

Тогда (опуская индекс «т») по (15.24) определяем

$$i_{кр} = \frac{g\chi_{кр}}{\alpha C_{кр}^2 B} = \frac{9,81 \cdot 13,94}{1,1 \cdot 37,38^2 \cdot 13,52} = 0,00658.$$

По приближенной формуле (15.25), считая $B_{кр} \approx \chi_{кр}$, имеем

$$i_{кр} = \frac{g}{\alpha C_{кр}^2} = 0,00638.$$

т. е. получили достаточно близкие значения $i_{кр}$.

Глава 16

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ (КАНАЛАХ)

16.1. Общие сведения. Гидравлически наивыгоднейший профиль

Основные особенности равномерного движения были изложены в гл. 3 и 8. При равномерном движении в открытом русле давление на свободной поверхности по длине не изменяется. Так же постоянно по длине значение скоростного напора $\alpha v^2/2g$. Следовательно, пьезометрический уклон свободной поверхности J_n при равномерном движении равен гидравлическому уклону J , который в свою очередь равен уклону дна i , т. е. $J = J_n = i$.

Равномерное движение характеризуется такими признаками:

- 1) расход постоянен;
- 2) русло призматическое;
- 3) глубина h , а следовательно (с учетом п. 2), форма и площадь живого сечения ω , χ и R постоянны;
- 4) шероховатость смоченной поверхности по длине не изменяется;
- 5) местные сопротивления отсутствуют;
- 6) положительный (прямой) уклон дна $i > 0$ по длине не изменяется.

Условно можно считать, что в призматических каналах указанные условия выполняются. Условность связана с неизбежностью тех или иных местных нарушений равномерности движения (например, вблизи мостов, перегораживающих и других сооружений). Для дальнейшего рассмотрения принимаем, что движение равномерное. Расход при равномерном движении по (15.11)

$$Q = \omega_0 C_0 \sqrt{R_0 i} \quad (16.1)$$

или по (15.12)

$$Q = K_0 \sqrt{i},$$

где $K_0 = \omega_0 c_0 \sqrt{R_0}$ — расходная характеристика при равномерном движении.

Форма поперечного сечения каналов, проложенных в грунтах, может быть различной: трапецеидальной, параболической и полигональной. Сборные железобетонные лотки применяются в основном параболической или сегментной формы. Могут быть и другие формы поперечного сечения каналов.

Площадь всех форм живых сечений, кроме полукруга, для которого $\omega = 0,5 \pi r^2$, зависит от двух или более параметров: для трапеции $\omega = f(b, h, m)$; для параболы $\omega = f(p, h)$; для сегмента с центральным углом φ $\omega = f(\varphi, r)$ и т. д. Поэтому заданную площадь живого сечения данной формы можно получить, используя сколь угодно много различных сочетаний этих параметров. При этом каждый из вариантов будет иметь свои значения гидравлического радиуса R и длины смоченного периметра χ .

Для каналов параболической формы сечения значения параметра параболы p задаются в нормативных документах в зависимости от высоты поперечного сечения лотка $h_{л}$. Например, для железобетонных лотков при $h_{л} = 0,4 \div 0,8$ м рекомендуется $p = 0,2$ м; при $h_{л} = 1,0 \div 1,8$ м значение $p = 0,4$ м и т. д. Для каналов параболического поперечного сечения в земляном русле значения p гораздо больше (см. табл. П.16.1).

Значения коэффициентов откоса m в земляных каналах принимают по нормативным данным или по сведениям об устойчивости откосов существующих каналов в аналогичных гидрогеологических и геологических условиях. При глубине выемки до 5 м и отсутствии данных о каналах-аналогах значения коэффициентов откоса можно принимать по табл. 16.1. Если же глубина выемки превышает 5 м, то для определения значений m следует провести специальные геотехнические расчеты.

В табл. 16.1 первое из значений коэффициента откоса m соответствует расходам Q , меньшим $0,5$ м³, а второе — расходам, большим 10 м³/с.

Таблица 16.1

Грунты	Коэффициент откоса	
	подводного	надводного
Скальный грунт	0—0,5	0—0,25
Полускальный грунт	0,5—1	0,5
Галечник и гравий с песком	1,25—1,5	1
Глина, суглинок тяжелый и средний, торф мощностью до 0,7 м, подстилаемый этими грунтами	1—1,5	0,5—1
Суглинок легкий, супесь, торф мощностью до 0,7 м, подстилаемый этими грунтами	1,25—2	1—1,5
Песок мелкий, торф мощностью до 0,7 м, подстилаемый этим грунтом	1,5—2,5	1—2
Песок пылеватый	3—3,5	2,5
Торф со степенью разложения до 50 %	1,25—1,75	1,25
Торф со степенью разложения более 50 %	1,5—2	1,5

Если найти такой вариант, при котором для неизменяемой $\omega = \text{const}$ смоченный периметр χ будет наименьшим (χ_{min}), то гидравлический радиус $R = \omega/\chi = \text{const}/\chi_{min}$ будет максимально возможным в данных условиях. Следовательно, такой профиль живого сечения с $\omega = \text{const}$ и $R = \text{max}$ пропустит наибольший расход. Гидравлически наивыгоднейшим сечением (профилем) канала называется такое, в котором при заданной площади живого сечения пропускная способность канала будет наибольшей, при этом имеется в виду, что коэффициент шероховатости n и уклон дна i заданы и неизменны.

При гидравлических расчетах каналов рекомендуется использовать значения коэффициентов шероховатости, приведенные в таблицах приложения к гл. 8.

Но чаще гидравлически наивыгоднейший профиль канала определяют как профиль, в котором при данных n и i заданный расход проходит при минимальной площади живого сечения ω .

В земляных каналах минимизация ω приводит к уменьшениям выемки грунта, т. е. к экономии затрат. При наименьшей длине смоченного периметра возможно уменьшение объемов работ и материалов на укрепление откосов и дна. Кроме того, при χ_{min} снижаются и возможные потери на фильтрацию через борта и дно канала.

Обязательно надо учитывать, что проектировать гидравлически наивыгоднейший профиль можно только при условии, если параметры, от которых зависит площадь живого сечения ω , заранее не заданы. Если заданы глубина h или другой геометрический размер, то выбор вариантов невозможен и остальные параметры определяются однозначно из формулы Шези.

Для определения значений относительной ширины по дну канала трапециевидальной формы сечения β , при которых смоченный периметр будет минимальным (что при данном значении площади живого сечения ω приводит к максимальному гидравлическому радиусу R), выполним следующий анализ.

Учитывая, что $\beta = \frac{b}{h}$ или $b = \beta h$, имеем

$$\omega = h^2(\beta + m); \quad \chi = h(\beta + 2\sqrt{1 + m^2}) = h(\beta + m').$$

Так как в данном случае $\omega = \text{const}$, то $d\omega = h^2 d\beta + 2(\beta + m)hdh = 0$. Приравнявая нулю первую производную $d\chi = h d\beta + (\beta + m') dh = 0$, найдем

$$d\beta = -\frac{\beta + m'}{h} dh.$$

Подставив найденное значение $d\beta$ в выражение для $d\omega$, получим для трапециевидального гидравлически наивыгоднейшего профиля

$$\beta_{г.н} = 2(\sqrt{1 + m^2} - m), \quad (16.2)$$

при этом $h/R_{г.н} = 2$.

Таблица 16.2

m	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	4
$\beta_{г.н}$	2	1,56	1,236	1	0,828	0,606	0,472	0,385	0,325	0,246

Таблица 16.3

Расчетный ход	Определяющие параметры	Расчетные элементы конструкций каналов
Максимальный	Наибольшая ордината графика водоподачи	Гидравлические элементы сечения
Минимальный	Наименьшая ордината графика водоподачи	Проверка уровней воды, обеспечивающих водозабор и независимость; местоположение подпорных сооружений
Форсированный	Максимальный расход, увеличенный на коэффициент форсировки	Превышение дамб и бровок берм над уровнем воды в канале; проверка неразмываемости

Таким образом, чтобы получить гидравлически наиболее выгодный профиль трапециевидного канала, необходимо запроектировать трапецию с соотношением ширины по дну к глубине, равным $\beta_{г.н}$ по (16.2). Значения $\beta_{г.н}$ приведены в табл. 16.2 и на рис. 16.1.

Таким образом, каналы гидравлически наиболее выгодного профиля представлены относительно узкими и глубокими. Для прямоугольного гидравлически наиболее выгодного профиля, т. е. $m = 0$, $(h/b)_{г.н} = 0,5$, а для трапециевидного профиля относительная глубина по табл. 16.2 изменяется в пределах $(h/b)_{г.н} = 0,64 \div 4,06$ при увеличении m от 0,25 до 4,0. Для параболического русла гидравлически наиболее выгодного профиля относительная глубина $\tau_{г.н} = (h/p)_{г.н} = 1,8856$.

В связи с этим крупные каналы не проектируют с гидравлически наиболее выгодным профилем. Малые каналы, особенно мелиоративные, целесообразно проектировать с гидравлически наиболее выгодным профилем (сечением) или с профилем, близким к гид-

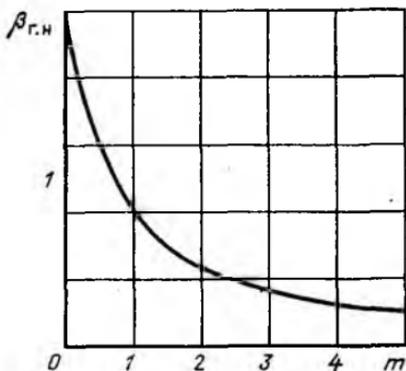


Рис. 16.1

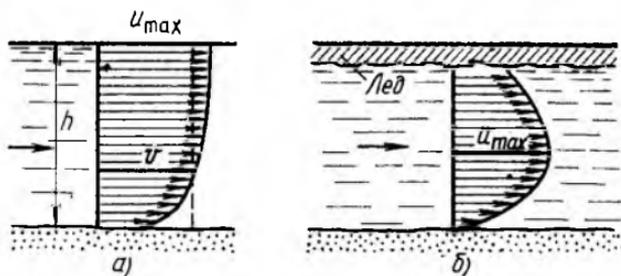


Рис. 16.2

равлически наивыгоднейшему. Этот вопрос будет рассмотрен в § 16.8.

При гидравлических расчетах каналов на оросительных системах расчетные расходы принимаются согласно табл. 16.3.

При этом значения коэффициента форсировки $k_{\text{форс}}$ зависят от расхода воды Q (табл. 16.4).

