

струи, распадающаяся на отдельные капли, иногда называется *распыленной струей*.

#### Вопросы для самопроверки

1. Классификация отверстий и истечений.
2. Определение скорости и расхода при истечении через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре.
3. Насадки и их применение. Скорость и расход при истечении жидкости через насадки при постоянном напоре.

4. Учет скорости подхода при истечении жидкости из отверстий и насадков при постоянном напоре.
5. Классификация труб. Скорость и расход при истечении из очень коротких труб при постоянном напоре.
6. Определение времени опорожнения сосуда.
7. Истечение жидкости через большие отверстия при постоянном уровне жидкости в резервуаре (общее решение).
8. Истечение через большие прямоугольные отверстия при постоянном уровне жидкости в сосуде.

## Глава 7. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

### § 7.1. Типы открытых русел.

#### Условия существования равномерного движения

*Открытыми* называются русла, контур поперечного сечения которых образован незамкнутой линией. К таким руслам, в связи с общностью их гидравлического расчета, могут быть отнесены и каналы замкнутого сечения с частичным заполнением его потоком.

Жидкость в открытых руслах движется под действием составляющей силы тяжести. Такое движение *безнапорное*, поток имеет свободную поверхность.

Характер движения жидкости в открытом русле, форма и уклон свободной поверхности потока, его глубина зависят от типа, размеров и формы сечения русла, уклона его дна.

Русла могут быть призматическими и непризматическими.

У *призматических* или *цилиндрических* русел форма и размеры элементов поперечного профиля сохраняются неизменными по длине русла. В таких руслах площадь живого сечения может изменяться только в связи с изменением глубины потока  $h$ .

У *непризматических* русел форма и (или) геометрические размеры какого-либо элемента поперечного профиля меняются по длине русла. В таких руслах площадь живого сечения является функ-

цией не только глубины потока  $h$ , но и длины русла  $l$ .

Открытые русла подразделяются также на русла правильной и неправильной формы поперечного, сечения.

К *руслам правильной формы* поперечного сечения относятся такие, для которых элементы живого сечения потока (площадь  $\omega$ , смоченный периметр  $\chi$ , гидравлический радиус  $R$ , ширина русла по свободной поверхности  $B$ ) — непрерывные функции глубины потока  $h$ , сохраняющие свое выражение во всем диапазоне изменения глубин. Этому условию удовлетворяют многие искусственные русла — прямоугольного, треугольного, трапецеидального, параболического поперечного сечений. К ним относятся и круговые русла, но при наполнении  $h < r$  (хотя с геометрической точки зрения они имеют правильную форму по всей своей высоте).

К *руслам неправильной формы* относятся открытые русла составного (полигонального) профиля поперечного сечения (рис. 7.1), русла замкнутого профиля любой формы (например, круговой, при  $h > r$ ) в диапазоне значительного изменения глубин (рис. 7.2).

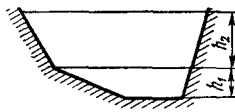


Рис. 7.1

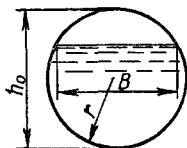


Рис. 7.2

Наконец, открытые русла делятся на русла с прямым уклоном дна ( $i > 0$ ), горизонтальные ( $i = 0$ ) и русла с обратным уклоном дна ( $i < 0$ ), когда уклон дна русла повышается в направлении движения потока.

Равномерным называется движение, гидравлические элементы которого не изменяются по длине потока.

Равномерное движение потока возможно только в призматических или цилиндрических руслах. При этом непременное условие равномерного движения — постоянство расхода вдоль потока, шероховатости стенок (дна и откосов) русла по его длине.

Перечисленные условия являются достаточными для существования равномерного напорного движения. Для обеспечения же равномерного движения в открытых руслах они являются необходимыми, но кроме того уклон дна должен быть прямым и постоянным вдоль русла.

Удовлетворить всем указанным требованиям могут только искусственные русла. Те участки русла, где движение может рассматриваться как равномерное, должны располагаться на достаточном удалении от участков, вызывающих деформацию потока (поворотов, резких сужений и расширений, переломов дна).

