3) лучшее сопряжение с точки зрения гидравлики — сопряжение трапецеидального быстротока, одиночные откосы и дно которого касательны к очертанию трубы (тип VII);

4) для пропуска расчетного расхода коническое входное звено не требуется, однако при наличии его вода входит более плавно и труба имеет больший запас пропускной способности;

5) для всех типов сужения, кроме типа VII, примазки в нижних углах сужений необходимы.

Глава III

ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ТРУБЕ

Режимы протекания. Часть водопропускного сооружения, располагающуюся под насыпью и имеющую замкнутое сверху сечение, называют средней частью трубы или собственно трубой, а иногда телом трубы.

Различают три режима протекания воды в трубе: безнапорный, напорный и полунапорный (рис. 25 и 26). Безнапорным называют режим работы, при котором поток на всем протяжении трубы имеет свободную поверхность, т. е. не касается верха трубы. Напорным называют режим работы, когда вода заполняет трубу до самого верха на всем ее протяжении. В этом случае давление в трубе над водой (в верхних точках сечений) не равно атмосферному, а в зависимости от уклона трубы и прочих ее характеристик это давление может быть как выше, так и ниже атмосферного. Полунапорным называют режим, при котором входное отверстие трубы затапливается водой, но в самой трубе течение происходит со свободной поверхностью.

Косогорные водопропускные трубы стремятся проектировать на безнапорный режим, который имеет ряд достоинств.

При безнапорном режиме труба гидравлически работает как водослив. Расход воды Q через прямоугольную трубу отверстием в свету b пропорционален $H^{1,5}$ воды перед входом

$$Q = MbH^{1,5}, \qquad (27)$$

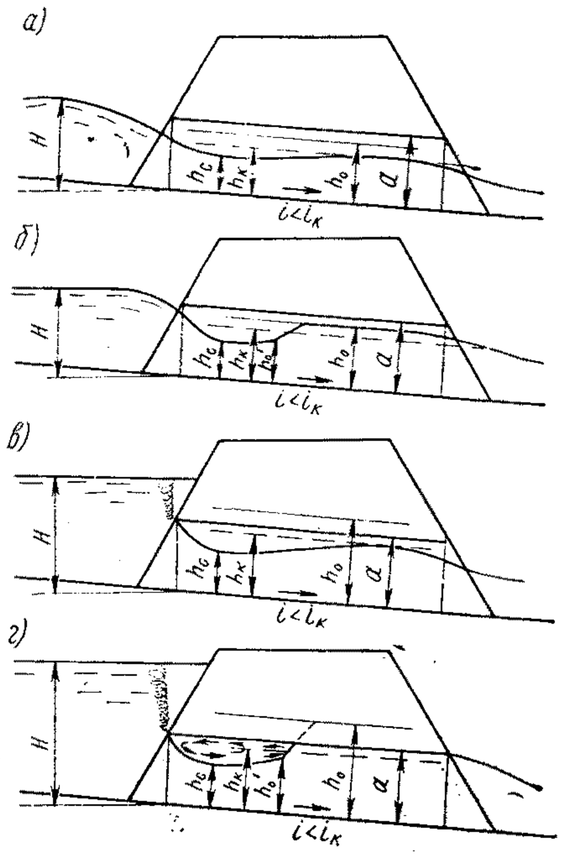


Рис. 25. Режимы протекания воды через трубу с уклоном меньше критического:

а — безнапорный в короткой трубе; *б* — то же, в длинной; *в* — полунапорный; *г* — напорный

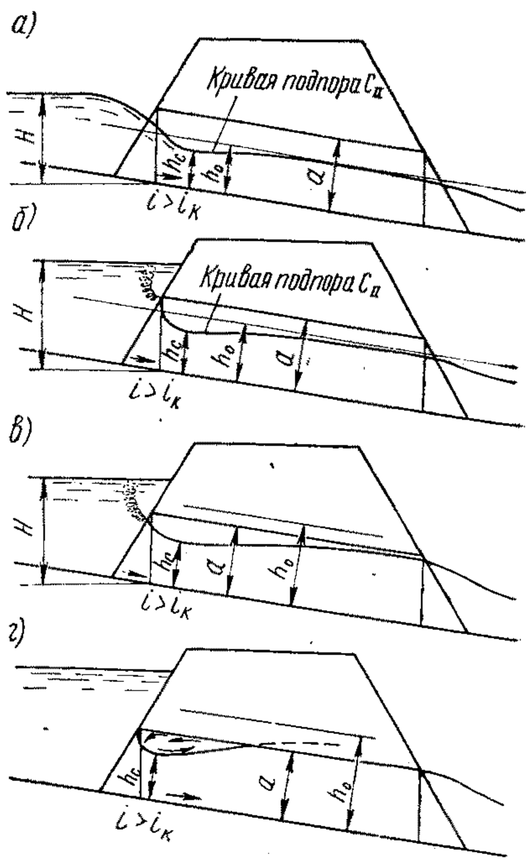


Рис. 26. Режимы протекания воды через трубу с уклоном больше критического:

а — безнапорный; *б* — полунапорный при $h_0<a$; *в* — то же, при $h_0>a$; *г* — напорный

поэтому некоторое увеличение расхода, поступающего к трубе, несущественно увеличивает глубину перед насыпью. А при напорном и полунапорном режимах расход пропорционален квадратному корню из глубины воды перед входом, т. е.

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH}, \qquad (28)$$

и даже небольшое увеличение расхода вызывает значительное увеличение глубины воды перед насыпью.

Второе преимущество безнапорного режима — его устойчивость. Полунапорный режим при некоторых условиях может переходить в напорный (зарядка трубы) и обратно (срыв вакуума). Такие смены режима сопровождаются резкими колебаниями уровня воды перед насыпью и вибрациями трубы. Напорный режим нежелателен еще и потому, что при наличии в трубе давления выше атмосферного вода стремится проникать через стыки звеньев и трещины в насыпь, что может нарушить ее устойчивость. А наличие в трубе вакуума создает опасность засасывания в нее мелких частиц грунта из насыпи, что может

повести к просадке и к промыву насыпи фильтрационными водами. Поэтому техническими нормами допускается напорный режим только для наибольшего (форсированного) расхода и при обеспечении герметичности стыков. Поскольку нет уверенности, что в период эксплуатации трубы не возникнут трещины или не разойдутся стыки, то напорный режим даже для равнинных труб допускают в исключительных случаях.

Проектируя трубу или оценивая ее водопропускную способность, необходимо знать, какой режим гидравлической работы трубы будет возникать в тех или иных условиях.

Для трубы, уложенной с уклоном, который остается меньше критического при всех расходах (см. рис. 25), глубина h_0 равномерного движения будет больше критической глубины $h_к$ воды. При небольшом расходе, когда вход не затоплен, глубина равномерного движения воды будет меньше высоты a трубы и возможны два вида безнапорного протекания.

Если оголовок обычного типа, т. е. портальный, раструбный или воротниковый, то, втекая в трубу, поток резко сжимается с боков, скорость его возрастает, происходит сжатие и в вертикальной плоскости. Глубина воды убывает до величины h_c, называемой глубиной сжатого сечения или сжатого глубиной. Так как $h_c<h_к$, то поток здесь оказывается в бурном состоянии, и вниз от сжатого сечения при уклоне менее критического устанавливается вогнутая кривая подпора типа c_I (см. рис. 5, *а*). Если труба короткая или шероховатость ее невелика, то поток сохранит бурное состояние на всем протяжении трубы (см. рис. 25, *а*). Если же труба будет длинная или с высокой шероховатостью, то энергии потока не хватит для протекания в бурном состоянии и он перейдет в спокойное состояние с глубиной h_0 равномерного движения. Этот переход осуществится гидравлическим прыжком (см. рис. 25, *б*) в том сечении, где глубина бурного потока h'_0 станет сопряженной с нормальной глубиною (см. гл. I «Гидравлический прыжок»).

Если же к трубе будет подходить большой расход, при котором вход затопится, то возрастут и глубины критическая $h_к$ и нормальная h_0, которая может стать даже больше высоты a трубы. В этом случае возможны тоже две качественно разные картины. В короткой трубе (см. рис. 25, *в*) поток не успевает достичь глубины, сопряженной с нормальной, и остается бурным; сечение трубы не заполняется, над потоком имеется атмосферный воздух; такой режим протекания будет полунапорным.

В длинной трубе (см. рис. 25, *г*) поток стремится перейти в спокойное состояние гидравлическим прыжком, но так как $h_0>a$, то поток заполняет все сечение трубы от прыжка и ниже, где давление оказывается выше атмосферного. Этот режим будет напорным. Воздух из пространства, примыкающего к входу, увлекается потоком и это пространство может заполниться водой, образующей поверхностный валец с горизонтальной

осью. Но если над входом возникает вихревая воронка, по которой в трубу будет подаваться достаточно воздуха, то пространство над потоком может или не заполнится водой, или же вместе с возникновением и исчезновением воронки будет периодически заполняться то водой, то воздухом. Однако ниже прыжка поток будет устойчиво заполнять сечение трубы.

Если труба имеет уклон более критического (см. рис. 26), непосредственно за входом образуется сжатое сечение с глубиной $h_c < h_к$. При малом расходе вход остается незатопленным. Возможно $h_c < h_0$ и $h_c > h_0$, но так как все же $h_0 < h_к$, то поток остается бурным и ниже сжатого сечения устанавливаются соответственно либо кривая подпора типа c_{II}, либо кривая спада типа b_{II} (см. рис. 5, *б*). Режим остается безнапорным. При затопленном входе, если $h_0 < a$, то при $h_c < h_0$ получается кривая подпора типа c_{II}, асимптотически приближающаяся к линии нормальных глубин, поток остается бурным, и режим полунапорным (см. рис. 26, *б*). Если бы было $h_c > h_0$, то установилась бы кривая спада типа b_{II}, также тяготеющая к линии нормальных глубин, и при незатопленном выходе режим тоже был бы полунапорным независимо от прочих факторов.

Если линия нормальных глубин лежит выше потолка трубы, т. е. $h_0 \geqslant a$, тогда в короткой трубе кривая подпора c_{II} может остаться ниже потолка трубы, и режим протекания сохранится полунапорным (см. рис. 26, *в*). В длинной трубе кривая свободной поверхности, стремясь приблизиться к линии нормальных глубин, может пересечь линию потолка трубы в точке K (см. рис. 26, *г*). Тогда ниже точки K сечение трубы заполнится водой и режим протекания получится напорный.

Все рассмотренные случаи протекания характерны для плохо обтекаемых оголовков, вызывающих сжатие потока на входе. При хорошо обтекаемых оголовках столь сильного сжатия потока не происходит и у затопленного входа обычно устанавливается напорный режим.

Повышенная шероховатость. Чтобы решить вопрос о том, каков будет режим протекания (напорный или полунапорный), необходимо построить кривые свободной поверхности в трубе, как для быстротока (см. гл. I). Для этого, в свою очередь, необходимо оценить шероховатость трубы, от которой зависят потери напора по длине. В частности, необходимо определить сопротивление труб с повышенной шероховатостью. Роль повышенной шероховатости труб прямоугольного сечения оценивают так же, как и быстротоков, а круглых труб — иначе.

Косогорные трубы часто устраивают из звеньев, укладываемых горизонтально с перепадами на стыках, получая ступенчатый продольный профиль, где ступени создают повышенную шероховатость.

Формулы Е. А. Замарина и Ф. И. Пикалова для ступенчатых прямоугольных русел, полученные около полувека тому

назад, устарели; новейшими исследованиями выявлены их недостаточная точность и неудовлетворительная структура. Поэтому в ЦНИИСе было проведено исследование закономерностей безнапорного течения воды в круглых и прямоугольных ступенчатых и в круглых ребристых трубах. В результате получены эмпирические формулы, позволяющие рассчитывать косогорные сооружения в типичных условиях. При повышенной шероховатости дна можно пренебрегать сопротивлением боковых стен прямоугольного русла, даже если глубина по величине приближается к ширине потока, и пользоваться формулой Шези в таком виде:

$$Q = bhC\sqrt{hi}, \qquad (29)$$

где Q — расход воды, м³/с; h — глубина потока, м; b — ширина русла, м. Определяя коэффициент Шези C в этом случае, можно гидравлический радиус приравнивать глубине над выступом шероховатости.

Прямоугольные ступенчатые трубы. В опытной установке (рис. 27) в головной части гидравлического лотка был сооружен напорный резервуар высотой 2,0 м. В стене резервуара предусмотрено прямоугольное окно шириной 0,5 м, которое изнутри перекрывалось щитом, позволяющим менять высоту отверстия над нижней кромкой окна и получать поток с заданными глубиной и скоростью. С наружной стороны к окну примыкал открытый лоток шириной 0,5 м. Лотку можно было придавать уклон от нуля до 0,3. Ступени из водостойкой фанеры (на всю ширину лотка) длиной 20 либо 10 см закрепляли шурупами. Высоту ступеней варьировали от 5 до 40 мм. Каждый вид ступеней испытывали при уклоне i, при котором ступени получались почти горизонтальными, а также вдвое большем или вдвое меньшем

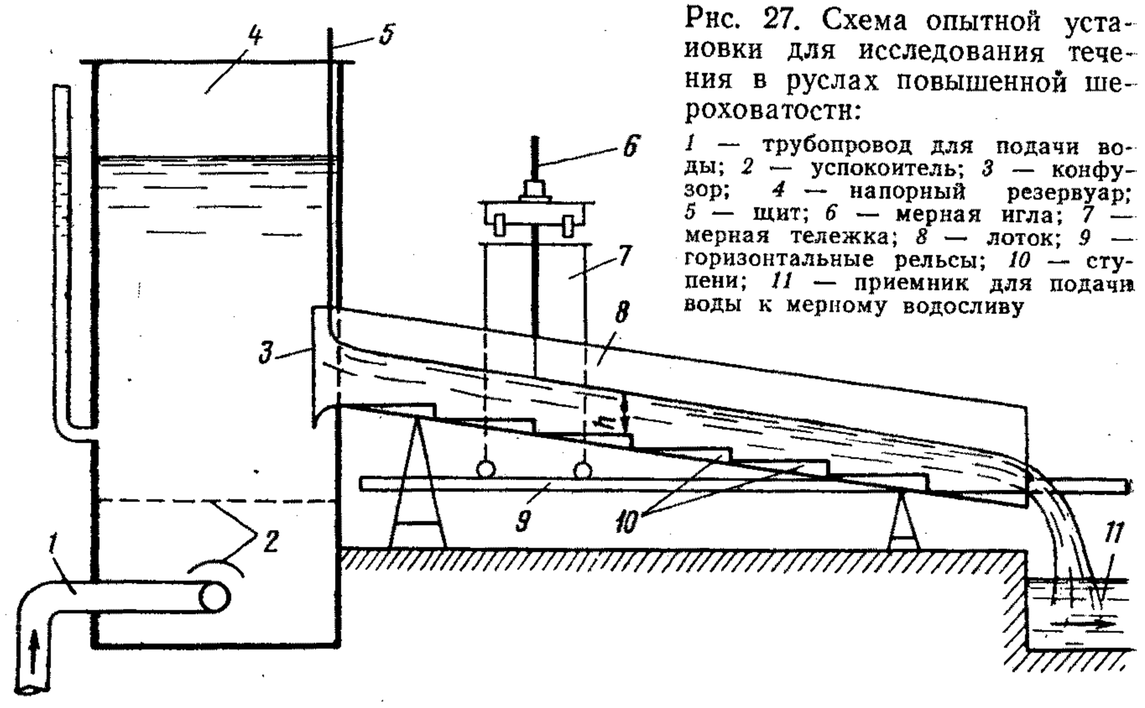


Рис. 27. Схема опытной установки для исследования течения в руслах повышенной шероховатости:

1 — трубопровод для подачи воды; *2* — успокоитель; *3* — конфузор; *4* — напорный резервуар; *5* — щит; *6* — мерная игла; *7* — мерная тележка; *8* — лоток; *9* — горизонтальные рельсы; *10* — ступени; *11* — приемник для подачи воды к мерному водосливу

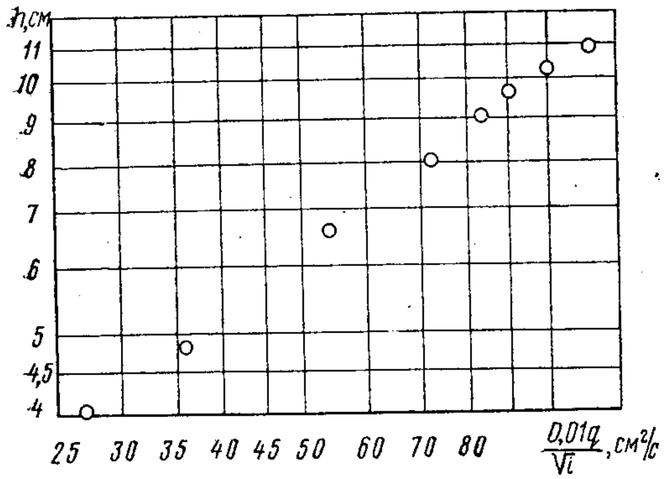


Рис. 28. Зависимость удельного расхода $q/\sqrt{i}$ от глубины h для прямоугольного русла со ступенями при $\Delta = 2{,}43$ см, $l = 20{,}3$ см и $i = 0{,}0492$

уклоне. Над лотком по горизонтальным рельсам перемещалась тележка с мерной иглой и трубкой Пито.

Во время проведения опытов мерной иглой при установившемся движении воды замеряли отметки поверхности ее над ребрами ступеней и отметки самих ребер; разность давала глубину воды. Замеры делали в пяти точках, равномерно распределенных по ширине лотка. Вычисляли среднюю для каждой ступени глубину воды и строили продольный профиль потока. На этом профиле выбирали участок с почти постоянной глубиной, которую и принимали за глубину h равномерного движения.

Для последующего опыта изменяли расход воды и повторяли все замеры.

Опытные точки (рис. 28), полученные на одной модели, накладывали на логарифмическую бумагу в координатах $q/\sqrt{i}$ и h (где $q = Q:b$ — расход на единицу ширины модели, т. е. удельный расход, а i — уклон лотка).

Таблица 12

Серии опытов	Длина l ступеней, см	Высота Δ ступеней, см	Уклон i	$\frac{l}{\Delta}$	$\frac{il}{\Delta}$	$C/\sqrt{g}$ для быстроточного режима
1	9,9	2,33	0,197	4,25	0,829	7,91
2	9,9	2,33	0,0996	4,25	0,42	8,80
3	9,9	2,33	0,142	4,25	0,60	7,98
4	20,3	2,43	0,0999	8,35	0,83	9,21
5	20,3	2,43	0,0492	9,35	0,41	9,90
6	20,3	2,43	0,0252	8,35	0,20	10,36
7	9,94	1,72	0,144	5,78	0,83	8,14
8	9,94	1,72	0,0948	5,78	0,44	9,62
9	9,94	1,72	0,198	5,78	1,14	7,47
10	20,3	2,43	0,198	8,35	1,65	8,19
11	20,1	1,37	0,100	14,7	1,50	9,84
12	20,1	1,37	0,050	14,7	0,74	11,70
13	20,1	1,37	0,0174	14,7	0,26	12,87
14	—	0	0,193	—	—	14,00
15	20,1	0,79	0,010	25,5	0,25	13,34
16	20,1	0,79	0,0238	25,5	0,60	13,60
17	20,1	0,79	0,049	25,5	1,26	12,63
18	—	0	0,050	—	—	16,68
19	—	0	0,025	—	—	17,20
20	—	0	0,100	—	—	18,08

Затем изменяли уклон лотка и делали следующую серию опытов с той же моделью. Выполнив так три серии на одной модели, изменяли размеры ступеней и выполняли еще три серии опытов на следующей модели. Для каждого опыта вычисляли безразмерный скоростной множитель

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{q}{h^{1,5}\sqrt{gi}} \,. \qquad (30)$$

Значения безразмерного скоростного множителя давали на графике (рис. 29) в виде функции относительной глубины $\eta = h:\Delta$. Совокупность такого рода графиков показала, что безразмерный скоростной множитель (а значит, и коэффициент Шези C) в условиях проводимых опытов не зависел от глубины потока, как это ранее установил П. И. Гордиенко. В таком случае скоростной множитель является функцией прежде всего относительной длины ступеней l/Δ и в какой-то мере уклона.

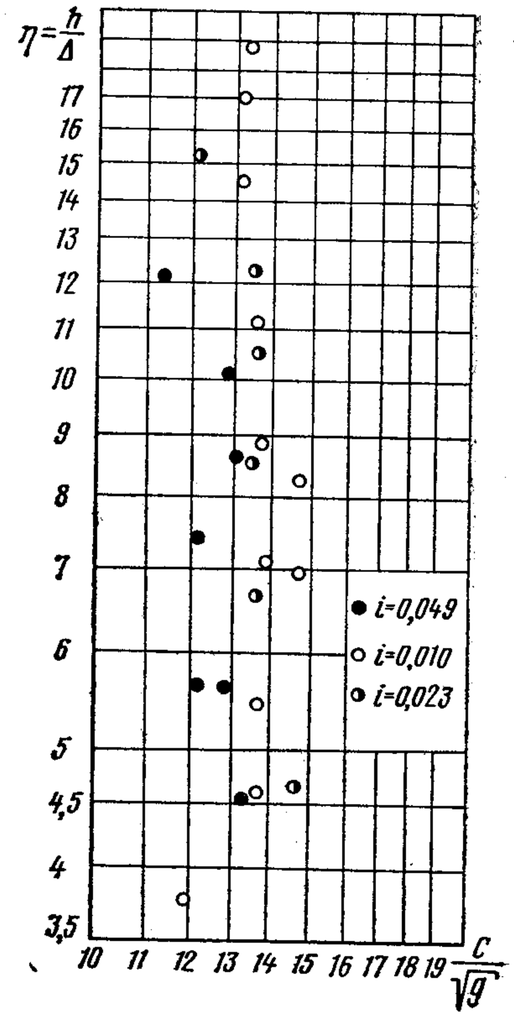


Рис. 29. Зависимость коэффициента $C/\sqrt{g}$ от относительной глубины η потока для прямоугольного русла со ступенями

Для каждой серии опытов вычисляли среднее значение величины $C/\sqrt{g}$ (табл. 12), причем использовали только те опыты, в которых был быстроточный режим течения, а число Фруда значительно больше единицы. Средние значения безразмерного скоростного множителя $C/\sqrt{g}$, полученные во всех сериях со ступенями, выражены графиком в виде точек в функции l/Δ (рис. 30). Кривая на графике соответствует горизонтальным ступеням (изолиния $i:i_0 = 1$) и отражает искомую зависимость. На логарифмической клетчатке эта кривая распрямляется и выражается уравнением

$$\frac{C_0}{\sqrt{g}} = 4{,}4\sqrt[3]{\frac{l}{\Delta}} \,, \qquad (31)$$

где C_0 — коэффициент Шези при горизонтальных ступенях.

На графике (см. рис. 30) точки, лежащие ниже кривой, соответствуют увеличенным уклонам, когда ступени наклонены в сторону течения. Точки, лежащие выше кривой, с цифрами меньше единицы, соответствуют уменьшенным уклонам, т. е. со

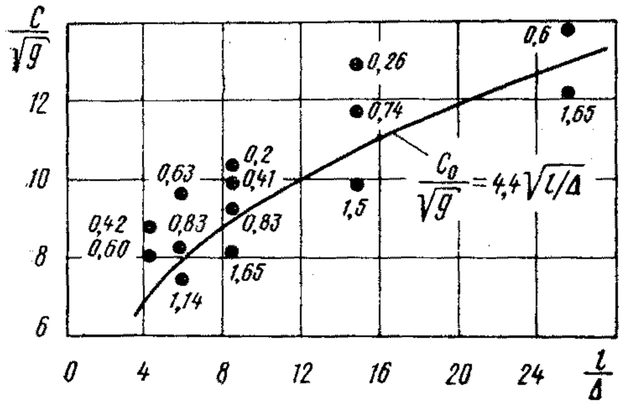


Рис. 30. Зависимость безразмерного скоростного множителя $C/\sqrt{g}$ от относительной длины ступеии l/Δ для русла со ступенями. Цифрами у точек дано отношение: $i : i_o = l : \Delta$; при $i = i_o$ ступени горизонтальны

ступенями, имеющими обратный уклон. Следовательно, с увеличением уклона при прочих неизменных условиях коэффициент Шези убывает. Такую же закономерность наблюдали и другие исследователи. Подобное явление можно объяснить тем, что открытый поток движется под действием силы тяжести и, следовательно, его поведение и свойства зависят от числа Фруда, т. е. от скорости. К этим свойствам относится и затрата энергии на сопротивления движению потока.

Влияние уклона или отклонения ступеней от горизонтального положения приближенно оценивается введением в формулу (31) добавочного члена

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{C_0}{\sqrt{g}} - 1{,}5\left(i\,\frac{l}{\Delta} - 1\right) \qquad (32)$$

или

$$C = 13{,}8\sqrt[3]{\frac{l}{\Delta}} - 4{,}7\left(i\,\frac{l}{\Delta} - 1\right)\ \text{м}^{0,5}/\text{с}. \qquad (33)$$

Установленная зависимость глубины потока h_o от уклона трубы при горизонтальных ступенях, полученная вычислениями по различным формулам (рис. 31), показывает, что характер зависимости $h_0 = f(i)$ при $i > 0{,}14$ по всем формулам получается сходный, причем формула (33) дает в этой области результат, близкий к формуле Гордиенко (18). Однако формула Гордиенко при $i < 0{,}13$ дает резкое падение глубин, а при $i \leqslant 0{,}09$ глубина оказывается даже меньше, чем в трубе без ступеней. Подобный же недостаток имеет и известная формула Пикалова, которая к тому же сильно занижает значение нормальной глубины, завышая коэффициент Шези С. Формула (31) лишь при $i = 0{,}07 \div 0{,}05$, т. е. при $l : \Delta = 20$, дает результат одинаковый с формулой Павловского при коэффициенте шероховатости 0,016. Очевидно при $l : \Delta > 15 \div 20$ нужно переходить на расчет без учета ступеней как фактора шероховатости.

Круглые трубы с поперечными ребрами. Чтобы облегчить гашение энергии на выходе из трубы, стремятся снизить в ней скорость течения, а для этого иногда прибегают к искусственному повышению шероховатости внутренней поверхности. Повышенную шероховатость в круглых трубах обеспечивают устройством специальных ребер шероховатости (обойм) в виде

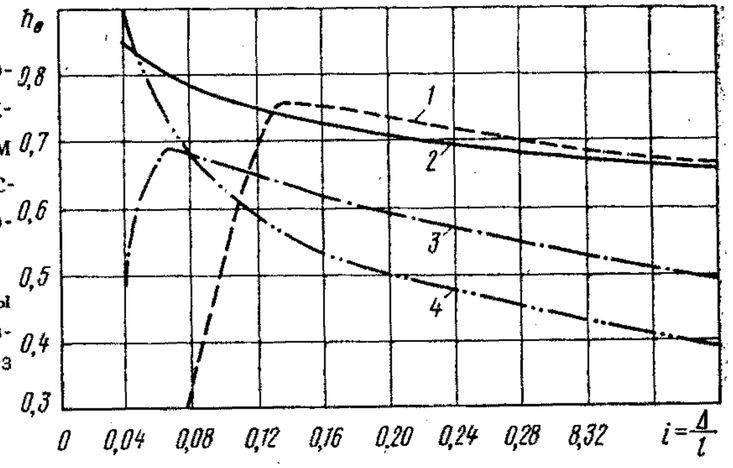


Рис. 31. Зависимость нормальной глубины h_o от уклона i в прямоугольном русле со ступеиями, вычисленная с применеиием формул:

1 — Гордиенко; *2* — формулы (31); *3* — Пикалова; *4* — Павловского (для русла без ступеней)

железобетонных дуг прямоугольного сечения, закрепляемых штырями в стыках звеньев с помощью цементного раствора. Внизу между ребрами оставляют просвет 20 см во избежание застоя воды и наносов (рис. 32).

ЦНИИС исследовал гидравлическнй эффект ребер в области условий, характерных для транспортных водопропускных труб. Опытная установка и методика эксперимента были подобны описанным выше для прямоугольных ступенчатых труб. Модель труб длиной 9 м собирали из стальных звеньев длиной 20 см и внутренним диаметром 20 см, которые взаимно соединяли фланцами. Сверху звенья имели прорезь для наблюдений. Шероховатость создавали стальными обоймами высотой Δ, равной 1,2; 1,5; 2,0; 2,4 и 3,2 см. Над трубой перемещалась тележка с мерной иглой.

Во время проведения опыта расход воды измеряли треугольным водосливом. При установившемся течении мерной иглой снимали поверхность потока. Для каждого створа вычисляли среднюю отметку поверхности и строили продольный профиль потока. На профиле выбирали участок с равномерным движением и среднюю глубину его принимали за глубину h равномерного движения. При неизменных высоте ребер Δ, расстоянии между ними и уклоне трубы i проводили серию таких опытов с различными расходами. Всего по трубам с ребрами было выполнено 25 серий опытов общим числом 159, включая сюда и опыты с гладкой трубой.

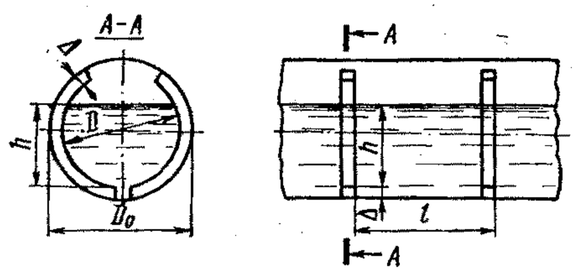


Рис. 32. Схема круглой трубы с поперечными ребрами

Результаты опытов наносили на графики (рис. 33) на логарифмической клетчатке в безразмерных координатах:

$$\eta = \frac{h}{D} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{Q}{D^{2,5}\sqrt{gi}}\,.$$

Здесь D — диаметр трубы в свету; Δ—высота ребер; D_o—пол-

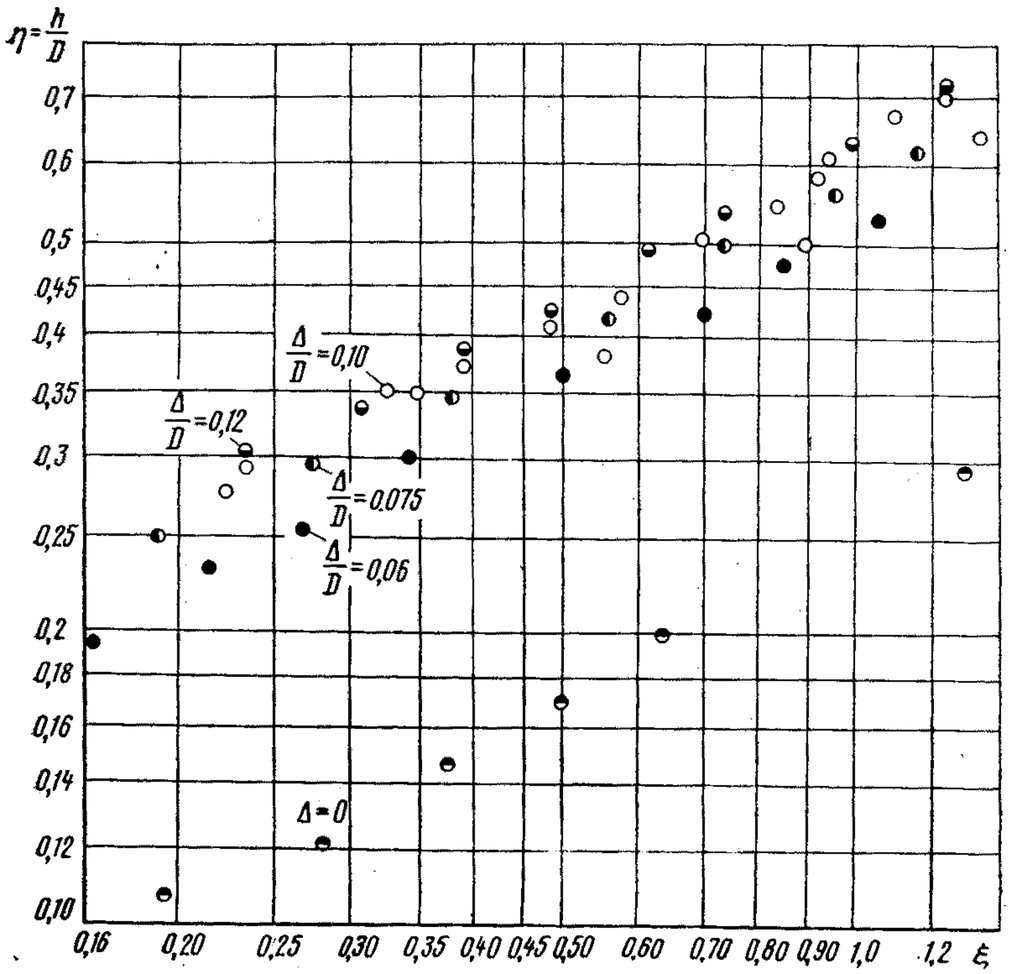


Рис. 33. Зависнмость безразмерного расхода ξ от относительного заполнения η круглой трубы с ребрамн при уклоне $i=0{,}08$

ный диаметр трубы; h — глубнна воды, измеренная над ребром (см. рис. 32); ξ — безразмерный модуль расхода.

По опытным точкам на логарифмической бумаге были даны линии, к которым точки достаточно тесно прилегают. При горизонтальной сдвижке линии достаточно хорошо взанмно совпадают. Это значит, что функция $\xi=\varphi(\eta)$ для разных моделей отличается лишь множителем. Множитель Ф, очевидно, должен отражать специфику труб и быть функцией вида

$$\Phi(\Delta/D_0,\ l/\Delta,\ i).$$

В проведенных опытах форма сечения ребер оставалась близкой к квадратной, поэтому параметр формы ребер в формулы не введен.

В качестве функции Ф удобно брать значение $\xi=\xi_0$ при наполнении трубы $h_0=0{,}5D$. Тогда задача сводится к отысканию функций

$$\xi_0=\Phi(\Delta/D_0,\ l/D,\ i) \text{ и } \varphi(\eta)=\xi:\xi_0.$$

С опытных графиков функции $\xi=\varphi(\eta)$, соответствующих отдельным сериям опытов при $l=D_0$, были сняты значения величины $\xi_0=Q:(D^{2,5}\sqrt{gi})$ при заполнении трубы наполовину высоты (табл. 13). По этим данным подобрана (рис. 34) эмпирическая формула

$$\xi=0{,}477+\frac{\xi_{гл}-0{,}477}{1+[1180+7{,}5\,(100i)^2]\,(\Delta/D_0)^2}, \qquad (34)$$

где $\xi_{гл}$ — безразмерный модуль расхода той же трубы, но без ребер.

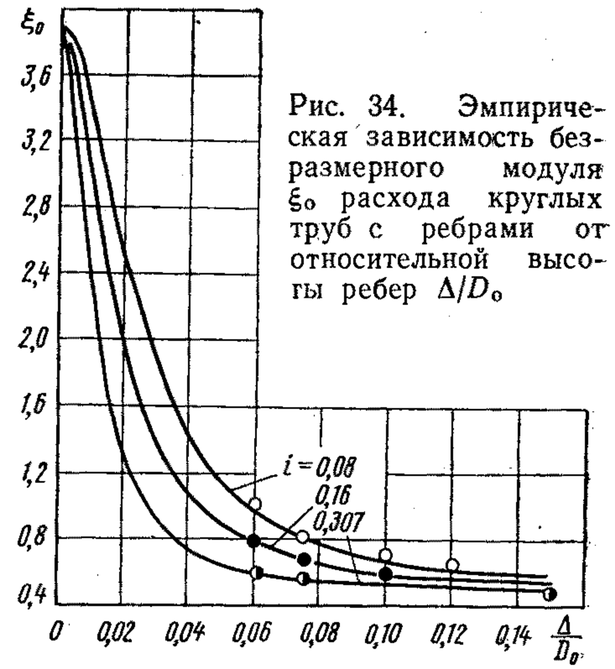


Рис. 34. Эмпирическая зависимость безразмерного модуля ξ_0 расхода круглых труб с ребрами от относительной высоты ребер Δ/D_0

Для описания влияния относительного заполнения трубы $\eta=h/D$ стремились найти достаточно простую функцию $C=f(\eta)$ или $n=f(\eta)$, которая позволила бы распространить результаты за пределы охваченных опытами значений η и на сооружения натурных размеров. Для этого, пользуясь формулой (34) для труб в натуре диаметром от 0,5 до 2,5 м, вычислили значения ξ_0. Затем определили отношения $\tau=\xi_\eta:\xi_0$, где $\xi_\eta=Q:(D^{2,5}\sqrt{gi})$ при заполнении трубы на высоту $h=\eta D$. После этого для каждого η вычисляли соответствующие значения коэффициента Шези C и коэффициент шероховатости n по формулам Маннинга, Н. Н. Павловского, И. И. Агроскина и по формуле $C=\frac{1}{n}\sqrt[3]{R}$. По результатам вычислений были построены графики $C=f_1(h)$ и $n=f(h)$. В качестве примера на рис. 35 приведено одно семейство таких графиков.

Анализ всей совокупности полученных графиков $n=f(\eta)$ показал, что наиболее удобна формула

$$C=\frac{1}{n}\sqrt[3]{R}, \qquad (35)$$

где R — гидравлический раднус, вычнсленный для живого сечения

Таблица 13

Высота ребер Δ, см	Δ/D (см. рис. 32)	Уклон трубы 0,08	0,16	0,307	Высота ребер Δ, см	Δ/D₀ (см. рис. 32)	Уклон трубы 0,08	0,16	0,307
		Коэффициент ξ₀					Коэффициент ξ₀		
0	0	3,90	3,90	3,90	20	0,10	0,690	0,594	0,657
12	0,06	0,991	0,790	0,581	24	0,12	0,644	0,644	—
15	0,075	0,794	0,665	0,550	30	0,15	—	—	0,472

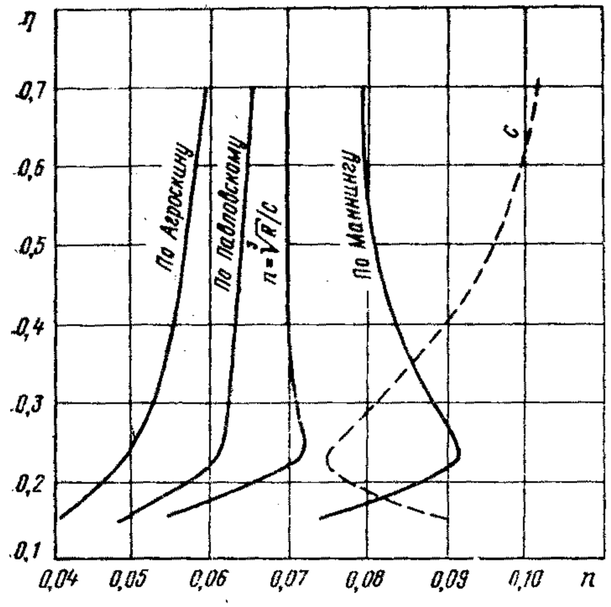


Рис. 35. Зависимость коэффициентов Шези C и шероховатости n от относительного наполиения $\eta=\frac{h}{D}$ трубы с ребрами при $i=0{,}08$; $D_0=2{,}0$ и $\frac{\Delta}{D_0}=0{,}10$

потока, текущего в суженном ребрами отверстии, имеющем диаметр $D=D_0-2\Delta$.