При проектировании каналов следует учитывать, что верх дамб и бровки берм каналов должны располагаться выше максимального уровня воды в канале на определенное значение Δh , которое также зависит от расхода (табл. П.16.2).

Таблица 16.4

Q , м ³ /с	Менее 1	1—10	10—50	50—100	Более 100
$k_{\text{форс}}$	1,2	1,15	1,1	1,05	1

16.2. Распределение осредненных и пульсационных скоростей в безнапорных (открытых) потоках

Распределение осредненных скоростей. Для открытых достаточно широких потоков распределение осредненных скоростей (рис. 16.2, а), начиная с некоторого расстояния от стенки, хорошо описывается формулами логарифмического закона.

Относительный дефицит местной скорости от максимальной в открытых руслах с учетом (8.24)

$$\frac{u_{\text{max}} - u}{u_*} = \frac{2,3}{\kappa} \lg \frac{h}{z}. \quad (16.3)$$

Относительный дефицит средней скорости от максимальной, как и в трубах, постоянен для данных условий:

$$\frac{u_{\text{max}} - v}{u_*} = \frac{1}{\kappa}.$$

Для открытого плоского потока можно также аналитически (см. § 8.5) получить $z_v \approx 0,4 h$, где h — глубина.

Для лабораторных лотков и каналов с жесткими стенками коэффициент $\kappa = 0,34 \div 0,4$ (см. § 8.4); для рек $\kappa \approx 0,1 \div 1,3$; для земляных размываемых каналов $\kappa \approx 0,2 \div 0,6$.

Схематизация, принятая при определении z_0 и интегрировании, конечно, не может соответствовать всему многообразию условий в естественных (реки) и искусственных (каналы) водотоках. Поэтому исследования, особенно проводимые в натуральных условиях, позволяют получить некоторые уточнения.

На распределение осредненных скоростей в натуральных условиях влияют многочисленные факторы. В ряде случаев максимальная скорость наблюдается в местах, несколько заглубленных под поверхностью. Так, максимум скорости под ледяным покровом находится в толще потока (рис. 16.2, б). При этом местоположение на вертикали точки, где наблюдается u_{max} , зависит от соотношения шероховатости дна и нижней поверхности льда.

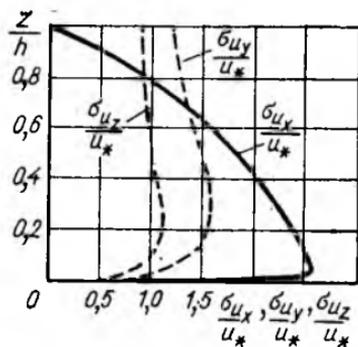


Рис. 16.3

При грядовой форме дна эпюры скоростей, измеренных в различных створах гряд (рис. 8.6) (на гребне, в подвалье и т. п.), могут различаться.

На распределение осредненных скоростей оказывает влияние ветер (при встречном ветре, например, поверхностные слои затормаживаются и скорость в них может значительно уменьшиться), что приводит к переформированию эпюры.

Распределение скоростей по вертикали также зависит от относительной ширины русла и размещения створа, где измеряются скорости, по отношению к стенкам русла.

В широких руслах распределение скоростей на осевой вертикали можно считать не зависящим от влияния стенок.

В узких руслах максимум скорости обычно наблюдается не на поверхности открытого потока.

При наличии в потоке взвешенных наносов форма эпюры скоростей также изменяется: чем выше содержание наносов, тем эпюра скоростей получается менее «полной».

Коэффициент кинетической энергии. Изменение коэффициентов α с изменением λ или C для каналов подчиняется другим зависимостям, чем для напорных труб. Натурные исследования, проведенные на больших каналах Средней Азии, проложенных в песчаных грунтах, показали, что при $\lambda = 0,02 \div 0,087$ коэффициент $\alpha \approx 1,2 + 0,7 \lambda$.

Распределение пульсационных составляющих скоростей. В открытых потоках распределение по вертикали пульсационных составляющих скорости неодинаково (рис. 16.3). Все три пульсационные составляющие скорости, характеризующиеся среднеквадратичными отклонениями, отнесенными к динамической скорости (см. гл. 6), имеют в придонной области максимум, а затем по мере приближения к дну уменьшаются. Вблизи дна и берегов интенсивность продольных пульсаций больше, чем на оси потока.

Касательные напряжения. В открытых потоках максимальные значения касательного напряжения τ наблюдаются на уровне вершин выступов шероховатости. Затем τ убывает и по направлению к дну, и по нормали к нему.

Влияние ветра сказывается и на кинематике потока, на гидравлическом уклоне, на возникающих на поверхности воды касательных напряжениях, на пропускной способности. Это влияние различно при разных направлениях ветра. При попутном ветре уклон водной поверхности уменьшается, поверхностная скорость в потоке растет, а придонная уменьшается. Высота волн (а значит, и шероховатость водной поверхности) и их длина уменьшаются при попутном ветре. Например, при направлении ветра, совпадающем с направлением течения (попутный ветер), высота ветровых волн

в несколько (примерно 3—5) раз меньше, чем при встречном ветре. Пропускная способность (расход воды) при попутном ветре растет.

Тенденции изменения всех указанных параметров при встречном направлении ветра (по отношению к направлению движения воды) противоположны. При попутном ветре касательное напряжение на водной поверхности меньше, чем при встречном направлении ветра.

На незащищенных участках земляных каналов ветровые волны способствуют усилению размыва и повышению концентрации взвешенных наносов в потоке вблизи линии уреза. В целом встречное направление ветра больше влияет на поток воды в канале, чем попутное.

16.3. Коэффициенты Шези

Область сопротивления. В каналах, как проходящих в земляном русле, так и в бетонных, может наблюдаться не только квадратичная область сопротивления, но и переходная область. Однако в этих случаях применение формул для коэффициента Шези, предложенных для квадратичной области, не приводит к особым погрешностям.

В то же время во многих натуральных исследованиях экспериментально подтверждается, что при достаточно больших Re коэффициент λ не зависит от Re , т. е. наблюдается автомодельность по числу Re (движение происходит в квадратичной области сопротивления).

Неоднородная шероховатость по периметру русла (канала) встречается довольно часто. Так, откосы канала могут быть укреплены бетонной одеждой или каменной наброской, а дно может быть грунтовым. Русло может иметь неоднородную шероховатость по периметру при наличии ледяного покрова, шероховатость нижней поверхности которого отличается от шероховатости откосов и дна канала. Могут быть и другие случаи, в которых шероховатость по периметру неодинакова.

При наличии неоднородной шероховатости по периметру канала расчет коэффициента Шези обычно проводится по известным формулам (8.49), (8.51) с введением в них так называемого приведенного коэффициента шероховатости $n_{пр}$. Для его определения существует несколько формул, дающих приблизительно одинаковые численные результаты. Если известны части смоченного периметра с различной шероховатостью (сюда в общем случае включается и ледяной покров), например χ_1 , χ_2 и χ_3 , и соответственно коэффициенты шероховатости для этих частей периметра n_1 , n_2 и n_3 , приведенный коэффициент шероховатости можно вычислить по формуле Павловского

$$n_{пр} = \sqrt{\frac{\chi_1 n_1^2 + \chi_2 n_2^2 + \chi_3 n_3^2}{\chi_1 + \chi_2 + \chi_3}}$$

Деформируемые русла. В земляных руслах, подверженных деформациям, кроме шероховатости частиц, слагающих русло и оцениваемых высотой выступа Δ , в гидравлических сопротивлениях учитываются и русловые образования различного характера. К ним относятся излучины, плесы и перекаты и другие крупные образования, характеризующие русловой процесс в реках и каналах.

Конечно, не все виды указанных крупных образований могут образоваться в данном водотоке. Условия их возникновения и существования рассматриваются в речной гидравлике и теории руслового процесса.

Элементами рельефа деформируемых водотоков являются рифели (более мелкие формы донного рельефа), гряды (более крупные) (см. рис. 8.6) и др. Коэффициент Дарси представляют в виде суммы коэффициента λ_Δ , отражающего зернистую шероховатость, и λ_ϕ , зависящего от донных форм рельефа:

$$\lambda = \lambda_\Delta + \lambda_\phi.$$

При необходимости добавляются члены, отражающие влияние растительности, а также ледяного покрова, и другие параметры.

Очевидно, что

$$1/C^2 = (1/C_{\Delta}^2) + (1/C_{\Phi}^2).$$

Коэффициент λ_{Δ} помимо уже известных из (7.16) параметров зависит от относительной гладкости в виде относительной глубины h/Δ , неоднородности грунтового материала, которая оценивается отношением диаметров частиц в выбранных характерных зернах одного размера, и от других факторов. Коэффициент λ_{Φ} (или C_{Φ}) чаще всего представляют в виде функции относительных параметров h/h_r , l_r/h_r и др. (h — глубина потока, h_r и l_r — высота и длина гряд). При этом коэффициент Шези увеличивается с увеличением относительной гладкости и относительной длины гряды.

Как уже указывалось в § 8.6, статистические параметры полнее всего оценивают шероховатость.

Ниже приводится формула (Д. В. Штеренлихт, А. П. Поладзаде) для коэффициента Шези, полученная по данным натурных исследований крупных каналов, проходящих в песчаных грунтах:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6,18 \lg \left[0,183 \left(\frac{R}{h_{r.сп}} \right) \left(\frac{l_{r.сп}}{h_{r.сп}} \right) \right],$$

где $h_{r.сп}$ и $l_{r.сп}$ — высота и длина гряд, определенные на основе статистического (в данном случае спектрального) анализа.

Заращение водотока. В каналах и реках при благоприятных температурных условиях может происходить заращение дна и откосов. Это приводит к уменьшению живого сечения и повышению шероховатости границ потока. В результате при неизменности перепада напоров происходит уменьшение скоростей движения воды и расхода. Увеличиваются потери воды на испарение и фильтрацию через дно и откосы канала, вследствие чего может начаться выпадение взвешенных в воде частиц наносов, т. е. заиление.

Заращение может охватить часть живого сечения или даже все живое сечение. Если растительность своевременно не удалить, пропускная способность канала снижается, а если подавать постоянный расход, глубины потока в зарастающем русле увеличиваются.

К зарастающим обычно относятся также поймы рек. При некоторых схемах поверхностных поливов сплошной травяной покров также может находиться на дне. Как показывают натурные и лабораторные исследования, наличие растительности сказывается на форме эпюры скорости (часто точка с максимальной скоростью располагается ниже свободной поверхности).