Естественные русла, вообще говоря, непризматические и равномерное движение в них существовать не может. Однако при решении инженерных задач на участках естественных русел, где незначительно меняются форма и размеры поперечного сечения, уклон дна, шероховатость дна и откосов в периоды времени, когда постоянным остается рас-

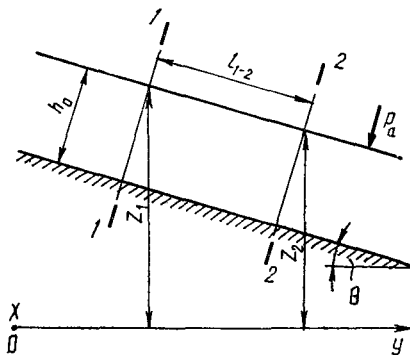


Рис. 7.3

ход водотока, движение может с определенной степенью приближения рассматриваться как равномерное.

Равномерное движение жидкости — параллельноструйное, оно характеризуется прямыми параллельными линиями токов (траекториями), постоянством местной осредненной во времени скорости вдоль каждой линии тока; при этом эпюры скоростей для всех сечений имеют одинаковую площадь и форму. Живые сечения при равномерном движении — плоские, а средняя в сечении скорость  $V$  остается неизменной вдоль всего потока.

## § 7.2. Основные уравнения равномерного движения

Пусть в открытом призматическом (цилиндрическом) русле (рис. 7.3), дно которого составляет угол  $\theta$  с горизонтом, имеет место равномерное движение с постоянной глубиной  $h_0$ . Выберем два произвольных сечения 1—1 и 2—2 в пределах этого русла отстоящих друг от друга на расстоянии  $l_{1-2}$  и, назначив плоскость сравнения ( $xOy$  — ее след), запишем уравнение Д. Бернулли для точек, лежащих на свободной поверхности жидкости в пределах выбранных

сечений,

$$\frac{\alpha V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_{w1-2}. \quad (7.1)$$

Поскольку давление на свободной поверхности жидкости  $p_1 = p_2 = p_a$  и скорости в рассматриваемых сечениях равны между собой ( $V_1 = V_2$  по условию задачи), получим

$$z_1 - z_2 = h_{w1-2}. \quad (7.2)$$

Так как русло призматическое (цилиндрическое) и, следовательно, местные сопротивления отсутствуют, потери (затраты) энергии (напора) будут только за счет преодоления сил трения по длине и

$$h_{w1-2} = h_{f1-2}. \quad (7.3)$$

Подставив (7.3), в (7.2) и отнеся обе части равенства к расстоянию между сечениями  $l_{1-2}$ , получим

$$\frac{z_1 - z_2}{l_{1-2}} = \frac{h_{f1-2}}{l_{1-2}}. \quad (7.4)$$

Левая часть равенства (7.4)

$$\frac{z_1 - z_2}{l_{1-2}} = \sin \theta. \quad (7.5)$$

При малых углах (как это имеет обычно место в открытых руслах)

$$\sin \theta \approx \operatorname{tg} \theta = i, \quad (7.6)$$

где  $i$  — уклон дна русла.

Правая часть равенства (7.4)

$$\frac{h_{f1-2}}{l_{1-2}} = i_f, \quad (7.7)$$

где  $i_f$  — так называемый уклон трения (частный случай гидравлического уклона, учитывающий только потери по длине).

Отсюда основное уравнение равномерного движения

$$i = i_f, \quad (7.8)$$

то есть при равномерном движении потока в открытых руслах уклон дна равен уклону трения.

### § 7.3. Определение средней в сечении скорости и расхода при равномерном движении

Выделим в открытом русле, на участке с равномерным движением (рис. 7.4) отсек жидкости, ограниченный двумя произвольными сечениями 1—1 и 2—2 (площадь живого сечения  $\omega$ ), стоящими друг от друга на расстоянии  $l$ . Мысленно отбросив часть потока жидкости до и после отсека, заменим его действие силами  $P_1$  и  $P_2$  — нормальными сжимающими силами избыточного гидродинамического давления в рассматриваемых сечениях.

Вес отсека  $G$  разложим на две составляющих:  $R_1$  — параллельную дну и  $R_2$  — перпендикулярную к нему.