Эта формула дает значение коэффициента шероховатости, практически не зависящее от наполнения, и позволяет значение n, вычисленное при любом относительном наполнении больше 0,225, распространить на всю область $\eta\geqslant 0{,}225$.

При меньших наполнениях по всем формулам получается резкое убывание коэффициента шероховатости n с уменьшением наполнения трубы.

С учетом формулы Шези для безразмерного модуля расхода получаем

$$\xi_0=\frac{Q}{D^{2,5}\sqrt{gi}}=\frac{\omega C\sqrt{Ri}}{D^{2,5}\sqrt{gi}}. \qquad (36)$$

Но при $\eta=0{,}5$ площадь живого сечения $\omega=\pi D^2/8$, а гидравлический радиус $R=D/4$, поэтому

$$\xi_0=\frac{\pi D^2}{8}\cdot\frac{C\sqrt{Di/4}}{D^{2,5}\sqrt{gi}}=\frac{\pi}{16}\cdot\frac{C}{\sqrt{g}}=\frac{C}{15{,}95}. \qquad (37)$$

С учетом формулы (35)

$$\xi_0=\frac{\pi}{16}\cdot\frac{\sqrt[3]{R}}{n\sqrt{g}}=\frac{\pi}{16}\cdot\frac{\sqrt[3]{D}}{\sqrt[3]{4}\,n\sqrt{g}}, \qquad (38)$$

откуда коэффициент шероховатости для формулы (35)

$$n=\frac{\pi\sqrt[3]{D}}{16\sqrt[3]{4}\sqrt{g\xi_0}}=\frac{0{,}0395}{\xi_0}\sqrt[3]{D}. \qquad (39)$$

Таким образом, формулы (35), (37) и (39) позволяют рассчитывать течение в ребристых трубах при наполнениях свыше $0{,}225D$ и расстоянии между ребрами $l=D_0$.

Область малых наполнений ($h<0{,}225D$) характеризуется (рис. 36) наклонными и почти прямыми участками кривых $n=f(\eta)$, для которых

$$n=n_{0,5}\frac{\eta+0{,}05}{0{,}275}, \qquad (40)$$

где $n_{0,5}$ — коэффициент шероховатости по формуле (39).

Рассмотрим случай, когда $l\neq D_0$. Известно, что при $l:\Delta\cong 8\div 12$ коэффициент шероховатости получается наибольшим. При более частой и более редкой расстановке ребер коэффициент шероховатости убывает, стремясь к коэффициенту шероховатости $n_{гл}$ материала, когда $l\longrightarrow\infty$, или ребра сближаются вплотную, т. е. при $l\longrightarrow 0$.

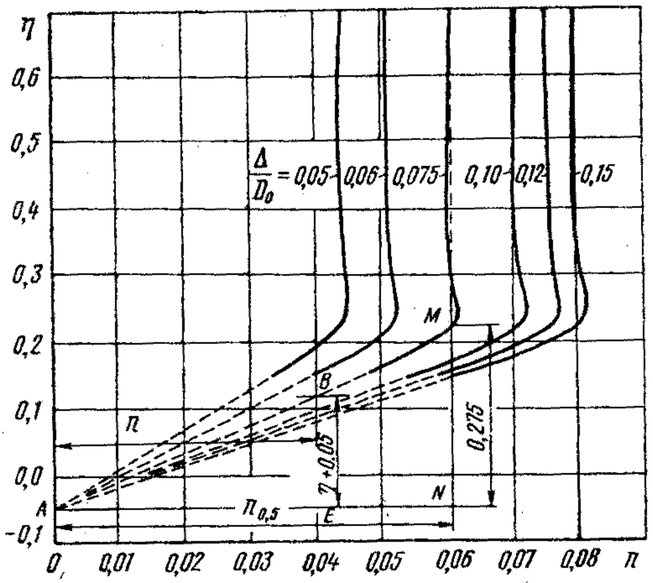


Рис. 36. Зависимость коэффициеита шероховатости n от отиосительной высоты $\eta=h:D$ ребер при $i=0{,}08$ и $D_0=2$ м

Кривая зависимости относительного отклонения коэффициента шероховатости $y=(n-n_{гл}):(n_{max}-n_{гл})$ от относительного шага ребер l/Δ, удовлетворяющая опытному значению n при $l:\Delta=6{,}67$, представлена на рис. 37. Эта кривая описывается формулой

$$n=n_{гл}+(n_{max}-n_{гл})\zeta \qquad (41)$$

при $\zeta=\left(\frac{l}{D_0}\right)^{2/3}\exp\left(\frac{D_0-l}{15\Delta}\right)$ и $n_{гл}=n_м C$,

где $n_м$ — коэффициент шероховатости материала по Манниигу для формулы $C=\frac{1}{n_м}R^{1/6}$; $n_{гл}$ — коэффициеит шероховатости материала к формуле (35).

Когда коэффициент шероховатости n для заданных условий найден, дальнейшие расчеты выполняются как при обычной шероховатости, если заполнение в трубе окажется не менее $h=0{,}225D$. Если же $h<0{,}225D$, то в ходе расчетов необходимо уточнять коэффициент шероховатости по формуле (40).

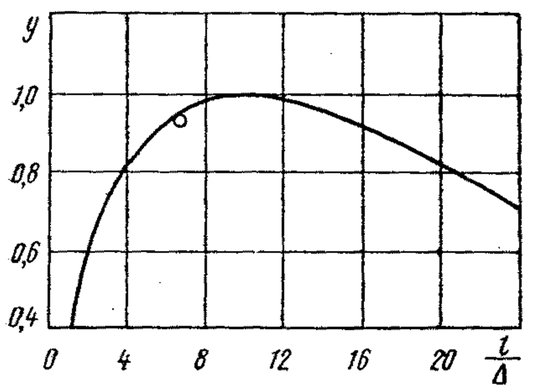


Рис. 37. Зависимость отиосительиого отклонения y коэффициента шероховатости ребристых труб от относительиого шага ребер l/Δ

Круглые ступенчатые трубы. Гидравлический эффект ступеней в руслах круглого сечения впервые был изучен[1] в ЦНИИСе. Опытная установка и методика опытов были в основном те же,

[1] Руководил экспериментами и обработал результаты каид. техн. наук В. С. Муромов.

что и для опытов с ребристыми трубами. Звенья трубы длиной и диаметром по 200 мм ($l=D=200$ мм) были соединены между собой с помощью фланцев, образуя уступы высотой Δ, равной 4, 8, 16, 32 и 64 мм.

Всего было выполнено 40 опытов (6 серий). В серию входила совокупность опытов, выполненных при разных расходах и неизменных прочих условиях. Результаты опытов одной серии выражаются кривой зависимости глубины в трубе от расхода $h=f(Q)$.

Характер расположения опытных точек на графиках получился такой же, как и при поперечных ребрах, и потому была применена аналогичная обработка данных. Величина $\xi=Q:(D^{2,5}\sqrt{gi})$ названа безразмерным модулем расхода, величина $\eta=h:D$ — относительным заполнением трубы.

Результаты опытов были выражены графически в виде кривых зависимостей $\xi=f(\eta)$, которые практически оказались теми же, что и для круглых труб с ребрами.

Следовательно, зависимость расхода от глубины воды в трубе может быть описана аналогично через коэффициент шероховатости

$$n_{0,5}=\frac{0,0395}{\xi_0}\sqrt[3]{D}, \qquad (42)$$

где $n_{0,5}$ — коэффициент шероховатости при заполнении трубы наполовину высоты звеньев.

Для величины ξ_0 в области $0,5>\frac{h}{D}\geqslant 0,225$ опытным путем получена зависимость

$$\xi_0=\xi_{гл}-10,85\frac{\Delta}{D}, \qquad (43)$$

где $\xi_{гл}$ — безразмерный модуль расхода той же трубы, но без ступеней. При $\frac{h}{D}<0,225$ коэффициент шероховатости определяется формулой (40).

Если длина звеньев не равна их диаметру или уступы даны через два-три звена, то влияние параметра l/D приближенно учитывается по аналогии с прямоугольными ступенчатыми трубами, для которых коэффициент Шези

$$C=\frac{1}{n}\sqrt[3]{R\frac{l}{D}}. \qquad (44)$$

Таким образом, при $l\neq D$ нужно пользоваться формулой (44).

Глава IV

ПОВЕДЕНИЕ ВОДНОГО ПОТОКА НА ВЫХОДЕ ИЗ ТРУБЫ И В ОТВОДНОМ РУСЛЕ

Когда водоток с расходом Q м³/с в естественных условиях протекает по участку длиной L, падение местности на котором составляет

$$\Delta z=iL \text{ м},$$

то в каждую секунду потенциальная энергия протекающей воды убывает на величину

$$\Delta E=\rho gQ\Delta z \text{ кгс·м},$$

где ρ — плотность воды, равная 1000 кг/м³; i — средний уклон русла на участке.

Это значит, что на рассматриваемом участке затрачивается мощность $N=\rho gQ\Delta z:75$ л. с.

В естественных условиях русло может выдерживать воздействие потока и оставаться практически неизменным во времени. Но бывают условия, в силу которых естественное русло деформируется при больших расходах воды (например, развивающиеся овраги).

Когда же устраивают водопропускное сооружение, то в целях экономии затраты средств на сооружение его стремятся сделать по возможности коротким и узким. В этих условиях поток преодолевает падение Δz на значительно меньшей длине и с меньшим смоченным периметром. К тому же бетонные или каменные поверхности сооружений, как правило, обладают меньшей шероховатостью, чем естественные лога; исключение составляют лишь сооружения с искусственно повышенной шероховатостью. В результате энергия потока, протекающего через сооружения, не расходуется полностью на преодоление гидравлических сопротивлений, значительная часть потенциальной энергии переходит в кинетическую, и поток приобретает большую скорость. Поэтому вытекающий из водопропускного сооружения поток обладает повышенной против его естественного состояния разрушительной силой.

Опыт эксплуатации водопропускных сооружений показывает, что если не предусмотреть специальных мер, отводные русла на выходе из сооружений сильно размываются, что иногда приводит к авариям сооружений.

Мерами против размывов отводных русел, т. е. способами гашения энергии водного потока, являются: непрерывное рассеивание энергии потока в самом сооружении; сосредоточенное гашение энергии потока на выходе из трубы; укрепление отводных русел.

Принципы гашения энергии потока на выходе из трубы. Известно много различных принципов гашения энергии потока. Наиболее распространенные из них:

1) рассеивание энергии в вальцах гидравлического прыжка;

2) усиленное перемешивание (этот принцип используется при устройстве повышенной шероховатости, поперечных расщепляющих балок, зубчатых порогов и т. п.);

3) соударение свободных струй в атмосфере;

4) сосредоточенное гашение энергии в замкнутом блоке — напорные гасители;

5) отброс струй от сооружения с одновременным их расщеплением и аэрацией (этот принцип реализуется в рассеивающих трамплинах);

6) силовое воздействие на поток в направлении, противоположном течению, путем установки различных препятствий: порогов, шашек, пирсов и т. п.

Некоторые из этих принципов в какой-то мере всегда сочетаются с другими; например, повышенная шероховатость одновременно действует и как система препятствий, изменяющих количество движения, т. е. приближается к гасителям типа порогов или пирсов. Существуют гасители, основанные одновременно на двух и более принципиальных схемах. Такие гасители можно назвать смешанными (например, водобойный колодец с повышенной шероховатостью дна).

Гашение энергии потока гидравлическим прыжком. Наиболее распространены в транспортном строительстве и наиболее перспективны гасители, обеспечивающие гашение гидравлическим прыжком. Гидравлическим прыжком называется явление резкого увеличения глубины потока при переходе его из бурного состояния в спокойное. Такой переход прыжком сопровождается потерей значительной доли энергии потока. В условиях плоской задачи эта потеря определяется выражением

$$\Delta E = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2}, \qquad (45)$$

где h_1 и h_2 — сопряженные глубиины гидравлического прыжка.

Совместный анализ формул (45) и (9) показывает (см. гл. I, гидравлический прыжок), что доля рассеянной энергии тем больше, чем больше отношение h_2/h_1. А это отношение тем больше, чем больше число Фруда Fr_1 перед прыжком.

Механическая энергия открытого водного потока, отнесенная к действующей на него силе тяжести и называемая удельной энергией, состоит из удельной потенциальной энергии z и удельной кинетической энергии $\alpha v^2/2g$, которая является энергией осредненного поступательного движения. Однако, кроме поступательного движения, частицам воды свойственны беспорядочные движения поперек и вдоль потока, переменные

во времени, образующне так называемую турбулентность. Энергия турбулентности в обычных гидравлических расчетах в явном виде не участвует, но для решения ряда технических вопросов имеет важное значение.

Для устойчивости сравнительно больших массивов энергия турбулентности существенного значения не имеет, так как в большом пространстве силы, порождаемые пульсационными составляющими скоростей, взаимно уравновешиваются. Но для малых элементов (зерна грунта или камни наброски) пульсация скоростей проявляется вполие заметно в виде иепостоянства гидродинамических сил взаимодействия этих тел с потоком. Поэтому в вопросе о размывах русел пульсация, т. е. турбулентность, играет важную роль.

Гидравлический прыжок хорошо гасит энергию поступательного движения, но вместе с тем он усиливает пульсацию скоростей. Поэтому поток ниже гидравлического прыжка, хотя и находится в спокойном состоянии, все же обладает бо́льшей размывающей способностью, чем бытовой поток с теми же глубиной и средней скоростью. Поэтому за гасителями с прыжком укрепление русла обычно бывает необходимо.

Чтобы гидравлический прыжок образовался вблизи выхода из сооружения, надо, чтобы фактическая глубина воды $h_б$ в отводящем русле была больше, чем глубина h''_c, сопряженная с глубиной h_c бурного потока, вытекающего из сооружения. Если $h_б < h''_c$, прыжок отгоняется от сооружения и на значительной длине поток сохраняет бурное состояние. С точки зрения предотвращения размыва русла, такое положение недопустимо (исключение составляют лишь русла в скале). Следовательно, чтобы прыжок придвинуть к сооружению, надо увеличить глубину воды в отводном русле. Это можно обеспечить двумя средствами: углубить русло или поднять уровень воды с помощью преграды.

Расширяющийся водобойный колодец. Наиболее распространенный гаситель энергии за водопропускными сооружениями — расширяющийся водобойный колодец. Он представляет собой раструб, образованный отвесными стенками, расходящимися в плане на угол $\alpha = 15°$ к оси сооружения; вблизи выхода из раструба устанавливается водобойная стенка.

Гидравлический расчет расширяющегося водобойного колодца состоит в подборе высоты стенки и расстояния до нее из условия, что в пространстве перед стенкой поток перейдет в спокойное состояние и будет переливаться через стенку, как через водослив. Расстояние до стенки от начала раструба определяется из условия размещения подпертого гидравлического прыжка.

Для расчета водобойного колодца прежде всего необходимо установить гидравлические характеристики потока, энергию

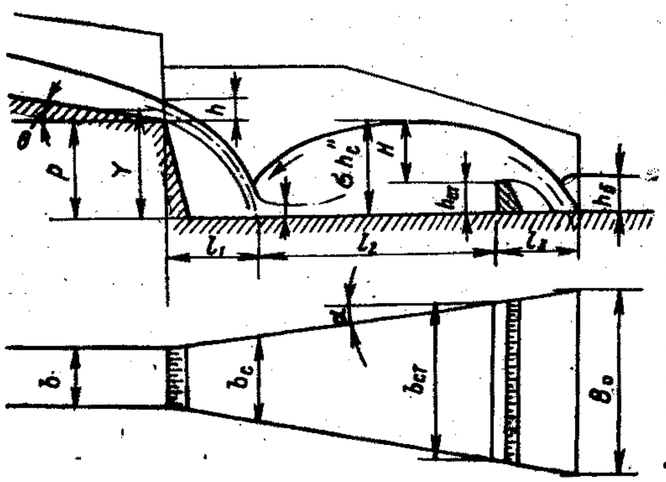


Рис. 38. Расширяющийся водобойный колодец, модель 1

которого требуется погасить. Эта энергия зависит от глубины потока h и скорости его v. Если дно гасителя располагается ниже дна выходного сечения трубы (рис. 38), то после выхода из трубы поток претерпевает еще падение с высоты p. При этом его скорость возрастает до величины $v_c = v + \Delta v$, а площадь сечения становится $\omega_c = \frac{Q}{v + \Delta v}$ (где v — средняя скорость потока перед стенкой падения). Если будет известна ширина потока b_c в месте падения, то, зная ее, можно вычислить и глубину h_c в сжатом сечении. При отвесных боковых стенках раструба $h_c = \frac{\omega_c}{b_c}$, а при наклонных стенках определится из условия

$$\omega_c = (b_c + 2m_{от} h_c) h_c,$$

где $m_{от}$ — коэффициент заложения откосов гасителя (котангенс угла наклона); b_c — ширина гасителя по дну в месте падения потока.

Дальность падения l_1 потока (считая по его оси, проходящей через центр тяжести выходного сечения) определяется решением уравнений:

$$l_1 = vt \cos\Theta \quad \text{и} \quad vt \sin\Theta + \frac{gt^2}{2} = Y,$$

где Y — высота оси потока над дном колодца; Θ — угол наклона трубы (быстротока) к горизонту; v — средняя скорость потока перед падением.

Отсюда получаем

$$l_1 \operatorname{tg}\Theta + \frac{l_1^2 g}{2v^2 \cos\Theta} = Y. \qquad (46)$$

Дальность падения l_1 находят после подстановки в уравнение (46) соответствующих числовых значений. Для прямоугольных русел $Y = p + \frac{h}{2}$.

Уравнение (46) очень упрощается, когда $\Theta \cong 0$, что допустимо при уклоне трубы до 0,10 (см. прилож. 4).

Для определения ширины b_c гасителя в месте падения потока, глубины h_c и скорости v_c потока в этом сечении составляют уравнение Бернулли для сечения над уступом и в месте

падения, выражая скорость в сжатом сечении через расход $v_c = Q/\omega_c$;

$$p + h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha Q^2}{2g} \cdot \frac{1}{\omega_c^2}. \qquad (47)$$

Если стенки раструба вертикальны, то $\omega_c = b_c h_c$, и для определения сжатой глубины получаем уравнение

$$p + h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha Q^2}{2g} \cdot \frac{1}{b_c h_c}. \qquad (48)$$

Из этих уравнений глубину h_c сжатого сечения находят подбором с точностью порядка 1—2 см.

Далее определяют длину L водобойного колодца:

$$L = l_1 + l_2 + l_3,$$

где l_3 — длина, необходимая для размещения водобойной стенки и переливающейся через нее струи; l_2 — длина подпертого гидравлического прыжка. Подпертым называется прыжок, образующийся перед стенкой; длина его меньше, чем длина совершенного прыжка, образующегося в неестественном русле.

Обычно считают $l_2 = 3{,}2\, h_c''$, здесь h_c'' — глубина, сопряженная с глубиной сжатого сечения и определяемая уравнением прыжковой функции, которая для расширяющегося прямоугольного русла имеет вид:

$$\frac{2Q^2}{g\omega_c} + \omega_c h_c = \frac{2Q^2}{g\omega_2} + \omega_2 h_c''; \qquad (49)$$

$$\omega_c = h_c b_c; \quad \omega_2 = h_c'' b_{ст},$$

где b_c и $b_{ст}$ — ширина колодца соответственно в месте падения струй и в створе водобойной стенки.

Так как ω_2 зависит от ширины колодца в створе стенки, которая, в свою очередь, зависит от длины, а следовательно, и от высоты прыжка, то длину колодца находят подбором с точностью до 1% или 1 см. Для этого вычисляют левую часть равенства (49); задаются некоторым значением h_c'' (в несколько раз больше h_c) и соответствующей длиной

$$l_2 = 3{,}2 h_c''; \qquad (50)$$

вычисляют длину водобойной стенки поперек потока $b_{ст} = b_c + 2\, l_2 \operatorname{tg}\alpha$, где α — угол раструбности колодца, считая в одиу сторону). Затем вычисляют значение правой части равенства (49).

После вычисления длины колодца определяют необходимую высоту водобойной стенки из расчета, чтобы фактическая глубина воды перед нею была немного больше, чем сопряженная со сжатой.

Вода через водобойную стенку переливается как через водослив практического профиля. Известно, что расход q через 1 пог. м отверстия водослива (удельный расход) при истечении без подтопления снизу определяется формулой

$$q = Q / b_{ст} = m \sqrt{2g} H_0^{1,5}, \qquad (51)$$

где m — коэффициент расхода, зависящий от профиля стенки:

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_{кол}^2}{2g} -$$

полный напор перед стенкой; $v_{кол}$ — средняя скорость потока в колодце перед стенкой; H — возвышение уровня воды в колодце над порогом водобойной стенки.

Из формулы (51) имеем

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{q^2}{m^2 \cdot 2g}}. \qquad (52)$$

Обычно принимают $m=0{,}42$. Геометрический напор относительно порога стенки

$$H = H_0 - \frac{\alpha v_{кол}^2}{2g}, \qquad (53)$$

где

$$v_{кол} = q : (H + h_{ст}). \qquad (54)$$

Для первого приближения принимают $v_{кол}=q:(H_0+h_{ст})$ и подставляют это значение в уравнение (53), а полученное новое значение H вновь используют для определения $v_{кол}$ по выражению (54) и еще раз вычисляют H по уравнению (53) до тех пор, пока два подряд полученных значения H будут отличаться не более чем на 1—2 см.

Высота стенки, обеспечивающая надежное затопление прыжка:

$$h_{ст} = 1{,}05h_c'' - H. \qquad (55)$$

Переливающаяся через водобойную стенку струя будет падать тоже со сравнительно большой скоростью, при которой поток еще способен разрушать русло и недостаточно прочное крепление. Поэтому дно и стенки колодца располагают и за водобойной стенкой на расстоянии, несколько большем, чем дальность падения струи.

Дальность l_3 падения струи, переливающейся через водобойную стенку (см. рис. 38), находят по формуле (46) подобно тому, как для падения с уступа в колодец. Принимая $\Theta=0$, а $Y=h_{ст}+0{,}5H$, формула получает вид:

$$l_3 \frac{g}{2v_{кол}^2} - \left(h_{ст} + \frac{H}{2}\right) = 0, \qquad (56)$$

откуда

$$l_3 = v_{кол} \sqrt{\frac{2}{g}\left(h_{ст} + \frac{H}{2}\right)}. \qquad (57)$$

Далее находят ширину b_3 раструба у места падения струи по выражению

$$b_3 = b_{ст} + 2l_3 \operatorname{tg} \alpha. \qquad (58)$$

На длине l_3 материал дна и боковых стенок должен выдерживать скорость v_3 потока

$$v_3 = Q : (b_3 h_3),$$

где h_3 — глубина сжатого сечения за стенкой.

К величине l_3 добавляют конструктивный запас l_4, ориентировочно считая $l_4=0{,}2\ l_3$ или 1—2 м, или $(3 \div 5)h_3$.

Гаситель ЦНИИСа. В 1962—1963 гг. в ЦНИИСе проводили экспериментальные исследования для выработки эффективного и дешевого типа гасителя и составления методики его расчета. Для экспериментов был использован гидравлический лоток шириною 2,5 м, разделенный продольной стенкой на рабочую часть шириной 2,0 м и холостой канал. В начале рабочей части был сооружен напорный резервуар размерами в плане 100×120 см и высотой около 1 м. В передней и боковой стенках резервуара были предусмотрены прямоугольные отверстия, которые изнутри перекрывались плоскими щитами. К отверстию, обращенному в рабочую часть лотка, примыкал быстроток шириной 15 см. Поднимая и опуская щит, можно было менять глубину воды и скорость течения в быстротоке.

Уклон быстротока — 0,20; его ширину и высоту напорного резервуара подобрали так, чтобы иметь возможность моделировать потоки, характерные для косогорных труб. Лоток имел продольный уклон 0,01, что обеспечивало отток воды без подтопления гасителя. По бортам лотка проходили рельсы для мерной тележки, которая позволяла устанавливать мерный прибор в любом месте над лотком.

Для возможности сравнения между собой различных схем гасителей в рабочей части лотка был насыпан слой гравия в 15 см с крупностью частиц от 2 до 8 мм. Размеры ямы, образующейся в слое гравия, принимали за показатель эффективности испытуемого гасителя. Испытуемые модели гасителей устанавливали на дощатом настиле, длину которого изменяли, моделируя длину укрепления отводящего русла. Перед каждым опытом поверхность гравия выравнивали вровень с поверхностью настила.

При закрытом рабочем щите подбирали заданный расход потока, пропуская его по боковому каналу; состояние размываемого материала в лотке при этом не нарушалось. Когда заданный расход устанавливался, открывали рабочий щит, а боковой закрывали. В ходе опытов мерной иглой с тележки снимали высоту уровня воды в характерных точках и их плановые координаты. Через определенное время (от 30 мин до 2 ч) вновь открывали боковой щит, а рабочий закрывали. После стока воды снимали полученный рельеф отводящего русла.

Таблица 14

Характеристика гасителя энергии	Модель 1	Модель 2
	Размер в пересчете на натуру, м	
Длина раструба L	8,50	5,32
Ширина раструба B_0	5,75	7,60
Длина крепления русла	16,5	6,0

Постепенно изменяя размеры и формы модели, начав с обычного водобойного колодца в виде раструба с водобойной стенкой (модель 1), при-

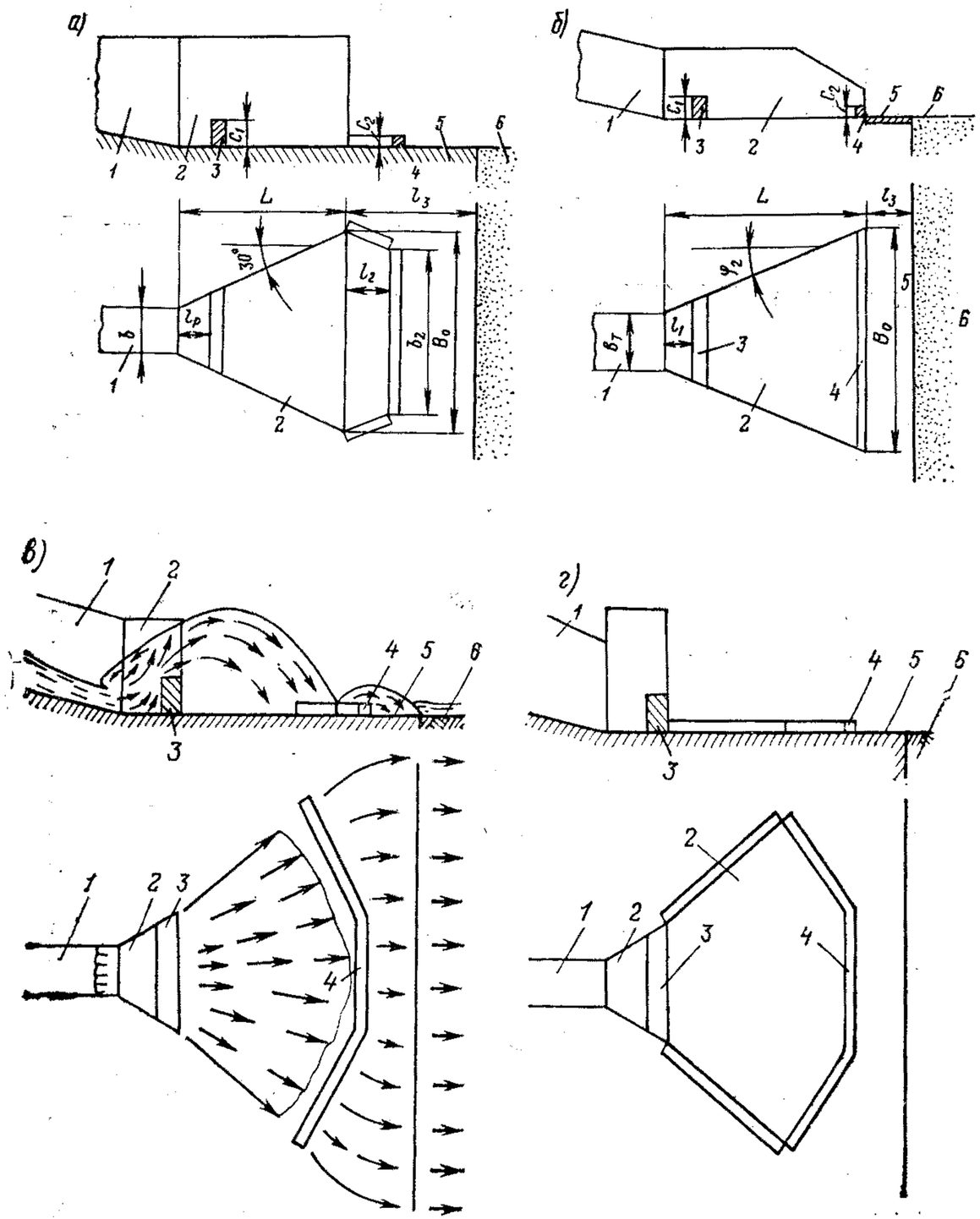


Рис. 39. Гасители с порогами:
1 — труба или быстроток; *2* — раструб; *3* — первый водобойный порог; *4* — второй водобойный порог; *5* — укрепление; *6* — отводное русло

шли к модели 2 (рис. 39, *а*), которая действует принципиально иначе, чем раструб с водобойной стенкой.

Рабочими элементами гасителя служат два водобойных порога: первый (высокий) отбрасывает бурный поток вверх, который разлетается также вширь и затем падает на дно в виде веера (рис. 39, *б*). Далее поток встречает второй (низкий) водобойный порог, который образует в плане ковш, охватывающий выход из раструба. После падения на дно поток остается бурным и, ударившись о верховую грань второго водобойного порога, вновь взлетает вверх, но на меньшую высоту и падает на крепление дна за гасителем. В результате двух ударов о пороги и двух ударов о дно поток теряет значительную часть своей энергии. Этому же способствует валец, образующийся перед первым порогом. Гаситель, кроме того, распределяет поток по широкому фронту, благодаря чему сильно снижается его удельный расход и размывающая способность.

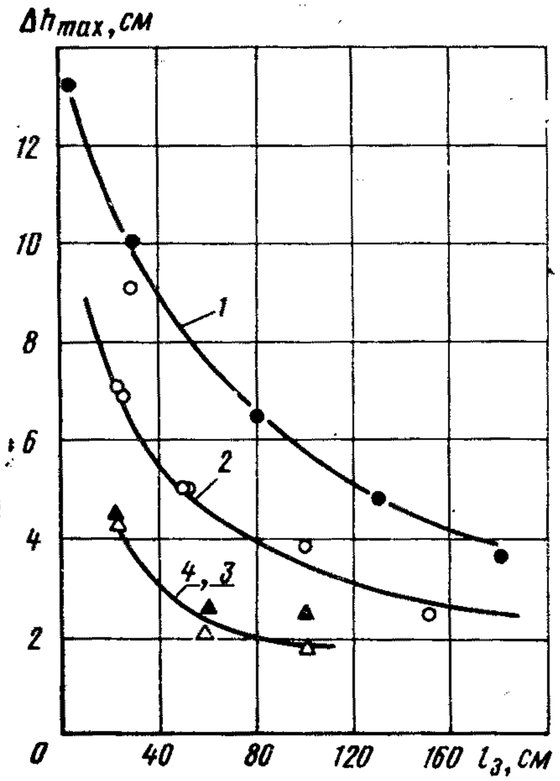


Рис. 40 Зависимость глубины Δh_{max} размыва от длины $l_з$ крепления отводного русла:
1—4 — номера моделей

Важнейшие характеристики расширяющегося водобойного колодца по моделям 1 и 2 в условиях равной глубины размыва за укреплением приведены в табл. 14 применительно к следующим условиям в натуре: труба прямоугольная отверстием $b=1{,}5$ м, расход воды $Q=9{,}45$ м³/с, глубина потока на выходе из трубы $h_c=0{,}88$ м. Ориентировочные подсчеты показывают, что гаситель по модели 2 примерно на 30% дешевле, чем по модели 1. Постепенно усовершенствуя модель 2 в процессе исследований, получили еще более эффективные модели 3 (рис. 39, *в*) и 4 (рис. 39, *г*). Размеры пяти моделей приведены в табл. 15, где даны и результаты испытаний. Некоторые модели были испытаны при переменной длине $l_з$ крепления и одинаковых прочих условиях (рис. 40).

Результаты опытов (см. табл. 15 и рис. 40) показывают, что эффективность гасителей по моделям 3 и 4 в сравнении с моделью 2 значительно выше. Так, например, модель 3 снижает в 2—3 раза глубину и в 2,5 раза объем размыва; хотя по эффективности несколько и уступает ей модель 4 (см. рис. 39, *в*), однако она имеет то достоинство, что здесь ковш ограничен со всех сторон и сооружение получает более определенные очертания.

Для типовых проектов принята модель 5 (гаситель ЦНИИСа), отличающаяся от модели 4 высокими боковыми стенами раструба (рис. 41). По эффективности он не уступает модели 3 и значительно эффективнее расширяющегося водобойного колодца (модель 1). Было проведено много опытов

Таблица 15

№ модели	Размеры модели, см								Максимальная глубина размыва, см		Объем ямы размыва, дм³
	c_1	l_1	l_2	b_2	c_2	L	B_0	l_3	для всей ямы	в конце крепления	
1	8,5	61	—	—	0	90,5	61	2,5	13,2	11,5	53,7
2	9	12	16	68	3	53	75	40	6,9	5,0	27,7
3	11	12	50	111	3	18	40	75	3,5	1,7	8,2
4	11	12	50	96	2,5	18	35	23	4,3	2,9	15,4
5	11	12	0	98	2	70	98	23	7,1	4,5	23,5

Примечание. Расход на модели 32 л/с, глубина бурного потока 8,8 см, продолжительность опытов 30 мин.

с вариантами модели 5 для выявления наилучшего сочетания размеров отдельных ее элементов. Одновременно было подробно изучено поведение потока при протекании через гаситель.

На основании этих опытов составлена методика расчета гасителя ЦНИИСа.

Гидравлические явления, происходящие в гасителях с водобойными порогами, строгими гидромеханическими методами описать не удается и приходится ограничиться эмпирическими расчетными зависимостями. Приведенные ниже формулы составлены применительно к условиям, характерным для малых косогорных сооружений, а именно: расчетные расходы до 16 м³/с; отверстия до 2,5 м; уклон площадки под гаситель до 0,30; число Фруда для бурного потока на выходе из трубы от 3 до 13.

Анализ совокупности опытов с различной высотой c_1 первого водобойного порога и неизменных прочих элементах гасителя показывает, что эффект гасителя остается близок к оптимальному, если сохраняется условие $1{,}2 \leqslant \frac{c_1}{h_c} \leqslant 1{,}5$.

Поэтому высоту первого водобойного порога рекомендуется принимать

$$c_1 = (1{,}2 \div 1{,}5)\, h_c, \tag{59}$$

где h_c — глубина бурного потока в начале раструба, определяемая расчетом трубы или быстротока в предположении отсутствия гасителя.

Положение первого порога в раструбе слабо сказывается на эффекте гашения, если только порог не слишком близко расположен у начала раструба. Рекомендуемое расстояние l_1 до первого порога от начала раструба при отверстии b трубы:

$$l_1 = (0{,}55 \div 0{,}70)\, b. \tag{60}$$

Дальность падения струй, отраженных первым порогом (см. рис. 41), определяется по выражению

$$S = \left[1 + \left(4{,}4 - \frac{c_1}{h_c}\right)\left(0{,}52\sqrt{Fr} - 0{,}4\right)\right] h_к, \tag{61}$$

где $h_к$ — критическая глубина в начале раструба, определяемая по формуле (5).