Наблюдаются случаи движения, при котором в заросшем водотоке потери напора по длине $h_{дл}$ пропорциональны первой степени средней скорости:

$$\lambda = 7500/Re + 110\,000/Re,$$

имеются и предложения (А. Д. Асанова) по трехчленной зависимости

$$\lambda = \lambda_0 + (a/Re) + (b/Re^2),$$

где λ_0 — коэффициент Дарси в незаросшем русле в данных условиях; a и b — коэффициенты.

В большинстве исследований заросших русл квадратичная область не зафиксирована.

Укажем, что коэффициенты λ (или C) в рассматриваемых условиях зависят от вида растений, соотношения высоты растений и глубины, от отношения части площади живого сечения, занятой растительностью, ко всей площади живого сечения, от гибкости растений, количества растений на единице

площади дна и откосов, числа Re , подсчитанного по диаметру стеблей, от критериев, характеризующих поток в канале, и ряда других факторов.

Влияние формы живого сечения. Гидравлический радиус в качестве характерного линейного размера в формулах для коэффициента Шези не является достаточно точным решением для всех форм живого сечения русла. На значения коэффициента Шези влияет и форма сечения, что проявляется тем сильнее, чем выше относительная шероховатость.

При прочих равных условиях наибольший коэффициент Шези имеют русла с криволинейной формой. Значения коэффициента Шези уменьшаются от треугольного к прямоугольному живому сечению.

Разность значений коэффициента Шези для различных форм живого сечения может доходить по лабораторным данным максимально до 15 %.

Влияние формы живого сечения на коэффициенты Шези — один из вопросов, подлежащих дальнейшему изучению. Пока же в расчетах применяют обычные формы для коэффициента Шези без учета влияния формы живого сечения.

В расчетной практике отмеченные особенности потоков в деформируемых земляных руслах суммарно учитывают по коэффициентам шероховатости n . Принятые значения коэффициентов n при расчетах земляных русл могут быть не совсем точными, что зависит от полноты исходных данных. Целесообразно переходить к расчету коэффициентов Шези, при котором будут использоваться только объективно определяемые параметры шероховатости.

Анализ натуральных материалов, полученных на реках и крупных каналах в диапазоне изменения гидравлического радиуса от 2 до 5 м (каналы) и от 3 до 20 м (реки), позволил в дополнение к (8.46) предложить уточненную формулу для коэффициента Шези, отвечающую указанным натурным данным:

$$C = \frac{1}{n} + \frac{0,42 + 0,003R}{n} \lg R,$$

или в среднем

$$C = \frac{1}{n} + \frac{0,45}{n} \lg R.$$

16.4. Допускаемые скорости движения воды в каналах

В настоящее время для гидравлических расчетов каналов применяют различные методы: метод допускаемых скоростей, влекущей силы, режимной теории, морфометрических зависимостей, а также комбинированные методы.

В большинстве случаев применяется метод допускаемых скоростей. Согласно методу допускаемых скоростей для обеспечения высокой надежности каналов необходимо принимать такое расчетное значение средней скорости v , при котором в канале не будет происходить ни размыв, ни заиление. При недопустимо высоких значениях скорости ($v > v_{\text{доп}}$) борта и дно могут подвергаться разрушению (это касается и каналов с жесткими одеждами) и размыву. При недопустимо малых скоростях ($v < v_{\text{нез}}$) в канале могут выпадать взвешенные в воде наносы и канал будет постепенно заиляться. Заиление может происходить не только в земляных, но и в бетонных каналах.

Под допускаемой неразмывающей средней скоростью $v_{\text{доп}}$ понимается наибольшее значение средней скорости движения воды, при которой поток не может вызвать недопустимого для нормальной эксплуатации размыва (разрушения) русла.

За незаилающую скорость $v_{\text{нез}}$ принимается наименьшее значение средней скорости движения, при которой поток способен транспортировать без осаждения находящиеся в нем наносы.

Как размыв, так и заиление нарушают нормальную работу каналов.

Существует весьма большое число формул как для $v_{\text{доп}}$, так и для $v_{\text{нез}}$. Имеются и ведомственные нормативы, отражающие специфику работы сооружений разного назначения.

Значения допускаемой неразмывающей скорости (средней $v_{\text{доп}}$ и придонной $u_{\Delta \text{ доп}}$ на уровне выступов шероховатости) принимаются в соответствии с результатами исследований, которые выполнил акад. Ц. Е. Мирцхулава.

Допускаемые скорости определены при логарифмическом распределении осредненных скоростей по вертикали. Принято, что высота выступа шероховатости для однородных грунтов $\Delta = 0,7 d$ [d — средний размер частиц несвязного или агрегатов (отдельно-стей) связного грунта], для неоднородного грунта $\Delta = 0,7 d_{95}$.

Рассмотрим сначала несвязные грунты. Несвязный грунт считается однородным, если $d_{95}/d_5 \leq 5$, где d_5 и d_{95} — диаметр частиц, меньше которых в данном грунте содержится по массе соответственно 5 % и 95 %.

Для однородных несвязных грунтов при глубине h

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{доп}} &= \lg \frac{8,8h}{d} \sqrt{\frac{2m}{0,44\rho n} [g(\rho_{\text{гр}} - \rho) d + 2C_{\text{ун}}^n k]} ; \\ u_{\Delta \text{ доп}} &= 1,25 \sqrt{\frac{2m}{0,44\rho n} [g(\rho_{\text{гр}} - \rho) d + 2C_{\text{ун}}^n k]} , \end{aligned} \right\} (16.4)$$

где $v_{\text{доп}}$ — средняя по сечению допускаемая неразмывающая скорость потока, м/с; $u_{\Delta \text{ доп}}$ — допускаемая неразмывающая придонная скорость потока на высоте выступов шероховатости Δ , м/с; $\rho_{\text{гр}}$, ρ — плотность материала частиц грунта и воды, кг/м³; d — средний (средневзвешенный) диаметр частиц грунта, м; $C_{\text{ун}}^n$ — усталостная прочность на разрыв несвязного грунта, Па, этим параметром учитывается появление ощутимых сил сцепления при мелкозернистости грунта (при $d < 0,25$ мм); m — коэффициент условий работы, учитывающий (для каналов, устраиваемых в несвязных грунтах) влияние наносов в коллоидном состоянии на размывающую способность потока; при содержании в воде глинистых частиц менее 0,1 кг/м³ коэффициент $m = 1$, при наличии в воде этих частиц

0,1 кг/м³ и более $m > 1$; n — коэффициент перегрузки, учитывающий изменение размывающей способности потока под влиянием пульсационного характера скоростей и другие случаи вероятного превышения нагрузок на частицы грунта над расчетными значениями; k — коэффициент, характеризующий вероятность отклонения сил сцепления от среднего значения, его можно принять равным $k = 0,5$.

Усталостная прочность на разрыв несвязного грунта приближенно определяется по формуле $C_{\text{ун}}^n = 1,72 \cdot 10^{-4} d^{-1}$, где d — в м, $C_{\text{ун}}^n$ — в Па.

Коэффициент перегрузки равен

$$n = (u_{\Delta \text{макс}} / \bar{u}_{\Delta})^2,$$

где u_{Δ} и \bar{u}_{Δ} — максимальная мгновенная и осредненная (по времени) придонная скорость на высоте выступов шероховатости. При $d < 0,001$ м можно n определять по приближенной формуле

$$n = 1 + \frac{d}{0,00005 + 0,3d}, \quad (16.5)$$

где d — в метрах.

При $d > 0,001$ м коэффициент перегрузки $n = 4$.

Значения $v_{\text{доп}}$ и $u_{\Delta \text{доп}}$, подсчитанные по (16.4) для потоков, свободных от наносов, для однородных несвязных грунтов при $\rho_{\text{гр}} = 2650$ кг/м³, $m = 1$ приведены в табл. 16.5.

Если несвязные грунты неоднородны, при определенных условиях учитывают возможное при их размыве явление естественной отмытки (самоотмытки) русла канала крупными фракциями грунта. При этом, если допустить незначительный размыв русла канала в начальный период его эксплуатации, более крупные фракции грунта покроют (отмытят) поверхность русла. Вследствие этого допускаемая неразмывающая скорость увеличивается, так как она будет определяться не для среднего диаметра частиц, а для среднего диаметра частиц отмытки $d_{\text{отм}}$. Значение допускаемой глубины размыва здесь ограничивают 5 % глубины потока, т. е. $h_{\text{доп}} \leq 0,05 h$.

Значения допускаемых неразмывающих средних скоростей потока $v_{\text{доп}}$, м/с, для неоднородных по крупности грунтов при допускаемой глубине размыва $h_{\text{доп}} = 0,05 h$ приведены в табл. 16.6. Неоднородность частиц грунта оценена коэффициентом неоднородности $k = d_{\text{ср}}/d_{95}$, где d_{95} — средний размер частиц, мельче которых в данном грунте содержится 95 % (по массе).

Если необходимо рассчитать крепление русла каменной наброской, средний размер (диаметр) устойчивого камня (грунта) определяется из (16.4).

Таблица 16.5

Средний размер частиц грунта d , мм	Допускаемые неразмыывающие донные скорости на высоте выступов шероховатости $u_{\Delta\text{доп}}$, м/с	Допускаемые неразмыывающие средние скорости $v_{\text{доп}}$, м/с, при глубине потока h , м			
		0,5	1	3	5
0,05	0,13	0,52	0,55	0,6	0,62
0,15	0,1	0,36	0,38	0,42	0,44
0,25	0,11	0,37	0,39	0,41	0,45
0,37	0,12	0,38	0,41	0,46	0,48
0,5	0,13	0,41	0,44	0,5	0,52
0,75	0,16	0,47	0,51	0,57	0,59
1	0,17	0,51	0,55	0,62	0,65
2	0,24	0,64	0,7	0,79	0,83
2,5	0,27	0,69	0,75	0,86	0,9
3	0,29	0,73	0,8	0,91	0,96
5	0,37	0,87	0,96	1,1	1,17
10	0,52	1,1	1,23	1,42	1,51
15	0,64	1,26	1,42	1,65	1,76
20	0,73	1,37	1,55	1,84	1,96
25	0,82	1,48	1,65	1,98	2,12
30	0,89	1,56	1,76	2,1	2,26
40	1,03	1,68	1,93	2,32	2,5
75	1,42	2,01	2,35	2,89	3,14
100	1,63	2,15	2,54	3,14	3,46
150	2	2,35	2,84	3,62	3,96
200	2,31	2,47	3,03	3,92	4,31
300	2,82	2,9	3,32	4,4	4,94

Для связных грунтов (глины, суглинки, супеси) допускаемые неразмыывающие скорости находят по формулам, предложенным Ц. Е. Мирцхулава:

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{доп}} &= \left(\lg \frac{8,8h}{d} \right) \sqrt{\frac{2m}{2,6\rho n} [g(\rho_{\text{гр}} - \rho)d + 1,25C_y^H k]} ; \\ u_{\Delta\text{доп}} &= 1,25 \sqrt{\frac{2m}{2,6\rho n} [g(\rho_{\text{гр}} - \rho)d + 1,25C_y^H k]} , \end{aligned} \right\} (16.6)$$

где C_y^H — нормативная усталостная прочность на разрыв связного грунта, Па; d — средний размер агрегатов (отрывающихся отдельностей) грунта, приведенный к диаметру равнообъемного шара, м; m — коэффициент условий работы; k — коэффициент однородности связных грунтов, характеризующий вероятность отклонения показателей сцепления от их средних значений в неблагоприятную сторону по сравнению с нормативной. При отсутствии данных по испытанию грунтов $k = 0,5$; n — коэффициент перегрузки, определяется по формуле (16.5); при отсутствии данных специальных исследований пульсации скоростей для потоков с вполне развившейся турбулентностью принимают $n = 4$.