Если равнодействующая сил трения  $T$ , то условие равновесия сил, действующих параллельно дну, будет иметь вид

$$P_1 - P_2 + R_1 - T = 0, \quad (7.9)$$

где

$$P_1 = p_1 \omega; \quad (7.10)$$

$$P_2 = p_2 \omega \quad (7.11)$$

( $p_1$  и  $p_2$  — гидродинамическое давление в центрах тяжести рассматриваемых се-

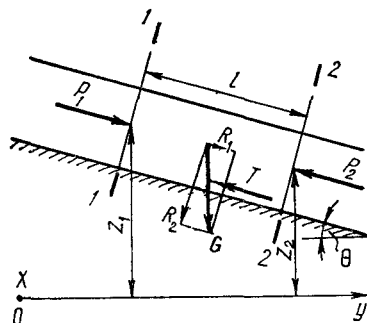


Рис. 7.4

чений);

$$R_1 = G \sin \theta; \quad (7.12)$$

$$G = \rho g \omega l. \quad (7.13)$$

Следовательно, с учетом (7.5)

$$R_1 = \rho g \omega l \frac{z_1 - z_2}{l} = \rho g \omega (z_1 - z_2). \quad (7.14)$$

Считая, что силы трения сосредоточены у дна и стенок русла, можно записать

$$T = \tau \chi l, \quad (7.15)$$

где  $\tau$  — касательное напряжение

Переноса  $T$  в правую часть уравнения (7.9) и подставляя полученные для действующих сил выражения, будем иметь

$$\rho_1 \omega - \rho_2 \omega + \rho g \omega (z_1 - z_2) = \tau \chi l. \quad (7.16)$$

Разделив обе части уравнения на  $\rho g \omega$ , получим

$$\frac{\rho_1}{\rho g} - \frac{\rho_2}{\rho g} + z_1 - z_2 = \frac{\tau \chi l}{\rho g \omega}. \quad (7.17)$$

Помня, что  $\frac{\omega}{\chi} = R$ ,  $V_1 = V_2$ , прибавив и отняв в правой части скоростные напоры  $\frac{\alpha V_1^2}{2g}$  и  $\frac{\alpha V_2^2}{2g}$ , получим, отнеся обе части уравнения к  $l$ ,

$$\frac{\left(\frac{\alpha V_1^2}{2g} + \frac{\rho_1}{\rho g} + z_1\right) - \left(\frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{\rho_2}{\rho g} + z_2\right)}{l} = \frac{\tau}{\rho g} \frac{1}{R}, \quad (7.18)$$

или

$$\frac{h_f}{l} = i_f = \frac{\tau}{\rho g} \frac{1}{R}. \quad (7.19)$$

При турбулентном режиме движения потери на трение по длине  $h_f = kV^2$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности. Следовательно, можно считать, что и касательное напряжение

$$\tau = kV^2. \quad (7.20)$$

Тогда с учетом основного уравнения равномерного движения (7.8) из (7.19)

$$Ri = \frac{kV^2}{\rho g}, \quad (7.21)$$

откуда средняя в сечении скорость

$$V = \sqrt{\frac{\rho g}{k}} \sqrt{Ri}. \quad (7.22)$$

Обозначив

$$\sqrt{\frac{\rho g}{k}} = C, \quad (7.23)$$

получим так называемую формулу Шези

$$V = C \sqrt{Ri}, \quad (7.24)$$

где  $C$  — скоростной множитель (коэффициент Шези), который А. Шези считал постоянной величиной.

По данным акад. Н. Н. Павловского,

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (7.25)$$

где  $y$  — показатель степени, в общем случае являющийся функцией гидравлического радиуса  $R$  и коэффициента шероховатости  $n$ .

*Шероховатость* — совокупная неровность твердой поверхности, сказывающаяся на возникновении сил трения потока о дно и стенки русла. Зависит от абсолютного размера неровностей и их взаимного расположения, обобщенно характеризуется безразмерным коэффициентом шероховатости  $n$ .

Обозначив

$$C \sqrt{R} = W, \quad (7.26)$$

получим формулу Шези — Павловского для определения средней в сечении скорости при равномерном движении воды в открытых руслах

$$V = W \sqrt{i}, \quad (7.27)$$

где  $W$  — скоростная характеристика;  $i$  — уклон дна русла

Скоростная характеристика имеет определенный физический смысл — это средняя в сечении скорость потока при укло-

не дна  $i = 1$ ; она определяется обычно по формуле

$$W = \frac{1}{n} R^z, \quad (7.28)$$

где  $n$  — коэффициент шероховатости;  $z$  — показатель степени,  $z = 0,5 + y$ .