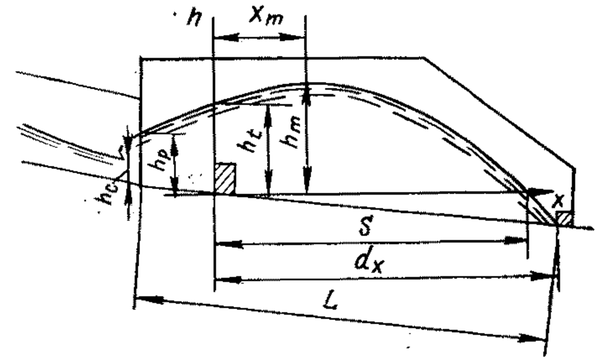


Рис. 41. Схема к расчету гасителя ЦНИИСа

Полная длина раструба $L = l_1 + S$. (62)

Ширина раструба в конце

$$B_0 = b + 2L \operatorname{tg} 30° = b + 1{,}15L. \tag{63}$$

Высота второго водобойного порога $c_2 = (0{,}25 \div 0{,}30)\, h_c$. (64)

На участке между водобойными порогами боковые стены могли бы отсутствовать, как это и сделано в моделях 3 и 4. Если же их устраивают по архитектурным или иным соображениям, то нужно иметь в виду, что боковые стены не несут гидростатической нагрузки со стороны потока в раструбе, который здесь состоит из свободно летящих струй. Для построения очертания этих струй (см. рис. 41) получены следующие выражения:

1. Глубина $h_р$ воды в начале раструба

при $0{,}5 \leqslant \frac{c_1}{h_c} \leqslant 1{,}4$

$$h_р = 1{,}18 h_к \frac{c_1}{h_c}; \tag{65}$$

при $1{,}4 \leqslant \frac{c_1}{h_к} \leqslant 2{,}6$

$$h_р = \left(0{,}95 + 0{,}5 \frac{c_1}{h_c}\right) h_к. \tag{66}$$

2. Глубина h_t потока в плоскости напорной грани первого порога

при $\frac{c_1}{h_к} \leqslant 1{,}4$

$$h_t = \left(0{,}3 + \frac{c_1}{h_c}\right) h_к; \tag{67}$$

при $\frac{c_1}{h_к} > 1{,}4$

$$h_t = \left(1 + 0{,}5 \frac{c_1}{h_c}\right) h_к. \tag{68}$$

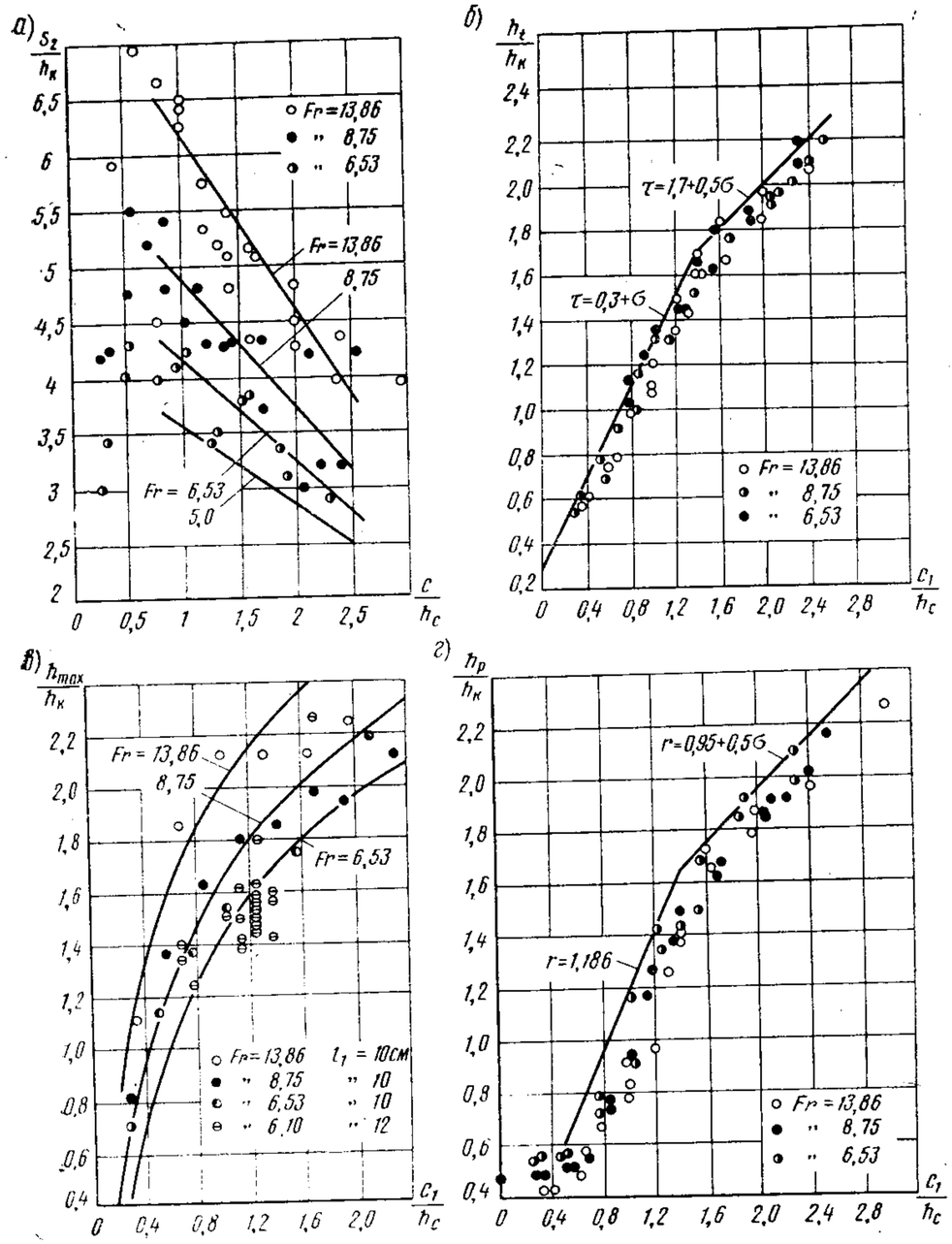


Рис. 42. Результаты экспериментов по определению характеристик потока в гасителе ЦНИИСа:
а — дальности полета струй за первым порогом; *б* — глубины воды перед первым порогом; *в* — высоты подъема струй; *г* — глубины воды в начале гасителя

Наибольшая высота h_{max} подъема струй:

$$h_{max}=1{,}75\,h_к\,\lg\left(Fr\,\frac{c_1}{h_c}\right). \tag{69}$$

Справедливость формул (61) — (68) подтверждается опытными данными и огибающими кривыми, построенными по этим формулам (рис. 42).

Очертание осевой струи при начале координат в нижней точке напорной грани первого водобойного порога строят по формуле

$$h=Ax^2+Ex+h_t\,, \tag{70}$$

где $A=-\frac{am^2}{S^2}$; $E=\frac{2am}{S}$; $a=h_m-h_t$; $m=1+\sqrt{1+\frac{h_t}{a}}$.

Горизонтальное расстояние до вертикали с максимальной глубиной

$$x_m=S/m. \tag{71}$$

Эти выражения получены из условия, что поверхность потока — парабола, проходящая через точки $M(0;\ h_t)$ и $N(S;\ 0)$.

Дно гасителя может быть и наклонным, но пороги должны оставаться вертикальными. При наклонном дне гасителя дальность полета струй увеличивается, соответственно требуется и большая длина раструба. Ее определяют, продолжая траекторию струи до пересечения с линией дна.

Для труб круглого сечения схема гасителя остается такой же. Ширину раструба в начале принимают равной диаметру трубы. Остальные элементы рассчитывают так же, как и для прямоугольных труб, но сегментальное сечение потока на выходе заменяется эквивалентным прямоугольным. В качестве эквивалентного принято равновеликое сечение, при котором поток имеет ту же энергетическую структуру, характеризуемую числом Фруда:

$$Fr=\frac{v^2}{gh}=\frac{Q^2}{g\omega^2 h}\,,$$

где ω — площадь сечения потока.

Для прямоугольного сечения $\omega=bh$ и потому

$$Fr=\frac{Q^2}{gbh^3}\,.$$

Для постоянства значения Fr достаточно, чтобы площадь сечения и глубина его остались неизменными, тогда ширина $b=\omega:h$. При таком подходе ширина эквивалентного прямоугольника будет зависеть от глубины на выходе из трубы.

В целях унификации желательно применять для круглых труб типовые конструкции гасителей, разработанные для прямоугольных. При этом ширина раструба в начале будет $b=D$.

Из равенства чисел Фруда имеем

$$\frac{Q^2}{gb_0^2h_0^3}=\frac{Q^2}{g\omega^2 h_0}=\frac{Q^2}{gD^2h_0^3}\,,$$

где ω — площадь фактического сегментального сечения, а h_0 — глубина эквивалентного потока прямоугольного сечения.

Получаем $h_0=\sqrt[3]{\frac{\omega^2 h}{D^2}}$. (72)

Нет необходимости делать боковые стены гасителя излишне высокими. Наблюдения на моделях показали, что боковые струи короче осевых. Это надо учитывать при назначении размеров боковых стен гасителя. Дальность полета S' боковых струй составляет около $0{,}57S$. Следовательно, очертание боковых стен определится уравнением

$$h=3{,}07Ax^2\cos^2\frac{\varphi}{2}+1{,}75Ex\cos\frac{\varphi}{2}, \quad (73)$$

а при $\varphi=60°$

$$h=2{,}30Ax^2+1{,}51Ex+h_t. \quad (74)$$

Очертание боковых стен рекомендуется принимать таким, чтобы они имели минимальную площадь. Отрезки, образующие профиль стен, могут быть касательны к боковым струям. Запас по высоте стен не нужен, так как он уже содержится в уравнениях очертания струй.

Сопряжение трубы с гасителем ЦНИИСа (и иными гасителями с порогами) имеет некоторые особенности. Водобойный порог вызывает подпор, высота которого зависит от глубины $h_р$ в начале раструба, определяемой по формулам (65) и (66). Эту глубину следует сопоставлять с глубиной $h''_с$, сопряженной со сжатой глубиной $h_с$ в конце трубы. Для прямоугольных сечений, как известно

$$h''_с=0{,}5h_с\left(\sqrt{1+8Fr}-1\right). \quad (75)$$

При расчетном расходе $h''_с=h_р$. Это значит, что перед водобойным порогом формируется несовершенный гидравлический прыжок, частично распространяющийся выше начала раструба (см. рис. 41). Если желательно сохранить на выходе из трубы просвет над потоком, надо построить продольный профиль потока перед раструбом. Для случая $h''_с>h_р$ это делается следующим образом. Вначале определяют уклон j свободной поверхности ближайшего к началу раструба участка по эмпирической формуле

$$j=0{,}55+0{,}0304Fr-0{,}300\frac{h_р}{h_к}. \quad (76)$$

От точки *0*, лежащей на поверхности потока в начале раструба, в сторону трубы (рис. 43, *а*) откладывают первый отрезок *0—1* с уклоном $j=tg\gamma_1$. В начале этого отрезка (точка *1*) определяют высоту водной поверхности $h_{р1}$. Затем по формуле (76) определяют уклон $j_2=\operatorname{tg}\gamma_2$ поверхности следующего вышележащего участка, к точке *1* пристраивают второй отрезок *1—2* и т. д. Чтобы это построение было достаточно точным, длина отрезков должна быть небольшой, например $\Delta x=1$ м. Построение ведут на протяжении, достаточном для назначения

открытой вставки или числа повышенных звеньев, необходимых для соблюдения нормированного просвета над потоком на выходном участке трубы.

Продольный профиль строят до того сечения, где глубина h спокойного потока при $h>h_к$ будет равна глубине h''_x, сопряженной с глубиной h_x бурного потока. Выше будет располагаться гидравлический прыжок. Его профиль строят так же, как и для обычного случая (когда $h_р<h''_с$), но в качестве исходной глубины принимают h''_x.

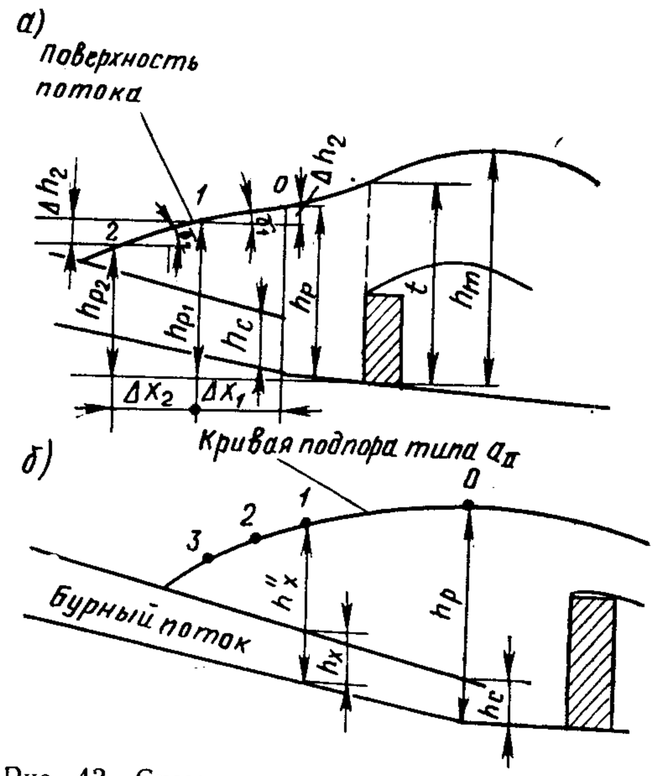


Рис. 43. Схемы к построению продольного профиля потока перед гасителем ЦНИИСа

В особых случаях, например, когда расход меньше того, на который был запроектирован гаситель, может оказаться $h_р>h''_с$. Тогда перед раструбом будет участок плавно изменяющегося движения с кривой подпора типа $a_п$ (рис. 43, *б*). Построение профиля потока на этом участке возможно любым способом. Длину и высоту звеньев перед гасителем определяют, причерчивая их контур к очертанию потока с соблюдением принятого просвета.

Отводные русла косогорных труб. Из гасителя поток поступает в отводное русло, которое может представлять собой естественный лог или искусственный канал. В обоих случаях на некотором участке, примыкающем к гасителю, отводное русло может быть закреплено. Крепление отводного русла бывает необходимо для безопасности гасителя, так как вытекающий из него поток воды характеризуется все же значительной скоростью и, кроме того, повышенной турбулентностью. Благодаря повышенной турбулентности поток обладает более высокой размывающей способностью, чем равномерный поток.

Максимальные скорости, которые выдерживают, не размываясь, естественные грунты и материалы креплений под воздействием равномерных потоков, называют допускаемыми скоростями $v_{доп}$. Значения допускаемых скоростей устанавливают путем лабораторных исследований и анализом работы осуществленных сооружений [15]. Если пропускать по руслу поток с расходом Q и скоростью $v>v_{доп}$, то дно и стенки его

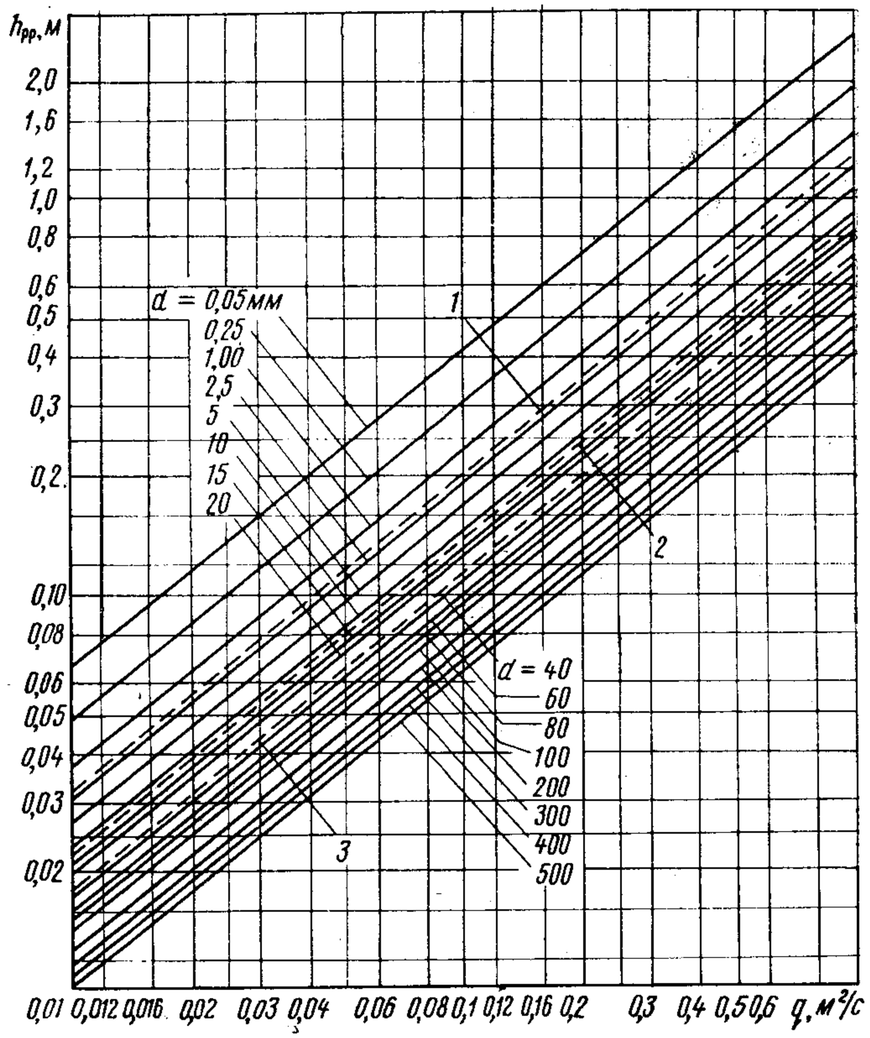


Рис. 44. График для определения глубины $h_{рр}$ размыва грунта равномерным потоком:
1 — глины средние $d_э$ = 2 мм; *2* — глины плотные $d_э$ = 10 мм; *3* — глины очень плотные $d_э$ = 30 мм

будут размываться, а живое сечение ω увеличиваться до тех пор, пока скорость $v = \frac{Q}{\omega}$ не станет практически равна допускаемой. При неразмываемых стенках или в случае весьма широкого русла увеличение живого сечения будет происходить только путем углубления. Та глубина, при которой данный расход будет протекать с допускаемой скоростью, называется глубиной $h_{рр}$, формируемой равномерным потоком

$$h_{рр} = \frac{Q}{bv_{доп}} = \frac{q}{v_{доп}}. \qquad (77)$$

Для несвязных грунтов с диаметром d частиц допускаемую скорость (в м/с) можно определить по формуле Б. И. Студеничникова:

$$v_{доп} = 3{,}6\, d^{0,25} h^{0,25}, \qquad (78)$$

где d — средний диаметр частиц грунта, м.

Умножив обе части этого равенства на h, учтя, что

$$q = vh = v_{доп}\ h_{рр} = 3{,}6 d^{0,25}\ h_{рр}^{1,25},$$

получим $h_{рр} =$

$$= \left(\frac{q}{3{,}6 d^{0,25}}\right)^{0,8}. \qquad (79)$$

По этой формуле построен график (рис. 44).

Для связных (глинистых) грунтов допускаемую скорость определяют по формуле проф. Ц. Е. Мирцхулавы:

$$v_{доп} = 0{,}4\,(3{,}34 + \lg h)\sqrt{0{,}15 + C_р},\ м/с. \qquad (80)$$

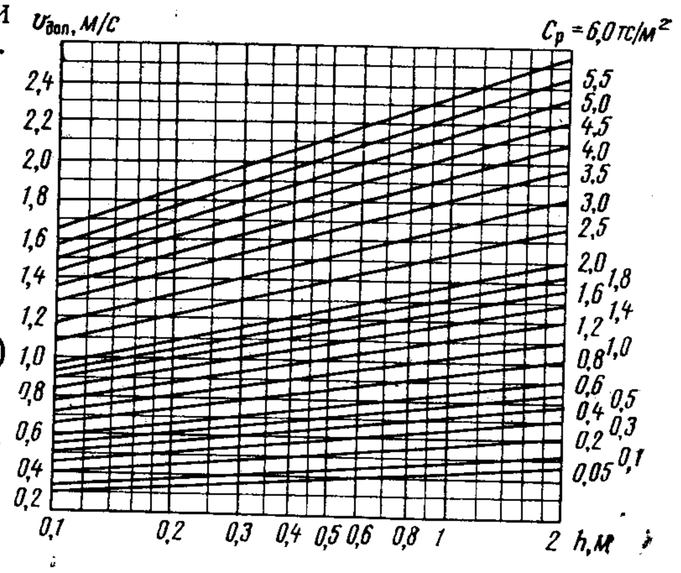


Рис. 45. График для определения допускаемой скорости $v_{доп}$ связных грунтов

Здесь $C_р$ — расчетное значение сцепления (в тс/м²), капиллярно водонасыщенного грунта при полной влагоемкости, определяемое срезными приборами или сферическим штампом проф. Н. А. Цытовича.

По формуле (80) построен график (рис. 45), позволяющий быстро находить допускаемую скорость для связных грунтов.

Так как $q = v_{доп} h_{рр}$, то из выражения (80) имеем

$$q = 0{,}4 h_{рр}\sqrt{0{,}15 + C_р}\lg(2200 h_{рр}). \qquad (81)$$

Отсюда глубина (в м), формируемая равномерным потоком в связном грунте, может быть найдена подбором.

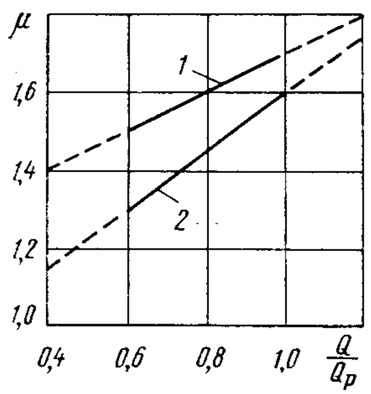


Рис. 46. График для определения величины μ при расчете глубины размыва:
1 — расширяющиеся водобойные колодцы; *2* — гаситель ЦНИИСа

Но в потоке повышенной турбулентности глубина размыва при том же удельном расходе получается больше и находится по выражению

$$T_р = \Psi M h_{рр} - h_б, \qquad (82)$$

где $M = \mu + 0{,}3\frac{v^2}{2gh_к}$. (83)

Значение μ зависит от конструкции гасителя и представлено графиком (рис. 46), полученным в ЦНИИСе опытным путем. На этом графике величина μ дана в виде функции отношения расхода Q, фактически пропускаемого трубой, к рас-

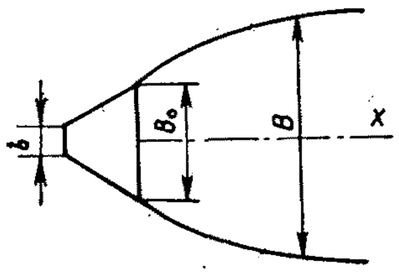


Рис. 47. Схема растекания потока в отводном русле

четному расходу $Q_р$ (см. гл. I). При устройстве в конце укрепления отвесного зуба принимают $\psi = 1$, при устройстве предохранительного откоса $\psi = 1{,}35$.

Удельный расход q, входящий в формулы, определяется как отношение полного расхода Q к ширине B потока (рис. 47) в рассматриваемом створе. Ширину потока B можно определить, пользуясь эмпирическими формулами:

1) при гасителе в виде расширяющегося водобойного колодца

$$B = 2B_0\left\{1 + 0{,}55 \lg\left[\frac{x}{B_0}(1 - i) + 0{,}123\right]\right\}; \qquad (84)$$

2) при гасителе ЦНИИСа

$$B = B_0\left\{2{,}52 + 2{,}18 \lg\left[\frac{x}{B_0}(1 - i) + 0{,}20\right]\right\}; \qquad (85)$$

3) при типовом раструбном оголовке без гасителя

$$B = B_0 + \frac{(0{,}635Q - 0{,}52)(1 - i)\,x}{1 + 0{,}262(1 - i)\,x}. \qquad (86)$$

В этих формулах B_0 — ширина выхода из гасителя (см. рис. 47), м; x — расстояние от конца раструба, м; Q — расход воды, м³/с.

Фигуру растекания строят до боковых стенок отводного русла, а дальше поток считают заполняющим всю ширину.

Глава V

КОНСТРУКЦИИ БЫСТРОТОКОВ И СОПРЯГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ВХОДЕ В ТРУБУ

По своим конструктивным разновидностям быстротоки разделяются на бетонные и железобетонные лотки и русла, укрепляемые искусственной одеждой.

В последние годы для косогорных труб разработаны типовые конструкции лотков и укрепленных русел. Исходя из существующих размеров отверстий железобетонных круглых и прямоугольных труб, запроектированы бетонные и железобетонные лотки прямоугольного поперечного сечения шириной 1,0; 1,25; 1,5; 2,0 и 3,0 м. При одной и той же ширине лотки могут иметь четыре высоты стенки: 0,6; 0,9; 1,2 и 1,5 м. Такой набор блоков лотка позволяет законструировать быстротоки при уклонах от 0,05 до 0,40. Типовые конструкции русел имеют понизу такую же ширину, как и лотки: 1,0; 1,25; 1,5; 2,0 и 3,0 м.

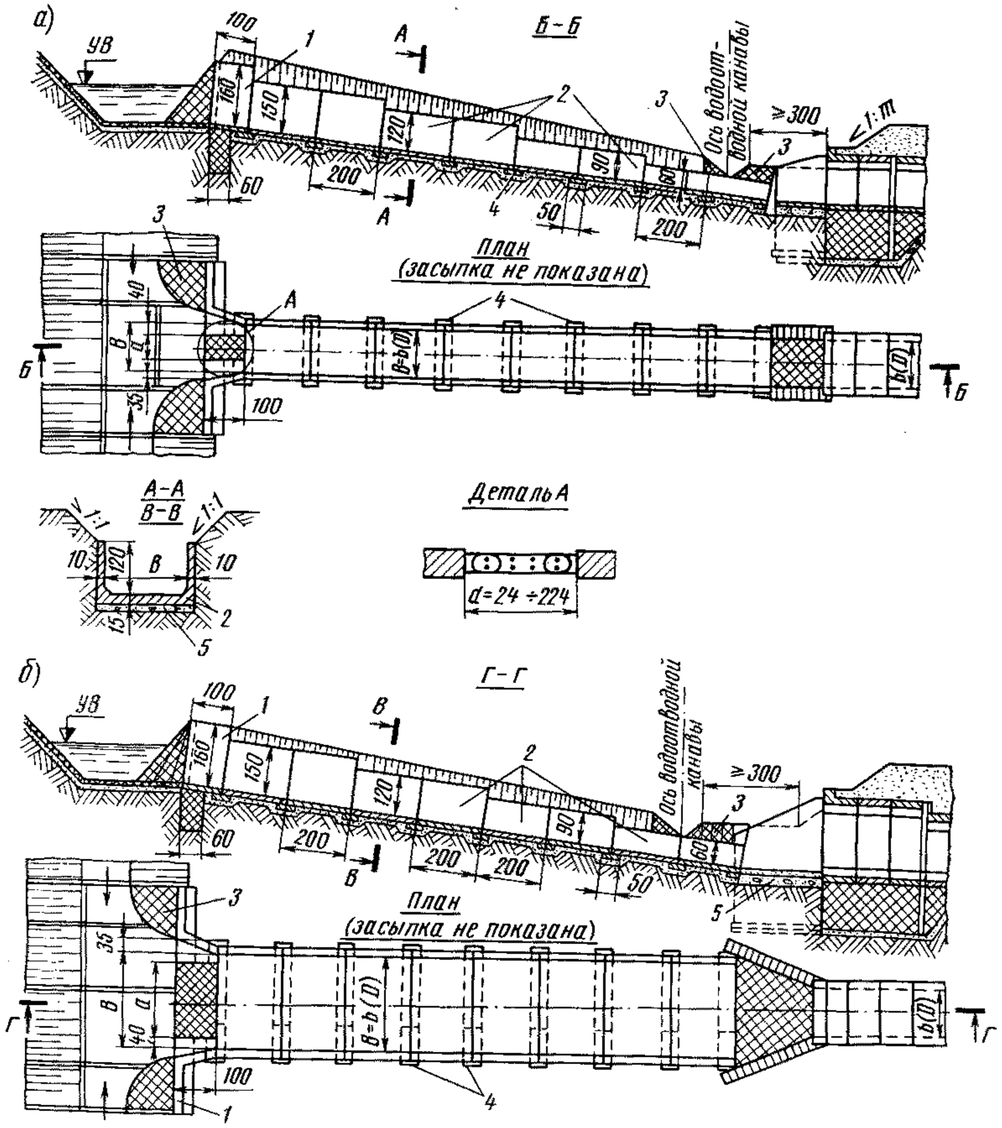


Рис. 48. Конструкция быстротока из сборного железобетона и деталь стыка блоков оголовка[1]:

а — ширина лотка равна отверстию трубы; *б* — ширина лотка больше отверстия трубы;
1 — блоки оголовков; *2* — блоки лотка; *3* — участки, укрепляемые монолитным бетоном; *4* — фундаментные плиты; *5* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси. Значения буквенных обозначений даны в табл. 16.

Сборные железобетонные быстротоки. Сборные быстротоки прямоугольного сечения (рис. 48) монтируют из отдельных железобетонных лотков-блоков. В зависимости от условий монтажа длину блоков лотка быстротока назначают в пределах 100—200 см; в типовых конструкциях они приняты длиной 200 см. Для обеспечения плавного входа потока в быстроток

[1] Здесь и дальше на рисунках в соответствии с ГОСТ 2.307-68 (п. 2.41) перед величиной откоса поставлен знак, острый угол которого направлен в сторону уклона.

на входе в него устраивают оголовок раструбного типа, который монтируют из двух Г-образных блоков. Монтажный стык расположен в плите, которая служит основанием блока. Такая конструкция оголовка позволяет использовать один типоразмер блоков для быстротоков с разной шириной лотка. Изменение ширины лотка достигается за счет изменения размера стыка. Блоки оголовка устанавливают на фундамент из монолитного бетона. Фундамент служит также и экраном, препятствующим фильтрации воды под быстроток. При устройстве быстротока блоки лотка устанавливают на железебетонные плиты шириной 50 см и толщиной 15 см. Длину плит L (в см) определяют по формуле

$$L = B + 2\delta + 30, \qquad (87)$$

где B — ширина лотка быстротока, см: δ — толщина стенки лотка, см; 30 — длина двух свесов плиты, см.

Плиты располагают в местах сопряжения смежных блоков лотка. Лотки изготавливают из бетона марки 300 с водо-цементным отношением не более 0,55 и морозостойкостью не менее Мрз200, а при климатических условиях, соответствующих среднемесячной температуре наиболее холодного месяца ниже минус 15°С, не менее Мрз300. Водонепроницаемость бетона должна быть не ниже В-2 по ГОСТ 4795—69. В качестве основной рабочей арматуры рекомендуется мартеновская и кислородно-конверторная (конверторная) сталь периодического профиля из углеродистой горячекатаной стали класса А-II марок Ст. 5сп по ГОСТ 5781—61 и ГОСТ 380—60*. Для распределительной арматуры и строповочных петель применена гладкая арматура из углеродистой горячекатаной стали класса А-I марок ВМ Ст. 3сп и ВК Ст. 3сп по ГОСТ 5781—61 и ГОСТ 380—60*.

Быстротоки из монолитного бетона. Выбор характера материала конструкции быстротока — из сборного железобетона или монолитного бетона — производится на основании технико-экономического сравнения вариантов.

Быстроток из монолитного бетона (рис. 49) состоит из массивных стенок, бетонируемых совместно с фундаментом, и лотка. Материалом для него служит бетон марки 200 морозостойкостью Мрз200 или Мрз300 в зависимости от климатической зоны, в которой сооружается быстроток. Для обеспечения независимости деформаций стенок и лотка донная плита его отделяется сквозным швом шириной 2 см от основной конструкции, который в дальнейшем заделывают цементным раствором. Этим достигается раздельная статическая работа стенок и лотка. Толщину донной плиты принимают равной 40 см. Применение монолитного бетона дает возможность варьировать длиной секций быстротока. В зависимости от местных условий длина секций назначается в пределах 4—6 м.

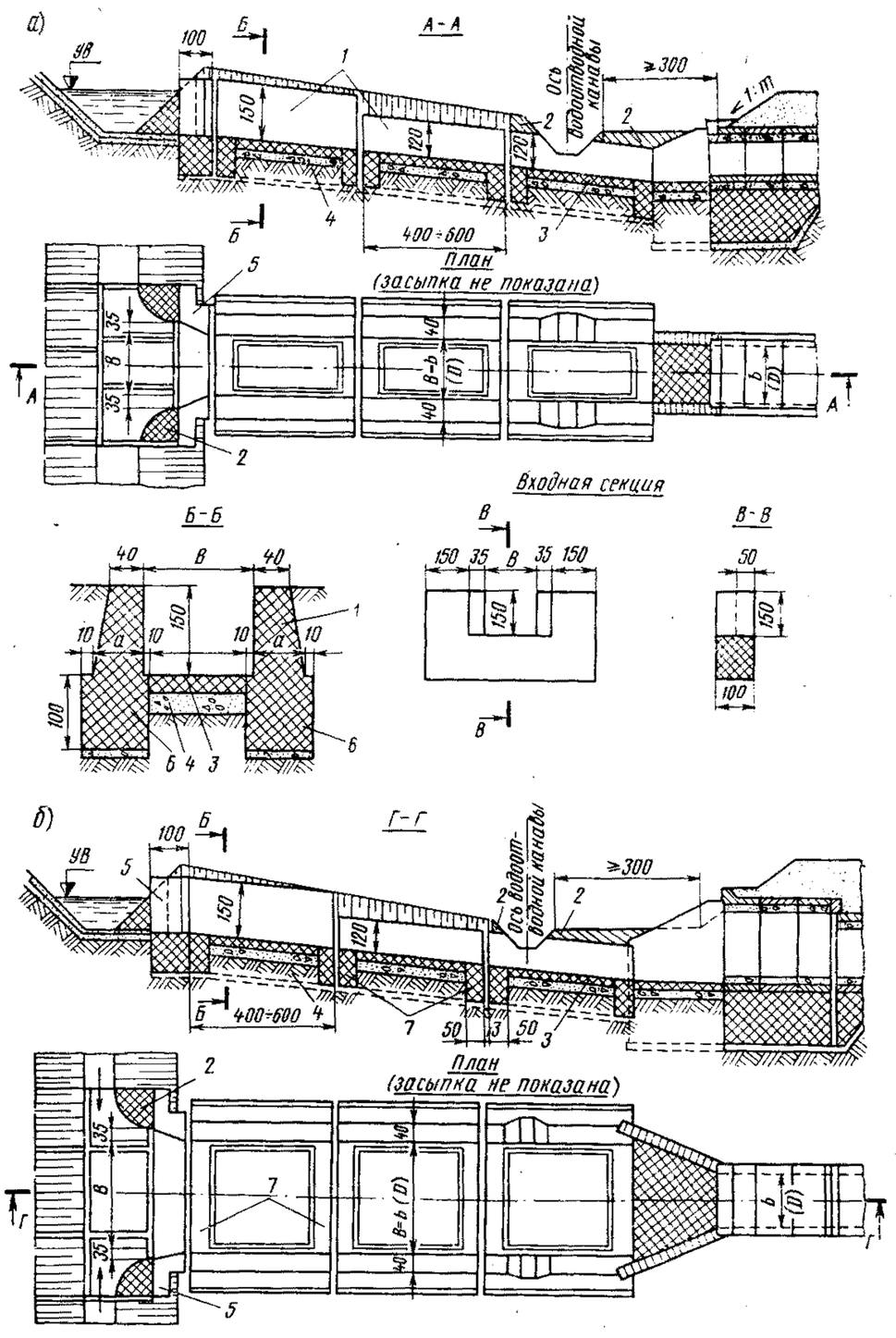


Рис. 49. Конструкция быстротока из монолитного бетона:
а — ширина лотка равна отверстию трубы; *б* — ширина лотка больше отверстия трубы;
1 — стенки лотка; *2* — участки, укрепляемые монолитным бетоном; *3* — лоток; *4* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси; *5* — оголовок; *6* — фундамент; *7* — поперечные стенки фундамента (экраны)

Высоту стенок лотка в быстротоках из сборного железобетона и монолитного бетона назначают из расчета, чтобы она была на 20 см выше глубины потока в данном сечении.

На входе в быстроток устраивают оголовок раструбного типа на общем фундаменте, который одновременно служит и

экраном от возможной фильтрации воды под лоток быстротока. Глубину заложения фундаментов под оголовки быстротоков из сборного железобетона и монолитного бетона, а также под стены лотков из монолитного бетона назначают при скальных, крупнообломочных, гравелистых и крупнопесчаных грунтах основания независимо от глубины промерзания, а при всех прочих грунтах на 0,25 м ниже глубины промерзания основания. Сборные железобетонные лотки, а также донные плиты лотков быстротоков из монолитного бетона при наличии в основании скальных, крупнообломочных, гравелистых и крупнопесчаных грунтов закладывают непосредственно на естественном грунте. При глинистых грунтах в основании лотков естественный грунт заменяют подушкой из песка, гравия или щебня. В сухих грунтах толщина подушки должна быть не менее 0,4 м, а во влажных низ подушки закладывают на глубину от основания лотка не менее 75% глубины промерзания.

Для предотвращения вымывания грунта из-под донных плит лотков по концам секций быстротоков в уровне подошвы фундамента устраивают поперечные стенки (экраны), которые соединяют с фундаментами под стенками быстротока. В сборных железобетонных быстротоках под лотком устраивают сплошной щебеночный антифильтр толщиной не менее 20 см. Поверхности лотков быстротоков, засыпаемые грунтом, покрывают обмазочной изоляцией из двух слоев горячей или холодной битумной мастики по битумной грунтовке. Швы между секциями быстротока из монолитного бетона и блоками лотков из сборного железобетона конопатят с обеих сторон паклей, пропитанной битумом. С наружной стороны швы покрывают слоем оклеечной гидроизоляции шириной 25 см, поверх которой наносят горячую битумную мастику. С внутренней стороны шов заделывают цементным раствором на глубину 3 см.

Продольный профиль быстротока необходимо проектировать с наибольшим приближением к рельефу местности, чтобы сократить объемы земляных работ. При этом боковые стенки быстротоков заглубляют в грунт на полную высоту с устройством за стенками (в необходимых случаях) отсыпки местным грунтом шириной поверху не менее 2 м. Отсыпаемый грунт должен быть хорошо утрамбован.

Большое внимание уделяют укреплению русла на входе в быстроток, а также подходных участков водоотводных канав. Укрепление может быть осуществлено сборными бетонными плитами или монолитным бетоном. Конуса у оголовков укрепляют монолитным бетоном.

При значительном притоке грунтовых вод и недренирующих грунтах основания за стенками лотков необходимо предусмотреть устройство дренажей, обеспечивающих выход грунтовых вод в нижний бьеф. Для того чтобы избежать возможного оползания грунта в лоток быстротока, целесообразно над продольными стенками лотка дать укрепление откоса бетонными плитками или отмосткой.

Размеры стенок быстротоков из сборного железобетона и монолитного бетона назначают исходя из расчета их на прочность от усилий, возникающих от давления грунта. Величина давления E_a грунта при горизонтальной поверхности засыпки за стенкой лотка, отсутствии внешней нагрузки и однородном грунте засыпки определяется по формуле

$$E_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 \operatorname{tg}^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right), \qquad (88)$$

где γ — объемный вес грунта, тс/м³; H — высота засыпки, м; ψ — угол внутреннего трения грунта.

Нижняя ордината $\sigma_н$ эпюры давления

$$\sigma_н = \gamma H \operatorname{tg}^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Равнодействующая горизонтального давления грунта располагается на расстоянии z, равном $H/3$ от основания засыпки.

При определении расчетных нагрузок от давления грунта, кроме учета коэффициента перегрузки, в формулу для определения давления грунта вводится расчетная величина угла внутреннего трения $\varphi = \varphi_н \pm 5°$ (где $\varphi_н$ — нормативное значение угла внутреннего трения) в зависимости от того, какое значение даст наибольшее суммарное воздействие. Средние физико-механические характеристики грунтов оснований берут из справочной литературы.

В типовых конструкциях железобетонных лотков минимальная толщина стенок принята равной 10 см, а нижней плиты — 15 см. Эти размеры получены при максимальной высоте засыпки за стенкой лотка, равной 2,5 м.

При расчете стенок железобетонного лотка на прочность расчетную схему ее принимают в виде плиты, заделанной у основания и загруженной давлением грунта. Нижнюю плиту лотка рассчитывают как свободно опертую балку с пролетом, равным расстоянию между осями фундаментных плит, на нагрузки от собственного веса и веса воды при максимальном заполнении лотка.

При расчете стенок быстротока из монолитного бетона минимальную ширину их поверху принимают равной 0,4 м.

Размеры стенки по обрезу фундамента подбирают исходя из расчета их на прочность в соответствии с СН 200-62. При этом величина эксцентриситета e_0 приложения равнодействующей активных сил от нормативных нагрузок не должна превышать пределы:

1) при учете нагрузок основных сочетаний

$$e_0 \leqslant 0{,}5y_0; \qquad (89)$$

2) при учете нагрузок особых сочетаний

$$e_0 \leqslant 0{,}7 y_0, \qquad (90)$$

где $e_0 = M/N$ — эксцентриситет нормального усилия N относительно центра тяжести сечения; M — момент действующих сил относительно центра тяжести всего сечения; y_0 — расстояние от центра тяжести сечения до более напряженной грани сечения, измеренное по перпендикуляру к этой грани.