$v_{\text{доп}}$, м/с, для неоднородных несвязных грунтов при $h_{\text{доп}} \leq 0,05 h$

$d_{\text{ср}}$, мм	$k = \frac{d_{\text{ср}}}{d_{95}} = 0,5$				$k = \frac{d_{\text{ср}}}{d_{95}} = 0,3$				$k = \frac{d_{\text{ср}}}{d_{95}} = 0,2$			
	$h = 0,5$ м	$h = 1$ м	$h = 3$ м	$h = 5$ м	$h = 0,5$ м	$h = 1$ м	$h = 3$ м	$h = 5$ м	$h = 0,5$ м	$h = 1$ м	$h = 3$ м	$h = 5$ м
	0,25	0,44	0,47	0,52	0,55	0,53	0,58	0,64	0,68	0,62	0,67	0,76
0,37	0,48	0,52	0,58	0,61	0,59	0,64	0,72	0,75	0,65	0,75	0,84	0,89
0,50	0,53	0,57	0,64	0,67	0,63	0,70	0,79	0,83	0,67	0,81	0,92	0,97
0,75	0,59	0,65	0,73	0,77	0,68	0,79	0,89	0,94	0,70	0,87	1,05	1,11
1,0	0,63	0,70	0,79	0,83	0,71	0,83	0,96	1,02	0,70	0,89	1,13	1,20
2,0	0,79	0,89	1,04	1,10	0,83	1,01	1,26	1,34	0,76	0,99	1,41	1,56
2,5	0,84	0,96	1,13	1,20	0,87	1,06	1,36	1,46	0,78	1,02	1,46	1,70
3,0	0,88	1,02	1,21	1,28	0,90	1,11	1,44	1,56	0,80	1,04	1,54	1,78
5,0	1,01	1,18	1,45	1,56	0,98	1,23	1,67	1,86	1,86	1,11	1,68	1,98
10	1,18	1,42	1,82	2,00	1,10	1,39	1,97	2,26	0,95	1,21	1,83	2,22
15	1,29	1,57	2,05	2,28	1,17	1,48	2,13	2,48	1,02	1,29	1,92	2,34
20	1,38	1,68	2,22	2,48	1,23	1,55	2,24	2,64	1,07	1,35	1,99	2,42
25	1,44	1,76	2,36	2,65	1,28	1,61	2,33	2,75	1,11	1,40	2,05	2,48
30	1,50	1,83	2,47	2,79	1,32	1,66	2,40	2,84	1,15	1,44	2,10	2,54
40	1,59	1,95	2,64	3,01	1,39	1,74	2,52	2,99	1,20	1,52	2,19	2,63
75	1,79	2,22	3,05	3,51	1,51	1,94	2,79	3,31	1,28	1,68	2,43	2,88
100	1,87	2,35	3,24	3,75	1,56	2,02	2,93	3,48	1,30	1,74	2,55	3,02
150	1,98	2,52	3,54	4,09	1,60	2,14	3,14	3,71				

Нормативная усталостная прочность на разрыв находится в зависимости от нормативного удельного сцепления грунта C^H по формуле

$$C_y^H = 0,035C^H.$$

За нормативное удельное сцепление грунта C^H принимается среднее значение сцепления поверхностного слоя грунта в состоянии капиллярного водонасыщения при полной влагоемкости, полученное по данным испытаний путем вдавливания сферического штампа, проведенных непосредственно на трассе проектируемого канала на отобранных на трассе образцах грунтов.

Значения нормативного удельного сцепления можно принимать по нормативам (см. табл. П.16.3).

Произведение нормативного удельного сцепления C^H на коэффициент однородности грунта k принимают в качестве расчетного удельного сцепления

$$C_{\text{расч}} = C^H k,$$

в зависимости от которого устанавливают допускаемую неразрывающую скорость потока по табл. 16.3, составленной по (16.6) при $\rho_r = 2650 \text{ кг/м}^2$, $m = 1$, $d = 4 \text{ мм}$, $\Delta = 2,8 \text{ мм}$.

Найденные по (16.6) значения приведены в табл. 16.7.

Т а б л и ц а 16.7

Расчетное сцепление $C_{\text{расч}}$ 10^5 Па	Допускаемые неразрывающие придонные скорости на высоте выступов эквивалентной шероховатости $u_{\Delta \text{ доп}}$	Допускаемые неразрывающие средние скорости $u_{\text{доп}}$, м/с, при глубине потока h , м			
		0,5	1	3	5
0,005	0,16	0,39	0,43	0,49	0,52
0,01	0,18	0,44	0,48	0,55	0,58
0,02	0,21	0,52	0,57	0,65	0,69
0,03	0,24	0,59	0,64	0,74	0,78
0,04	0,27	0,65	0,71	0,81	0,86
0,05	0,29	0,71	0,77	0,89	0,98
0,075	0,34	0,83	0,91	1,04	1,1
0,1	0,39	0,96	1,04	1,2	1,27
0,125	0,42	1,03	1,13	1,3	1,37
0,15	0,46	1,13	1,23	1,41	1,49
0,175	0,5	1,21	1,33	1,52	1,6
0,2	0,53	1,28	1,4	1,6	1,69
0,225	0,56	1,36	1,48	1,7	1,8
0,25	0,58	1,42	1,55	1,78	1,88
0,3	0,63	1,54	1,69	1,94	1,04
0,35	0,69	1,67	1,83	2,09	2,21
0,4	0,74	1,79	1,96	2,25	2,38
0,45	0,77	1,88	2,06	2,35	2,49
0,5	0,82	1,99	2,17	2,5	2,63
0,6	0,89	2,16	2,38	2,72	2,88

Таблица 16.8

Грунт. условия работы канала	Значения коэффициентов m для		
	магистральных каналов	водохозяйствен- ных распределителей	хозяйственных распределителей
Песок:			
мелкий и средней крупности	1,3	1,4	1,5
крупный и гравелистый	1,5	1,6	1,7
Гравий:			
мелкий	1,5	1,6	1,7
средней крупности	1,4	1,5	1,6
крупный	1,2	1,3	1,4
галька	1,1	1,2	1,3
Глинистые грунты:			
при содержании в потоке глинистых частиц менее 0,1 кг/м ³	1	1	1
то же более 0,1 кг/м ³ при донных корродиру- ющих наносах	1,3 0,75	1,4 0,8	1,6 0,85
Дно и откосы покрыты расти- тельностью	1,1	1,15	1,2
При длительных перерывах работы каналов:			
для районов недостаточ- ного увлажнения	0,2	0,22	0,25
для районов с влажным климатом	0,6	0,7	0,8

Значения коэффициента условий работы m , учитывающего влияние ряда факторов на $v_{\text{доп}}$ и $u_{\text{доп}}$, приведены в табл. 16.8.

Если $m \neq 1$, то значения допускаемых неразмывающих скоростей, найденные по табл. 16.5 и 16.7, следует умножить на \sqrt{m} .

Допускаемые неразмывающие скорости для связных засоленных грунтов значительно ниже, чем для незасоленных при тех же значениях $S_{\text{расч}}$. В табл. 16.9 приведены значения допускаемых неразмывающих средних скоростей потока для связных соленых грунтов при содержании легкорастворимых солей 0,2—0,3 % массы грунта.

Допускаемые неразмывающие средние скорости потока для каналов, проходящих в торфяных грунтах, зависят от свойств грунта. Значения этих скоростей (при $R = 1$ м) даны в табл. 16.10.

В практике проектирования и эксплуатации каналов с креплениями большое значение имеет правильное определение допускаемых скоростей. Значения допускаемых средних скоростей, м/с, потока для каналов с монолитными бетонными, сборными железобетонными и асфальтобетонными облицовками приведены в табл. 16.11.

Все приведенные выше для каналов в неукрепленных руслах зависимости и табличные данные рекомендуется применять при расходах в канале не более 50 м³/с. При больших расходах допускаемые скорости принимают по данным работы каналов-аналогов или по данным специально проводимых исследований.

Таблица 16.9

Расчетное сцепление $C_{расч}$ 10^3 Па	Допускаемые неразмывающие средние скорости $v_{доп}$, м/с, при глубине потока, м			
	0,5	1	3	5
0,005	0,36	0,4	0,46	0,49
0,01	0,39	0,43	0,49	0,52
0,02	0,41	0,45	0,52	0,55
0,03	0,43	0,48	0,55	0,59
0,04	0,46	0,51	0,58	0,62
0,05	0,48	0,53	0,61	0,65
0,075	0,51	0,56	0,64	0,69
0,1	0,55	0,61	0,7	0,75
0,125	0,6	0,67	0,76	0,81
0,15	0,65	0,72	0,82	0,88
0,175	0,7	0,77	0,89	0,94
0,2	0,75	0,82	0,93	1
0,225	0,8	0,88	1	1,07
0,25	0,82	0,91	1,04	1,1
0,3	0,9	0,99	1,12	1,2
0,35	0,97	1,06	1,22	1,3
0,4	1,03	1,15	1,31	1,4
0,5	1,26	1,28	1,46	1,56
0,6	1,27	1,38	1,6	1,7

Таблица 16.10

Вид торфа	Допускаемые неразмывающие средние скорости, м/с
Древесный	0,4
Хвоцевой	0,8
Осок-гипновый хорошо разложившийся (более 55 %)	0,6
Осок-гипновый слабо разложившийся (до 35 %)	0,9
Сфагновый хорошо разложившийся (более 55 %)	0,7
Сфагновый слабо разложившийся (до 35 %)	1,2

Примечание. При других значениях гидравлического радиуса приведенные в табл. 16.10 значения $v_{доп}$ умножаются на $R^{0,667}$.