Значения коэффициентов шероховатости для неукрепленных естественных и искусственных русел и русел с искусственным креплением приводятся в специальных пособиях и справочниках.

Для примера укажем средние значения коэффициента шероховатости  $n$  для различных поверхностей:

одерновки плашмя и в стенку — 0,028; малых земляных каналов при частичной планировке дна и откосов — 0,03; земляных русел периодических водотоков при благоприятных условиях — 0,04.

При расчете русел с неоднородной шероховатостью дна и стенок определяется *осредненный коэффициент шероховатости*:

$$\text{при } \frac{n_{\max}}{n_{\min}} > 1,5 \dots 2$$

$$n_{\text{ср}} = \left( \frac{\chi_1}{\chi} n_1^{\frac{3}{2}} + \frac{\chi_2}{\chi} n_2^{\frac{3}{2}} + \dots \dots + \frac{\chi_m}{\chi} n_m^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}};$$

$$\text{при } \frac{n_{\max}}{n_{\min}} < 1,5 \dots 2$$

$$n_{\text{ср}} = \frac{\chi_1 n_1 + \chi_2 n_2 + \dots + \chi_m n_m}{\chi},$$

где  $\chi$  — полная длина смоченного периметра;  $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_m$  — длины частей смоченного периметра с коэффициентами шероховатости  $n_1, n_2, \dots, n_m$ ;  $n_{\max}$  и  $n_{\min}$  — наибольший и наименьший из коэффициентов шероховатости.

По полной формуле акад. Н. Н. Пав-

Таблица 7.1 Скоростные характеристики

Гидравлический радиус $R$ , м	Скоростная характеристика $W$ , м/с, при значениях $n$				
	0,014	0,025	0,0275	0,03	0,04

0,01	2,8	1,2	1	0,9	0,5
0,1	16	7,1	6,2	5,5	3,6
0,5	45	24	22	20	14
1	71	40	36	33	25
1,5	93	53	49	45	34
2	112	65	60	55	43
3	145	85	78	73	56

ловского

$$z = 0,37 + 2,5 \sqrt{n} - 0,75(\sqrt{n} - 0,1) \sqrt{R} \quad (7.29)$$

В среднем показатель степени  $z$  может быть принят равным 0,65 — при коэффициенте шероховатости  $n = 0,011 \dots 0,0175$ ; 0,7 — при  $n = 0,018 \dots 0,0225$ ; 0,75 — при  $n = 0,025 \dots 0,04$ .

Сцелью облегчения практических расчетов в учебных пособиях и справочниках по гидравлике приводятся подробные таблицы скоростных характеристик  $W = f(R; n)$ .

Фрагмент подобной таблицы приведен в табл. 7.1.

Поскольку  $Q = \omega W$ , то с учетом (7.27) расход при равномерном движении

$$Q = \omega W \sqrt{i}, \quad (7.30)$$

где  $K$  — расходная характеристика,

$$K = \omega W. \quad (7.31)$$

Физический смысл  $K$  — это расход при уклоне дна  $i = 1$ .

Приведенные выше формулы для скоростной характеристики  $W$  (или скоростного множителя  $C$ ), расходной характеристики  $K$ , а также построенные на их базе вспомогательные таблицы и графики широко применяются на практике при расчетах открытых русел различного назначения — каналов, лотков, безнапорных труб и тоннелей. В тех случаях, когда на ограниченном участке

естественного русла сечение мало изменяется по длине, для расчета такого русла с известным приближением можно пользоваться зависимостями для равномерного движения. При этом следует помнить, что все приводимые здесь и в специальной литературе формулы для  $W$ ,  $C$  и  $K$  носят приближенный характер.

При турбулентном режиме движения в открытых руслах, также как в трубопроводах (см. гл. 5) имеют место области гидравлически гладких русел, переходная область и область гидравлически шероховатых русел. В двух первых областях гидравлический коэффициент трения  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса, а значит для этих областей от числа Рейнольдса должны зависеть и скоростная характеристика  $W$  и скоростной множитель  $C$ . Однако формулы (7.25) и (7.28) этого обстоятельства не учитывают. Следовательно, эти формулы, справедливы только для гидравлически шероховатых русел (для квадратичного сопротивления), в других же случаях следует использовать приводимые в литературе зависимости для гидравлически гладких русел либо переходной области сопротивления (например, формулу Н. В. Федорова для переходной области сопротивления, в которой работают канализационные безнапорные трубы).