Заданные размеры фундамента должны отвечать условию, чтобы напряжения по его подошве были бы не больше величины расчетного сопротивления грунта.

Помимо расчета на прочность, стенки совместно с фундаментом проверяют на устойчивость против опрокидывания и скольжения. Расчет на устойчивость против опрокидывания производится по формуле

$$\frac{M_{опр}}{M_{пр}} = \frac{e}{y} \leqslant m. \qquad (91)$$

Здесь $M_{опр}$ и $M_{пр}$ — расчетный и предельный опрокидывающие моменты; e — расстояние от центра тяжести сечения до точки пересечения линий действия равнодействующей сил с плоскостью проверяемого сечения; y — расстояние от центра тяжести сечения до грани контура сечения, относительно которой проверяется опрокидывание; m — коэффициент условий работы для сечений бетонных и каменных конструкций, а также фундаментов на скальных основаниях, принимаемый равным 0,80, а для фундаментов на нескальных основаниях — 0,70.

Расстояние y и e берут в плоскости, перпендикулярной оси (грани контура сечения), относительно которой проверяют опрокидывание.

Расчет на устойчивость против скольжения производится по формуле

$$\frac{T_{сд}}{T_{пр}} = \frac{\sum T_i}{\psi \sum P_i} \leqslant m, \qquad (92)$$

где $T_{сд}$ и $T_{пр}$ — расчетная и предельная сдвигающие силы; $m = 0{,}80$ — коэффициент условий работы; ΣP_i — составляющие всех активных сил, перпендикулярные проверяемому сечению; ΣT_i — геометрическая сумма составляющих всех активных сил, параллельных проверяемому сечению; ψ — коэффициент трения кладки по грунту, принимаемый с учетом вида грунта:

Глины и скальные грунты с омывающейся поверхностью (глинистые известняки, сланцы и т. п.):	
во влажном состоянии	0,25
то же, для сухих	0,30
Суглинки и супеси	0,30
Пески	0,40
Гравийные и галечниковые грунты	0,50
Скальные грунты (породы) с неомыливающейся поверхностью	0,60

Толщину стенки по обрезу фундамента для быстротоков из монолитного бетона можно определить, пользуясь графиком (рис. 50), который справедлив для двух случаев засыпки за стенками лотка: ограниченной высоты с восходящим откосом

и при горизонтальной поверхности грунта. Ширина стенки поверху здесь принята равной 0,4 м, длина горизонтальной площадки — $2{,}5h$ (где h — высота засыпки).

Гидравлические характеристики быстротоков прямоугольного сечения из сборного железобетона приведены в табл. 16, из монолитного бетона — в табл. 17. Используя данные таблиц, можно по заданному расчетному расходу и отверстию трубы наметить основные параметры быстротока.

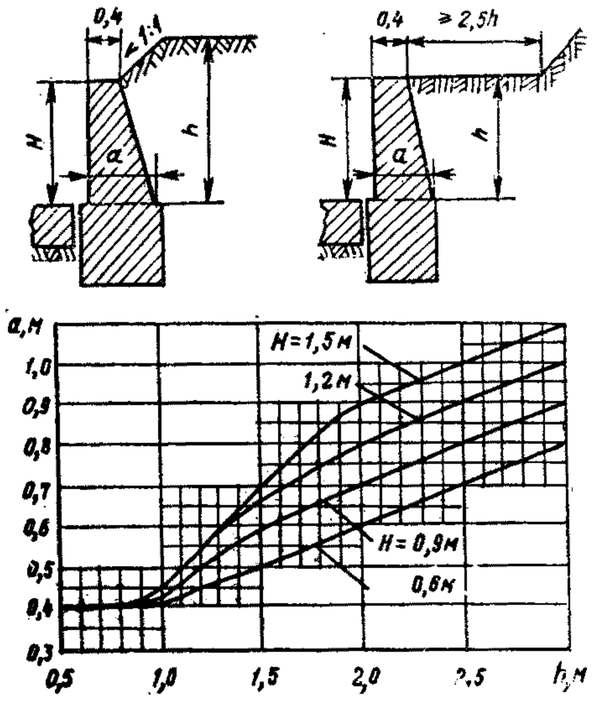


Рис. 50. Зависимость толщины a стенки по обрезу фундамента от высоты h засыпки в быстротоках из монолитного бетона

Укрепленные русла. Для трапецеидальных русел применяют три типа укреплений: бетонными плитами размером в плане 49×49 см и толщиной 12 см (рис. 51), омоноличиваемых в стыках бетоном; монолитным бетоном марки 200 с толщиной слоя 15 см; одиночным мощением на щебне (рис. 52). Высоту укрепления откосов русел назначают на 0,2 м выше глубины потока в данном сечении. Гидравлические характеристики трапецеидальных русел приведены в табл. 18 и 19.

Помимо лотков с нормальной шероховатостью, применяют железобетонные и бетонные лотки с искусственной шероховатостью. Такие лотки используют в комбинации с лотками, имеющими нормальную шероховатость, и устанавливают на тех участках, где скорость воды в лотках превосходит максимально допустимую для данного материала.

Применение искусственной шероховатости — эффективное средство гашения энергии и целесообразно только в том случае, когда поток не несет крупных песчаных насосов. Наиболее простые типы искусственной шероховатости — это прямые поперечные ребра из брусков (рис. 53, *а*), шашки кубической формы (рис. 53, *б*), расположенные по дну в шахматном порядке, и зубья по течению (рис. 53, *в*). Для них коэффициенты шероховатости n_0 можно определить по формулам (15)—(18).

Для того чтобы не допустить застоя воды в лотке при искусственной шероховатости в виде поперечных ребер, по их середине на всю высоту ребра устраивают зазор шириной 10 см.

Сопряжение быстротока с трубой. В зависимости от местных условий сопряжение быстротока с трубой может быть решено в двух вариантах:

Таблица 16

Ширина лотка B, м	Отверстие трубы, м: круглой D	Отверстие трубы, м: прямоугольной $в$	Расход Q, м³/с	Гидравлические характеристики быстротока прямоугольного сечения из сборного железобетона, м: i=0,05 $h_к$	i=0,05 h_0	i=0,05 h	i=0,05 $L_б$	i=0,10 $h_к$	i=0,10 h_0	i=0,10 h	i=0,10 $L_б$	i=0,20 $h_к$	i=0,20 h_0	i=0,20 h	i=0,20 $L_б$	i=0,40 $h_к$	i=0,40 h_0	i=0,40 h	i=0,40 $L_б$
1,0	1,0	—	2,2	0,80	0,42	—	—	0,80	0,33	—	—	0,80	0,26	—	—	0,80	0,20	0,23	21,8
	—	1,0	4,6	1,30	0,74	—	—	1,30	0,56	—	—	1,30	0,44	0,41	50,5	1,30	0,34	0,47	12,3
1,25	1,25	—	2,5	0,75	0,39	—	—	0,75	0,31	—	—	0,75	0,24	—	—	0,75	0,20	0,21	22,1
	1,25	—	3,9	1,00	0,52	—	—	1,00	0,45	—	—	1,00	0,34	—	—	1,00	0,24	0,32	14,5
	—	1,25	5,8	1,30	0,70	—	—	1,30	0,54	—	—	1,30	0,42	0,47	37,0	1,30	0,33	0,47	11,7
1,5	1,5	—	3,9	0,89	0,44	—	—	0,89	0,36	—	—	0,89	0,28	—	—	0,89	0,22	0,27	15,3
	1,5	—	6,0	1,18	0,60	—	—	1,18	0,47	—	—	1,18	0,37	0,41	38,5	1,18	0,29	0,41	12,0
	—	1,5	9,5	1,50	0,84	—	—	1,60	0,66	—	—	1,60	0,51	0,64	25,8	1,60	0,40	0,64	10,1
2,0	—	2,0	12,6	1,60	0,78	—	—	1,60	0,62	—	—	1,60	0,48	0,64	23,1	1,60	0,38	0,64	9,6
	—	2,0	15,0	1,79	0,87	—	—	1,79	0,68	0,75	85	1,79	0,54	0,75	21,6	1,79	0,42	0,75	9,0
	1,0	—	2,2	0,50	0,23	—	—	0,50	0,18	—	—	0,50	0,15	—	—	0,50	0,13	—	—
	—	1,0	4,6	0,81	0,38	—	—	0,81	0,30	—	—	0,81	0,24	—	—	0,81	0,19	0,23	51,4
	1,25	—	2,5	0,54	0,28	—	—	0,54	0,20	—	—	0,54	0,16	—	—	0,54	0,13	—	—
	1,25	—	3,9	0,73	0,34	—	—	0,73	0,27	—	—	0,73	0,21	—	—	0,73	0,17	0,195	19,6
	—	1,25	5,8	0,95	0,44	—	—	0,95	0,35	—	—	0,95	0,28	0,29	62,0	0,95	0,22	0,29	12,6
3,0	1,5	—	3,9	0,56	0,26	—	—	0,58	0,21	—	—	0,56	0,16	—	—	0,56	0,13	—	—
	1,5	—	6,0	0,75	0,34	—	—	0,75	0,21	—	—	0,75	0,22	0,21	53,2	0,75	0,17	0,21	16,9
	—	1,5	9,5	1,01	0,45	—	—	1,01	0,37	—	—	1,01	0,29	0,32	44,9	1,01	0,23	0,32	13,3
	—	2,0	12,6	1,22	0,53	—	—	1,22	0,44	—	—	1,22	0,35	0,43	27,8	1,22	0,28	0,43	10,9
	—	2,0	15,0	1,36	0,61	—	—	1,38	0,48	0,50	114	1,36	0,39	0,50	22,0	1,36	0,31	0,50	10,2

Примечания. 1. Принятые обозначения: $h_к$—критическая глубина, м; h_0—глубина воды при равномерном движении потока, м; h—глубина воды при скорости, допустимой по материалу быстротока, м.

2. Максимальная длина $L_б$ быстротоков дана при скорости потока, изменяющейся: от критической до 10 м/с для железобетонных лотков и от критической до 8 м/с для лотков из монолитного бетона.

3. В тех случаях, когда скорость равномерного потока окажется меньше допускаемой для данного материала быстротока, длина L_{max} не ограничивается и принимается в зависимости от местных условий. В таблице i=0,05÷0,40—уклон быстротока.

Таблица 17

Ширина, лотка B, м	Отверстие трубы, м: круглой D	Отверстие трубы, м: прямоугольной $в$	Расход Q, м³/с	Гидравлические характеристики быстротока прямоугольного сечения из монолитного бетона, м: i=0,05 $h_к$	i=0,05 h_0	i=0,05 h	i=0,05 $L_б$	i=0,10 $h_к$	i=0,10 h_0	i=0,10 h	i=0,10 $L_б$	i=0,20 $h_к$	i=0,20 h_0	i=0,20 h	i=0,20 $L_б$	i=0,40 $h_к$	i=0,40 h_0	i=0,40 h	i=0,40 $L_б$
1,0	1,0	—	2,2	0,80	0,42	—	—	0,80	0,33	—	—	0,80	0,26	0,28	35,0	0,80	0,20	0,28	8,4
	—	1,0	4,6	1,30	0,74	—	—	1,30	0,56	—	—	1,30	0,44	0,58	14,5	1,30	0,34	0,58	5,8
1,25	1,25	—	2,5	0,75	0,39	—	—	0,75	0,31	—	—	0,75	0,24	0,26	28,0	0,75	0,20	0,26	7,9
	1,25	—	3,9	1,00	0,52	—	—	1,00	0,45	—	—	1,00	0,34	0,40	19,1	1,00	0,24	0,40	6,5
	—	1,25	5,8	1,30	0,70	—	—	1,30	0,54	0,58	5,25	1,30	0,42	0,58	13,4	1,30	0,33	0,58	5,6
1,5	1,5	—	3,9	0,89	0,44	—	—	0,89	0,36	—	—	0,89	0,28	0,33	19,4	0,89	0,22	0,33	7,2
	1,5	—	6,0	1,18	0,50	—	—	1,18	0,47	0,51	48,8	1,18	0,37	0,51	13,5	1,18	0,29	0,51	5,7
	—	1,5	9,5	1,60	0,84	—	—	1,60	0,66	0,80	28,3	1,60	0,51	0,80	10,4	1,60	0,40	0,80	4,6
2,0	—	2,0	12,6	1,60	0,78	—	—	1,60	0,62	0,79	25,9	1,60	0,48	0,79	10,2	1,60	0,38	0,79	4,7
	—	2,0	15,0	1,79	0,87	0,94	78,0	1,79	0,68	0,94	24,2	1,79	0,54	0,94	8,0	1,79	0,42	0,94	4,5
	1,0	—	2,2	0,50	0,24	—	—	0,90	0,19	—	—	0,50	0,14	—	—	0,50	0,13	0,14	16,7
	—	1,0	4,6	0,81	0,38	—	—	0,81	0,30	—	—	0,81	0,24	0,29	15,9	0,81	0,19	0,29	8,1
	1,25	—	2,5	0,54	0,25	—	—	0,54	0,20	—	—	0,54	0,16	—	—	0,54	0,13	0,16	17,3
	1,25	—	3,9	0,72	0,34	—	—	0,72	0,27	—	—	0,72	0,21	0,24	16,8	0,72	0,17	0,24	8,9
3,0	—	1,25	5,8	0,96	0,44	—	—	0,96	0,35	—	—	0,96	0,28	0,36	13,7	0,96	0,22	0,36	6,6
	1,5	—	3,9	0,56	0,26	—	—	0,56	0,21	—	—	0,56	0,16	0,17	19,7	0,56	0,13	0,17	9,9
	1,5	—	6,0	0,75	0,34	—	—	0,75	0,27	—	—	0,75	0,22	0,26	19,7	0,75	0,17	0,26	7,3
	—	1,5	9,5	1,01	0,45	—	—	1,01	0,37	0,40	49,8	1,01	0,29	0,40	14,7	1,01	0,23	0,40	6,3
	—	2,0	12,6	1,22	0,53	—	—	1,22	0,44	0,53	52,5	1,22	0,35	0,53	12,3	1,22	0,28	0,53	5,9
	—	2,0	15,0	1,36	0,61	—	—	1,36	0,48	0,63	27,0	1,36	0,39	0,63	9,6	1,36	0,31	0,63	5,5

Примечания—см. табл. 16.

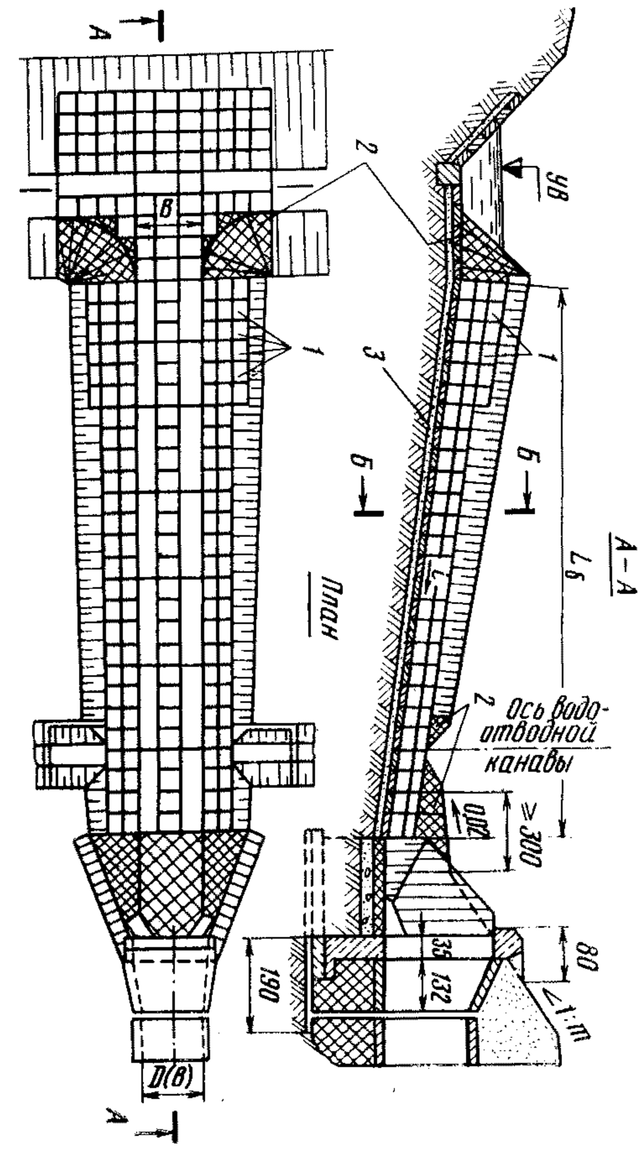


Рис. 51. Конструкция трапецеидального русла, укрепленного бетонными плитами:

1 — плиты; *2* — участки, укрепляемые монолитным бетоном; *3* — подготовка из щебня или гравия; *4* — упорный блок.
Значения буквенных обозначений даны в табл. 18

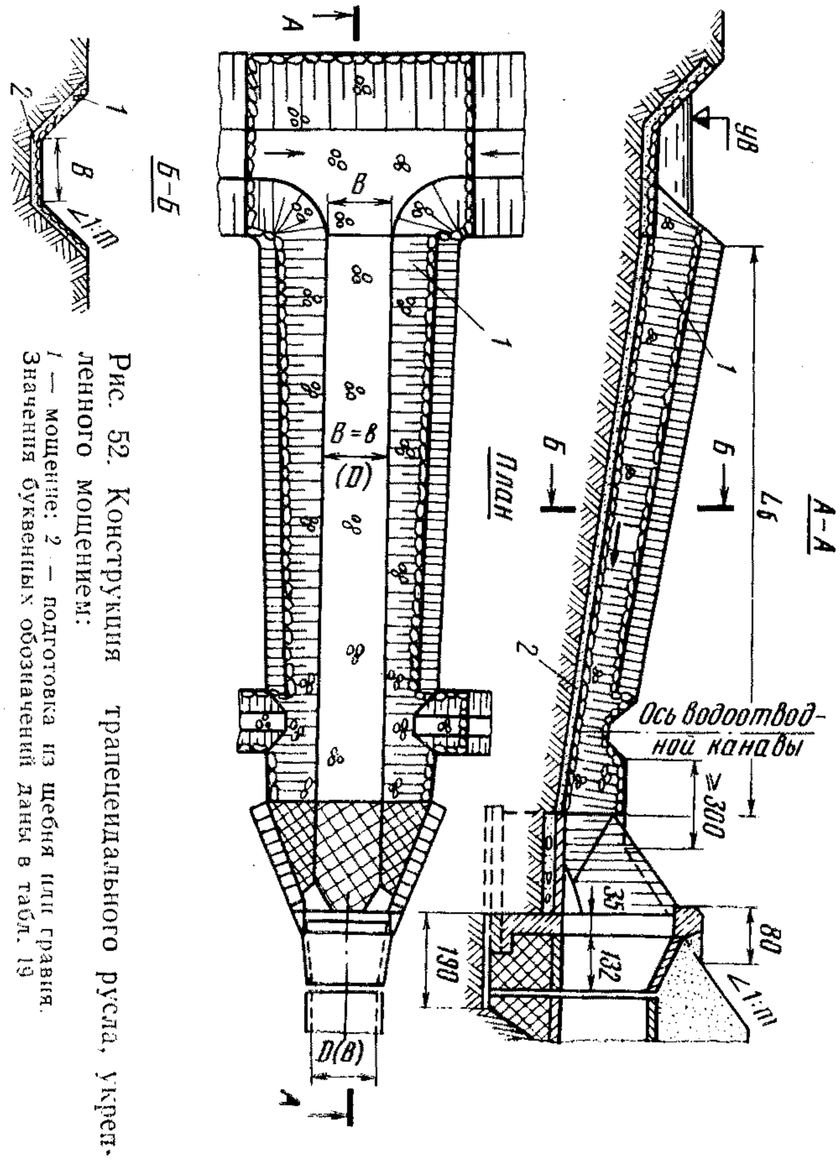


Рис. 52. Конструкция трапецеидального русла, укрепленного мощением:

1 — мощение; *2* — подготовка из щебня или гравия.
Значения буквенных обозначений даны в табл. 19

Таблица 18

Ширина лотка B, м	Отверстие трубы, м		Расход Q, м³/с	Гидравлические характеристики трапецеидальных русел, укрепленных бетонными плитами, м													
	круглой D	прямоугольной $в$		$i=0{,}05$				$i=0{,}10$				$i=0{,}20$				$i=0{,}40$			
				$h_к$	h_0	h	$L_б$	$h_к$	h_0	h	$L_б$	$h_к$	h_0	h	$L_б$	$h_к$	h_0	h	$L_б$
1,0	0,75	—	0,74	0,34	0,18	—	—	0,34	0,15	—	—	0,34	0,12	—	—	0,34	0,10	0,12	6,0
	1,0	—	1,4	0,50	0,26	—	—	0,50	0,21	—	—	0,50	0,18	0,20	13,1	0,50	0,14	0,20	4,5
	1,0	—	2,2	0,64	0,33	—	—	0,64	0,28	0,29	34,9	0,64	0,23	0,29	8,9	0,64	0,19	0,29	3,8
	—	1,0	4,6	0,95	0,50	0,51	90,7	0,95	0,41	0,51	16,3	0,95	0,34	0,51	8,4	0,95	0,28	0,51	3,9
1,25	1,25	—	2,5	0,63	0,32	—	—	0,63	0,26	0,28	29,0	0,63	0,22	0,28	8,5	0,63	0,18	0,28	3,7
	1,25	—	3,9	0,81	0,41	—	—	0,81	0,34	0,40	18,2	0,81	0,28	0,40	7,1	0,81	0,23	0,40	3,2
	—	1,25	5,8	0,99	0,51	0,54	57,5	0,99	0,42	0,54	14,5	0,99	0,35	0,54	6,2	0,99	0,28	0,54	2,3
1,5	1,5	—	3,9	0,15	0,37	—	—	0,75	0,31	0,36	18,3	0,75	0,25	0,36	7,1	0,75	0,21	0,36	3,9
	1,5	—	6,0	0,95	0,48	0,51	45,4	0,95	0,39	0,51	13,8	0,95	0,32	0,51	5,9	0,95	0,26	0,51	2,8
	—	1,5	9,5	1,22	0,61	0,72	38,3	1,22	0,51	0,72	11,4	1,22	0,48	0,72	5,1	1,22	0,34	0,72	2,5
2,0	—	2,0	12,6	1,28	0,62	0,77	24,8	1,28	0,51	0,77	14,9	1,28	0,42	0,77	4,6	1,28	0,34	0,77	2,2
	—	2,0	15,0	1,41	0,68	0,88	21,9	1,41	0,56	0,88	9,2	1,41	0,46	0,88	4,3	1,41	0,38	0,88	2,1
	1,0	—	1,4	—	—	—	—	0,35	0,14	—	—	0,35	0,12	—	—	0,35	0,10	0,12	5,1
	1,0	—	2,2	0,45	0,23	—	—	0,46	0,19	—	—	0,46	0,15	0,17	14,3	0,45	0,13	0,17	5,4
	—	1,0	4,5	0,72	0,35	—	—	0,72	0,29	0,33	20,7	0,72	0,23	0,33	7,8	0,72	0,19	0,33	3,5
	1,25	—	2,5	0,55	0,24	—	—	0,55	0,19	—	—	0,55	0,16	0,19	11,5	0,55	0,13	0,19	3,8
	1,25	—	3,9	0,73	0,31	—	—	0,73	0,25	0,29	27,0	0,73	0,21	0,29	8,4	0,73	0,17	0,29	3,5
	—	1,25	5,8	0,95	0,39	—	—	0,95	0,32	0,41	15,0	0,95	0,26	0,41	5,8	0,95	0,21	0,41	3,2
3,0	1,5	—	3,9	0,53	0,25	—	—	0,53	0,21	0,21	53,4	0,53	0,17	0,21	9,2	0,53	0,14	0,21	3,9
	1,5	—	6,0	0,69	0,32	—	—	0,69	0,26	0,31	18,7	0,69	0,22	0,31	7,2	0,69	0,18	0,31	3,3
	—	1,5	9,5	0,91	0,42	0,45	43,7	0,91	0,35	0,45	14,0	0,91	0,28	0,46	7,9	0,91	0,23	0,46	2,9
	—	2,0	12,6	1,08	0,50	0,52	30,1	1,08	0,41	0,59	11,6	1,08	0,33	0,59	5,2	1,08	0,27	0,59	2,5
	—	2,0	15,0	1,19	0,55	0,68	26,6	1,19	0,45	0,68	10,8	1,19	0,37	0,68	4,9	1,19	0,30	0,68	2,4

Примечание. Максимальная длина $L_б$ быстротока дана при изменении скорости потока: от критической до 6,0 м/с в случае укрепления русел бетонными плитами и монолитным бетоном; от критической до 3,5 м/с в случае укрепления русел мощением. См. табл. 16 примечание 3.

Таблица 19

Ширина лотка B, м	Отверстие трубы, м: круглой D	Отверстие трубы, м: прямоугольной a	Расход Q, м³/с	Гидравлические характеристики трапецеидального русла, укрепленного мощением, м: $i=0,05$ $h_к$	$i=0,05$ h_o	$i=0,05$ h	$i=0,05$ $L_б$	$i=0,10$ $h_к$	$i=0,10$ h_o	$i=0,10$ h	$i=0,10$ $L_б$	$i=0,20$ $h_к$	$i=0,20$ h_o	$i=0,20$ h	$i=0,20$ $L_б$	$i=0,40$ $h_к$	$i=0,40$ h_o	$i=0,40$ h	$i=0,40$ $L_б$
1,0	0,75	—	0,74	0,34	0,21	—	—	0,34	0,17	0,18	14,4	0,34	0,14	0,18	8,5	0,34	0,12	0,18	1,5
	1,0	—	1,4	0,50	0,30	0,31	19,9	0,50	0,25	0,31	4,0	0,50	0,20	0,31	1,6	0,50	0,17	0,31	1,2
	1,0	—	2,2	0,64	0,38	0,44	8,0	0,64	0,32	0,44	2,8	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	1,0	4,6	0,95	0,57	0,76	3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,25	1,25	—	2,5	0,63	0,37	0,43	6,7	0,63	0,30	0,43	2,1	—	—	—	—	—	—	—	—
	1,25	—	3,9	0,81	0,47	0,61	4,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	1,25	5,8	0,99	0,58	0,81	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	1,5	—	3,9	0,75	0,43	0,55	4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1,5	—	6,0	0,95	0,55	0,76	2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,0	1,0	—	1,4	0,33	0,20	—	—	0,35	0,17	0,19	7,7	0,35	0,14	0,19	2,9	0,34	0,14	0,19	1,6
	1,0	—	2,2	0,46	0,27	0,28	15,1	0,46	0,22	0,28	3,8	0,46	0,18	0,28	1,6	—	—	—	—
	—	1,0	4,6	0,72	0,40	0,53	4,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,0	1,25	—	2,5	0,55	0,28	0,31	10,7	0,44	0,23	0,31	3,3	—	—	—	—	—	—	—	—
	1,25	—	3,9	0,73	0,36	0,46	5,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	1,25	5,8	0,95	0,46	0,64	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1,5	—	3,9	0,53	0,29	0,34	7,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1,5	—	6,0	0,69	0,37	0,50	4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. См. табл. 18.

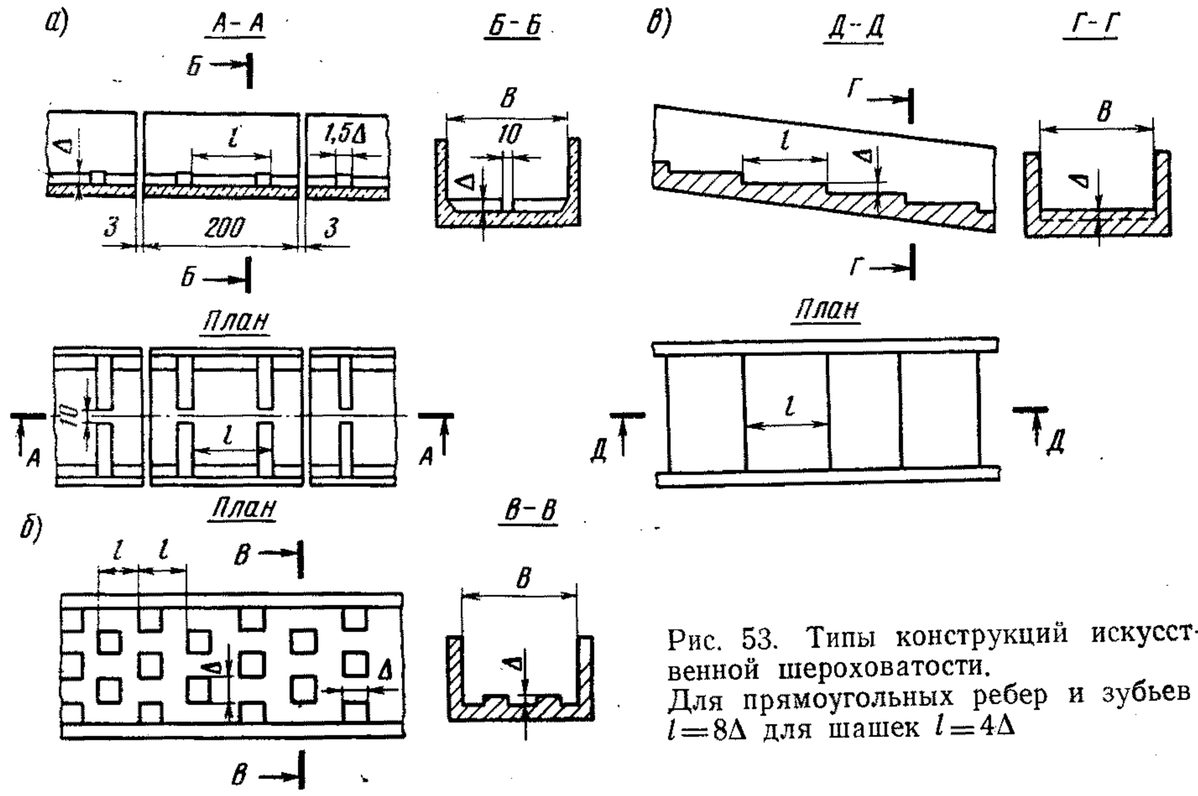


Рис. 53. Типы конструкций искусственной шероховатости.
Для прямоугольных ребер и зубьев $l=8\Delta$ для шашек $l=4\Delta$

1. Путем непосредственного примыкания быстротока к трубе, когда труба располагается с уклоном, равным или меньшим уклона быстротока. При таком сопряжении быстротока зачастую возникает высокая скорость потока на выходе из трубы, для снижения которой требуется устройство специальных гасителей энергии потока. Варьируя уклонами трубы и быстротока, обычно находят оптимальное решение с минимальными затратами по гашению энергии потока.

2. В случае больших уклонов местности, когда требуется уменьшить скорость потока уже в конце быстротока, устраивают водоприемные колодцы, которые устанавливают между быстротоком и трубой. Поток, попадая из быстротока в водоприемный колодец, гасит свою энергию и с пониженной скоростью попадает в трубу. Устройство водоприемных колодцев в конце быстротока, кроме того, позволяет уменьшить уклон трубы.

Иногда удается получить такую скорость потока на выходе из трубы, при которой отпадает необходимость в устройстве в конце трубы дополнительных гасителей энергии.

В случае непосредственного примыкания быстротока к трубе ширина лотка быстротока может быть равна или больше отверстия трубы, т. е. $B \geqslant b$ и $B \geqslant D$. Если ширина лотка быстротока равна отверстию трубы, оголовки в трубах устраивают с параллельными откосными крыльями, когда ширина лотка больше отверстия трубы, нужны оголовки раструбного типа (рис. 54).

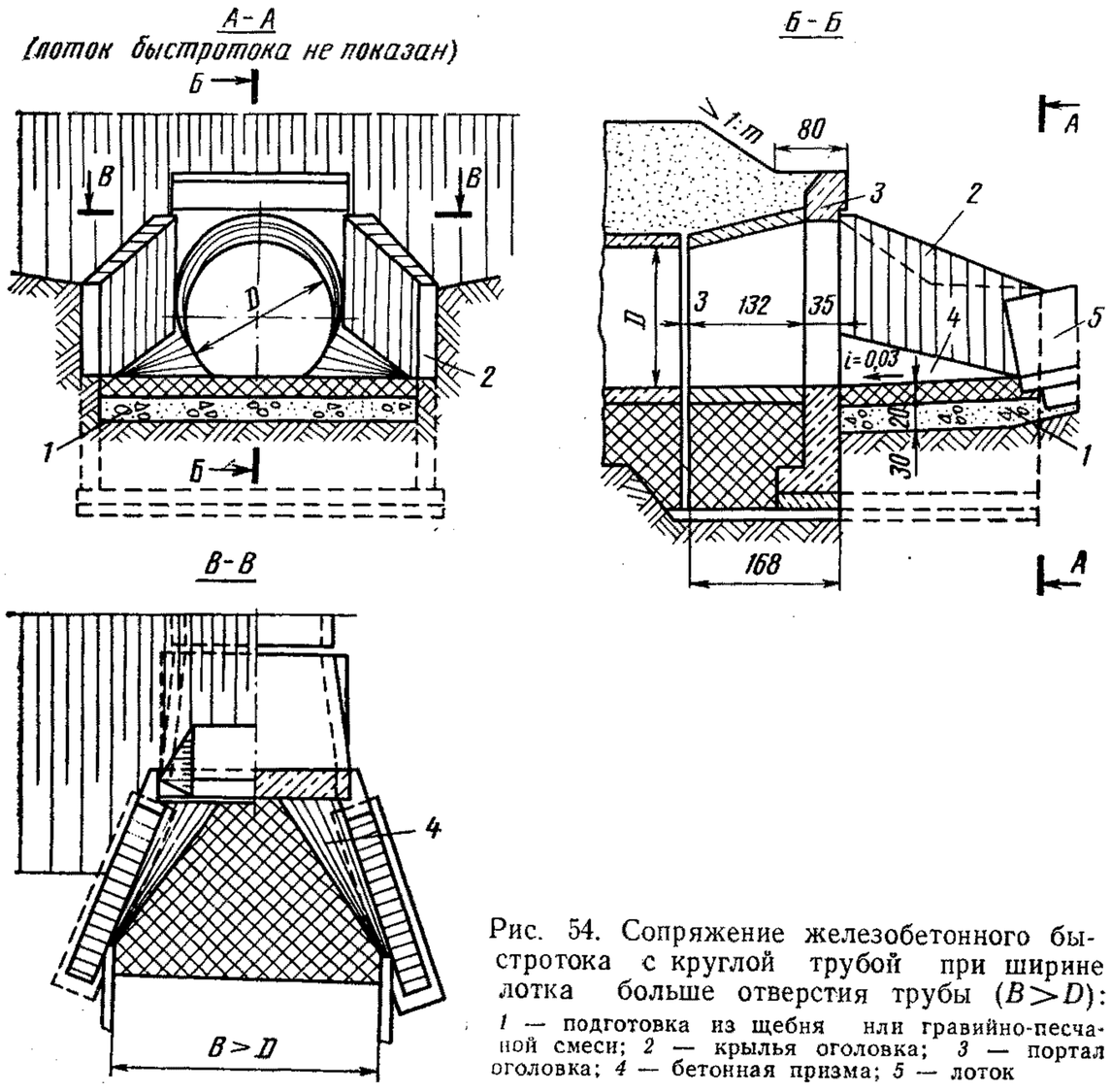


Рис. 54. Сопряжение железобетонного быстротока с круглой трубой при ширине лотка больше отверстия трубы ($B>D$):
1 — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси; *2* — крылья оголовка; *3* — портал оголовка; *4* — бетонная призма; *5* — лоток

Исследования ЦНИИСа показали, что при пропуске расхода воды угол сужения, т. е. угол между осью быстротока и линией продолжения плоскости крыла раструбного оголовка нужно назначать в пределах 15—20°. В типовых проектах косогорных труб этот угол принят равным 20°.

Увеличивать угол сужения нежелательно, так как будет резко понижаться пропускная способность трубы. При сопряжении прямоугольных лотков с круглыми трубами надо создавать плавный переход от прямоугольного к круглому сечению путем устройства треугольных бетонных призм с обеих сторон крыльев по дну лотка. Обычно быстротоки сборной конструкции применяют в сочетании со сборными оголовками.

В случае сопряжения с трубами быстротоков из монолитного бетона оголовки труб также устраивают из монолитного бетона. Применение монолитного бетона для оголовков позволяет в быстротоке любой ширины обеспечить непосредственное

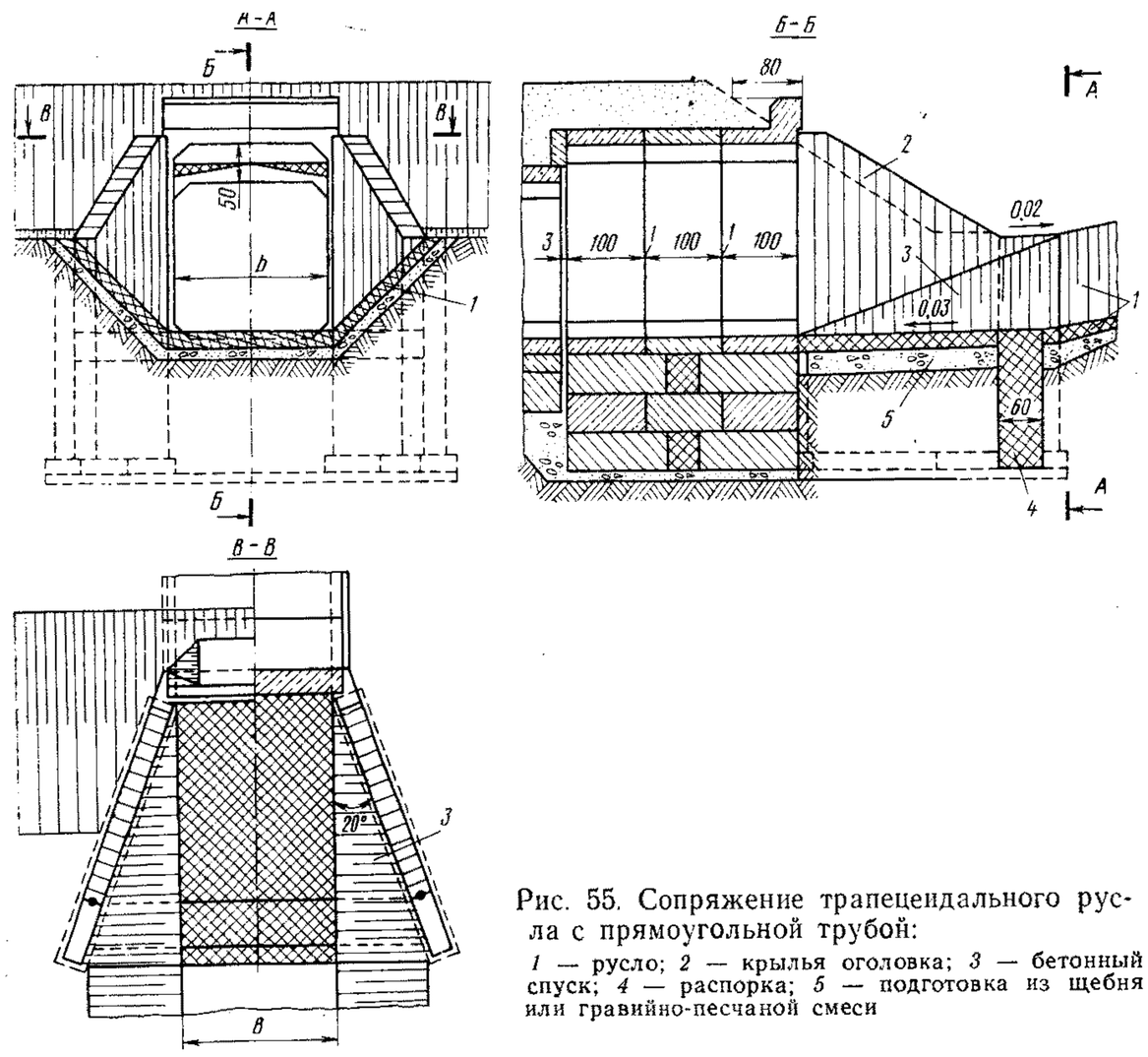


Рис. 55. Сопряжение трапецеидального русла с прямоугольной трубой:
1 — русло; *2* — крылья оголовка; *3* — бетонный спуск; *4* — распорка; *5* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси

примыкание стенок лотка к торцам крыльев оголовков (как с параллельными крыльями, так и раструбного типа).