Незаиляющие скорости. Средняя незаиляющая скорость $v_{нез}$ соответствует состоянию, когда мутность потока или концентрация взвешенных наносов ρ_n (т. е. содержание наносов в единице объема воды) равна его транспортирующей способности ρ_t . Транспортирующая способность потока — то максимальное количество взвешенных наносов, содержащихся в единице объема воды, которое поток способен транспортировать без их осаждения.

Таблица 16.11

Проектная марка (класс) материала облицовки по прочности	Глубина потока, м			
	0,5	1	3	5
50 (B3,5)	9,6	10,6	12,3	13
75 (B5)	11,2	12,4	14,3	15,2
100 (B7,5)	12,5	13,8	16	17
150 (B10)	14	15,6	18	19,1
200 (B15)	15,6	17,3	20	21,2
300 (B22,5)	19,2	21,2	24,6	26,1

Приведем формулы для ρ_{τ} , предложенные Е. А. Замариным для водотоков, где мутность ρ_n не превышает 5—6 кг/м³. Г и д - рав л и ч е с к о й к р у п н о с т ь ю н а н о с о в ω называется скорость равномерного падения частицы наносов в неподвижной воде.

По Е. А. Замарину:
при $0,0004 < \omega < 0,002$ м/с

$$\rho_{\tau} = 11v \sqrt{\frac{v}{\omega}} \sqrt{Ri}; \quad (16.7)$$

при $0,002 < \omega < 0,008$ м/с

$$\rho_{\tau} = 0,022 (v/\omega)^{3/2} \sqrt{Ri}. \quad (16.8)$$

Гидравлическая крупность зависит от размера и формы частиц наносов и от кинематической вязкости воды (см. гл. 20). При расчетах обычно принимают ω как средневзвешенное значение гидравлических крупностей для каждой из фракций.

От формул (16.7) и (16.8) можно перейти к определению выражений для незаиляющей (средней по живому сечению) скорости $v_{нез}$.

Записав по формуле Шези $v_{нез} = (C \sqrt{R})_{нез} \sqrt{i}$, получим для случаев, когда гидравлическая крупность находится в пределах $0,0004 < \omega < 0,002$ м/с:

$$\omega \rho^2 = 121v_{нез}^3 Ri,$$

отсюда

$$(C^{0,6} \sqrt{R})_{нез} \sqrt{i} = 0,383\rho^{0,4} \omega^{0,2}. \quad (16.7a)$$

Для тех случаев, когда $0,002 < \omega < 0,008$ м/с,

$$(C^{0,6} \sqrt{R})_{нез} \sqrt{i} = 4,6\rho^{0,4} \omega^{0,6}. \quad (16.8a)$$

Значение выражения $C^{0,6} \sqrt{R}$ при данном значении коэффициента шероховатости зависит только от гидравлического радиуса.

Обозначим $(C \sqrt{R})_{нез} = \varphi(R_{нез})$, где под $R_{нез}$ подразумевается наименьшее значение гидравлического радиуса, при кото-

ром в данных условиях еще не начинается осаждение взвешенных в воде наносов. Значения $\varphi (R_{\text{нез}}) = (C^{0,6} \sqrt{R})_{\text{нез}}$ приведены в табл. П.16.4.

Прямым следствием формул Е. А. Замарина является запись

$$\varphi (R_{\text{нез}}) = \frac{\Phi_{\text{н}}}{\sqrt{i}} .$$

В правой части формул (16.7а) и (16.8а) — функция от концентрации взвешенных наносов в воде, поступающей в канал, и гидравлической крупности (как указывалось, обычно принимается средневзвешенное значение ω). Эти значения определяют при проведении расчетов применительно к формулам (16.7а) и (16.8а). Вычисленные значения соответствующих правых частей в (16.7а) $\rho^{0,4}\omega^{0,2}$ и в (16.7в) $\rho^{0,4}\omega^{0,6}$, обозначенные через $\Phi_{\text{н}}$ (функция наносов), сведены в табл. П.16.4. Значения функции $\Phi_{\text{н}}$ размерные, так же как и значения $C^{0,6} \sqrt{R}$ в левой части формул (16.7а) и (16.8а).

Порядок определения $v_{\text{нез}}$ такой: по известным ρ и ω по табл. П.16.4 определяется значение функции $\Phi_{\text{н}}$, затем находится значение $\frac{\Phi_{\text{н}}}{\sqrt{i}}$, т. е. значение $\varphi (R_{\text{нез}}) = \frac{\Phi_{\text{н}}}{\sqrt{i}}$, а по этому значению при заданном коэффициенте шероховатости n в табл. П.16.5 — значение $R_{\text{нез}}$. Далее по известному $R_{\text{нез}}$ в табл. П.16.6 также при заданном значении коэффициента шероховатости находится $(C \sqrt{R})_{\text{нез}}$ и затем определяется

$$v_{\text{нез}} = (C \sqrt{R})_{\text{нез}} \sqrt{i} .$$

Другой способ определения $v_{\text{нез}}$ заключается в следующем. Приняв коэффициент Шези по формуле, например, Павловского $C = \frac{1}{n} R^y$, получим

$$v_{\text{нез}} = \frac{\sqrt{i}}{n} R_{\text{нез}}^{0,5+y} .$$

Тогда из формул (16.7) и (16.8) получим:
для $0,0004 < \omega < 0,002$ м/с

$$R_{\text{нез}} = \sqrt[2,5+3y]{\frac{n^2 \omega \rho^2}{121 i^{2,5}}} ;$$

для $0,002 \leq \omega \leq 0,008$ м/с

$$R_{\text{нез}} = \sqrt[2,5+3y]{\frac{n^3 \rho^2 \omega^3}{0,022^2 i^{2,5}}} .$$

Приняв для простоты вычислений $y = 1/6$, найдем при $0,0004 < \omega < 0,002$ м/с

$$R_{\text{нез}} = \frac{0,2n}{i^{0,833}} \rho^{0,667} \omega^{0,33} .$$

При $0,002 \leq \omega \leq 0,008$ м/с

$$R_{\text{нез}} = \frac{12,74}{i^{0,833}} \rho^{0,667} \omega.$$

Зная значение $R_{\text{нез}}$, находим по нему в табл. П.16.6 ($C \sqrt{R}$)_{нез} и далее

$$v_{\text{нез}} = (C \sqrt{R})_{\text{нез}} \sqrt{i}.$$

Для ориентировочных расчетов $v_{\text{нез}}$ применяют также формулы

$$v_{\text{нез}} = 0,3R^{0,25} \text{ или } v_{\text{нез}} = AR^{0,2},$$

где R — гидравлический радиус (м). Значения коэффициента A принимают в зависимости от значений средневзвешенной гидравлической крупности: $A = 0,33$ при $\omega_{\text{ср. в}} < 0,0015$ м/с; $A = 0,44$ при $\omega_{\text{ср. в}} = 0,0015 \div 0,0035$ м/с и $A = 0,55$ при $\omega_{\text{ср. в}} > 0,0035$ м/с.

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

$$v_{\text{доп}} > v > v_{\text{нез}},$$

но при этом средняя скорость не может быть больше, чем скорость $v_{\text{г. н}}$, соответствующая условиям гидравлически наивыгоднейшего профиля, т. е. $v_{\text{г. н}} = (C \sqrt{R})_{\text{г. н}} \sqrt{i}$. Таким образом, если $v_{\text{доп}} > v_{\text{г. н}}$, то средняя скорость должна быть ограничена в пределах $v_{\text{доп}} > v_{\text{г. н}} > v_{\text{нез}}$.

16.5. Основные типы задач при расчете каналов

Основные типы задач

1. Заданы все элементы живого сечения, а также m , n . Необходимо найти расход Q и среднюю скорость v .

1а. Заданы расход Q , линейные размеры, m и n . Необходимо найти уклон i .

Решение задач этого типа проводится прямой подстановкой вычисленных ω , R , C в (16.1).

2. Заданы Q , m , n , i , один из геометрических элементов живого сечения (b или h для трапецидального сечения и r или h для параболического). Необходимо найти другой линейный элемент живого сечения, а затем среднюю скорость v .

Решение ведется с помощью подбора. Задаемся несколькими значениями неизвестного параметра, для каждого из значений находим по уравнению Шези расход Q . Найдя расход, равный заданному, тем самым определим неизвестный линейный элемент. Расчет можно вести с построением графика зависимости расхода от неизвестного геометрического элемента. Средняя скорость определяется просто. Задача по отысканию ширины трапеции по дну b при неудачном задании h может не иметь решения.

3. Известны Q , i , m , n . Необходимо найти размеры элементов живого сечения и среднюю скорость v .

Неопределенность таких задач нейтрализуется введением в них дополнительных условий:

а) канал должен быть гидравлически наивыгоднейшего профиля, т. е. иметь $\beta_{г.н} = 2 (\sqrt{1+m^2} - m)$ для трапецеидального или $\beta_{г.н} = 1,8856$ для параболического сечения;

б) канал должен иметь заданное отношение $\beta = b/h$ для трапецеидального или B/h для параболического сечения.

В практике проектирования относительная ширина по дну земляных каналов часто принимается близкой к β по формуле С. А. Гиршкана, полученной по натурным данным в каналах оросительных систем, при расходах в них до 250 м³/с:

$$\beta = 3\sqrt[4]{Q} - m,$$

очевидно, что коэффициент в формуле — размерный.

Эти дополнительные условия помогают свести решения этих задач или к использованию уравнения Шези, или к подбору.

Например, для трапецеидального сечения подстановка $b = \beta h$ позволяет выразить

$$\begin{aligned}\omega &= (\beta + m) h^2; \\ \chi &= b + 2h \sqrt{1+m^2} = h(\beta + 2\sqrt{1+m^2}); \\ R &= \frac{\beta + m}{\beta + 2\sqrt{1+m^2}} h; \\ Q &= \frac{h^{2.5+y}}{n} (\beta + m) \left(\frac{\beta + m}{\beta + 2\sqrt{1+m^2}} \right)^{0.5+y} \sqrt{i}.\end{aligned}$$

Далее определяются h , затем b и v .