#### **§ 7.4. Допускаемые неразмывающие и незаиляющие средние в сечении скорости**

Для обеспечения бесперебойного функционирования открытых русел и других искусственных водопропускных сооружений существенное значение имеет правильное назначение расчетной скорости  $V_{расч}$ .

Во всех случаях эта скорость

$$V_{min} < V_{расч} \leq V_{доп}, \quad (7.32)$$

где  $V_{min}$  — минимальная допускаемая (незаиляющая или самоочищающая) сред-

няя в сечении скорость, то есть скорость, при незначительном снижении которой можно ожидать заилиение русла наносами;  $V_{доп}$  — максимальная допускаемая (неразмывающая) средняя в сечении скорость, то есть наивысшее значение средней скорости течения воды, при которой для выбранного типа крепления или грунта, если русло не укреплено, поток не вызывает сказывающегося на нормальной эксплуатации размыва (разрушения) русла.

Максимальные допускаемые (неразмывающие) средние в сечении скорости  $V_{доп}$  определяются на основе натуральных наблюдений и опытов и сводятся в таблицы ведомственных нормативов или представляются в виде приближенных эмпирических зависимостей.

Так, для русел с искусственным креплением, неукрепленных русел в скальных, связанных и несвязанных грунтах МПС утверждены «Временные нормы допускаемых скоростей течения в искусственных сооружениях. (см.: Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений.— М., 1974, с. 25—29).

Для иллюстрации некоторые значения неразмывающих скоростей течения потока приведены в табл. 7.2.

Более подробные сведения можно найти в «Справочнике по гидравлике» [26] (табл. 7.10—7.13). Эти таблицы предназначены для определения  $V_{доп}$  при проектировании каналов, водоотводных русел, искусственных сооружений — мостов, труб, плотин, пойменных насыпей, выправительных сооружений, водотоков, а также укреплений берегов и подмостовых русел естественных водотоков.

Значения скоростей, приводимых в этих и подобных им таблицах, интерполировать не следует. При промежуточных размерах частиц грунта, размерах идущего для мощения камня, марках бетона и глубинах водотока значения

скоростей принимаются по размерам, прочности и глубинам, ближайшим к натурным.

Если в начальной стадии проектирования глубина потока не известна, то для предварительных ориентировочных расчетов принимаются значения допускаемой скорости, соответствующие глубине 0,4 м. Если глубина водотока больше 3 м, то при пользовании таблицами (в случае отсутствия специальных данных), для расчетов принимается значение допускаемой скорости, соответствующее глубине 3 м.

Средние в сечении скорости течения, учитываемые в расчетах, должны соответствовать расчетным расходам воды в нормальных условиях эксплуатации. При расчетах отверстий и размывов сооружений, проектировании укреплений по всему периметру поперечного сечения водотока они определяются как частное от деления расчетного расхода водотока на площадь всего сечения; при проектировании местных укреплений — как такое же частное от деления для соответствующей части водотока (ближайшей к укрепляемому месту).

При небольших размерах русел с неоднородной шероховатостью за допускаемую скорость принимается неразмывающая средняя в сечении скорость для наиболее слабого типа укрепления.

В случае резкого отлиция режима протекания воды от нормальных условий допускаемые скорости течения устанавливаются на основании дополнительных расчетов, а в особо ответственных случаях — на основании специальных натурных и лабораторных исследований. При неблагоприятных грунтовых условиях (свеженасыпанный грунт и др.), неблагоприятных обстоятельствах производства работ и эксплуатации укрепления допускаемые скорости течения должны быть соответственно понижены. Допускаемые скорости для риберм и креплений дна зависят от характера

Таблица 7.2. Максимальные допускаемые (неразмывающие) средние в сечении скорости  $V_{\text{доп}}$ , м/с, по ВН МПС

Тип укрепления или наименование грунтов	$V_{\text{доп}}$ /м/с, при средней глубине потока $h$ , м			
	0,4	1	2	3
Одерновка:				
плащмя (на плотном ос-новании)	0,9	1,2	1,3	1,4
в стенку	1,5	1,8	2	2,2
Бетон марки М140 как одежда для креплений	6	7	8	9
Бутовая кладка из камня крепких пород	6,5	8	10	12
Глины плотные	1	1,2	1,4	1,5

течения и для ответственных сооружений подлежат установлению на основании дополнительных исследований.