Сопряжения укрепленных русел с трубами. Трапецеидальные русла сопрягают с круглыми и прямоугольными трубами с помощью оголовков раструбного типа (рис. 55). Длину крыльев оголовка принимают с учетом ширины русла: чем шире русло, тем длиннее крылья. Здесь так же, как и в лотках, могут быть два случая сопряжений — для ширины русла понизу, равной отверстию трубы ($B=b$; $B=D$), и большей отверстия трубы ($B>b$; $B>D$).

Поскольку в месте стыкования русла с оголовком имеются два разных по конфигурации сечения, то необходимо в пределах оголовка создавать переход от трапецеидального сечения русла к сечению на входе в трубу. Это достигается путем устройства между крыльями оголовка плавного бетонного спуска. В сопряжениях круглых труб с быстротоками прямоугольного и трапецеидального сечений предпочтение отдают оголовками с коническим звеном на входе. Применение их позволяет при пропуске расчетного расхода и бурном режиме улучшить характер втекания потока в трубу и увеличить запас пропускной

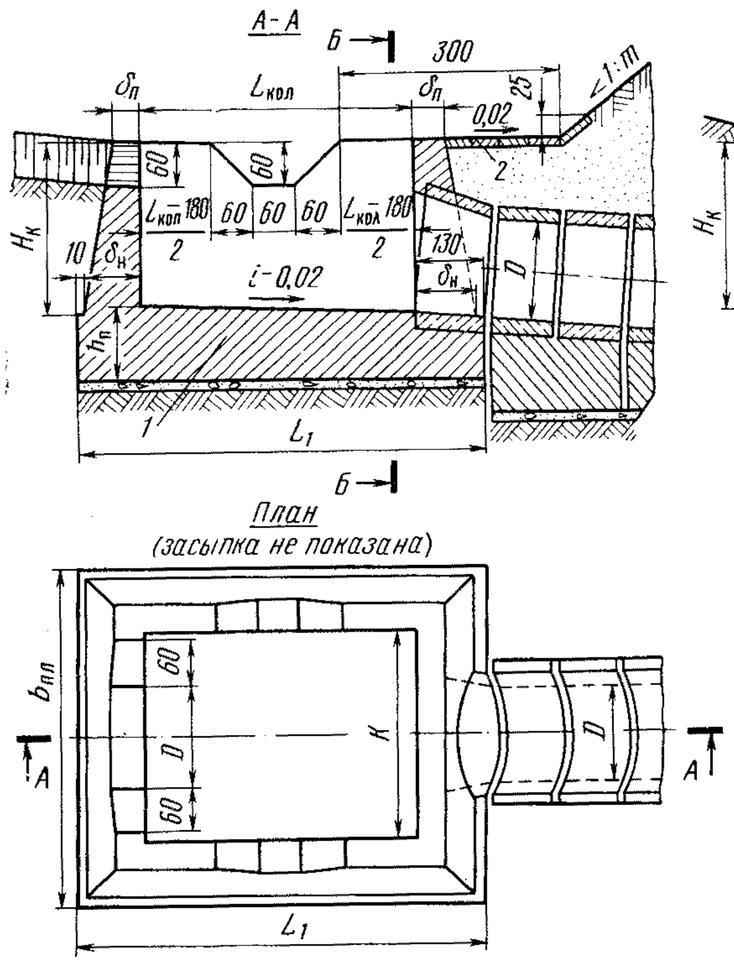


Рис. 56. Водоприемный колодец для круглых труб с коническим входным звеном:

1 — плита; *2* — бетонные плиты укрепления; *3* — стенка. Значения буквенных обозначений даны в табл. 20

Рис. 57. Водоприемный колодец для прямоугольных труб с нормальным входным звеном:

1 — плита; *2* — бетонные плиты укрепления; *3* — стенка. $D = b$. Значения буквенных обозначений даны в табл. 21.

способности. Наибольшая глубина на входе оказывается в тех же условиях на 20—30% меньше, чем при нормальном входном звене.

Водоприемные колодцы. Типовыми конструкциями приняты водоприемные колодцы прямоугольного очертания в плане (рис. 56 и 57). Размеры водоприемных колодцев назначают в зависимости от гидравлических характеристик потока с учетом местных условий сооружения колодца. Длина колодца L (по оси трубы) при поступлении воды с торца колодца выражается формулой

$$L = l_1 + 0{,}5,$$

где l_1 — горизонтальное расстояние от уступа до места падения струи на дно колодца, м.

В этом случае ширина колодца должна быть не меньше ширины подводящего лотка и не меньше удвоенного отверстия трубы.

При боковом поступлении воды размер колодца вдоль оси трубы определяется шириной подводящих канав, а поперек оси трубы — величиной l_1.

В типовом проекте косогорных труб конструкция водоприемных колодцев принята из монолитного бетона. Это объясняется тем, что колодцы в каждом конкретном случае имеют свои местные особенности, с учетом которых значительно проще дать конструкцию в монолитном бетоне, чем в сборном железобетоне. Не исключается применение колодцев сборного типа, если это будет экономически оправданным.

Водоприемный колодец прямоугольного очертания состоит из фундаментной части и четырех стенок. В месте сопряжения быстротока с колодцем в стенке колодца устраивают вырез по очертанию водоподводящего лотка. Аналогичные вырезы предусматривают и в боковых стенках колодца для обеспечения доступа воды из водоотводных канав. Водоприемные колодцы применяют в сочетании с круглыми и прямоугольными трубами. В зависимости от величины расчетного расхода воды и подпора перед трубой могут быть установлены на входе в трубу нормальные или конические звенья в круглых трубах, нормальные или повышенные звенья в прямоугольных трубах.

Для исключения возможного застоя воды в колодце входные звенья труб устанавливают в одном уровне с дном колодца

Таблица 20

Диаметр круглой трубы D, м	Ширина колодца κ, м	Высота колодца $H_к$, м	Длина колодца $L_{кол}$, м	Толщина стенки поверху $\delta_п$, м	Длина плиты L_1 с входным звеном оголовка, м		Ширина плиты $b_{пл}$, м	Толщина стенки понизу $\delta_н$, м	Толщина плиты $h_п$, м
					нормальным	коническим			
0,75	2,0	1,0	2,0	0,40	3,7	—	3,4	0,6	1,04
			3,0	0,40	4,7	—	3,4	0,6	1,06
			4,0	0,40	5,7	—	3,4	0,6	1,08
			5,0	0,40	6,7	—	3,4	0,6	1,10
		1,5	2,0	0,40	3,7	—	3,4	0,6	1,04
			3,0	0,40	4,7	—	3,4	0,6	1,06
			4,0	0,40	5,7	—	3,4	0,6	1,08
			5,0	0,40	6,7	—	3,4	0,6	1,10
		2,0	2,0	0,40	3,8	—	3,6	0,7	1,04
			3,0	0,40	4,8	—	3,6	0,7	1,06
			4,0	0,40	5,8	—	3,6	0,7	1,08
			5,0	0,40	6,8	—	3,6	0,7	1,10
1,0	2,3	1,5	2,0	0,40	3,7	4,0	3,7	0,6	1,04
			3,0	0,40	4,7	5,0	3,7	0,6	1,06
			4,0	0,40	5,7	6,0	3,7	0,6	1,08
			5,0	0,40	6,7	7,0	3,7	0,6	1,10
		2,0	2,0	0,40	3,8	4,1	3,9	0,7	1,04
			3,0	0,40	4,8	5,1	3,9	0,7	1,06
			4,0	0,40	5,8	6,1	3,9	0,7	1,08
			5,0	0,40	6,8	7,1	3,9	0,7	1,10
		2,5	2,0	0,40	3,9	4,2	4,1	0,8	1,04
			3,0	0,60	4,9	5,2	4,1	0,8	1,06
			4,0	0,60	5,9	6,2	4,1	0,8	1,08
			5,0	0,60	6,9	7,2	4,1	0,8	1,10
		3,0	2,0	0,40	4,1	4,4	4,5	1,0	1,04
			3,0	0,60	5,1	5,4	4,5	1,0	1,06
			4,0	0,60	6,1	6,4	4,5	1,0	1,08
			5,0	0,60	7,1	7,4	4,5	1,0	1,10
1,25	2,5	1,5	2,0	0,40	3,7	4,0	3,9	0,6	1,04
			3,0	0,40	4,7	5,0	3,9	0,6	1,06
			4,0	0,40	5,7	6,0	3,9	0,6	1,08
			5,0	0,40	6,7	7,0	3,9	0,6	1,10
		2,0	2,0	0,40	3,8	4,1	4,1	0,7	1,04
			3,0	0,40	4,8	5,1	4,1	0,7	1,06
			4,0	0,40	5,8	6,1	4,1	0,7	1,08
			5,0	0,40	6,8	7,1	4,1	0,7	1,10
		2,5	2,0	0,40	3,9	4,2	4,3	0,8	1,04
			3,0	0,60	4,9	5,2	4,3	0,8	1,06
			4,0	0,60	5,9	6,2	4,3	0,8	1,08
			5,0	0,60	6,9	7,2	4,3	0,8	1,10
		3,0	2,0	0,40	4,1	4,4	4,7	1,0	1,04
			3,0	0,60	5,1	5,4	4,7	1,0	1,06
			4,0	0,60	6,1	6,4	4,7	1,0	1,08
			5,0	0,60	7,1	7,4	4,7	1,0	1,10

Продолжение табл. 20

Диаметр круглой трубы D, м	Ширина колодца κ, м	Высота колодца $H_к$, м	Длина колодца $L_{кол}$, м	Толщина стенки поверху $\delta_п$, м	Длина плиты L_1 с входным звеном оголовка, м		Ширина плиты $b_{пл}$, м	Толщина стенки понизу $\delta_н$, м	Толщина плиты $h_п$, м
					нормальным	коническим			
1,5	3,0	2,0	2,0	0,40	3,8	4,1	4,6	0,7	1,04
			3,0	0,40	4,8	5,1	4,6	0,7	1,06
			4,0	0,40	5,8	6,1	4,6	0,7	1,08
			5,0	0,40	6,8	7,1	4,6	0,7	1,10
		2,5	2,0	0,40	3,9	4,2	4,8	0,8	1,04
			3,0	0,60	4,9	5,2	4,8	0,8	1,06
			4,0	0,60	5,9	6,2	4,8	0,8	1,08
			5,0	0,60	6,9	7,2	4,8	0,8	1,10
		3,0	2,0	0,40	4,1	4,4	5,2	1,0	1,04
			3,0	0,60	5,1	5,4	5,2	1,0	1,06
			4,0	0,60	6,1	6,4	5,2	1,0	1,08
			5,0	0,60	7,1	7,4	5,2	1,0	1,10

или несколько ниже. Нельзя допускать образования встречной ступеньки на входе в трубу.

Дно водоприемного колодца должно иметь уклон в сторону трубы, равный 0,02.

Материалом для сооружения колодцев служит бетон марки 200, морозостойкостью Мрз 200 или Мрз 300 в зависимости от климатических условий района сооружения трубы. Поверхность колодцев, засыпаемую грунтом, покрывают горячей или холодной битумной мастикой по битумной грунтовке.

Основные геометрические размеры косогорных водоприемных колодцев из монолитного бетона назначают обычно по данным типового проекта круглых труб отверстиями от 0,75 до 1,50 (табл. 20) и прямоугольных труб отверстиями от 1,0 до 2,0 м (табл. 21).

Определив в результате гидравлического расчета требуемые длину и высоту колодца, можно для заданного отверстия трубы по данным табл. 20 и 21 наметить основные параметры водоприемного колодца.

Стенки водоприемного колодца, как и быстротоков, рассчитывают на усилия, возникающие от давления грунта. Величину горизонтального давления грунта определяют по формуле (88) или другим справочным данным. Для определения усилий в стенках колодца их расчетную схему принимают в виде плиты, опертой по контуру. Минимальную толщину стенки поверху принимают равной 0,4 м.

Таблица 21

Отверстие прямоугольной трубы $b \times h$, м	Ширина колодца κ, м	Высота колодца $H_к$, м	Толщина стенки поверху $\delta_п$, м	Длина колодца $L_{кол}$, м	Длина плиты L_1, м	Ширина плиты $B_{пл}$, м	Толщина стенки понизу $\delta_н$, м	Толщина плиты $h_п$, м
1,0×1,5	2,0	2,0	0,40	2,0	3,8	3,9	0,7	1,04
			0,40	3,0	4,8	3,9	0,7	1,06
			0,40	4,0	5,8	3,9	0,7	1,08
			0,40	5,0	6,8	3,9	0,7	1,10
		2,5	0,40	2,0	3,9	4,1	0,8	1,04
			0,60	3,0	4,9	4,1	0,8	1,06
			0,60	4,0	5,9	4,1	0,8	1,08
			0,60	5,0	6,9	4,1	0,8	1,10
		3,0	0,40	2,0	4,1	4,5	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	4,5	1,0	1,08
			0,60	4,0	6,1	4,5	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	4,5	1,0	1,10
1,25×1,5	2,5	2,0	0,40	2,0	3,8	4,1	0,7	1,04
			0,40	3,0	4,8	4,1	0,7	1,06
			0,40	4,0	5,8	4,1	0,7	1,08
			0,40	5,0	6,8	4,1	0,7	1,10
		2,5	0,40	2,0	3,9	4,3	0,8	1,04
			0,60	3,0	4,9	4,3	0,8	1,06
			0,60	4,0	5,9	4,3	0,8	1,08
			0,60	5,0	6,9	4,3	0,8	1,10
		3,0	0,40	2,0	4,1	4,7	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	4,7	1,0	1,06
			0,60	4,0	6,1	4,7	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	4,7	1,0	1,10
1,0×2,0	2,0	2,5	0,40	2,0	3,9	3,8	0,8	1,04
			0,60	3,0	4,9	3,8	0,8	1,06
			0,60	4,0	5,9	3,8	0,8	1,08
			0,60	5,0	6,9	3,8	0,8	1,10
		3,0	0,40	2,0	4,1	4,2	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	4,2	1,0	1,06
			0,60	4,0	6,1	4,2	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	4,2	1,0	1,10
1,25×2,0	2,5	2,5	0,40	2,0	3,9	4,3	0,8	1,04
			0,60	3,0	4,9	4,3	0,8	1,06
			0,60	4,0	5,9	4,3	0,8	1,08
			0,60	5,0	6,9	4,3	0,8	1,10
		3,0	0,40	2,0	4,1	4,7	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	4,7	1,0	1,06
			0,60	4,0	6,1	4,7	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	4,7	1,0	1,10
1,5×2,0	3,0	2,5	0,40	2,0	3,9	4,8	0,8	1,04
			0,60	3,0	4,9	4,8	0,8	1,06
			0,60	4,0	5,9	4,8	0,8	1,08
			0,60	5,0	6,9	4,8	0,8	1,10
		3,0	0,40	2,0	4,1	5,2	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	5,2	1,0	1,06
			0,60	4,0	6,1	5,2	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	5,2	1,0	1,10

Продолжение табл. 21

Отверстие прямоугольной трубы $b \times h$, м	Ширина колодца κ, м	Высота колодца $H_к$, м	Толщина стенки поверху $\delta_п$, м	Длина колодца $L_{кол}$, м	Длина плиты L_1, м	Ширина плиты $B_{пл}$, м	Толщина стенки понизу $\delta_н$, м	Толщина плиты $h_п$, м
2,0×2,0	4,0	2,5	0,40	2,0	3,9	5,8	0,8	1,04
			0,60	3,0	4,9	5,8	0,8	1,06
			0,60	4,0	5,9	5,8	0,8	1,08
			0,60	5,0	6,9	5,8	0,8	1,10
		3,0	0,40	2,0	4,1	6,2	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	6,2	1,0	1,06
			0,60	4,0	6,1	6,2	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	6,2	1,0	1,10
1,25×2,5	3,0	3,0	0,40	2,0	4,1	5,2	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	5,2	1,0	1,06
			0,60	4,0	6,1	5,2	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	5,2	1,0	1,10
2,0×2,5	4,0	3,0	0,40	2,0	4,1	6,2	1,0	1,04
			0,60	3,0	5,1	6,2	1,0	1,06
			0,60	4,0	6,1	6,2	1,0	1,08
			0,60	5,0	7,1	6,2	1,0	1,10

Глава VI

КОНСТРУКЦИИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ТРУБЫ И ОТВОДНОЕ РУСЛО

Конструкция тела трубы. Косогорные водопропускные трубы применяют круглого и прямоугольного поперечного сечения как железобетонные, так и бетонные. Железобетонные трубы сооружают на периодически действующих или постоянных водотоках при отсутствии наледных явлений. Конструкции железобетонных звеньев дорожных труб разработаны в типовых проектах. Трубы возводят на сборных фундаментах из бетонных и железобетонных блоков, а также на фундаментах из монолитного бетона. По длине железобетонные трубы разделяют на отдельные секции длиной 2 и 3 м. Косогорной трубе обычно стремятся придать уклон, близкий к уклону дна лога.

Требуемый уклон может быть обеспечен путем ступенчатого расположения: а) секций трубы; б) секций и звеньев в пределах секций, т. е. многоступенчатым перепадом (рис. 58). На крутых косогорах там, где требуемый уклон трубы не удается получить за счет ступенчатого расположения секций из-за необходимости устройства больших перепадов между ними, при-

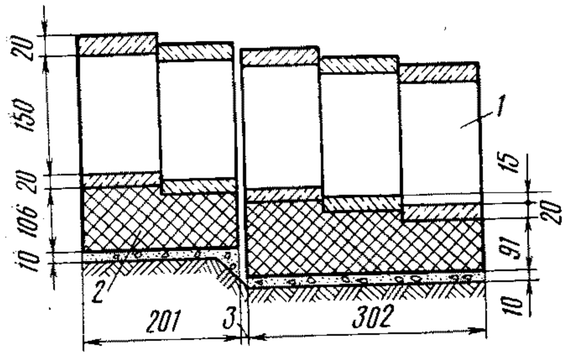


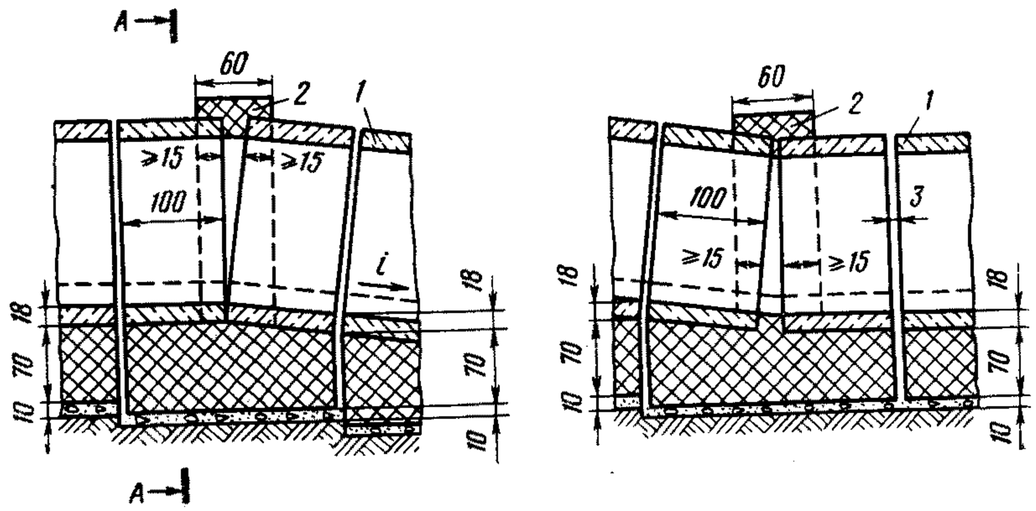
Рис. 58. Продольный разрез прямоугольной трубы со ступенчатым расположением секций и звеньев:
1 — звено; *2* — фундамент

меняют укладку звеньев с уклоном, близким к уклону дна лога, т. е. сооружают трубу в этом случае по типу быстротока. При этом труба может быть уложена или с одним общим уклоном, или с переменным (рис. 59). В трубе с переменным уклоном в месте перелома профиля между звеньями образуется зазор, вокруг которого устраивают бетонную обойму. При сооружении труб по типу быстротока устраивают фундаменты из монолитного бетона. Для обеспечения устойчивого положения трубы в фундаменте по краям секций предусматривают выступы, заглубляемые в грунт и предотвращающие сдвиг трубы. Выходной оголовок трубы служит своеобразным упором благодаря заглублению и развитию фундамента, обеспечивающим его устойчивое положение.

В случае ступенчатого расположения звеньев и секций круглых труб высота ступени не должна превышать $^2/_3$ толщины звена, а в прямоугольных трубах высота ступени не должна превышать 0,5 м. Назначая размеры ступеней, нельзя допускать оголения подошвы фундамента предыдущей секции, при этом нужно проверить расчетом достаточность оставшейся высоты отверстия трубы на пропуск расчетного расхода воды. Если величина ступени больше толщины ригеля, образующийся просвет между ригелями закрывают закладным блоком или монолитным бетоном.

Расположение трубы по типу быстротока или ступенчатым расположением секций с уклоном, близким к уклону косогора, в ряде случаев приводит к созданию больших скоростей потока на выходе из трубы. В этом случае для снижения скорости потока эффективно устройство на входе в трубу водоприемного колодца, благодаря которому можно не только понизить уклон трубы до минимально допустимой величины, но и снизить скорость потока на входе в трубу. При неблагоприятных геологических условиях нежелательно располагать трубу с большим уклоном. Снижение уклона трубы в этом случае тоже можно обеспечить устройством водоприемных колодцев.

Из всех способов образования необходимого уклона трубы предпочтительно ступенчатое расположение секций и звеньев труб, так как при этом обеспечивается не только наиболее устойчивое положение трубы, но и увеличивается шероховатость за счет ступенчатого перепада трубы, а вместе с тем и уменьшается скорость потока. Прямоугольные трубы наиболее удобны для косогорных сооружений, так как конструкция ступеней и перепадов для них наиболее проста.



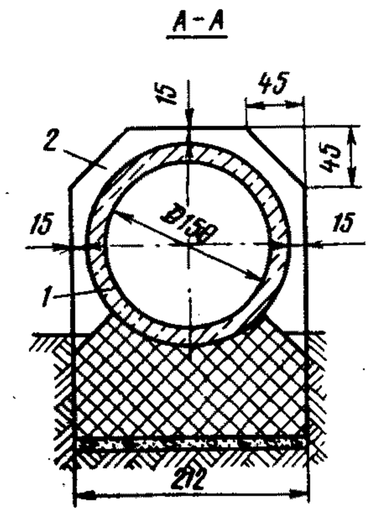


Рис. 59. Перелом профиля круглой трубы при укладке ее в виде быстротока с переменным уклоном:
1 — звено; *2* — бетонная обойма

На постоянно действующих водотоках в климатических районах с январской изотермой ниже минус 13°С обычно применяют сборные бетонные трубы по типовому проекту с тем же диапазоном отверстий, что и для железобетонных труб. Фундаменты типовых труб приняты как сборного, так и монолитного типов; поверх стеновых бетонных блоков шириною 1,0 м укладывают железобетонные насадки и плиты перекрытий. Длина секций труб принята 3,0 и 5,0 м. Требуемый уклон бетонных труб обеспечивается так же, как и железобетонных прямоугольных, путем ступенчатого расположения секций, а также стеновых блоков в пределах секций с устройством фундаментов из монолитного бетона.

Отметки секций назначают с учетом строительного подъема (по дуге круга) трубы как железобетонной, так и бетонной. В зависимости от высоты H насыпи и грунтов основания величину стрелки строительного подъема принимают: $^1/_{80}$ H для гравия, гальки, песка крупного, среднего и мелкого, плотного

и средней плотности и $^1/_{50}\,H$ для супеси, суглинков и глин плотных и средней плотности.

Глубину заложения фундаментов труб для средних звеньев при отверстии одного очка до 2,0 м назначают независимо от глубины промерзания, для оголовков и крайних звеньев при скальных, крупнообломочных, гравелистых и крупнопесчаных грунтах основания — независимо от глубины промерзания, а при всех прочих грунтах — на 0,25 м ниже глубины промерзания основания.

Поверхности труб, засыпаемые грунтом, покрывают гидроизоляцией. Железобетонные звенья одноочковых круглых труб и боковые поверхности звеньев прямоугольных труб разрешается покрывать обмазочной гидроизоляцией при условии, если они изготовлены из плотного бетона водонепроницаемостью не ниже В-2 по ГОСТ 4795—59. В этом случае поверхность ригеля звеньев прямоугольных труб покрывают двухслойной (толщиной каждого слоя 1,5—3,0 мм) оклеечной гидроизоляцией из битуминизированной ткани, укладываемой между тремя слоями горячей битумной мастики. Если результаты испытаний звеньев на водонепроницаемость неудовлетворительны, поверхности круглых труб, а также боковых стенок и ригеля прямоугольных труб покрывают оклеечной гидроизоляцией. Для боковых поверхностей бетонных труб во всех случаях применяют обмазочную гидроизоляцию, а для железобетонных перекрытий — оклеечную. Швы между звеньями, бетонными блоками и секциями труб конопатят с обеих сторон паклей, пропитанной битумом. С наружной стороны швы покрывают слоем оклеечной гидроизоляции шириной 25 см, поверх которой наносят горячую битумную мастику. С внутренней стороны шов заделывают цементным раствором на глубину 3 см.

Гасители энергии. При больших скоростях потока для предотвращения размыва отводного русла на выходе из трубы, как правило, устраивают гасители энергии потока, которые позволяют резко уменьшить скорость потока, а вместе с тем и размеры укрепления отводного русла. За последние годы ЦНИИСом и Ленинградским политехническим институтом имени Калинина были проведены большие работы по исследованию гасителей энергии потока. Результаты исследований положены в основу разработки типовых конструкций гасителей энергии потока. По своим конструктивным и гидравлическим особенностям различают три типа гасителей энергии потока:

1) гаситель ЦНИИСа — тип I, когда гашение энергии обеспечивается за счет водобойных порогов, устанавливаемых на выходе из трубы и в конце гасителя;

2) гаситель — тип II, представляющий собой расширяющийся водобойный колодец с одной или двумя водобойными стенками;

3) гаситель — тип III с повышенной шероховатостью в лотке.

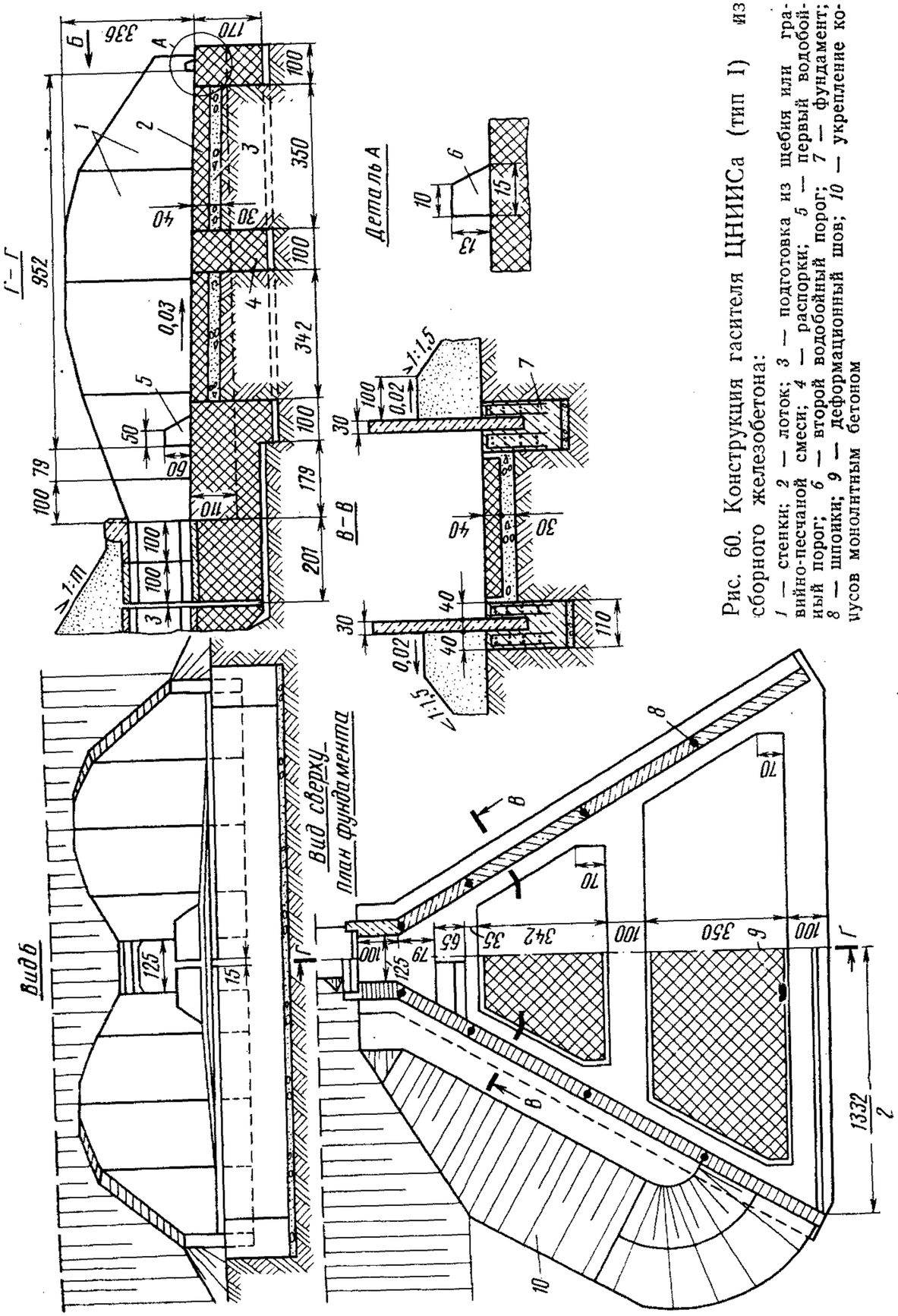


Рис. 60. Конструкция гасителя ЦНИИСа (тип I) из сборного железобетона:
1 — стенки; *2* — лоток; *3* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси; *4* — распорки; *5* — первый водобойный порог; *6* — второй водобойный порог; *7* — фундамент; *8* — шпоики; *9* — деформационный шов; *10* — укрепление конусов монолитным бетоном

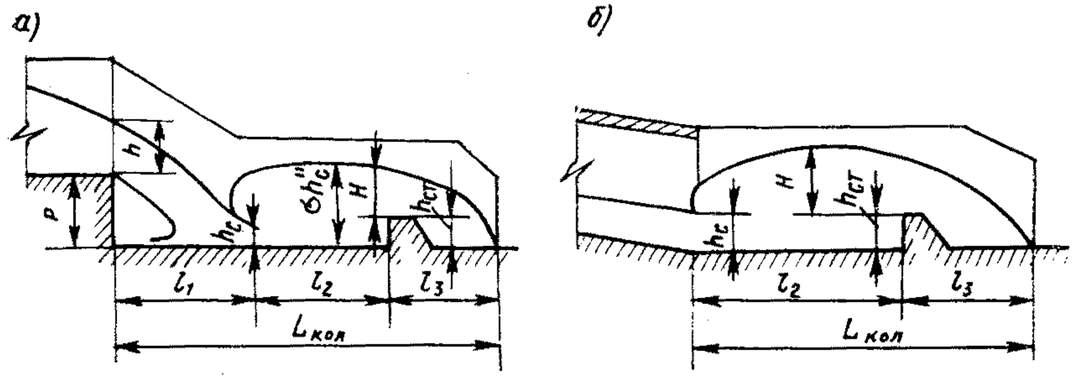


Рис. 61. Схема гасителя типа II (расширяющийся водобойный колодец)

Гаситель ЦНИИСа разработан для опытного применения и предназначен в основном для использования в прямоугольных трубах отверстиями 1,0; 1,25; 1,5 и 2,0 м, которые пропускают значительно больший расход, чем круглые трубы. Располагать его рекомендуется на участках с уклонами не более 0,2. Гаситель представляет собой раструб, боковые отвесные стенки которого образуют в плане угол 30° с осью сооружения. Между стенками перпендикулярно оси трубы устанавливают два водобойных порога: первый на относительно небольшом расстоянии от начала раструба, второй — на выходе из раструба.

Гаситель ЦНИИСа сооружают из сборного железобетона или монолитного бетона.

Конструкция гасителя сборного типа состоит из монолитного бетонного фундамента и сборных железобетонных стенок толщиной 30 см, заделываемых в фундамент (рис. 60). Стенки монтируют из отдельных плоских элементов, которые отличаются друг от друга по длине и высоте. Имея набор стеновых блоков, можно подобрать для разных отверстий труб требуемую длину гасителя. Между собой стеновые блоки стыкуют по вертикальным шпонкам, которые проходят вдоль длинных сторон блоков и заполняются цементным раствором марки 200. Шпонки образуются за счет треугольных пазов, которые устраивают в торцах длинных сторон блоков. Стеновые блоки заделывают в фундамент на глубину 110—120 см.

Положение начала раструба гасителя определяют гидравлическим расчетом в трубах под железную дорогу при проверке гасителя на пропуск максимального расхода воды, а в трубах под автомобильную дорогу — расчетного расхода воды. При этом глубина воды в начале раструба должна быть не больше высоты выходного отверстия трубы. Если глубина воды больше высоты выходного отверстия трубы, необходимо начало раструба гасителя отодвинуть от конца трубы путем устройства прямой вставки из параллельно устанавливаемых стенок, длину которых определяют гидравлическим расчетом.

Фундамент под стенки гасителя раструбный в плане сооружается из монолитного бетона. Для придания фундаменту жесткости отдельные ветви его, идущие под стенками, соединяются между собой распорками.

Водобойные пороги устраиваются из монолитного бетона и бетонируются одновременно с фундаментом. Ближайший к выходу из трубы водобойный порог располагается на массивной части фундамента, концевой водобойный порог — на крайней распорке.

Расширяющийся водобойный колодец — гаситель типа II — стенки которого располагают под углом 20° к оси сооружения, применяют в двух вариантах: со стенкой падения, когда лоток гасителя расположен ниже лотка выходного оголовка трубы (рис. 61, *а*), и без стенки падения, когда лоток гасителя и лоток выходного оголовка расположен на одном уровне (рис. 61, *б*).

Принцип действия гасителя состоит в том, что перед водобойной стенкой создается затопленный подпертый гидравлический прыжок.

Гаситель типа II применяют в прямоугольных и круглых трубах, возводимых из сборного железобетона или из монолитного бетона.

Гасители типа II — водобойные колодцы — со стенкой падения находят применение при сооружении труб на крутых косогорах, когда требуется довольно резко понизить уклон трубы. При одних и тех же исходных данных длина гасителя со стенкой падения будет большей, чем без стенки падения. Вариант гасителя этого типа для строительства выбирают на основании технико-экономических показателей всего сооружения косогорной водопропускной трубы.

Типовые конструкции гасителя типа II разработаны для прямоугольных труб отверстиями 1,0; 1,25; 1,5 и 2,0 м и для круглой — отверстием 1,5 м.

Конструкция гасителя типа II из сборного железобетона аналогична конструкции гасителя ЦНИИСа (рис. 62) и состоит из сборных железобетонных стенок толщиной 30 см, заделываемых в монолитный фундамент. Необходимую длину гасителя получают за счет разной ширины стеновых блоков. Заделка в фундамент этих блоков и соединение их между собой аналогичны по конструкции гасителю ЦНИИСа (тип I). Фундамент бетонируют на месте под каждой стенкой гасителя. В начале и в конце гасителя ветви фундамента соединяют распорками. На крайней распорке гасителя располагают водобойную стенку, бетонируемую одновременно с фундаментом.

Расчеты гасителя типа II для прямоугольных труб отверстиями 1,0 и 1,25 м показали, что при пропуске расчетного расхода и скорости воды в конце трубы 10 м/с скорость воды в конце гасителя составляет 4,5 м/с, а для прямоугольных труб отверстиями 1,5 и 2,0 м при тех же исходных данных 5,8 м/с.