4. Известны Q , v , i , m , n . Необходимо найти элементы живого сечения.

Определить $C \sqrt{R} = v/\sqrt{i}$ по известным v и i , затем по табл. П.16.6 или подбором найти R при заданном значении n .

Для трапецеидального сечения при известном R найдем b и h из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned}\omega &= \frac{Q}{v} = (b + mh) h; \\ \chi &= b + 2h \sqrt{1+m^2}.\end{aligned} \right\} \quad (16.9)$$

Для параболического сечения p и h определяются подбором из системы

$$\left. \begin{aligned}\omega &= \frac{Q}{v} = \frac{4}{3} h \sqrt{2p} \sqrt{h}; \\ \chi &= p [\sqrt{2\tau(1+2\tau)} + \ln(\sqrt{2\tau} + \sqrt{1+2\tau})].\end{aligned} \right\} \quad (16.10)$$

Могут встретиться и некоторые промежуточные виды задач. Следует отметить, что метод подбора позволяет получить решение задач равномерного движения в открытых руслах произвольной формы при достаточном числе исходных известных параметров.

16.6. Основы гидравлического расчета каналов в безразмерных параметрах

Способ расчета призматических каналов по характеристикам живого сечения был предложен И. И. Агроскиным.

На основании изучения геометрии отдельного живого сечения, представленного рядом линейных размеров (глубины, средней ширины, гидравлического радиуса и т. п.), можно прийти к заключению, что взаимосвязи отдельных элементов должны проявляться в виде безразмерных соотношений.

Для установления взаимосвязей необходимо сравнивать расход через данное живое сечение с расходом через какое-либо определенное живое сечение, взятое в качестве эталона.

При гидравлическом расчете каналов любой формы за такой эталон принимается живое сечение той же формы, но гидравлически наивыгоднейшее, т. е. с наибольшей пропускной способностью в данных условиях.

Для квадратичной области сопротивления при равномерном движении запишем

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \omega C \sqrt{R} = \omega \frac{1}{n} R^{0.5+y}. \quad (16.11)$$

Введем безразмерный параметр, равный отношению площади живого сечения к квадрату гидравлического радиуса, и обозначим его $\psi = \omega/R^2$.

Размерные ω и R в расходной характеристике представляют собой геометрию живого сечения.

Безразмерная ψ может зависеть только от некоторого другого безразмерного параметра характеристики живого сечения, который сам должен полностью характеризовать геометрию живого сечения.

Параболическое сечение определяется параметром параболы p , зная который, можно построить параболу по уравнению $y^2 = 2pz$. Задавая еще глубину воды h , можно зафиксировать живое сечение. Таким образом, два размерных параметра p и h или их безразмерное отношение $\tau = h/p$ характеризуют живое сечение.

Параметр $\tau = h/p$ называется характеристикой живого сечения в параболическом русле.

Характеристика живого сечения трапе-

цеидального русла, также полностью определяющая живое сечение,

$$\sigma = m_0 h / b_{\text{ср}}, \quad (16.12)$$

где $m_0 = 2\sqrt{1+m^2} - m$ — характеристика откоса.

Из всех возможных безразмерных параметров, составленных из геометрических элементов живого сечения, только τ (для параболического сечения) и σ (для трапецеидального сечения) полностью характеризуют живое сечение данной формы для каждой из характеристик.

Перепишем (16.11) с учетом того, что $\omega = \psi R^2$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= \psi CR^{2,5} \\ \text{или} \\ nK_0 &= \psi R^{2,5+y}. \end{aligned} \right\} \quad (16.13)$$

В канале той же формы, с тем же коэффициентом шероховатости, при том же значении $K_0 = Q/\sqrt{i}$, но гидравлически наилучшего профиля будем иметь

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= \psi_{\text{г.н}} (CR^{2,5})_{\text{г.н}} \\ \text{или} \\ nK_0 &= \psi_{\text{г.н}} R_{\text{г.н}}^{2,5+y}. \end{aligned} \right\} \quad (16.14)$$

Так как гидравлический радиус $R_{\text{г.н}}$ максимальный, то при данных значениях n и K_0 значение $\psi_{\text{г.н}}$ должно быть минимальным.

Далее можно найти значения $\psi_{\text{г.н}}$ для различных форм живого сечения. Из (16.14) можно получить

$$R_{\text{г.н}} = \sqrt[2,5+y]{\frac{Qn}{\psi_{\text{г.н}} \sqrt{i}}}. \quad (16.15)$$

Обозначив $F(R_{\text{г.н}}) = (CR^{2,5})_{\text{г.н}}$, получим

$$F(R_{\text{г.н}}) = \frac{Q}{\psi_{\text{г.н}} \sqrt{i}} = \frac{K_0}{\psi_{\text{г.н}}}. \quad (16.16)$$

Значение $R_{\text{г.н}}$ может быть найдено или непосредственно из (16.15), или после отыскания по известным K_0 и $\psi_{\text{г.н}}$ значения $F(R_{\text{г.н}})$. По найденному значению $K_0/\psi_{\text{г.н}}$ в табл. П.16.6 найдем значения $CR^{2,5}$ и затем $R_{\text{г.н}}$.

Отметим, что в (16.3) показатель степени $2,5 + y \approx 2,65 \div 2,8$. Значение $2,5 + y = 2,7$ при расчетах не будет давать отличий, которые надо было бы учитывать, по сравнению с показателями 2,5 и 2,8 до $R \leq 3$ м. При больших R целесообразно для расчета принимать точные значения показателя степени $2,5 + y$.

Значение $R_{\text{г.н}}$ принято в рассматриваемом способе расчета в качестве основного масштаба. Все элементы каналов выражаются в безразмерном виде через $R_{\text{г.н}}$.

Из (16.13) и (16.14) имеем безразмерный гидравлический радиус

$$R/R_{г. н} = \sqrt[2.7]{\Psi_{г. н}/\psi}; \quad (16.17)$$

безразмерную площадь

$$\omega/R_{г. н}^2 = \Psi R^2/R_{г. н}^2 = \Psi (R/R_{г. н})^2; \quad (16.18)$$

безразмерную скорость

$$v/v_{г. н} = \omega_{г. н}/\omega = \Psi_{г. н} R_{г. н}^2/(\Psi R^2). \quad (16.19)$$

Любой элемент живого сечения канала (b , h , $b_{ср}$, B , p и т. д.) может быть выражен в безразмерном виде через безразмерные коэффициенты α .

Например, для трапеции имеем

$$h/R = 1 + \sigma; \quad b_{ср}/h = m_0(1 + \sigma)/\sigma; \quad \omega/R^2 = \Psi = m_0(1 + \sigma)^2/\sigma,$$

коэффициенты

$$\alpha_h = 1 + \sigma; \quad \alpha_{b_{ср}} = m_0(1 + \sigma)/\sigma \text{ и т. д.,}$$

отношение

$$R/R_{г. н} = \sqrt[2.7]{4\sigma/(1 + \sigma)^2}. \quad (16.17a)$$

Тогда, подставив в (16.17) и (16.17a) вместо R величины $h\alpha_h^{-1}$ или $b_{ср}\alpha_{b_{ср}}^{-1}$ и т. д., получим

$$\frac{h}{R_{г. н}} = \alpha_h \sqrt[2.7]{\frac{\Psi_{г. н}}{\Psi}} = (1 + \sigma) \sqrt[2.7]{\frac{4\sigma}{(1 + \sigma)^2}}; \quad (16.20)$$

$$\frac{b_{ср}}{R_{г. н}} = \alpha_{b_{ср}} \sqrt[2.7]{\frac{\Psi_{г. н}}{\Psi}} = \frac{m_0(1 + \sigma)}{\sigma} \sqrt[2.7]{\frac{4\sigma}{(1 + \sigma)^2}}. \quad (16.21)$$

Последнее отношение записывают в виде $b_{ср}/(m_0 R_{г. н})$, для того чтобы в правой части, так же как и для $h/R_{г. н}$, безразмерные элементы живого сечения были функциями только характеристики живого сечения, в данном случае σ :

$$\frac{v}{v_{г. н}} = \left[\frac{4\sigma}{(1 + \sigma)^2} \right]^{0.26}. \quad (16.22)$$

Далее, относительная ширина по дну $b/R_{г. н}$ зависит от σ и от коэффициента откоса m .

Таким образом была составлена табл. П.16.7 для трапецеидального сечения: задавались значения σ и по выведенным выше формулам вычислялись безразмерные элементы живого сечения. Аналогично получена табл. 16.8 для параболического сечения, связь между элементами которых дана в § 16.7.

В каждой такой таблице каждая строчка отражает неограниченное число живых сечений с разными размерами элементов, но с од-

ной характерной особенностью: эти живые сечения имеют одинаковое значение характеристики живого сечения. Размеры одноименных элементов живых сечений, охватываемых одной строкой таблицы, самые различные, но их безразмерное выражение для каждого элемента одно и то же.

16.7. Характеристики живых сечений с различной формой. Взаимосвязи элементов живого сечения

Выше было показано, что при гидравлически наивыгоднейшем профиле значение безразмерной площади $\psi_{г. н} = (\omega/R^2)_{г. н}$ минимальное. Поэтому для живых сечений призматических каналов с любой формой необходимо записать ψ как функцию характеристики живого сечения и, выполнив анализ этой функции, из условия $\psi_{г. н} = \min$ найти искомые значения как $\psi_{г. н}$, так и характеристики живого сечения гидравлически наивыгоднейшего профиля.

Трапецеидальное сечение. Для живого сечения в виде трапеции имеем

$$\omega = b_{\text{ср}} h,$$

где $b_{\text{ср}}$ — средняя линия трапеции;

$$\begin{aligned} \chi &= b + 2h\sqrt{1+m^2} = (b_{\text{ср}} - mh) + \\ &+ 2h\sqrt{1+m^2} = b_{\text{ср}} + h(2\sqrt{1+m^2} - m) = \\ &= b_{\text{ср}} \left[1 + \frac{h}{b_{\text{ср}}} (2\sqrt{1+m^2} - m) \right] = b_{\text{ср}} [1 + \sigma]. \end{aligned}$$

Характеристика живого сечения трапецеидальной формы

$$\sigma = m_0 h / b_{\text{ср}}$$

отражает все факторы, от которых зависит геометрия трапеции.

Характеристика откоса m_0 равна

$$m_0 = 2\sqrt{1+m^2} - m. \quad (16.23)$$

Имеем

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\omega}{\chi} = \frac{h}{1 + \sigma}; & \omega &= \frac{m_0 \sigma}{h^2}; \\ \psi &= \frac{\omega}{R^2} = m_0 \frac{(1 + \sigma)^2}{\sigma} = \psi(\sigma); \\ \frac{d[\psi(\sigma)]}{d\sigma} &= m_0 \frac{2(1 + \sigma)\sigma - (1 + \sigma)^2}{\sigma^2}. \end{aligned} \right\} \quad (16.24)$$

Приравняв $d[\psi(\sigma)]$ нулю, находим

$$\sigma_{г. н} = 1 \quad \text{и} \quad \psi_{г. н} = 4m_0. \quad (16.25)$$

Для гидравлически наивыгоднейшего профиля

$$(h/R)_{г. н} = 2; \quad (b_{\text{ср}}/h)_{г. н} = m_0; \quad (b_{\text{ср}}/m_0 R)_{г. н} = 2.$$

Введем относительную ширину трапеции по дну $\beta = b/h$ и запишем

$$\sigma = \frac{m_0 h}{b_{\text{ср}}} = \frac{m_0 h}{b + mh} = \frac{m_0}{\beta + m} \quad (16.26)$$

или

$$\beta = m_0/\sigma - m. \quad (16.27)$$

Тогда для гидравлически наивыгоднейшего профиля ($\sigma_{г.н} = 1$)

$$\beta_{г.н} = m_0 - m = 2(\sqrt{1 + m^2} - m). \quad (16.28)$$

Для трапецеидального канала по (16.17)

$$R/R_{г.н} = \sqrt[2.7]{4\sigma/(1 + \sigma)^2}. \quad (16.29)$$

Остальные безразмерные элементы канала получаются на основе преобразований, показанных в § 16.6.

Основной элемент $R_{г.н}$ определяется по (16.15):

$$R_{г.н} = \sqrt[2.7]{(4m_0)^{-1} K_0 n}$$

или

$$F(R_{г.н}) = (CR^{2.5})_{г.н} = \frac{Q}{4m_0 \sqrt{i}}, \quad (16.30)$$

где $K_0 = Q/\sqrt{i}$.

Параболическое сечение. Для такого сечения

$$B = 2\sqrt{ph} = 2\sqrt{\tau} p = 2,828p\sqrt{\tau};$$

$$\omega = \frac{2}{3} Bh = \frac{4\sqrt{\tau}}{3} ph = 1,8856\tau^{1.5} p^2;$$

$$\chi = p[\sqrt{2\tau(1+2\tau)} + \ln(\sqrt{2\tau} + \sqrt{1+2\tau})] = pf(\tau);$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{1,8856\tau^{1.5} p}{f(\tau)}.$$

Отсюда

$$\psi = \frac{\omega}{R^2} = \frac{[f(\tau)]^2}{1,8856\tau^{1.5}} = \psi(\tau).$$

Приравняв $\frac{d\psi(\tau)}{d\tau}$ нулю, находим, что

$$\left. \begin{aligned} \tau_{г.н} &= 1,8856; \\ \psi_{г.н} &= 6,56. \end{aligned} \right\} \quad (16.31)$$

Далее находим

$$R_{г. н} = \sqrt[2.7]{\frac{K_0 n}{\psi_{г. н}}} = 0,498 \sqrt[2.7]{K_0 n}$$

или

$$F(R_{г. н}) = (CR^{2.5})_{г. н} = \frac{Q}{6,56 \sqrt{i}} = 0,152 \frac{Q}{\sqrt{i}}; \quad (16.32)$$

$$\frac{R}{R_{г. н}} = \sqrt[2.7]{\frac{6,56}{\psi(\tau)}} = f_1(\tau).$$

Остальные элементы сведены в табл. П.16.8.

Круговое (сегментное) сечение. Круговое сечение определяется радиусом r , для определения живого сечения требуется еще значение глубины h . Но относительная глубина $h/r = 2 \sin^2 \varphi/4$ (φ — центральный угол сегмента).

Центральный угол φ поэтому принят в качестве характеристики рассматриваемого сечения.

Для сегментного сечения

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{г. н} &= \pi; \\ \psi_{г. н} &= (\omega/R^2)_{г. н} = 2\pi = 6,28; \\ R_{г. н} &= \sqrt[2.7]{\frac{K_0 n}{2\pi}}; \\ F(R_{г. н}) &= (CR^{2.5})_{г. н} = \frac{Q}{2\pi \sqrt{i}}, \end{aligned} \right\} (16.33)$$

где $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}$. При этом

$$\frac{R}{R_{г. н}} = \sqrt[2.7]{\frac{\pi(\varphi - \sin \varphi)}{\varphi^3}}.$$

Расчеты каналов с сегментным сечением выполняются с помощью табл. П.16.9.

Отметим, что полукруг — абсолютно гидравлически наиболее выгодный профиль среди всех возможных форм живого сечения.

16.8. Рекомендации по выполнению расчетов каналов при равномерном движении

Указанные в § 16.5 основные задачи легко решаются с помощью таблиц, составленных И. И. Агроскиным. В задачах первого типа, вычислив R , по табл. П.16.6 находим значение $C\sqrt{R}$, а затем продолжаем вычисления.

Вычисления при решении остальных типов задач начинаются с определения $R_{г. н}$ через $F(R_{г. н}) = Q/(\psi_{г. н} \sqrt{i})$ с последующим

обращением к табл. П.16.7 при расчете по (16.15). Значения $C\sqrt{R}$ и $CR^{2.5}$ от формы сечения не зависят.

В задачах второго типа при заданном линейном элементе живого сечения необходимо найти недостающий линейный размер. Находим отношение известного линейного элемента к $R_{г.н}$ и по численному значению этого отношения в табл. П.16.7, П.16.8 и П.16.9 (соответствующему данной форме живого сечения) находим значение безразмерного отношения искомого линейного параметра к $R_{г.н}$. Умножив это значение на $R_{г.н}$, найдем искомый параметр.

В задачах третьего типа для канала гидравлически наивыгоднейшего профиля используется $\sigma_{г.н} = 1$ (трапеция) или $\tau_{г.н} = 1,8856$ (парабола).

При заданном значении β (для трапеции) и B/h (для параболы) используются формулы, связывающие характеристику живого сечения и заданный параметр [например, (16.26) для трапеции]. Найдя по вычисленному значению σ соответствующую строку в таблице, принимаем по этой строке все необходимые безразмерные отношения линейных элементов живого сечения к $R_{г.н}$ и затем находим значения этих элементов ($R_{г.н}$ найдем предварительно).

При известной средней скорости v (задача четвертого типа) определяем $R_{г.н}$, затем $v_{г.н}$ и затем отношение $v/v_{г.н}$.

По найденной $v/v_{г.н}$ аналогично третьему типу задач определяем безразмерные отношения линейных элементов к $R_{г.н}$. Далее находим размеры линейных элементов.

Трапецеидальные каналы гидравлически наивыгоднейшего профиля относительно узкие (см. табл. 16.2), что осложняет их строительство. В связи с этим представляет большой интерес рассмотрение возможности создания трапецеидальных каналов, в которых отношение $v/v_{г.н}$ было бы незначительно (например, не более чем на 5 %) меньше единицы (см. табл. П.16.7). Следовательно, в таких каналах $\omega/\omega_{г.н}$ незначительно (также не более чем на 5 %) превышает единицу. При столь малых отклонениях от $\omega_{г.н}$ (напомним, что она минимальная при данном расходе) отношения b/h при «удалении» от гидравлически наивыгоднейшего профиля резко растут, а это и необходимо. Поэтому если нельзя запроектировать канал гидравлически наивыгоднейшего профиля, рекомендуется запроектировать канал, назначая требуемое отношение $v/v_{г.н}$ (тем самым и $\omega/\omega_{г.н}$), и расчет ведется как для задачи четвертого типа.

Обычно назначают $\omega \leq (1,01 \div 1,05) \omega_{г.н}$. Такого увеличения отношения $\omega/\omega_{г.н}$ в большинстве случаев достаточно для получения приемлемых значений относительной ширины канала.

Следует особо отметить, что все расчеты каналов при равномерном движении могут быть успешно выполнены с помощью любых ЭВМ без применения вспомогательных таблиц.

16.9. Расчет каналов замкнутого сечения

Равномерное движение в безнапорных водоводах замкнутого сечения характерно для водоотводных труб, туннелей и других конструкций, работающих при неполном заполнении.

В некоторых случаях равномерное движение наблюдается не при всех глубинах.

При равномерном движении расчеты ведутся по уравнению Шези с учетом особенностей, присущих только руслам замкнутого сечения. В них при превышении некоторого значения глубины наполнения для круглой трубы ($h/d = 0,813$) увеличение χ происходит интенсивнее, чем увеличение ω . Вследствие этого гидравлический радиус уменьшается, хотя глубина растет.

Расход и средняя скорость в каналах замкнутого сечения определяются по формулам

$$Q = AK_{\text{п}} \sqrt{i} = A\omega_{\text{п}} C_{\text{п}} \sqrt{R_{\text{п}} i}; \quad (16.34)$$

$$v = BC_{\text{п}} \sqrt{R_{\text{п}} i}, \quad (16.35)$$

где $A = K/K_{\text{п}}$ — относительная расходная характеристика; $B = v/v_{\text{п}}$ — относительная средняя скорость; K — расходная характеристика и v — средняя скорость при неполном наполнении. Индекс «п» соответствует полному наполнению.

Для круглых труб график зависимости параметров A и B от относительной глубины наполнения h/d представлен на рис. 16.4. Очевидно, что рассчитанные значения A и B имеют максимум при $h/d = 0,95$ (для A) и $h/d = 0,813$ (для B).

Однако исследования Н. Ф. Федорова и Ю. М. Константинова показали, что при больших наполнениях расход и средняя скорость имеют меньшие значения, чем вычисленные по (16.34) и (16.35) с использованием A и B из рис. 16.4. Поэтому рекомендуется принимать A и B согласно пунктирным линиям на рис. 16.4.

Дренажные трубы рассчитывают как безнапорные, но полностью заполненные, т. е. $A = 1$. В этом случае при известном расходе $K = Q/\sqrt{i}$, а затем определяют необходимый диаметр труб.

Трубы и туннели, для которых применяются замкнутые сечения специальных форм, рассчитываются также по (16.34) и (16.35). Значения A и B при этом принимаются по приводимым в справочниках графикам, соответствующим каждой форме сечения в зависимости от относительной глубины наполнения.