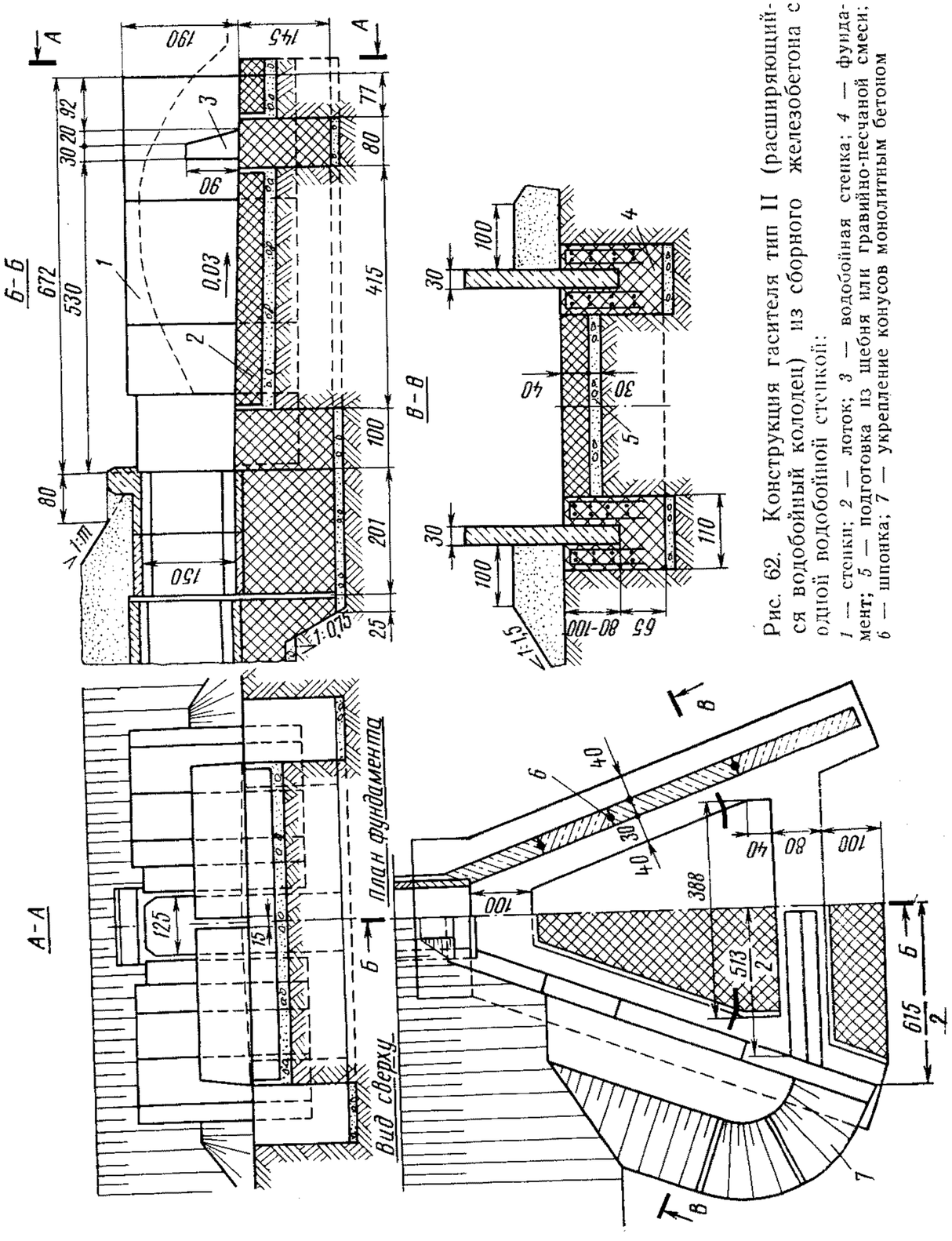


Рис. 62. Конструкция гасителя тип II (расширяющийся водобойный колодец) из сборного железобетона с одной водобойной стенкой:
1 — стенки; *2* — лоток; *3* — водобойная стенка; *4* — фундамент; *5* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси; *6* — шпонка; *7* — укрепление конусов монолитным бетоном

Эти данные были получены для случая устройства в конце гасителя одной водобойной стенки. При удлинении гасителя и устройстве второй водобойной стенки в тех же трубах отверстиями 1,5 и 2,0 м скорость воды в конце гасителя снижается соответственно до 3,64 и 3,79 м/с. В этом случае гаситель представляет собой два сопряженных водобойных колодца, в которых водобойная стенка первого колодца является стенкой падения для потока во втором колодце (рис. 63).

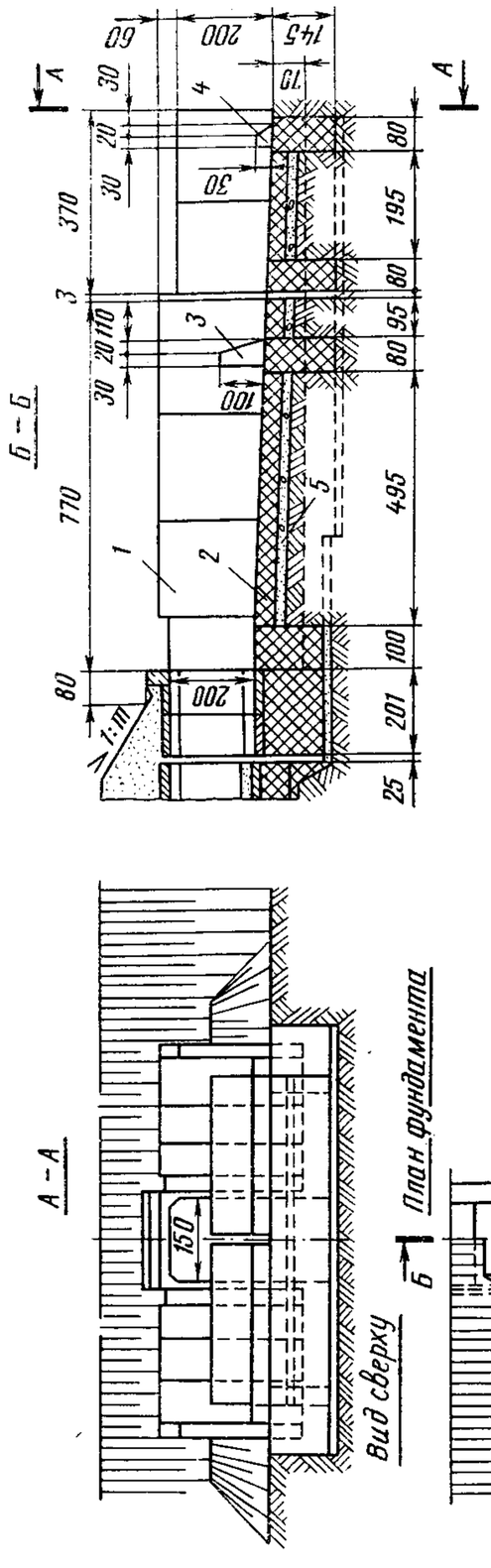
В гасителях типов I и II водобойные пороги (стенки) со стороны набегающего потока делают всегда вертикальными, их очертание с низовой стороны назначают по конструктивным соображениям. Во избежание застоя воды в пределах гасителя устраивают в водобойных порогах (стенках) посередине прорезь шириной 15 см от верха порога (стенки) до низа лотка.

В гасителях типа I и II из монолитного бетона стенки и фундамент располагают под тем же углом, что и в гасителях из сборного железобетона. Минимальную ширину стенки поверху принимают равной 0,4 м. В пределах сборного и монолитного гасителей устраивают бетонный лоток толщиной 0,4 м, укладываемый на подготовку из щебня или гравийно-песчаной смеси толщиной 30 см. Лотку придают уклон в сторону отводного русла, равный 0,03.

Глубину заложения фундамента гасителей принимают такой же, как и для оголовков труб. С наружной стороны стенки гасителей засыпают грунтом на высоту 1,5—2,0 м в зависимости от высоты стенки. Поверху засыпки устраивают площадку, ширина которой должна быть не меньше 1 м.

Раструб с повышенной шероховатостью — гаситель типа III — представляет собой раструб, стенки которого расходятся под углом в 30° по отношению к оси сооружения (рис. 64). Гаситель состоит из стенок, которые могут быть из сборного железобетона или монолитного бетона, и бетонного лотка с повышенной шероховатостью. Повышенную шероховатость обеспечивают устройством по длине лотка поперечных ребер прямоугольного очертания. Расстояние между ребрами принимают равным 8Δ, а ширину ребра — $1{,}5\Delta$ (где Δ — высота ребра). Гашение энергии в гасителе обеспечивается за счет гравитационного растекания потока и потерь по его длине.

Гаситель типа III рекомендуется в основном для круглых труб. В гасителях из сборного железобетона стеновые блоки заглубляют в грунт и устанавливают на бетонные фундаментные блоки. Лоток устраивают из монолитного бетона толщиной 40 см. Поперечные ребра бетонируют одновременно с лотком. Между ребрами вдоль оси лотка предусматривают зазор шириной 10 см. Длину гасителя определяют исходя из условия, чтобы скорость потока в конце его, определяемая при естественной шероховатости дна гасителя, не превышала бы допустимую скорость по материалу укрепления.



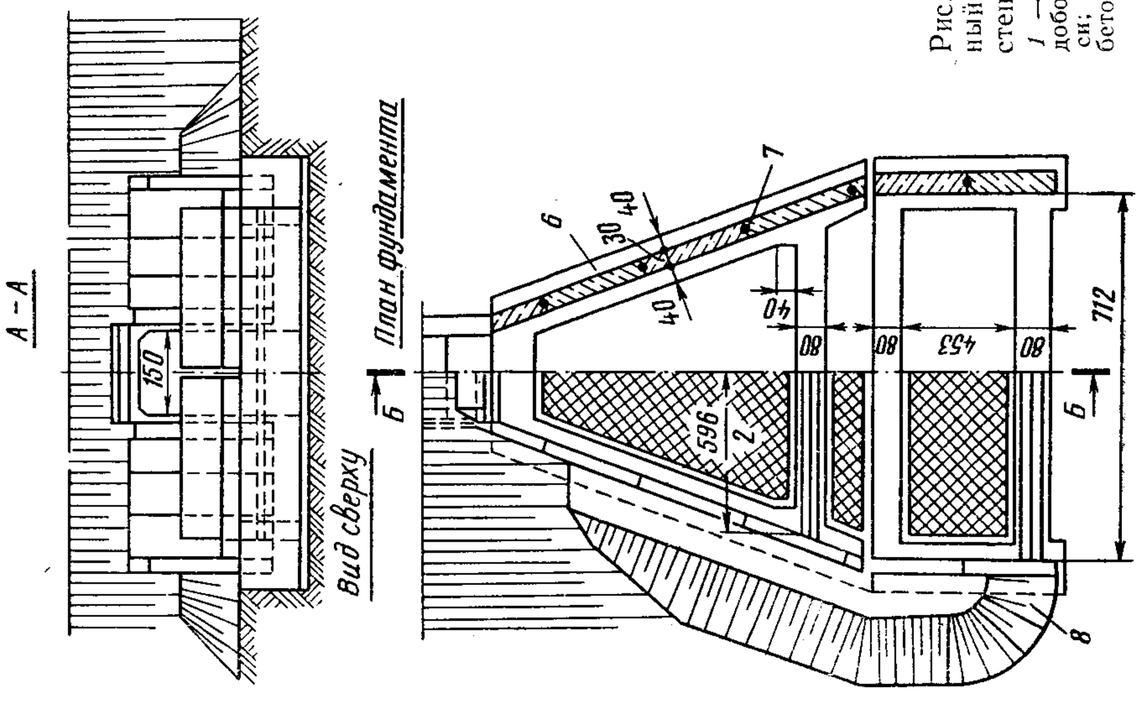


Рис. 63. Конструкция гасителя тип II (расширяющийся водобойный колодец) из сборного железобетона с двумя водобойными стенками:

1 — стенки; *2* — лоток; *3* — первая водобойная стенка; *4* — вторая водобойная стенка; *5* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси; *6* — фундамент; *7* — шпонки; *8* — укрепление конусов монолитным бетоном

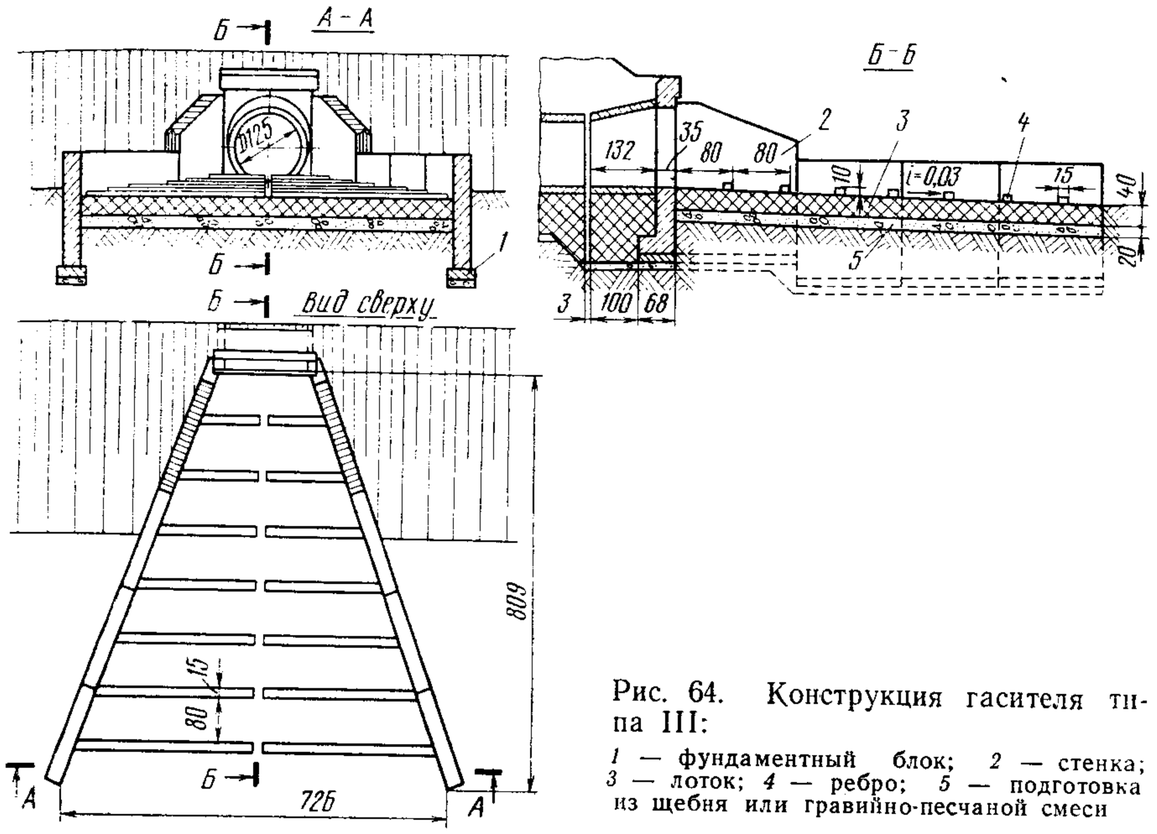


Рис. 64. Конструкция гасителя типа III:

1 — фундаментный блок; *2* — стенка; *3* — лоток; *4* — ребро; *5* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси

Длину и высоту стенок гасителя назначают исходя из очертания поверхности потока. Для этого определяют глубину воды в характерных сечениях по длине гасителя. Так, в гасителе ЦНИИСа (тип I) по формулам (65)—(69) определяют глубину потока $h_р$ в начале раструба, h_t в плоскости напорной грани первого водобойного порога и максимальную высоту h_{max} подъема струй. Расстояние до точки максимального подъема струй определяют по формуле (71). Помимо этих характерных точек, с помощью уравнения поверхности потока в осевой вертикальной плоскости (70) определяют глубину потока по длине гасителя на равных расстояниях от основания напорной грани первого водобойного порога. На основании полученных данных строят эпюру потока. Высоту стенки гасителя назначают из расчета, чтобы верхняя грань ее была на 0,25 м выше глубины потока в данном сечении. Верх стенки гасителя не должен строго повторять очертание поверхности потока, иначе в гасителях сборного типа потребуется большое количество типоразмеров стеновых блоков.

В зависимости от длины гасителя целесообразно стенку по длине разбить на несколько участков и с учетом максимальной глубины на данном участке назначить высоту стенки. В гасителях из монолитного бетона обычно назначают любое требуемое очертание стенки.

Высоту водобойных порогов в гасителях ЦНИИСа определяют по формулам (59) и (64). В расширяющихся водобойных

колодцах (гаситель типа II) высоту стенки назначают с учетом глубины воды перед водобойной стенкой, определяемой по формуле

$$h_m = h_{ст} + H,$$

где H — возвышение уровня воды в колодце над порогом водобойной стенки, определяемое по формуле (53); $h_{ст}$ — высота водобойной стенки, определяемая по формуле (55).

Назначив размеры стенок гасителя, приступают к расчету их на прочность.

Со стороны гасителя на стенку действует давление воды проходящего потока, а с наружной стороны давление грунта засыпки (рис. 65). Сечение стенки подбирают по расчетному изгибающему моменту в уровне обреза фундамента. Железобетонные блоки стенок гасителя армируют двойной арматурой с учетом условий монтажа и транспортирования их.

Проверяют расчетом прочность стенки фундамента в уровне опирания стеновых блоков гасителя. Монолитные стенки гасителей проверяют на прочность по обрезу фундамента, при этом эксцентриситет приложения равнодействующей активных сил от нормативных нагрузок не должен превосходить предельные значения, указанные в формулах (89) и (90).

Если между фундаментами не устраивают распорки, стенку совместно с фундаментом проверяют на устойчивость против опрокидывания и скольжения. Размеры фундамента назначают с расчетом, чтобы напряжения по подошве его не превосходили величину расчетного сопротивления грунта.

Иногда для гашения энергии потока применяют многоступенчатые перепады, которые по сравнению с гасителями энергии потока оказываются малоэффективными. Кроме того, при одних и тех же условиях устройство гасителей требует значительно меньших затрат, чем перепадов.

Отводное русло. На выходе из трубы и в конце гасителя скорость потока в большинстве случаев превосходит допустимую скорость по грунту. В этих условиях требуется устройство укрепления отводного русла. Размеры и тип укрепления назначают на основании гидравлических расчетов исходя из условия свободного растекания потока на плоском дне. Исходными данными для определения размеров укрепления служат глубина и скорость потока на выходе из трубы или в конце гасителя, характер грунтов слагающих отводное русло, а также уклон русла.

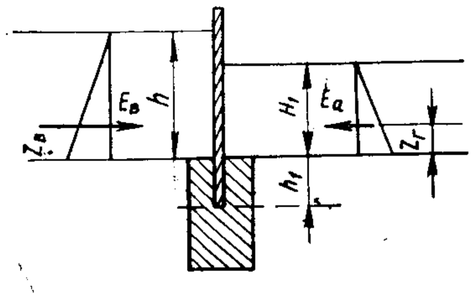


Рис. 65. Расчетная схема стенки и фундамента гасителя из сборного железобетона

Существуют три типа укрепления русел: сборными бетонными или железобетонными плитами, монолитным бетоном и мощением бутовым камнем. Размеры укрепляемого участка русла принимают с учетом типа укрепления. Границы укрепляемого участка назначают на основании эпюры растекания потока.

При наличии в конце трубы гасителей энергии потока, назначая границы и размеры укрепления русел, рекомендуется вначале через равные интервалы в 2,0—3,0 м от конца гасителя определить ширину растекания потока для построения эпюры растекания потока. При устройстве в конце трубы гасителя ЦНИИСа (тип I) ширину растекания потока определяют по формуле (85), если же на выходе из трубы устанавливают гаситель типа II (расширяющийся водобойный колодец) по формуле (84). В зависимости от принятого типа укрепления русла в тех же сечениях, где определена ширина растекания потока, способом В. И. Чарномского находим глубину h_x и скорость потока v_x, которые входят в расчетные формулы для определения местного размыва в рассматриваемых сечениях. Глубину местного размыва определяют по формуле (82).

На основании полученных данных о растекании потока и глубине местного размыва назначают длину укрепляемого участка русла исходя из условия, чтобы глубина местного размыва не превышала 3,0 м. Длину укрепляемого участка русла за гасителями назначают не менее 2,0 м. Если отводное русло начинают непосредственно за выходным оголовком трубы, порядок определения границы укрепляемого участка русла сохраняется такой же, как и при наличии гасителя. При этом ширину растекания потока определяют по формуле (86), а глубину размыва за укреплением по формуле (82). Длина укрепляемого участка русла в данном случае должна быть не менее 5,0—6,0 м. В плане эпюра растекания потока очерчивается двумя криволинейными линиями.

Границу укрепляемого участка русла назначают с таким расчетом, чтобы в каждой точке она выходила бы за пределы эпюры растекания потока не менее чем на 1,50 м. Для укреплений русел применяют готовые типовые плиты размером 49×49 см и толщиной 12 см (рис. 66). Плиты таких размеров удобны для перевозки и монтажа укреплений. Не исключено применение плит других размеров для укрепления русел, если это экономически оправдано. Плиты укладывают на подушку из щебня толщиной 10—15 см, которая одновременно выполняет роль антифильтра. Между собой плиты соединяют с помощью петлевых выпусков из арматуры (см. деталь на рис. 66). Пространство, образуемое в местах соединения петлевых выпусков, заполняют бетонной смесью. В результате получается сплошной гибкий ковер из бетонных плит.

При отсутствии на выходе из трубы гасителей нужно укреплять не только отводное русло, но и откосы насыпи в пределах оголовка. Высота укрепления откоса насыпи должна быть на

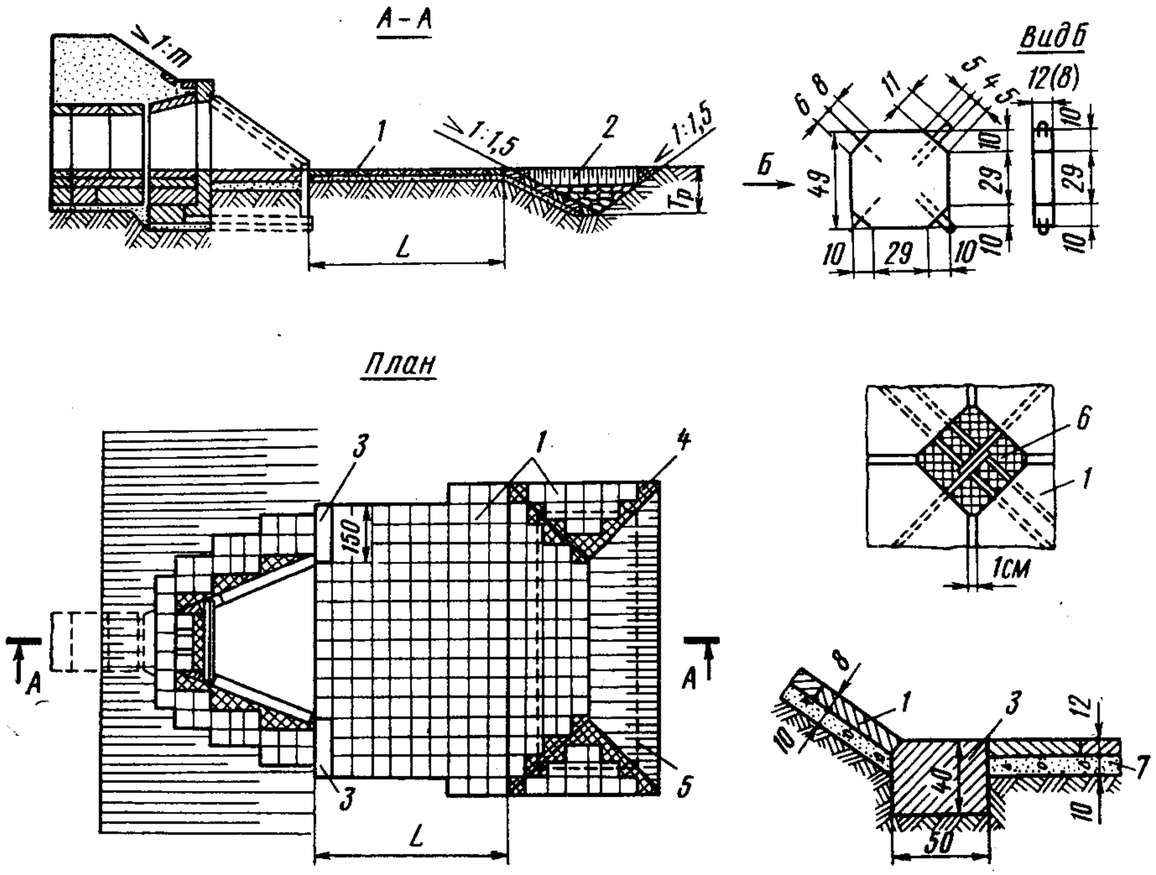


Рис. 66. Укрепление русла сборными бетонными плитами, детали скрепления плит и сопряжения откоса с руслом:

1 — плита; *2* — каменная наброска; *3* — упорный блок; *4* — монолитный бетон; *5* — граница каменной наброски; *6* — бетонное заполнение стыков; *7* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси.

25 см выше портала оголовка. Конусы у гасителей обычно укрепляют монолитным бетоном.

Если отводные русла укрепляют монолитным бетоном (рис. 67, *а*), укрепляемую площадь русла разбивают на отдельные карты (плиты) размером 1,0×1,0 или 2,0×2,0 м. Толщину плит принимают равной 12 см, основанием для них служит подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси толщиной 10—15 см.

Кроме рассмотренных видов укрепления, русла укрепляют двойным мощением из бутового камня на слое щебня, пролитым цементным раствором марки 150 (рис. 67, *б*). При этом размеры камней нижнего слоя должны быть от 10 до 18 см, а верхнего от 20 до 35 см. Камень для мощения нужно применять из слабовыветривающихся твердых скальных пород со средней плотностью не менее 2,0 т/м³ и временным сопротивлением на сжатие не менее 300 кгс/см³. Укрепление русел мощением применяют довольно редко, так как оно требует больших затрат ручного труда.

Тип укрепления русел выбирают на основании технико-экономических показателей.

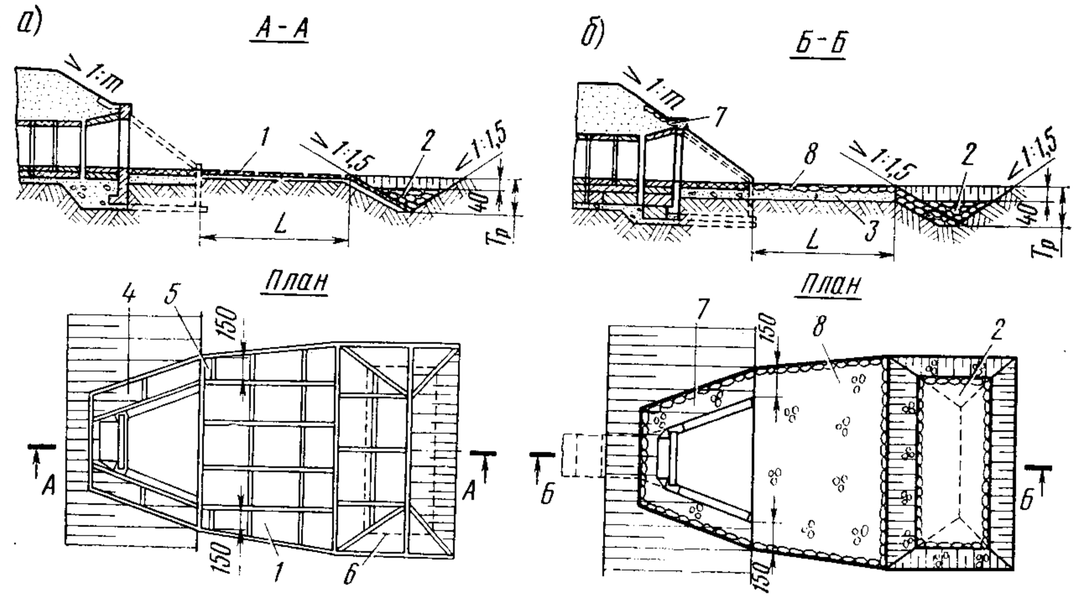


Рис. 67. Укрепление русла:

1 — плита толщиной 12 см; *2* — каменная наброска; *3* — подготовка из щебня или гравийно-песчаной смеси; *4* — плиты толщиной 8 см; *5* — упорный блок; *6* — граница каменной наброски; *7* — одиночное мощение; *8* — двойное мощение

За укрепленным участком русла поток, попадая на неукрепленный участок, вызывает местный размыв. Глубину этого местного размыва можно уменьшить путем увеличения длины укрепляемого участка русла или же устройством в конце укрепления ковша, заполненного камнем, который в процессе размыва на определенной длине (за пределами крепления) создаст самоотмостку русла, обеспечивая поддержание допускаемой глубины размыва и устойчивость концевого участка укрепления русла. Размеры ковша назначают с учетом глубины местного размыва за укреплением. В сечении по оси трубы ковш представляет собой трапецию с малым основанием, расположенным на уровне глубины размыва. Крутизну откосов ковша принимают обычно равной 1 : 1,5.

Типовые конструкции укрепления русел разработаны исходя из условия устройства такого ковша с заполнением камнем. При этом укрепление русла заканчивается не у начала ковша, а продолжается по его откосу до основания, образуя так называемый предохранительный откос (см. рис. 66). Ковш заполняют камнем крупностью 15—20 см. Поверхность каменной засыпки должна находиться ниже верха ковша на 0,4 м.

При назначении длины укрепления русла надо исходить из технико-экономических показателей по устройству укрепления самого русла и ковша с заполнением камнем, учитывая местные условия в каждом конкретном случае.

Необходимая длина укрепления русла увеличивается значительно интенсивнее по сравнению с изменением глубины размыва. Расчеты, выполненные при разработке типового проекта

косогорных водопропускных труб, показали, что при глинистых грунтах средней плотности, слагающих отводное русло, уменьшение глубины размыва на 8% потребовало увеличения длины укрепления русла на 25%, а при песках средней плотности с расчетным диаметром зерен 2 мм — уменьшение глубины размыва на 5% достигается за счет увеличения длины укрепления русла на 50%.

При наличии с низовой стороны трубы скальных или крупнообломочных пород вопрос о целесообразности устройства укрепления решается в индивидуальном порядке в зависимости от их прочности.

Глава VII

ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА КОСОГОРНЫХ ТРУБ

Сооружение косогорных труб ведется двумя основными способами с применением стреловых кранов на гусеничном ходу или монтажно-транспортной подвесной установки. В комплекс основных работ по сооружению косогорных труб входят следующие виды технологических операций:

подготовительные и геодезические работы;

сооружение элементов трубы — быстротоков, водоприемных колодцев, тела трубы и гасителей энергии потока;

изоляционные работы и засыпка трубы грунтом;

укрепление отводного русла и откосов насыпи.

Косогорные трубы сооружают в соответствии с техническими указаниями ВСН 81-62 [16]. Работы производят комплексные бригады, в состав которых входят звенья по отдельным видам работ. Укрепление русла и откосов насыпи в пределах трубы выполняет специализированная бригада после окончания отсыпки насыпи. Транспортные работы, связанные с доставкой готовых блоков, материалов, инвентарных обустройств, обеспечиваются средствами транспортной колонны строительного управления. Колонна имеет необходимое количество автомобилей, трайлеров, гусеничных и автомобильных кранов, тракторов, прицепов и прочего оборудования, нужного для транспортных и погрузочно-разгрузочных операций. Работы транспортной колонны включаются в общий график возведения труб на участке строящейся дороги.

Подготовительные и геодезические работы. В комплекс подготовительных работ входят планировка строительной площадки, разбивочные работы, доставка оборудования, элементов временных инвентарных обустройств, материалов, монтаж оборудования и обустройств на объекте строительства, завоз готовых блоков для сооружения сборных конструкций трубы.

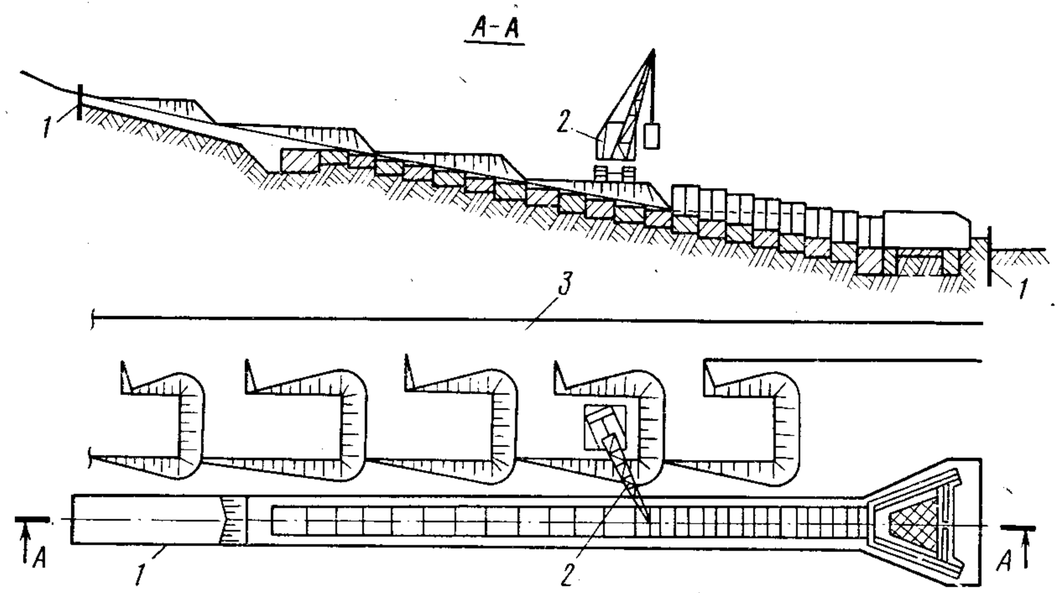


Рис. 68. Схема сооружения трубы с помощью гусеничного крана:
1 — крепление котлована; *2* — монтажный кран на гусеничном ходу; *3* — подъездная автомобильная дорога

Расположение трубы на местности указывается в проекте сооружений, в состав которого входит план соответствующего участка железной или автомобильной дороги с нанесенной осью трубы и местом расположения высотного репера .

В процессе строительства трубы выполняются геодезические работы по разбивке оси трубы и контуров котлованов, контуров фундаментов на обноске, а также по разбивке русла на входе и выходе из трубы.

Большое внимание должно быть уделено устройству подъездных дорог к сооружаемой трубе и площадок для установки кранов.

Оборудование и элементы инвентарных обустройств размещают в соответствии с планом стройплощадки. К началу работ на объект должны быть завезены в полном комплекте блоки с тем расчетом, чтобы исключить возможные простои при монтаже конструкций. Блоки на объект доставляют или непосредственно с полигона (завода) автомобильным транспортом или предварительно по железной дороге на базу, с которой затем развозят на объекты.

Постройка труб с помощью гусеничных кранов целесообразна при продольных уклонах лога в 0,15—0,20 и независимо от длины трубы, а при продольных уклонах свыше 0,20 для труб длиной не более 50 м. В этом случае вдоль оси трубы заранее нужно подготовить площадки для стоянки монтажных кранов (рис. 68). Площадки располагают так, чтобы с одной стоянки крана можно было бы обслуживать как можно больший участок сооружаемой трубы. К этим площадкам устраивают удобные подъездные дороги.

Таблица 22

Грунты	Отношение высоты откоса к заложению при глубине котлованов	
	до 3 м	3–6 м
Песчаные, гравелистые и насыпные	1:1,25	1:1,5
Супесчаные и суглинистые	1:0,7	1:1
Глинистые	1:0,5	1:0,7

Примечание. В супесчаных, суглинистых и глинистых грунтах при возможном их увлажнении крутизна откосов не должна превышать 1:1.

Устройство котлованов и фундаментов нужно вести посекционно, начиная со стороны выходного оголовка. Разработку грунта обычно производят с помощью крана-экскаватора на гусеничном ходу Э-257.

В устойчивых сухих и маловлажных грунтах котлованы разрабатывают без креплений, если дно котлована находится выше уровня грунтовых вод. Крутизну откосов (табл. 22) назначают исходя из состояния грунта, глубины котлована, наличия временной нагрузки на бермах котлована и продолжительности работ. В тех случаях, когда возможен приток грунтовых вод в котлован и грунты оказываются неустойчивыми, нужно устраивать шпунтовое ограждение. По готовности котлована производят его освидетельствование совместно с заказчиком и составляют соответствующий акт.

Сооружение труб стреловыми кранами на гусеничном ходу. Трубу начинают монтировать с выходного оголовка, продвигаясь снизу вверх. Для монтажа фундамента и звеньев труб используют краны-экскаваторы Э-257 и Э-652 грузоподъемностью 5 и 10 т, для монтажа оголовков и гасителей — Э-801 грузоподъемностью 15 т. При устройстве сборных фундаментов из бетонных блоков обеспечивают горизонтальную укладку блоков и перевязку швов. Блоки укладывают на цементном растворе марки 150 с водо-цементным отношением не выше 0,65.

После укладки каждого ряда блоков вертикальные швы заливают цементным раствором с помощью специальной плоской воронки. В швах цементный раствор уплотняют металлической трамбовкой. Для того чтобы раствор не вытекал, швы по наружиому контуру предварительно законопачивают паклей, бумагой из-под цементных мешков и т. п. Для заполнения вертикальных швов между блоками приготовляют цементный раствор с консистенцией от 11 до 13 см погружения конуса, а для горизонтальных швов от 6 до 8 см.

Звенья труб устанавливают на слой цементного раствора. Круглые звенья устанавливают на лекальные блоки фундамента, на деревянные клинья, благодаря которым создается требуемый зазор (не менее 2 см) между звеном и фундаментом, заполняемый в дальнейшем цементным раствором. При монтаже портальной стенки и крыльев оголовка их раскрепляют расчалками или инвентарными подкосами. Быстротоки сборной конструкции начинают монтировать от входного оголовка. Блоки

лотка устанавливают на заранее уложенные плиты. К сооружению гасителей энергии потока приступают сразу же после окончания монтажа выходного оголовка трубы. Фундамент под стенки гасителя бетонируют в два этапа: сначала до отметки подошвы стеновых блоков, заделывая в него арматурные каркасы обеих сторон стеновых блоков, а затем по достижении требуемой прочности бетона на подготовленную часть фундамента в пространство между двумя арматурными каркасами устанавливают стеновые блоки гасителя и бетонируют фундамент до проектной отметки; одновременно бетонируют и водобойный порог. Засыпку пазух между фундаментом и стенками котлована (одновременно с обеих сторон фундамента) производят с тщательным трамбованием сразу же после приемки кладки фундамента.

К бетонированию лотка в пределах гасителя приступают после засыпки пазух и устройства щебеночной подушки. Для образования деформационного шва между лотком и фундаментом до начала бетонирования по контуру лотка устанавливают на ребро доски толщиной 2 см.

При сооружении быстротоков, гасителей и фундаментов из монолитного бетона доставку бетонной смеси к месту укладки обеспечивают с ближайшего полигона. В том случае, когда оказывается экономически невыгодным доставлять бетонную смесь с полигона из-за большой дальности возки и отсутствия дорог, смесь готовят здесь же на стройплощадке. На этой стройплощадке располагают склады щебня, песка и цемента. Фундаменты под звенья труб бетонируют посекционно со стороны выходного оголовка. Фундамент под железобетонные прямоугольные звенья бетонируют сразу до проектной отметки.