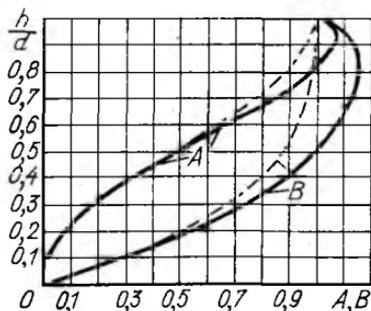


Рис. 16.4

16.10. Контрольные вопросы и примеры

1. Какими признаками характеризуется равномерное движение в открытом русле?

2. Как располагаются по отношению к линии дна пьезометрическая линия и линия удельной энергии при равномерном движении в открытом русле?

3. Выведите выражение для относительной ширины по дну в русле гидравлически наивыгоднейшего профиля (трапециевидальное поперечное сечение). Что такое гидравлически наивыгоднейший профиль (сечение) канала?

4. Каковы особенности распределения осредненных местных скоростей в открытых потоках? Какие факторы влияют на распределение указанных скоростей?

5. Как учитывается неоднородная шероховатость по периметру русла при расчете коэффициента Шези?

6. Какие факторы влияют также на значения коэффициентов Шези?

7. Что называется допускаемой неразмывающей и допускаемой незаляющей средней скоростью в русле?

8. Какие основные факторы влияют на допускаемую неразмывающую среднюю скорость? Как эти факторы определяются?

9. Что такое гидравлическая крупность наносов?

10. Что называется транспортирующей способностью потока?

11. Как можно определить незаляющую скорость в открытом потоке?

12. Какие основные типы задач рассматриваются при расчете каналов? Какие расчетные приемы (способы) могут быть применены при расчете каналов?

13. Какие характеристики живого сечения можно указать для трапециевидального и параболического русел?

14. Какая методика (сравнение с каким эталоном) выбрана при расчете каналов по способу Агроскина?

15. Укажите соотношения между основными характерными элементами рассчитываемого русла и русла с гидравлическим наивыгоднейшим профилем.

16. Как ведется расчет канала по способу Агроскина, если необходимо определить те или иные параметры канала при остальных заданных параметрах?

17. Каковы характеристики живого сечения канала трапециевидального параболического и сегментного (кругового) сечения гидравлически наивыгоднейшего профиля?

18. Как рассчитываются каналы в задачах различного типа?

19. Каковы особенности расчета каналов замкнутого сечения при равномерном движении?

Пример 16.1. Определить расход в трапециевидальном канале с шириной по дну $b = 5$ м, коэффициентом откоса $m = 1,5$, если глубина воды в канале $h = 2$ м и уклон дна канала $i = 0,0003$.

Канал имеет бетонное крепление, коэффициент шероховатости $n = 0,014$.

Решение. Находим гидравлический радиус:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} = \frac{(5 + 1,5 \cdot 2)2}{5 + 2 \cdot 2\sqrt{3,25}} = 1,31 \text{ м.}$$

По табл. П. 16.6 при $n = 0,014$ и $R = 1,31$ м находим $C\sqrt{R} = 84,14$ м/с. Тогда $Q = \omega C\sqrt{R}\sqrt{i} = 16 \cdot 84,14\sqrt{0,0003} = 23,32$ м³/с.

Пример 16.2. Определить глубину воды в трапециевидальном оросительном канале при следующих исходных данных: расход $Q = 18$ м³/с, ширина канала по дну $b = 8$ м, грунты, в которых проложен канал, — тяжелые суглинки, уклон дна канала $i = 0,00008$.

Решение. Найдем значение откоса по табл. 16.1, приняв $m = 1,5$; коэффициент шероховатости для оросительного канала при $1 \text{ м}^3/\text{с} < Q = 18 \text{ м}^3/\text{с} < 25 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. П.8.7) принимаем $n = 0,0225$ (грунты связные).

Расчет выполним по способу Агресскина. Найдем

$$F(R_{г.н}) = \frac{Q}{4m_0 \sqrt{i}} = \frac{18}{8,424 \sqrt{0,00008}} = 238,9 \text{ м}^3/\text{с},$$

где значение $4m_0 = 8,424$ принято по табл. П.16.7 для $m = 1,5$.

Согласно табл. П.16.6 при $n = 0,0225$ по значению $F(R_{г.н}) = 238,9$ находим $R_{г.н} = 1,88 \text{ м}$.

Вычислим отношение известного линейного размера $b = 8 \text{ м}$ к $R_{г.н} = 1,88 \text{ м}$.

Это отношение $b/R_{г.н} = 4,26$.

По табл. П.16.7 при $m = 1,5$ и по найденному значению $\frac{b}{R_{г.н}} = 4,26$

находим значение $\frac{h}{R_{г.н}} = 1,383$. Тогда глубина равна

$$h = 1,383 R_{г.н} = 1,383 \cdot 1,88 = 2,6 \text{ м}.$$

Пример 16.3. Рассчитать размеры канала гидравлически наиболее выгодного трапецидального профиля при следующих данных: расход $Q = 12 \text{ м}^3/\text{с}$; коэффициент шероховатости $n = 0,0225$; коэффициент откоса $m = 1,25$, уклон дна канала $i = 0,00011$.

Решение. Находим

$$F(R_{г.н}) = \frac{Q}{4m_0 \sqrt{i}} = \frac{12}{7,808 \sqrt{0,00011}} = 146,5 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $4m_0 = 7,808$ для $m = 1,25$ принято по табл. П.16.7.

Далее по табл. П.16.6 при $n = 0,0225$ по найденному значению $F(R_{г.н}) = 146,5$ находим $R_{г.н} = 1,56 \text{ м}$.

Обращаясь к табл. П.16.7 и зная, что для гидравлически наиболее выгодного профиля $\sigma_{г.н} = \left(\frac{m_0 h}{b_{ср}}\right)_{г.н} = 1$ (или отношение $\frac{R}{R_{г.н}}$ в этом случае, естественно, равно единице), из соответствующей строки указанной таблицы имеем

$$h/R_{г.н} = 2 \text{ и (при } m = 1,25) \frac{b}{R_{г.н}} = 1,4.$$

Тогда канал гидравлически наиболее выгодного профиля при заданных условиях имеет ширину по дну

$$b = 1,4 R_{г.н} = 2,18 \text{ м},$$

а глубина воды

$$h = 2 R_{г.н} = 3,12 \text{ м}.$$

Отношение $\beta = b/h$ в данном случае равно $\beta_{г.н} = 2,18/3,12 = 0,7$.

Согласно (16.2) $\beta = 2(\sqrt{1+m^2} - m) = 0,7$. Расчет размеров канала выполнен верно.

Пример 16.4. Определить ширину по дну трапецидального канала и глубину воды в нем так, чтобы относительная ширина по дну $\beta = b/h = 5$. Расход $Q = 23 \text{ м}^3/\text{с}$, уклон дна $i = 0,00005$, коэффициент откоса $m = 1,5$, коэффициент шероховатости $n = 0,025$.

Решение. Вначале найдем значение $R_{г.н}$.

Для этого вычисляем

$$F(R_{г.н}) = \frac{Q}{4m_0 \sqrt{i}} = \frac{23}{8,424 \sqrt{0,00005}} = 386,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда по табл. П.16.6 при $n = 0,025$ по найденному значению $F(R_{г.н})$ находим $R_{г.н} = 2,33$ м.

Далее, зная, что характеристика живого сечения для трапеции

$$\sigma = \frac{m_0 h}{b_{ср}} = \frac{m_0 h}{b + mh} = \frac{m_0}{\beta + m},$$

найдем значение σ :

$$\sigma = \frac{m_0}{\beta + m} = \frac{2,106}{5 + 1,5} = 0,324,$$

где $m_0 = 2,106$ для $m = 1,5$ принято по табл. П.16.7.

Из таблицы П.16.7 при $\sigma = 0,324$ находим $\frac{h}{R_{г.н}} = 1,184$ и $\frac{h}{R_{г.н}} = 5,92$.

Тогда ширина канала по дну $b = 5,92 R_{г.н} = 13,79$ м и глубина воды $h = 1,184 R_{г.н} = 2,76$ м.

Проверка показывает, что $\beta = \frac{b}{h} = 5$, т. е. условия задачи выполнены.

Пример 16.5. Определить размеры элементов живого сечения трапециевидального канала, в котором необходимо обеспечить среднюю скорость $v = 0,65$ м/с при следующих данных: $Q = 40$ м³/с, $m = 2$, $n = 0,025$, $i = 0,0001$.

Решение. Вначале определим $R_{г.н}$. Найдем

$$F(R_{г.н}) = \frac{Q}{4m_0 \sqrt{i}} = \frac{40}{9,888 \sqrt{0,0001}} = 404,86 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $4m_0 = 4(2\sqrt{1+m^2} - m) = 9,888$. По табл. П.16.6 по значению $F(R_{г.н}) = 404,86$ при $n = 0,025$ находим, что $R_{г.н} = 2,37$ м. Из той же таблицы определяем вновь при заданном значении $n = 0,025$, что $(C\sqrt{R})_{г.н} = 71,9$ м/с.

Тогда $v_{г.н} = (C\sqrt{R})_{г.н} \sqrt{i} = 0,719 \cong 0,72$ м/с.

Так как заданное значение средней скорости в канале $v = 0,65$ м/с оказалось меньше, чем вычисленное значение $v_{г.н} = 0,72$ м/с, решение задачи возможно.

Найдем отношение значений заданной скорости v и $v_{г.н}$, равное

$$\frac{v}{v_{г.н}} = \frac{0,65}{0,72} = 0,9027.$$

Обращаясь к табл. П.16.7, найдем, что при этом значении $v/v_{г.н}$ имеем $h/R_{г.н} = 1,088$ и $b/R_{г.н} = 7,93$ (при $m = 2$). Тогда $h = 1,088 R_{г.н} = 2,58$, $b = 7,93 R_{г.н} = 18,79$ м.

Проверим, какой будет средняя скорость в канале с такими размерами живого сечения:

$$\omega = (b + mh) h = (18,79 + 2 \cdot 2,58) \cdot 2,58 = 61,79 \text{ м}^2.$$

Средняя скорость $v = Q/\omega = 40/61,79 = 0,647 = 0,65$ м/с.

Если назначить ширину канала по дну $b = 19$ м (из соображений технологии строительства), для обеспечения требуемой скорости глубина воды в канале h должна быть несколько меньше, а именно $h = 2,55$ м.