Монолитный фундамент под круглые трубы бетонируют в две стадии. В первой стадии фундамент бетонируют не на полную высоту, а на 10 см ниже отметки верха фундамента по оси трубы. Через 10—12 ч после достижения бетоном требуемой прочности приступают к второй стадии. Сначала на бетонную поверхность укладывают деревянные бруски сечением 8×10 см длиной от 110 до 185 см (в зависимости от отверстия трубы), на которые устанавливают звенья. С боков звенья закрепляют деревянными клиньями. После выверки положения звеньев приступают к следующей стадии — к бетонированию верхней части фундамента, оставляя в бетоне ранее уложенные бруски (рис. 69). Если на входе в трубу устраивают водоприемный колодец, то его бетонируют одновременно с входным оголовком. Монолитные бетонные быстротоки сооружают вслед за водоприемным колодцем, а если колодцы не нужны, то от входного оголовка. При монолитном варианте гасителей энергии потока фундаменты и стенки бетонируют одновременно без перерыва.

Гидроизоляционные работы начинают после окончания монтажа трубы и выполняют их в соответствии с указаниями ВСН

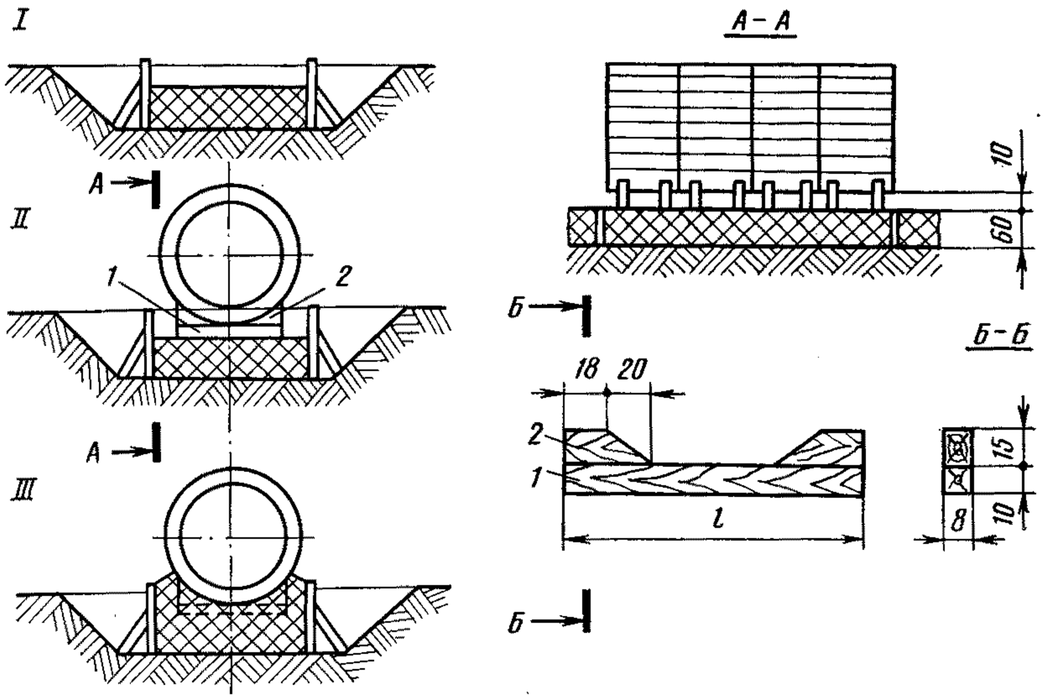


Рис. 69. Три стадии (*I—III*) бетонирования монолитного фундамента трубы:
1 — брусок; *2* — клин; *l* — длина бруска, равная 110—185 см

31-60. Гидроизоляцию устраивают обязательно в сухую погоду при температуре наружного воздуха не ниже +5°С, предохраняя ее от действия солнечных лучей.

К засыпке готовой трубы приступают сразу же после окончания гидроизоляционных работ. Если насыпь в этот момент не отсыпают на полный профиль, то с целью предохранения изоляции от разрушения трубу засыпают первоначально на высоту 0,5 м мягким хорошо уплотняемым грунтом.

Грунт отсыпают одновременно с обеих сторон горизонтальными слоями толщиной 15—20 см с тщательным уплотнением каждого слоя легкими электрическими или механическими трамбовками.

Отводное русло устраивают в следующем порядке. Вначале выполняют земляные работы по планировке участка и устройству ковша, а затем устраивают укрепление русла. Для этого на заранее подготовленную щебеночную подушку укладывают бетонные блоки (или бетонную смесь при монолитной конструкции). Блоки укладывают, начиная от оголовка. К месту укладки блоки подают на специальной платформе и краном на гусеничном или пневмоколесном ходу устанавливают их в проектное положение, затем соединяют между собой, а стыки заполняют бетонной смесью марки 200. При укреплении русла монолитным бетоном поверхность русла разбивают на отдельные карты (плиты) с помощью досок, поставленных на ребро и закрепленных с обеих сторон металлическими штырями. К месту укладки бетонную смесь подают краном в бадьях. Уложенную смесь уплотняют вибраторами, а поверхность выравнивают специальной рейкой.

Покрытие из бетонных блоков или монолитного бетона заводят в ковш, образуя предохранительный откос, после чего ковш заполняют камнем. Одновременно с укрепительными работами по отводному руслу укрепляют подводящее русло и откосы насыпи.

Сооружение труб с помощью монтажно-транспортной установки. При продольном уклоне лога свыше 0,2, когда из-за сложности рельефа местности невозможно использовать гусеничные краны, косогорную трубу можно сооружать с помощью монтажно-транспортной подвесной установки (МТПУ-3) грузоподъемностью 3,0 т. Эта установка может быть использована для укладки блоков сборного фундамента и звеньев круглых и прямоугольных труб отверстием до 1,50 м (за исключением повышенных звеньев в прямоугольных трубах). Все остальные элементы трубы в таких условиях из-за малой грузоподъемности крана возводят из монолитного бетона.

Сооружая косогорные трубы на постоянно действующем водотоке, нужно обеспечивать отвод воды от места их постройки. Потребность в материалах для возведения труб указывается в проекте сооружений.

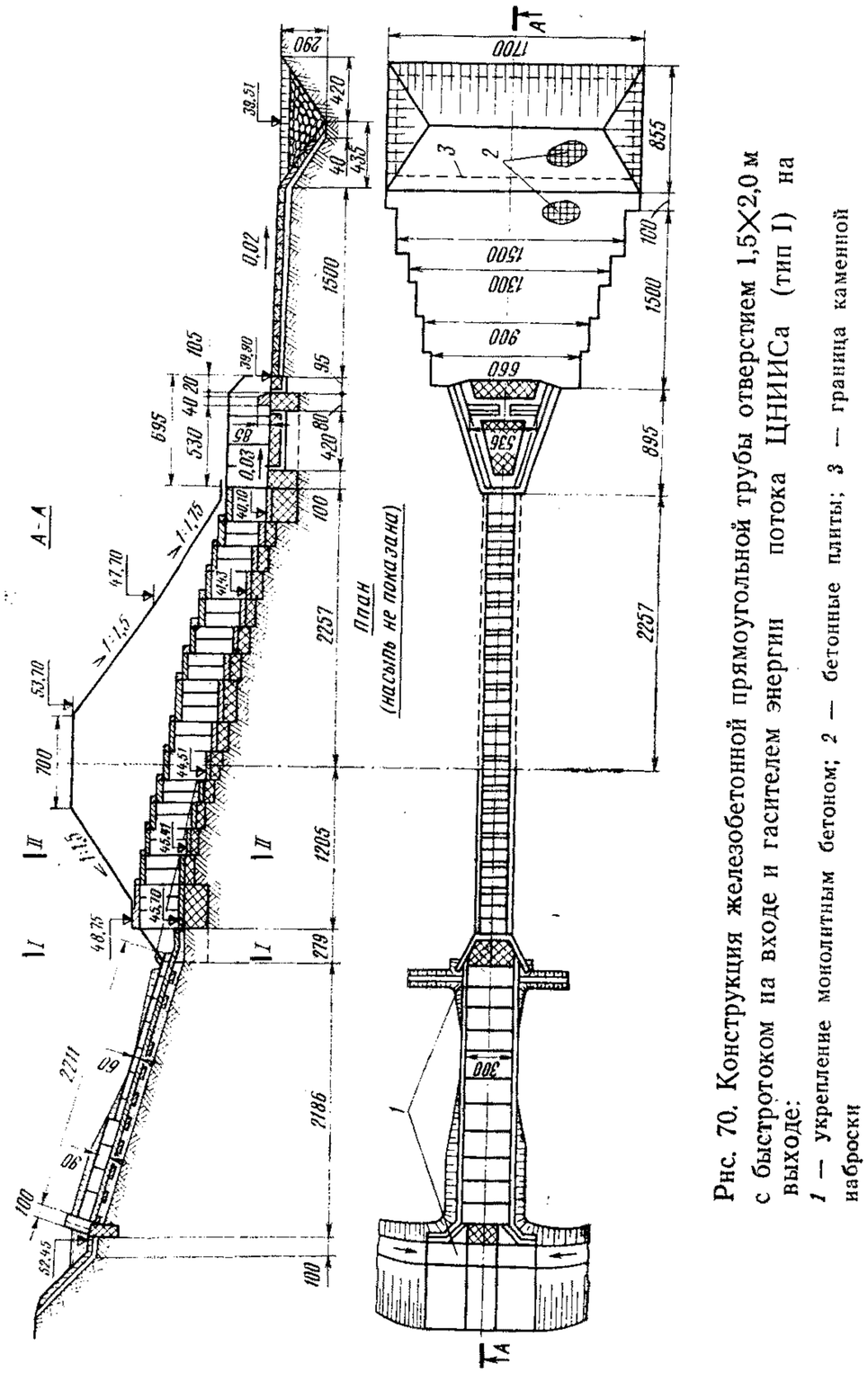
Основным оборудованием и инвентарем для строительства косогорных труб служат: гусеничные краны-экскаваторы Э-257, Э-652 и Э-801 грузоподъемностью 5, 10 и 15 т; экскаваторы Э-257 с емкостью ковша 0,25 м^3; бетономешалки; передвижная электростанция; автомобили для транспортирования блоков и материалов; центробежный насос С-203 производительностью 24 м^3/ч (высота всасывания 6 м); передвижной агрегат Д-124А для нагревания битума; вибраторы поверхностные Н-117 и внутренние И-50; автоцистерна для доставки воды; бадьи металлические емкостью 1 м^3 для транспортирования бетонной смеси; весы десятичные 100 кг; тачки металлические одноколесные емкостью 0,1 м^3; шуровки металлические для уплотнения раствора; воронки металлические для заливки раствора в швы; конопатки металлические; передвижной вагончик, используемый под склад инструмента и контору.

Глава VIII

ПРИМЕРЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ТРУБ

Пример № 1. Требуется запроектировать трубу под железиую дорогу по следующим исходным данным. На основании материалов изысканий и гидрологических расчетов определен расчетный расход $Q_р = 9{,}5$ м^3/с, средний уклон лога $i = 0{,}30$, грунты основания — суглинки средней плотности ($d_э = 2$ мм).

По заданному расходу принимаем типовую прямоугольную трубу отверстием 1,5 м с поступлением воды в трубу по быстротоку (рис. 70).


А-А
План
(насыпь не показана)
I-I
II-II
А
А
1:1,75
1:1,5
1:1,5
1:1,5
290
420
435
855
1700
1500
1300
900
660
536
100
1500
895
2257
2257
1205
279
2186
100
700
530
595
105
95
80
100
60
96
100
2711
53,70
47,70
45,70
48,35
52,45
38,51
38,90
0,02
0,03
0,03
0,03

для сечения *I—I* (конец быстротока) $h=0{,}3$ м и $v=10{,}5$ м/с;
для сечения *II—II* $h=0{,}7$ м и $v=9{,}5$ м/с (сечение взято не случайно, так как здесь из-за ступени понижена высота отверстия трубы). При высоте ступени 0,29 м высота отверстия трубы в сечении *II—II* будет равна 2,0—0,29 = =1,71 м, а глубина воды 0,70 м. Зазор между поверхностью воды и ригелем будет 1,71—0,70=1,01 м. По техническим условиям СН 200-62 для прямоугольных труб с высотой отверстия до 3 м зазор между поверхностью воды и ригелем должен быть не менее $^1/_6$ высоты трубы в свету, т. е. в нашем случае не менее 1.71/6. Следовательно, зазор в 101 см вполне достаточен.

Из формулы (1) находим глубину воды на выходе из трубы. Коэффициент *C* определяем как для ступенчатого профиля трубы по формуле

$$C=13{,}8\sqrt[3]{\frac{l}{\Delta}},$$

где Δ — средняя величина ступени; l — расстояние между ступенями.

Глубина воды на выходе из трубы $h_c=0{,}77$ м. Скорость течения воды на выходе из трубы будет

$$v=\frac{Q}{bh_c}=\frac{9{,}5}{1{,}5\cdot 0{,}77}=8{,}2\ \text{м/с}.$$

Чтобы понизить скорость потока при выпуске его в отводное русло, надо на выходе из трубы устроить гаситель энергии потока. Принимаем гаситель ЦНИИСа (тип I) и определяем его размеры при угле раструбности $\varphi=60°$. Расстояние от начала раструба до первого водобойного порога определяем по формуле (60):

$$l=0{,}63b=0{,}63\cdot 1{,}5=0{,}95\ \text{м}.$$

Высоту первого водобойного порога определяем по формуле (59):

$$c_1=1{,}3h_c=1{,}3\cdot 0{,}77=1{,}0\ \text{м}.$$

Дальность падения струи по формуле (61) при $h_к=1{,}6$ м будет

$$S=1{,}6\left[1+\left(4{,}4-\frac{1{,}0}{0{,}77}\cdot 0{,}52\sqrt{\frac{8{,}2^2}{9{,}81\cdot 0{,}77}}-0{,}4\right)\right]=7{,}31\ \text{м}.$$

Длина *L* раструба от начала до второй водобойной стенки по формуле (62) равна:

$$L=0{,}95+7{,}31=8{,}26\ \text{м}.$$

Высота второго водобойного порога по формуле (64)

$$c_2=0{,}27h_c=0{,}27\cdot 0{,}77=0{,}21\ \text{м}.$$

При $\frac{c_1}{h_c}=\frac{1}{0{,}77}=1{,}3$ глубина потока в плоскости напорной грани первого водобойного порога по формуле (67) будет

$$h_l=1{,}6h_к=1{,}6\cdot 1{,}6=2{,}56\ \text{м}.$$

Глубина потока в начале раструба по формуле (65)

$$h_р=1{,}18\cdot 1{,}6\cdot 1{,}3=2{,}47\ \text{м}$$

при $Fr=\frac{v^2}{gh_c}=\frac{8{,}2^2}{9{,}81\cdot 0{,}77}=8{,}9.$

Наибольшая высота подъема струй в раструбе по формуле (69) будет

$$h_{max}=1{,}75\cdot 1{,}6\cdot\lg(1{,}3\cdot 8{,}9)=2{,}98\ \text{м}.$$

Таблица 24

x	x^2	Ax^2	Ex	h	x	x^2	Ax^2	Ex	h
0	0	0	0	2,56	4	16,0	—1,680	1,68	2,56
2,5	6,25	—0,657	1,05	2,95	4,5	20,25	—2,12	1,88	2,32
3	9,0	—0,945	1,26	2,87	5	25,0	—2,63	2,10	2,03
3,5	12,25	—1,290	1,47	2,74	6	36,0	—3,78	2,52	1,30

Определяем горизонтальное расстояние от передней грани первого водобойного порога до места наибольшего подъема струй.

Имея $a=h_{max}-h_t=2{,}98-2{,}56=0{,}42$ м и

$$m=1+\sqrt{1+\frac{h_t}{a}}=1+\sqrt{1+\frac{2{,}56}{0{,}42}}=3{,}66,\quad \text{получаем}$$

$$x_m=\frac{S}{m}=\frac{7{,}31}{3{,}66}=2\ \text{м}.$$

Глубину воды на расстоянии x от основания напорной грани первого водобойного порога

при $A=-\frac{am^2}{S^2}=-\frac{0{,}42\cdot 3{,}66^2}{7{,}31^2}=-0{,}105$

и $E=\frac{2am}{S}=\frac{2\cdot 0{,}42\cdot 3{,}66}{7{,}31}=0{,}420$

вычисляем по формуле (70) и сводим в табл. 24, а по значениям x и h назначаем очертание боковых стен гасителя.

Скорость течения воды на выходе из гасителя $v_s=0{,}45v=0{,}45\cdot 8{,}2=$ =3,70 м/с. Глубина потока в начале раструба гасителя $h_р=2{,}47$ м, что больше высоты нормального звена на выходе из трубы.

Глубина, сопряженная со сжатой глубиной в конце трубы по формуле (75), будет

$$h''_c=0{,}5\cdot 0{,}77\left(\sqrt{1+8\cdot 8{,}9}-1\right)=2{,}89\ \text{м},$$

т. е. $h_р=2{,}47$ м $<h''_c=2{,}89$ м.

Следовательно, гидравлический прыжок расположен в раструбе. Обратный уклон свободной поверхности потока определяем по формуле (76):

$$j_1=0{,}55+0{,}0304\cdot 8{,}9-0{,}30\cdot\frac{2{,}47}{1{,}60}=0{,}358.$$

Глубина воды на расстоянии 1 м перед раструбом ($\Delta x_1=1$ м) будет

$$h_{р1}=h_р-j_1\Delta x_1=2{,}47-0{,}358\cdot 1=2{,}11\ \text{м}.$$

Уклон поверхности следующего вышележащего участка потока

$$j_2=0{,}55+0{,}0304\cdot 8{,}9-0{,}30\cdot\frac{2{,}11}{1{,}60}=0{,}426.$$

Глубина воды на расстоянии 2 м перед раструбом:

$$\Delta x_2 = 2 - \Delta x_1 = 2 - 1 = 1 \text{ м};$$

$$h_{p2} = h_{p1} - j_2 \Delta x_2 = 2{,}11 - 0{,}426 \cdot 1 = 1{,}68 \text{ м}.$$

Зазор между поверхностью воды и низом ригеля

$$2 - 1{,}68 = 0{,}32 \text{ м} < \frac{1}{6} 2 = 0{,}33 \text{ м}.$$

Поскольку на расстоянии 1 м от начала раструба глубина потока больше высоты выходного отверстия трубы, а на расстоянии 2 м получен требуемый нормами зазор между поверхностью воды и низом ригеля, нужно сдвинуть начало раструба. Для этого между трубой и началом раструба гасителя установим две параллельные стенки длиной по 2 м.

Укрепление отводного русла при уклоне $i=0{,}02$ проектируем сборным бетонным из плит.

Скорость течения воды на выходе из гасителя $v=3{,}7$ м/с.

Ширину раструба B_0 в конце гасителя определяем по формуле (63):

$$B_0 = 1{,}5 + 2 \cdot 8{,}26 \cdot \operatorname{tg} 30^\circ = 11 \text{ м}.$$

При этом глубина воды будет

$$h = \frac{Q}{vB_0} = \frac{9{,}5}{3{,}7 \cdot 11{,}0} = 0{,}234 \text{ м}.$$

Определяем ширину растекания потока на расстоянии x по оси сооружения, равном 2 м от конца гасителя по формуле (85):

$$B = 2 \cdot 11{,}0 \left\{ 1{,}262 + 1{,}09 \lg \left[\frac{2{,}0}{11{,}0} (1 - 0{,}02) + 0{,}20 \right] \right\} = 17{,}6 \text{ м}.$$

Аналогично определяем ширину растекания потока на расстоянии x от конца гасителя и получаем

x, м	2	3	5
B, м	17,6	19,8	23,3

На тех же расстояниях от конца гасителя определим по формуле (82) глубину местного размыва. Для этого сначала, используя способ В. И. Чарномского, находим скорость и глубину потока на расстоянии 2 м от конца гасителя; получаем $h_{x=2}=0{,}144$ м и $v_{x=2}=3{,}75$ м/с. Удельный расход

$$q = \frac{Q}{B_{x=2}} = \frac{9{,}5}{17{,}6} = 0{,}54 \text{ м}^2/\text{с}.$$

По графику (см. рис. 44) для диаметра частиц грунта $d_э=2$ мм находим глубину, формируемую равномерным спокойным потоком $h_{рр}=0{,}78$ м. Критическая глубина в конце укрепления, т. е. при $x=2$ м, будет

$$h_к = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{0{,}54^2}{9{,}81}} = 0{,}31 \text{ м}.$$

Для определения коэффициента M по формуле (83) на графике (см. рис. 46) находим значение коэффициента $\mu=1{,}6$.

При отношении фактического расхода к расчетному, равном 9,5:9,5=1, имеем

$$M = 1{,}6 + 0{,}3 \cdot \frac{3{,}75^2}{2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}31} = 2{,}29.$$

Так как предусмотрено устройство предохранительного откоса отводного русла, то принимаем $\Psi=1{,}35$ (см. гл. IV), $h_б=h_{x=2}=0{,}14$ м. Глубина местного размыва будет

$$T = 1{,}35 \cdot 2{,}29 \cdot 0{,}78 - 0{,}14 = 2{,}3 \text{ м}.$$

Таким же образом определяем глубину местного размыва на расстоянии 3 и 5 м от конца гасителя и получаем:

Длина укрепления, м	2	3	5
Глубина размыва, м	2,3	2,2	2,0

В данном случае с увеличением длины укрепления глубина размыва уменьшается на небольшую величину, а длина укрепления растет значительно быстрее. Поскольку поток воды на выходе из гасителя удаляется на значительное расстояние от основания насыпи, принимаем минимальную длину укрепления, равную 2 м, и по эпюре растекания потока намечаем границу укрепления русла.

Проверяем трубу на пропуск максимального расхода. Такая проверка необходима для труб под железную дорогу. Прямоугольная труба отверстием 1,5×2,0 м при полунапорном режиме протекания воды пропускает максимальный расход $Q_{max}=15{,}0$ м³/с. Проверку на пропуск максимального расхода начинаем с выяснения работы быстротока; длина быстротока 22,11 м.

По графику (прилож. 1) для отношения

$$\frac{Q}{\sqrt{i_0}} = \frac{15{,}0}{\sqrt{0{,}276}} = 28{,}5 \text{ м}^3/\text{с}$$

и ширине лотка $B=3$ м находим глубину потока при равномерном движении $h_0=0{,}35$ м, а по второму графику (прилож. 2) для

$$\frac{Qn}{B\sqrt{i_0}} \cdot \frac{15{,}0 \cdot 0{,}016}{3\sqrt{0{,}276}} = 0{,}153$$

имеем длину кривой спада $L_{сп}=103$ м. Имея удельный расход

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{15{,}0}{3} = 5{,}0 \text{ м}^2/\text{с},$$

находим критическую глубину $h_к=1{,}37$ м.

Определяем глубину h_i воды в лотке на расстоянии $x=22$ м от входа в быстроток (прилож. 3):

$$\frac{x}{L_{сп}} = 0{,}217; \quad Z = 0{,}90;$$

$$Z(h_к - h_0) = 0{,}92 \text{ м};$$

$$h_i = h_к - Z(h_к - h_0) = 0{,}45 \text{ м}.$$

Скорость течения воды в конце быстротока

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{15{,}0}{3{,}0 \cdot 0{,}45} = 11{,}1 \text{ м/с}.$$

Для гидравлической проверки трубы определяем способом В. И. Чарномского глубину и скорость потока в трубе в сечении *II—II* (см. рис. 70) и получаем $h=0{,}83$ м; $v=10{,}6$ м/с. При высоте отверстия трубы в сечении *II—II*, равной 1,71 м, зазор между поверхностью воды и низом ригеля будет 1,71—0,83=0,68 м, т. е. меньше минимального допустимого зазора (0,285 м) по нормам. Следовательно, условие обеспечения зазора между поверхностью воды и низом ригеля обеспечено.

При пропуске максимального расхода на выходе из прямоугольной трубы допускается касание поверхностью воды низа ригеля. Определим глубину воды на выходе из трубы по формуле

$$h_{max} = h_{pc}\sqrt[3]{k^2}.$$

Имея $k = \frac{Q_{max}}{Q_{расч}} = \frac{15,0}{9,5} = 1,58$

и глубину воды на выходе из трубы при пропуске расчетного расхода $h_{pc}=0,77$ м/с, получаем

$$h_{max} = 0,77\sqrt[3]{1,58^2} = 1,05 \text{ м}.$$

Глубину потока в начале раструба при высоте первого водобойного порога $c_1=1,0$ м можно вычислить по формуле

$$h_p = 1,18\,h_к\,\frac{c_1}{h_{max}}.$$

Глубина $h_к = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}} = \sqrt[3]{\frac{15,0}{9,81\cdot 1,5^2}} = 2,17$ м;

$$h_p = 1,18\cdot 2,17\cdot\frac{1,0}{1,05} = 2,44 \text{ м}.$$

Скорость на выходе из трубы

$$v_{max} = \frac{Q_{max}}{bh_{max}} = \frac{15,0}{1,5\cdot 1,05} = 9,5 \text{ м/с};$$

число Фруда $Fr = \frac{v^2_{max}}{gh_{max}} = \frac{9,5^2}{9,81\cdot 1,05} = 8,75.$

Глубина, сопряженная с глубиной бурного потока в трубе,

$h''_c = 0,5h_{max}\left(\sqrt{1+8Fr}-1\right) \doteq 0,5\cdot 1,05\left(\sqrt{1+8\cdot 8,75}-1\right) = 3,9$ м,

т. е. $2,44<3,9$ м.

Следовательно, имеем обычный случай и гидравлический прыжок отгоняется в раструб.

Обратный уклон свободной поверхности

$$j_1 = 0,550 + 0,0304Fr - 0,300\,\frac{h_p}{h_к} =$$

$$= 0,550 + 0,0304\cdot 8,75 - 0,300\,\frac{2,44}{2,17} = 0,477.$$

Глубина воды на расстоянии 1 м перед раструбом, т. е. $\Delta x_1 = 1$ м:

$$h_{p1} = h_p - j_1\,\Delta x_1 = 2,44 - 0,477\cdot 1 = 1,96 \text{ м}.$$

Уклон поверхности следующего вышележащего участка потока:

$$j_2 = 0,550 - 0,0304\cdot 8,75 - 0,300\,\frac{1,96}{2,17} = 0,545.$$

Глубина воды на расстоянии 2 м перед раструбом:

$$h_{p2} = h_{p1} - j_2\,\Delta x_2 = 1,96 - 0,545\cdot 1 = 1,41 \text{ м}.$$

Таблица 25

x	x^2	Ax^2	Ex	h	x	x^2	Ax^2	Ex	h
0	0	0	0	2,71	4	16,0	—2,270	2,68	3,12
2,5	6,25	—0,885	1,67	3,49	4,5	20,25	—2,870	3,01	2,85
3	9,0	—1,280	2,02	3,45	5	25,0	—3,550	3,34	2,50
3,5	12,25	—1,740	2,34	3,31	6	36,0	—5,110	4,02	1,62

При пропуске расчетного расхода глубина воды на таком же расстоянии от раструба равна 1,68 м (см. выше). Таким образом, проверка на пропуск максимального расхода показывает, что на выходе из трубы лимитирует пропуск расчетного расхода воды.

Наибольшая высота подъема струй в раструбе

$$h_m = 1,75h_к\lg\left(\frac{c_1}{h_{max}}Fr\right) = 1,75\cdot 2,17\lg\left(\frac{1,0}{1,05}\cdot 8,75\right) = 3,5 \text{ м}.$$

Глубина потока в плоскости напорной грани первого водобойного порога при $c_1/h_{max}=1,0/1,05=0,95$ будет

$$h_t = h_к\left(0,3+\frac{c_1}{h_{max}}\right) = 2,17\,(0,3+0,95) = 2,71 \text{ м}.$$

Имея $a = h_m - h_t = 3,5 - 2,71 = 0,79$ и $m = 1+\sqrt{1+\frac{2,71}{0,79}} = 1+2,1 = 3,1$, расстояние от передней грани первой водобойной стенки до места наибольшего подъема струй

$$x_m = \frac{S}{m} = \frac{7,31}{3,1} = 2,36 \text{ м}.$$

В тех же точках, где были получены данные о глубине воды при пропуске расчетного расхода воды, определим в табличной форме (табл. 25) глубину потока при пропуске максимального расхода по формуле

$$h = Ax^2 + Ex + h_t,$$

где $A = -\frac{am^2}{S^2} = -\frac{0,79\cdot 3,1^2}{7,31^2} = -0,142;$

$$E = \frac{2am}{S} = \frac{2\cdot 0,79\cdot 3,1}{7,31} = 0,669.$$

Окончательная высота стенок гасителя устанавливается по глубине потока при максимальном расходе.

Рассмотрим для заданных условий работу другого типа гасителя на выходе из трубы, т. е. вместо гасителя ЦНИИСа (тип I) поставим расширяющийся водобойный колодец (тип II) и при тех же исходных данных определим размеры гасителя и укрепления отводного русла (рис. 71).

Скорость течения воды на выходе из трубы $v=8,2$ м/с.

Пользуясь уравнением (49) прыжковой функции, определим глубину h''_c, сопряженную с глубиной потока в сжатом сечении h_c. Принимаем: $h''_c = 1,66$ м; $h_c=0,77$ м; длина гасителя до напорной грани водобойной стенки (длина подпертого гидравлического прыжка) $l_2 = 3,2\,h''_c = 3,2\cdot 1,66 = 5,31$ м; угол между

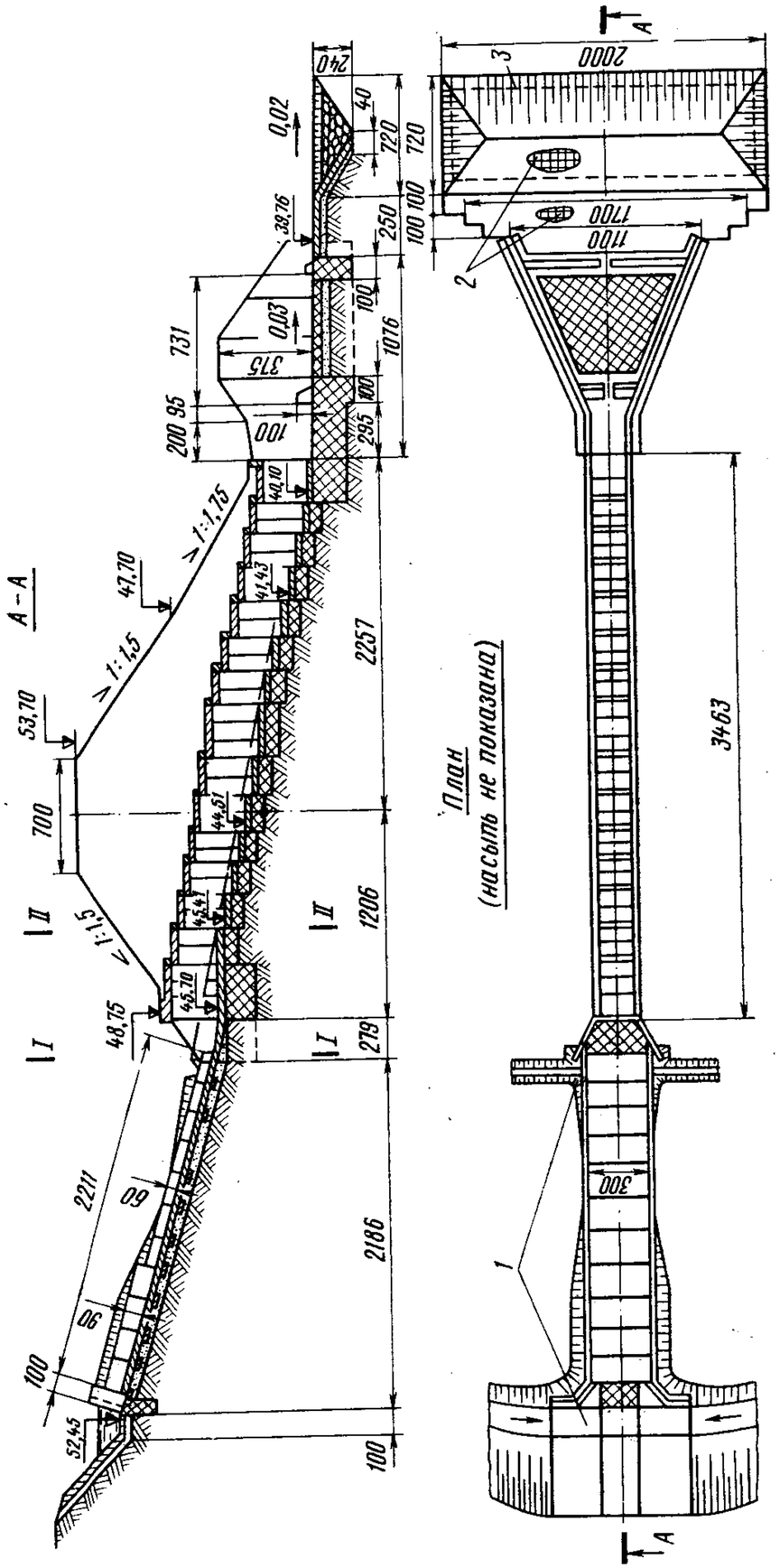


Рис. 71. Конструкция железобетонной прямоугольной трубы отверстием 1,5×2,0 м с быстротоком на входе и расширяющимся водобойным колодцем (гасителем) энергии потока тип II) на выходе:
1—3 см. рис. 70.

стенкой гасителя и осью трубы $\alpha=20°$; ширина колодца (гасителя) в сечении напорной грани водобойной стенки будет

$$B=b+2l_к \operatorname{tg}\alpha=1,5+2\cdot5,31\cdot0,634=5,36 \text{ м};$$

площади живых сечений $\omega_c=bh_c=1,5\cdot0,77=1,15$ м² и

$$\omega_2=Bh_c''=5,36\cdot1,66=8,9 \text{ м}^2.$$

Тогда $$\frac{2\cdot9,5^2}{9,81\cdot1,15}+1,15\cdot0,77=16,84 \text{ м}^3;$$

$$\frac{2\cdot9,5^2}{9,81\cdot8,9}+8,9\cdot1,66=16,86 \text{ м}^3.$$

Обе части решенного уравнения (49) практически равны между собой и, следовательно, величина $h_c''=1,66$ м подобрана правильно.

Удельный расход потока в сечении напорной граии водобойной стенки

$$q=\frac{Q}{B}=\frac{9,5}{5,36}=1,775 \text{ м}^2/\text{с}.$$

При глубине воды перед стенкой $H_1=\sigma h_c''$ и коэффициенте затопления прыжка $\sigma=1,05$ средняя скорость потока в колодце перед стенкой будет

$$v_{кол}=\frac{q}{H_1}=\frac{q}{\sigma h_c''}=\frac{1,775}{1,05\cdot1,66}=1,02 \text{ м/с}.$$

Определив по формуле (52) величину полного напора $H_0=0,96$ м перед водобойной стенкой, находим возвышение уровня воды в колодце над порогом водобойной стенки:

$$H=H_0-\frac{\alpha v_{кол}^2}{2g}=0,96-\frac{1,0\cdot1,02^2}{2\cdot9,81}=0,91 \text{ м}$$

и высоту водобойной стенки

$$h_{ст}=\sigma h_c''-H=1,05\cdot1,66-0,91=0,83 \text{ м}.$$

Для определения скорости течения воды на выходе из гасителя вначале находим высоту падения струи:

$$Y=h_{ст}+0,5H=0,83+0,5\cdot0,91=1,29 \text{ м}.$$

Имея угол наклона подводящего русла $\alpha_0=0$, принимаем $v_1=v_0=0$ и находим (прилож. 4) по $v_2=v_{кол}=1,02$ м/с дальность падения струи $l_1=0,55$ м.

Определим глубину потока в сжатом сечении за водобойной стенкой по графику (прилож. 5) при высоте водосливной стенки $p=0,83$ м, $H=0,91$ м и $v_{кол}=1,02$ м/с. Находим

$$T_0=p+H+\frac{\alpha v_{кол}^2}{2g}=0,83+0,91+\frac{1,0\cdot1,02^2}{2\cdot9,81}=1,79 \text{ м}.$$

Критическая глубина $h_к$ при удельном расходе $q=1,775$ м²/с будет

$$h_к=\sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}=\sqrt[3]{\frac{1,0\cdot1,775^2}{9,81}}=0,69 \text{ м},$$

а величина $\xi_0=T_0/h_к=1,79:\ 0,69=2,59$.

По графику (прилож. 5) определяем $\xi_c=0,485$.

Таблица 26

x, м	B, м	T, м
15	15,1	2,91
18	15,6	2,79
21	16,0	2,70

Глубина воды в сжатом сечении за водобойной стенкой будет $h_c = \xi_c \times h_к = 0{,}485 \cdot 0{,}69 = 0{,}34$ м. Полная длина гасителя энергии потока с учетом конструктивного запаса $l_3 = 3h_c$ будет $L = l_2 + l_1 + l_3 = 5{,}31 + 0{,}55 + 3 \cdot 0{,}34 = 6{,}88$ м.

Определим у места падения струи, переливающейся через водобойную стенку, ширину потока при $\alpha = 20°$:

$$B_0 = b + 2L \operatorname{tg} \alpha = 1{,}5 + 2 \cdot 6{,}88 \cdot 0{,}364 = 6{,}50 \text{ м}.$$

Скорость течения воды на выходе из гасителя будет

$$v = \frac{Q}{B_0 h_c} = \frac{9{,}5}{6{,}5 \cdot 0{,}34} = 4{,}3 \text{ м/с}.$$

При данном гасителе (тип II) тоже нужна проверка на пропуск максимального расхода.

В результате расчетов установлено, что максимально допустимую глубину размыва $T = 3{,}0$ м получаем лишь на расстоянии 15 м от конца гасителя.

Ширину растекания потока на расстоянии 15, 18 и 21 м от конца гасителя определим по формуле (84), а глубину и скорость потока в рассматриваемых сечениях — по способу В. И. Чарномского (табл. 26). По результатам расчета видно, что с увеличением длины укрепления с 15 до 21 м глубина размыва уменьшается на сравнительно небольшую величину (12—21 см), но в то же время площадь укрепляемого участка русла резко возрастает.

Принимаем длину укрепления равной 15 м при глубине размыва $T = 2{,}91$ м.

Таким образом, применение на выходе из трубы гасителя в виде расширяющегося водобойного колодца (тип II) вместо гасителя ЦНИИСа (тип I) позволяет сократить объем работ по сооружению гасителя, но требует значительного увеличения затрат на укрепление отводного русла. Вопрос о выборе типа гасителя необходимо решать комплексно, сопоставляя затраты на сооружение гасителя и отводного русла.

Для рассматриваемого примера примем конструкцию быстротока из сборных железобетонных лотков шириной $B = 3$ м. Высоту блоков лотка назначим на основании данных о глубине потока по длине быстротока. В целях унификации элементов быстротока принимаем две высоты блоков лотка — 90 и 60 см. Всего по длине быстротока нужно будет установить 11 блоков лотка длиной по 2 м каждый, из них 4 высотой 90 см и остальные — 60 см. Быстроток непосредственно примыкает к откосным крыльям оголовка трубы.

Высоту стен гасителя назначаем на основании данных о глубине потока при пропуске максимального расхода и на 0,25 м выше поверхности потока в каждом сечении.

Конструкции гасителя ЦНИИСа (типа I) или расширяющегося водобойного колодца (гаситель типа II) приняты по типовому проекту.

Пример № 2. Требуется запроектировать трубу под автомобильную дорогу по следующим исходным данным. На основании материалов изысканий и гидрологических расчетов определен общий расчетный расход, поступающий к сооружению, $Q_р = 4{,}2$ м³/с, при этом по главному руслу поступает $Q_р = 3{,}2$ м³/с, а по боковым канавам — $2 \cdot 0{,}5 = 1{,}0$ м³/с; уклон русла вдоль косогора $i = 0{,}137$; грунты основания — плотные суглинки.

По заданному расходу принимаем круглую типовую трубу отверстием 1,5 м (рис. 72). В данном случае целесообразно на входе в трубу установить водоприемный колодец. Лоток водоприемного колодца и входного звена трубы расположим на отметке 220,80 м. Резкое понижение отметки лотка на входе в трубу позволяет обеспечить ей средний уклон $i = 0{,}047$ за счет ступенчатого расположения секций. Вода в водоприемный колодец поступает по руслу, укрепленному мощением на щебне шириной с верховой стороны $B = 8$ м.

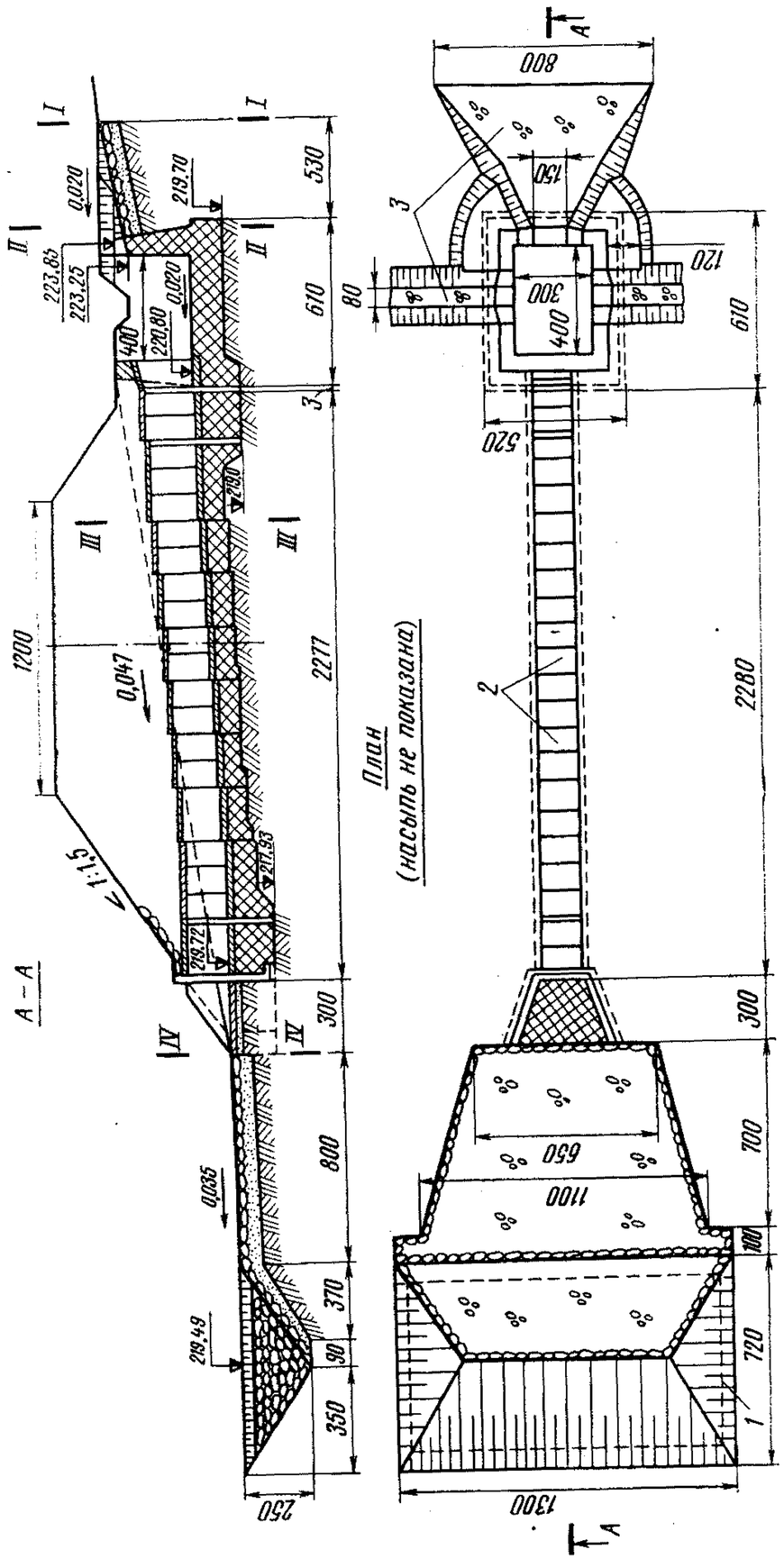


Рис. 72. Конструкция круглой трубы отверстием 1,50 м с водоприемным колодцем на входе:
1 — граница каменной наброски; *2* — звенья трубы; *3* — укрепление мощением на щебне

Используя формулу (1), определим глубину потока воды в начале укрепленного участка лога (сечение *I—I*) при коэффициенте шероховатости укрепленного русла, равном $n=0{,}04$ и $C=14{,}75$. Глубина воды будет $h_1=0{,}22$ м, а скорость в начале укрепленного лога

$$v_1=\frac{Q}{\omega}=\frac{3{,}2}{8\cdot 0{,}22}=1{,}84 \text{ м/с}.$$

Способом В. И. Чарномского определим скорость течения и глубину воды: на расстоянии $x=3$ м от начала укрепления

$$h_2=0{,}21 \text{ м и } v_2=4{,}24 \text{ м/с};$$

в начале колодца, т. е. в конце укрепления (сечение *II—II*)

$$h_3=0{,}39 \text{ м и } v_3=5{,}48 \text{ м/с}.$$

Требуемая длина водоприемного колодца $L=l_1+0{,}5$. Горизонтальное расстояние l_1 от уступа до места падения струи на дно водоприемного колодца вычисляем по уравнению

$$l_1^2\frac{g}{2v^2\cos^2\alpha}+l_1\operatorname{tg}\alpha_0-Y=0$$

или определяем по графику (прилож. 4).

Высота стенки падения $p=2{,}45$ м, угол наклона подводящего русла к горизонту $\alpha_0=12°30'$, глубина потока на уступе (в начале колодца) $h_3=0{,}39$ м. Имея

$$Y=p+\frac{h}{2}=2{,}45+\frac{0{,}39}{2}=2{,}65 \text{ м},$$

и подставляя значения в уравнение

$$l_1^2\cdot\frac{9{,}81}{2\cdot 5{,}48^2\cdot 0{,}966^2}+l_1\cdot 0{,}256-2{,}65=0,$$

получим $l_1=3{,}22$ м

Так как $L=3{,}22+0{,}5=3{,}72$ м, то по табл. 20 принимаем длину колодца $L=4{,}0$ м.

Каждая боковая канава пропускает расход $Q_р=0{,}5$ м³/с.

Ширина канавы по дну $b=0{,}8$ м, а уклон $i=0{,}02$. Канаву укрепляем мощением на щебне, коэффициент шероховатости укрепления $n=0{,}04$. Определяя глубину воды в канаве подбором из формулы (1), получим $h=0{,}39$ м. Скорость течения воды в конце канавы будет

$$v=\frac{0{,}5}{0{,}46}=1{,}1 \text{ м/с} < [3{,}5] \text{ м/с}.$$

Методом подбора определим глубину и скорость течения воды на выходе из трубы (сечение *IV—IV*) с помощью формулы Шези. При горизонтальном расположении ступеней коэффициент Шези будет

$$C=13{,}8\sqrt[3]{\frac{l}{\Delta}}=13{,}8\sqrt[3]{\frac{1}{i}}=13{,}8\sqrt[3]{\frac{1}{0{,}047}}=38{,}3.$$

Зададимся глубиной воды $h=0{,}72$ м и получим площадь живого сечения $\omega=0{,}83$ м², а затем гидравлический радиус $R=0{,}364$ м. Определим величину расхода, соответствующую заданной глубине $h=0{,}72$ м потока

$$Q=0{,}83\cdot 38{,}3\sqrt{0{,}364\cdot 0{,}047}=4{,}2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Следовательно, глубина потока определена правильно.

Скорость течения воды на выходе из трубы будет

$$v=\frac{4{,}2}{0{,}83}=5{,}05 \text{ м/с}.$$

Проверим достаточность зазора от поверхности воды до высшей точки внутренней поверхности трубы в сечении *III—III* (см. рис. 71).

Определим критическую глубину с помощью уравнения

$$\frac{\omega_к^3}{b_к}=\frac{Q^2}{g}.$$

Здесь $\omega_к$ — площадь живого сечения потока; $b_к$ — ширина свободной поверхности потока при критической глубине; Q — расход воды; g — ускорение силы тяжести.

Решая это уравнение, находим критическую глубину $h_к=1{,}07$ м.

Определим глубину и скорость потока в сжатом сечении:

$$h_{сж}=0{,}91h_к=0{,}91\cdot 1{,}07=0{,}98 \text{ м};$$

$$v_{сж}=\frac{1{,}21Q}{\omega_{сж}}=\frac{1{,}21\cdot 4{,}2}{1{,}22}=4{,}17 \text{ м/с}.$$

Глубину и скорость потока в сечении *III—III* определим способом В. И. Чарномского и получим

$$h=0{,}94 \text{ м}; \quad v=4{,}32 \text{ м/с}.$$

С учетом ступени между секциями зазор между поверхностью воды и высшей точкой внутренней поверхности трубы будет (150—11)—94=45 см, т. е. больше допустимого по нормам и равного 1/4 отверстия круглой трубы (37,5 см). На выходе из трубы глубина потока $h=0{,}72$ м, скорость $v=5{,}05$ м/с, а уклон русла $i=0{,}035$.

Непосредственно на выходе из трубы устраиваем отводное русло. На основании технико-экономического анализа принимаем укрепление русла двойным мощением на щебне, пролитым цементным раствором. Коэффициент гидравлической шероховатости такого русла будет $n=0{,}02$. Границу укрепления русла назначим на основании данных о ширине растекания потока.

Ширину B растекания потока определим по формуле

$$B=B_0+\frac{(0{,}635Q-0{,}52)(1-i)x}{1+0{,}262(1-i)x},$$

где B_0 — ширина выхода из оголовка, равная 3,46 м.

Вычисляем ширину растекания потока на расстоянии $x=6\div 15$ м от конца раструба и получаем

x, м	6	8	10	12	15
B, м	8,50	9,0	9,4	9,7	10,0

Глубину размыва определяем в тех же сечениях, где были получены данные о ширине растекания потока (при $d_э=2$ мм) по формуле (82), а способом В. И. Чарномского находим глубину и скорость потока в рассматриваемых сечениях:

Длина укрепления, м	6	8	10	12	15
Глубина размыва, м	2,7	2,5	2,4	2,3	2,2

Сравнивая стоимость укреплений, принимаем длину укрепления русла 8 м при глубине размыва 2,5 м (см. рис. 71). Глубина ковша составляет 2,5 м. Укрепление отводного русла заходит в ковш, образуя предохранительный откос. Ковш заполняем камнем на высоту 2,1 м. Водоприемный колодец устраиваем по типовому проекту из монолитного бетона. Геометрические размеры колодца назначаем по данным табл. 20: ширина колодца 3 м, длина — 4 м; высота стенок колодца, считая от его дна, — 3 м, толщина их поверху 0,6 м и понизу — 1 м.

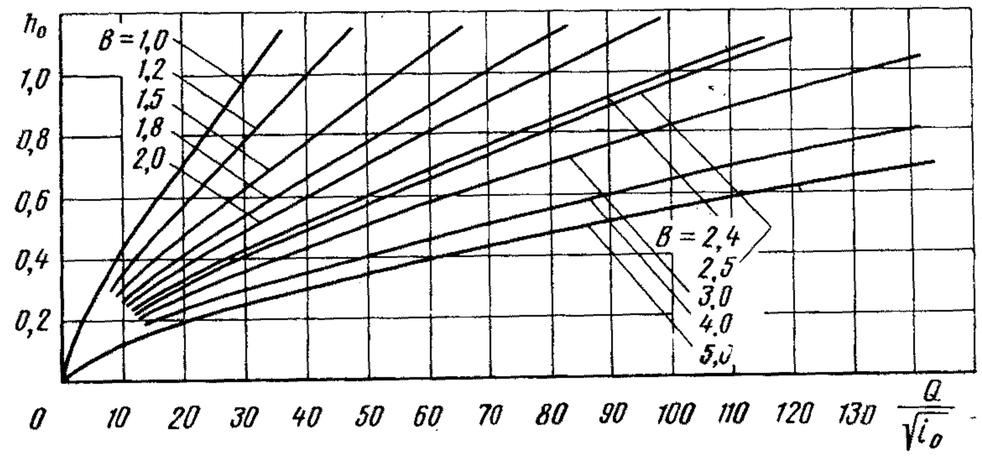
В стенках колодца предусмотрены вырезы глубиной 0,6 м по очертанию примыкающего участка главного русла и боковых канав. Дну колодца придается уклон $i=0{,}02$. Уклон средней части трубы обеспечивается ступенчатым расположением секций. Высота ступеней принята около 2/3 толщины звена и составляет 10—11 см.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

График для определеиия глубины воды при равномерном движеиии потока в прямоугольном русле

Принятые обозначеиия: $n=0{,}016$ — коэффициент шероховатости русла; Q — расчетный расход воды, м³/с; i_0 — уклон дна русла; b — ширина русла, м



Приложение 2

График для определеиия расчетиой длиины кривой спада потока в призматическом русле прямоугольиого сечеиия

Принятые обозначеиия: $n=0{,}016$ — коэффициент шероховатости русла; $L_{сп}$ — длина кривой спада потока, м; Q — расчетный расход воды, м³/с; i_0 — уклон дна русла; B — ширина русла, м.

График составлен по уравнению В. И. Чарномского

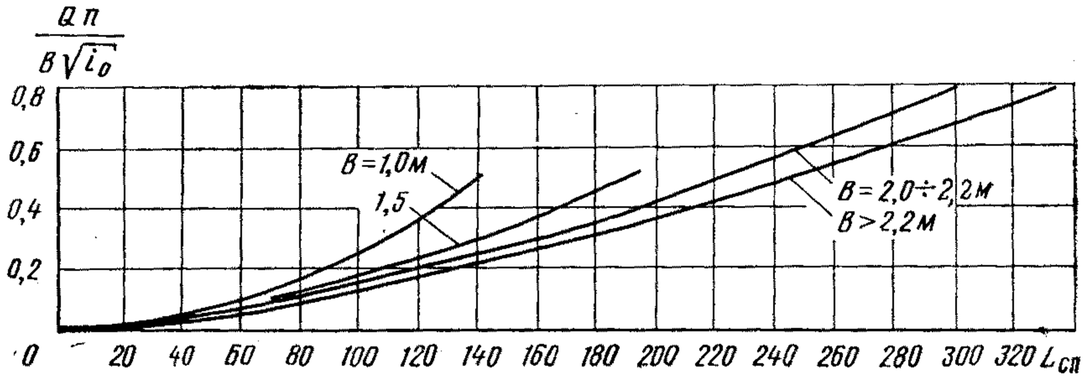
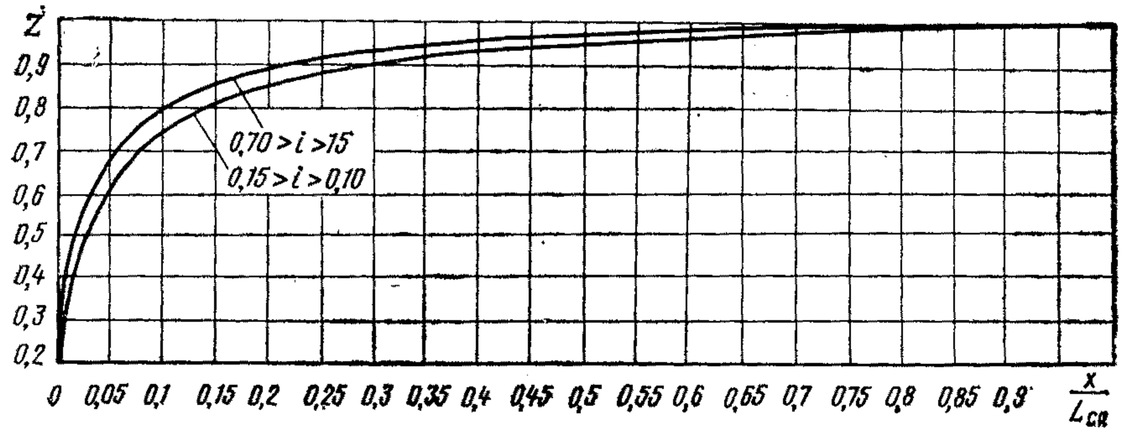


График для построения кривой свободиой поверхности потока в призматическом русле

Принятые обозначеиия: $n=0{,}016$ — коэффициент шероховатости русла; Z — множитель для определеиия глубин в быстротоке; x — расстояние до сечения, в котором определяется глубина потока, м; $L_{сп}$ — длина кривой спада потока, м.

График составлен по уравиению В. И. Чарномского.



Приложение 4

График для определеиия дальности падеиия струи

Принятые обозначеиия: $Y=p+\frac{h}{2}$ — высота падеиия струи, м; p — высота водосливной стенки, м; h — глубина потока на водосливе, м; v_0 — средняя скорость потока на водосливе, м/с; i_0 — уклон подводящего русла; l_1 — дальность падеиия струи, м; α — уголнаклона подводного русла.

$$v_1=v_0\sin\alpha;\quad v_2=v_0\cos\alpha.$$

При $i\leqslant 0{,}1$ разрешается принимать $v_1=0$ и $v_2=v_0$.

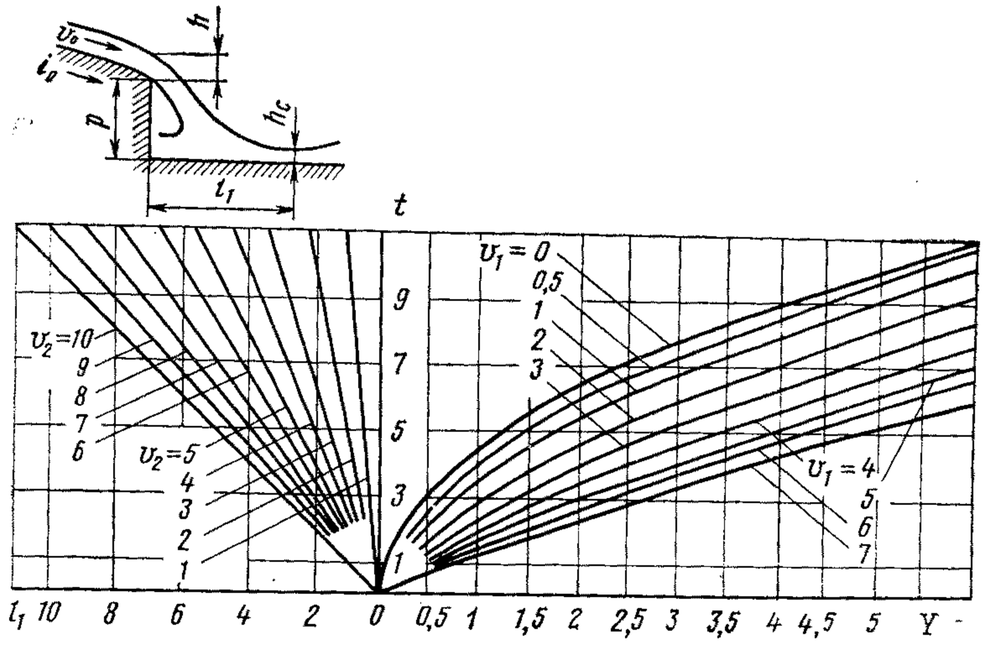
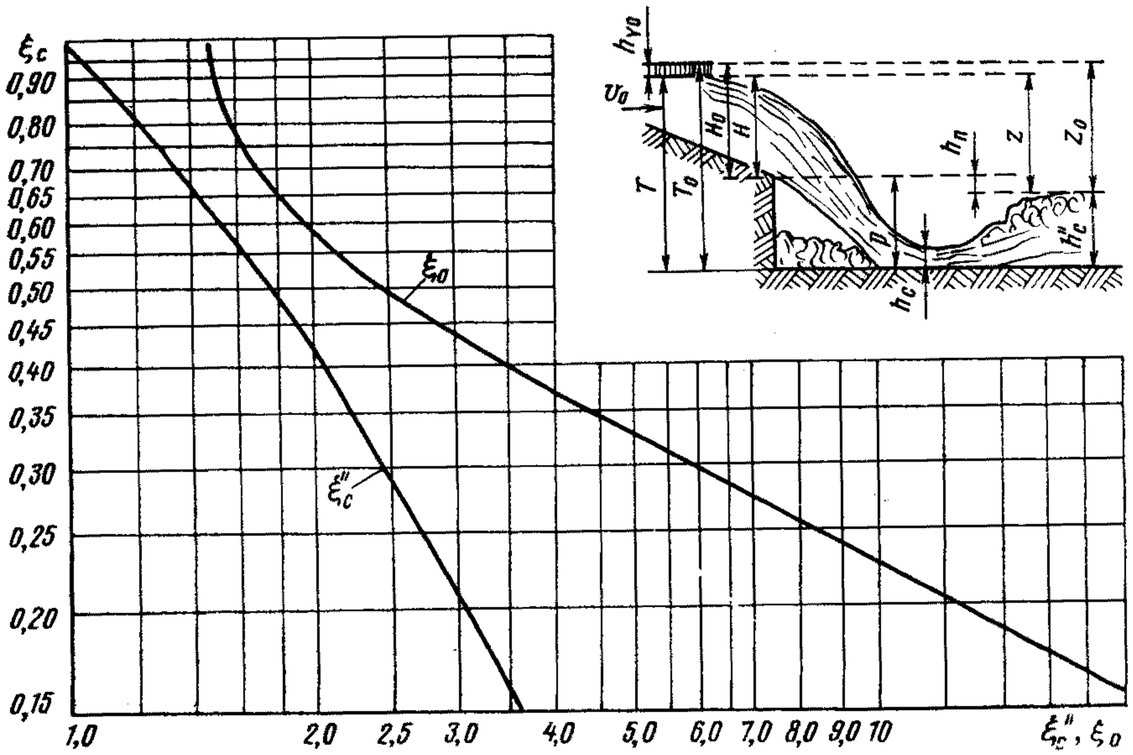


График для определения глубины потока в сжатом сечеиии и глубины, сопряжеиной с ией в руслах прямоугольного сечеиия

Принято: $\xi_0 = \frac{T_0}{h_к}$; относительные глубины $\xi_c = \frac{h_c}{h_к}$ и $\xi_c'' = \frac{h_c''}{h_к}$; T_0 — средняя удельная энергия потока, равная $p + H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}$; T — средняя удельная энергия потока без учета скорости потока; $h_к$ — критическая глубина, м; h_c — глубина потока в сжатом сечеиии, м; h_c'' — глубина, сопряжениая с глубиной потока в сжатом сечении, м; p — высота водосливной стенки, м; v_0 — средняя скорость потока в верхнем бьефе, м/с; $h_п$ — глубииа затопления водослива, м; H и H_0 — иапор водослива, м; причем $H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}$; z и z_0 — перепад в сооружении, м; $z_0 = z + \frac{\alpha v_0^2}{2g}$; g — ускорение силы тяжести, м/с²;

График заимствоваи у М. Д. Чертоусова [22].



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бегам Л. Г., Волченков Г. Я. Водопропускная способиость мостов и труб. М., «Транспорт», 1973. 193 с.

Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика. М., Стройиздат, 1965, 632 с.

Большаков В. А. Гидротехнические сооружения иа автомобильных дорогах. М., «Транспорт», 1965. 320 с.

Вереземский В. Г. О прыжке и сужении бурного потока. Автореферат диссертации. М., изд. МГМИ, 1967. 14 с.

Вереземскнй В. Г., Климешов В. И. Вопросы гидравлического расчета и проектирование косогорных водопропускных сооружений. В ки.: Гидравлика водопропускных дорожных сооружений. Киев, изд-во Киевского университета, 1969. 229—235 с. (Труды II Всесоюзной научно-технической конференции).

Дарков А. В., Кузнецов В. И. Строительная механика. М., Трансжелдориздат, 1956. 492 с.

Емцев Б. Т. Двухмерные бурные потоки. М., «Энергия», 1967. 212 с.

Железобетонные конструкции. Киев, Гостехиздат, 1959, 875 с. Авт.; И. И. Улицкий, С. А. Рывкии, М. В. Самолетов, А. А. Дыховичный.

Замарин Е. А., Фандеев В. В. Гидротехиические сооружения. М., Сельхозгиз, 1954, 543 с.

Киселев П. Г. Справочиик по гидравлическим расчетам. М., «Энергия», 1973. 312 с.

Климешов В. И. Гидравлика входных участков косогориых водопропускных сооружений. В кн.: Гидравлика водопропускных дорожных сооружений. Гомель, изд. БелИИЖТ, 1973, 222—225 с. (Труды III Всесоюзной научно-технической конференции).

Методические указания по гидравлическому расчету косогориых водопропускных труб. М., Изд. ЦНИИС, 1965. 59 с.

Муромов В. С. Гашение энергии потока и укрепление русел иа выходах из косогориых труб. Изд. ЦНИИС, 1965, 18—38 с. (Труды ЦНИИС, вып. 15).

Муромов В. С. Учет повышенной шероховатости водопропускных труб. — «Транспортное строительство», 1966, № 9, 42—44, с.

Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений и русел. М., «Транспорт», 1974. 296 с.

Технические указания по изготовлению и постройке сборных железобетонных водопропускных труб. ВСН 81-62. М., Оргтрансстрой. 1963. 128 с.

Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб (СН 200-62). М., Трансжелдориздат, 1962. 328 с.

Толмачев К. Х. Специальные сооружения на гориых дорогах. М., Автотрансиздат, 1963. 285 с.

Турсунов А. А. Теоретические основы расчета береговых безнапорных водосбросов больших плотии. Автореферат диссертации. Л., изд. ЛПИ, 1970. 30 с.

Урецкий Б. А. Портовые иабережные. М.—Л. Главная редакция строительной литературы, 1938. 283 с.

Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л., «Энергия», 1971. 552 с.

Чертоусов М. Д. Гидравлнка. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957. 640 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Настоящий указатель адресует читателя к тем страницам книги, где можно найти справку по существу рубрики или подрубрики. Заголовки рубрик расположены по алфавиту — буква за буквой. Служебные слова, невходящие в алфавит, выделены курсивом. В сочетаниях существительного и прилагательного рубрик существительное, как правило, стоит на первом месте (например, *глубина критическая*), кроме случаев, когда существительное носит слишком общий характер (например, *прыжковая функция*).

А

Аккумуляция воды перед трубой 5, 35
Антифильтр 84
Аэрация потока 31, 39

Б

Бетон 82, 99
Бетонирование сооружений 119, 120 (рис. 69)
Блоки быстротоков 82
— гасителя ЦНИИСа 106
— стенок гасителя 112
Быстротоки:
гидравлический расчет 67, 22, 123
дренаж 84
конструкция 80—87
— лотка 82, 84, 85
— из монолитного бетона 82—86
— оголовков 82, 83, 84
— сборных железобетонных 81, 82
— стенок 81, 85
— фундаментов 82
постоянной ширины 14

В

Волна расширения 29, 36
Воронка вихревая 52
Вставка прямая гасителя ЦНИИСа 106
Высота прыжка максимальная 30
— водобойной стенки 68
— стенок гасителя ЦНИИСа 76, 111

Г

Гаситель ЦНИИСа:
гидравлические исследования 69—71
гидравлический расчет 72—77
конструкция 106—109
— типовая 107
для круглых труб 75
сопряжение с трубой 76
Гашение энергии гидравлическим прыжком 63—76
— — потока, принципы 64
Гидравлика двухмерная 25
Гидроизоляция 84, 119, 120
— обмазочная 104
— оклеечная 104
Глубина воды:
критическая 8, 11, 14, 51
нормальная 7, 51, 136
в сжатом сечении 51, 66, 128, 138
сопряженная 12, 51, 64
в сужении см. Движение воды, Гребень потока
Глубина потока расчетная 40
Графики для гидравлических расчетов 136—138
Гребень потока 28 (рис. 13), 29, 36 (рис. 18)
— — второй 35 (рис. 17), 41 (рис. 21)
— — положение 32, 37, 40
— — длина 39

Д

Давление грунта 85
Дальность падения потока 66, 68, 137
Движение воды:
бурное см. Поток
на выходе из трубы 63, 80
неравномерное 13—15
— *в* сужении 48
в отводном русле 77
равномерное 7, 51, 57
спокойное см. Поток
в сужениях 23—44
— влияние числа Фруда 31, 32
— — степени сжатия потока 35—37
— — угла сужения 32—35
— — уклона дна 37—39
— качественная картина 28
— трапецеидальных быстротоков 44
Допускаемая скорость движения воды:
для искусственных укреплений 20, 21
несвязных грунтов 18, 78
связных грунтов 19, 79
Дороги подъездные 117

З

Зарядка трубы 50
Звено входное 47
Звенья конические 46, 47, 49, 95
— основные 46
— повышенные 41, 77

И

Исследования гидравлические:
Гордиенко П. И. 17, 55
Климешова В. И. 26—39
Муромова В. С. 26, 46—49, 53—62, 69—72
Инвентарь *для* строительства 121

К

Кинетичность потока 11, 31
Ковш гасителя ЦНИИСа 71
— отводного русла 115
Колебания уровня воды *перед* насыпью 50
Колодец водобойный:
гидравлический расчет 65—69, 107, 129
конструкция 108 (рис. 62), 109, 110 (рис. 63), 111
принцип действия 65, 107
Колодец водоприемный 5, 93, 96 — 101, 102
— шахтный 5
Котлованы 118
Коэффициент кинетической энергии (Кориолиса) 8
— перегрузки 85
— трения 86
— условий работы 86
— Шези 7, 21, 55, 56, 59, 62
— шероховатости 7, 9, 10, 60, 62
Краны стреловые 118
Кривые:
подпора 12, 13 (рис. 5), 52
свободной поверхности 13
— — построение 14—16, 136, 137
— — — *по* Павловскому 15, 16
— — — Чарномскому 14, 15
— — *в* трубе 50, 52
спада 13, 14, 52, 136

Л

Линия фронта прыжка см. Прыжок гидравлический
Лотки 80, 81 (рис. 48), 84
— повышенной шероховатости 87

М

Метод Павловского 15
— стереофотограмметрический 28
— Чарномского 15, 123
Модуль расхода безразмерный 58 (рис. 33), 59, 60, 62
Множитель безразмерный скоростной 55, 56 (рис. 30)
Монтаж сооружений 116—121
— — стреловыми кранами 118—120
— — монтажно-транспортной установкой 121

Н

Нагрузки сооружений 85
Наносы 5, 6

О

Оборудование для строительства 121
Обтекатели в сужениях (примазки) 46, 47
Оголовки быстротоков 82
— труб 51, 94, 95
Основные положения проектирования 5
Отверстие трубы 40, 41
Откос предохранительный 115
Очертание струи в гасителе ЦНИИСа 73—75
Перелом профиля трубы 102, 103 (рис. 59)
Перепады 112
Периметр смоченный 7
Плиты быстротоков 82
— перекрытий 103
— укреплений русел 113
Подушка 84
Пороги водобойные:
высота 72, 73, 111
конструкция 107, 109, 111
принцип действия 70, 106
Поток бурный 4, 10, 23, 25, 28 (рис. 13), 48
— раздробленный 30, 31
— спокойный 10
Примазки см. Обтекатели

Пример гидравлического расчета сужений 42
Примеры расчета общие 121
Проекты типовые 26, 71
Промыв насыпи 51
Профиль продольный быстротока 84
— — потока см. Кривые свободиой поверхности
Профиль потока поперечный 24 (рис. 10, *в*)
Прыжковая функция 12, 13
Прыжок-волна 29
Прыжок гидравлический *в* русле 11, 12 (рис. 3, 4), 48, 64
— — подпертый 65, 67
— — *перед* сужением, 37
— — — косой 23, 28, 47
— — — прямой 34
— — *в* трубе 51

Р

Размываемость грунта несвязного 77
— — связного 79
Радиус гидравлический 7, 53
Размыв местный 115
— русла 65
Расположение трубы *на* местиости 117
Растекание потока 30, 112
Раструб *с* повышенной шероховатостью 109, 111 (рис. 64)
Расход воды измерение 117
Расход допустимый 26, 46
— расчетный 26, 40
— удельный 11, 22, 54, 71
— форсированный 46
Ребра поперечные 16, 17, 21, 22, 57 (рис. 32), 87, 109, 111 (рис. 64)
Русло искусственное 9
— отводное, гидравлика 77
— — конструкция 112
— — строительство 120
— призматическое 13, 15
— укрепленное 87, 90 (рис. 52), 91, 92, 113, 115
Режимы протекания воды *в* трубе:
безнапорный 47, 49, 50 (рис. 25, *а;* рис. 26, *а*)
быстроточный 17 (рис. 7, *г*), 21, 55
напорный 50 (рис. 25, *г;* рис 26, *г*), 51
перепадный 17 (рис. 7, *б*)
при повышенной шероховатости 17 (рис. 7, рис. 8)
полунапорный 50, 51

С

Сопряжение быстротока *с* трубой:
круглой 22, 23, (рис. 9), 45—49, 94 (рис. 54)
гидравлические исследования 24—42
конструкция 87, 93
прямоугольной 22—44, 95 (рис. 55)
— расчет гидравлический 40—44
Сопряжеиие гасителя ЦНИИСа *с* трубой 76
— укрепленных русел с трубами 95, 96
Стенки быстротока 83, 85—87
— — расчет *на* прочность 85, 86
— водобойные 65, 67, 68, 111, 112
— водоприемиого колодца 99
— гасителя ЦНИИСа 106, 109, 111
— падения 107
— раструба повышенной шероховатости 109, 111
— сужения быстротока 41, 46
Степень сжатия 26, 35, 36, 37
Стереофотограмметрический метод 28
Строительный подъем труб 103
Строительство:
геодезические работы 116
общие сведения 116
основные работы 116
подготовительные работы 116
Стройплощадка 117
Ступени *как* шероховатость 21, 22
Стык оголовка 82
Стыки блоков гасителя ЦНИИСа 106
— звеньев 50, 51
— плит 87
Сужение быстротока см. Сопряжение быстротока с трубой

Т

Тело трубы:
гидроизоляция 104
конструкция 101
фундамент 101, 103, 104
Труба длинная 51, 52
— короткая 51, 52
— круглая *с* поперечными ребрами 56—61
— — ступенчатая 52—56,
— — — конструкция 102, 122 (рис. 70), 130 (рис. 71)
Турбулентность 65, 77

У

Угол внутреннего трения грунтов 85
— сужения 32, 34, 35
— — наибольший 40, 41
— фронта волны 23
Удельная энергия 64
— — кинетическая 10
— — потенциальная 10
— — сечения 10 (рис. 2)
Уклон критический 11, 13
— трения 15
Укрепление откоса 85, 113
— русла 65, 113—116
— — бетонными плитами 87, 112, 113, 114 (рис. 66), 115, (рис. 67)
— — монолитным бетоном 87, 112, 113
— — мощением 113, 114
— — типовые конструкции 115
Уравнение Бериулли 14, 15, 66, 67
— Павловского 15
— Чарномского 14
Установка монтажно-транспортная 121

Ф

Формула Гордиенко 21, 57 (рис. 31)
— Мирцхулавы 79
— Павловского 7, 13, 57 (рис. 31)
— Пикалова 52, 56, 57 (рис. 31)
— Студеничникова 78
— Шези 7, 53
Фуидаменты быстротоков 82, 86
— гасителей 106, 107, 109, 119
— оголовков монолитные 119
— стенок 119
— труб 102, 103, 104

Х

Характеристика русла расходная 7
— — скоростная 7, 8

Ч

Число Фруда 11, 15, 27, 30, 31, 39, 72
— — граиичное 30
— — минимальное 35, 37

Ш

Шашки кубические 21, 22,
Швы конструкций 82, 104, 118
Шероховатость песчаная 21
— повышенная 4, 5, 16, 17, 21, 22, 52—62, 104
— — *в* гасителе энергии 109
— — влияние уклоиа 17, 56
— — конструкция 93

Э

Экраны 82, 84

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Глава I. Течение воды в быстротоках 7
Глава II. Гидравлика сопряжений быстротоков с трубами . . . 22
Глава III. Движение воды в трубе 49
Глава IV. Поведение водного потока иа выходе нз трубы и в отводном русле 63
Глава V. Конструкции быстротоков и сопрягающих устройств на входе в трубу 80
Глава VI. Конструкции средней части трубы и отводиое русло . . 101
Глава VII. Особенности строительства косогорных труб . . . 116
Глава VIII. Примеры гидравлического расчета и конструирования труб. 121
Приложение 1. График для определения глубины воды при равномерном движении потока в прямоугольном русле 136
Приложение 2. График для определения расчетной длины кривой спада потока в призматическом русле прямоугольиого сечения . . 136
Приложение 3. График для построения кривой свободной поверхности потока в призматическом русле. 137
Приложение 4. График для определения дальности падения струи. 137
Приложение 5. График для определения глубины потока в сжатом сечении и глубины, сопряженной с ней в руслах прямоугольного сечения 138
Список литературы 139
Предметный указатель 140

Владимир Сергеевич Муромов
Михаил Хаимович Лившиц

Косогориые водопропускиые трубы

Предметный указатель составил *В. С. Муромов*

Редактор *Е. С. Голубкова*

Обложка художника *Н. М. Морозова*

Технический редактор *Л. Е. Войтас*

Корректор *В. Я. Кинареевская*

Сдано в набор 25/XI 1974 г. Подписано к печатн 10/VI 1975 г.
Бумага 60×90¹/₁₆, типографская № 2. Печатных листов 9
Учетно-изд. листов 10,15. Тираж 6000. Т-11402. Изд. № 1-3-1/15 № 4810. Зак. тип. 7337.
Цена 51 коп.
Изд-во «ТРАНСПОРТ», Москва, Басманный туп., 6а

г. Куйбышев, проспект Карла Маркса, 201. Типографня изд-ва «Волжская коммуна».



СКАНИРОВАЛ: Seguille