Ведомственные строительные нормы Минводхоза СССР предусматривают определение максимальных допускаемых (неразмывающих) скоростей водного потока при проектировании каналов оросительных и осушительных систем по специальным расчетным зависимостям, учитывающим физико-технические свойства и однородность грунта, в котором проложено русло канала, материал крепления (облицовки), назначение (категорию) канала и условия его работы (см.: Указания по определению допускаемых (неразмывающих) скоростей водного потока для различных грунтов и облицовок.— М., 1965).

При наличии наносов в коллоидном состоянии значения максимальных допускаемых (неразмывающих) скоростей течения следует умножить на коэффициент условий работы, устанавливаемый в зависимости от категории каналов. В тех случаях, когда необходимо учитывать влияние нескольких факторов, проявляющихся одновременно, коэффициент условий работы определяется как произведение коэффициентов, учитывающих влияние отдельных факторов.

Допускаемые (неразмывающие) средние в сечении скорости протекания потока для проложенных в торфе русел определяются по данным, которые можно найти в Справочнике по гидравлике [26] в табл. 7.14—7.20.

Минимальные допускаемые (незаиляющие) средние в сечении скорости протекания воды  $V_{\min}$  зависят от количества и размеров взвешенных частиц. Для их определения существуют зависимости и таблицы, составленные на основе натуральных наблюдений и опытных данных. Некоторые из них приводятся ниже.

Если насыщенность потока наносами с диаметром частиц более 0,25 мм не превышает 0,01 % по весу, то

$$V_{\min} = a_1 \sqrt{R}, \quad (7.33)$$

где гидравлический радиус  $R$  берется в м, а множитель  $a_1$  — в зависимости от среднего диаметра частиц преобладающей массы взвешенных наносов, например, при  $d_{\text{ср}} = 0,1$  мм  $a_1 = 0,22$  м<sup>0,5</sup>/с, при  $d_{\text{ср}} = 1$  мм  $a_1 = 0,95$  м<sup>0,5</sup>/с, при  $d_{\text{ср}} = 1$  мм  $a_1 = 1,1$  м<sup>0,5</sup>/с.

Минимальная допускаемая (незаиляющая) скорость может быть определена и по такой зависимости:

$$V_{\min} = ah^{0,64}, \quad (7.34)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от характеристики наносов и имеющий следующие усредненные значения: для крупных песчано-илистых наносов  $a \approx 0,63$ , для средних песчано-илистых наносов  $a \approx 0,56$ , для мелких песчано-илистых наносов  $a \approx 0,4$ , для очень мелких песчано-илистых наносов  $a \approx 0,36$ ;  $h$  — глубина потока, м.

Допускаемая незаиляющая скорость может быть также определена по зависимости А. С. Гиршкана

$$V_{\min} = AQ^{0,2}, \quad (7.35)$$

где  $Q$  — расход, м<sup>3</sup>/с;  $A$  — коэффициент,

зависящий от гидравлической крупности наносов  $\omega_{\text{кн}}$  (скорости падения частиц грунта в чистой воде):  $A = 0,33$  при  $\omega_{\text{кн}} < 1,5$  мм/с,  $A = 0,44$  при  $\omega_{\text{кн}} = 1,5 \dots 3,5$  мм/с,  $A = 0,55$  при  $\omega_{\text{кн}} > 3,5$  мм/с.

В трубах дождевой и общесплавной канализации при периоде повторяемости расчетного дождя  $p_d = 0,5$  допускается принимать расчетное значение самоочищающей скорости  $V_{\min} = 0,6$  м/с.

При движении в канализации осветленных или биологически очищенных сточных вод принимают  $V_{\min} = 0,5$  м/с.

При движении сточных вод в дюкере  $V_{\min} = 0,9$  м/с.

Наименьшие расчетные скорости движения ила  $V_{\min}$  в напорных илопроводах:

Содержание воды в иле, %	$V_{\min}$ , м/с
98	0,7—0,8
95	1—1,1
90	1,5—1,6

По данным Минводхоза СССР, при проектировании осушительных и оросительных каналов минимальная средняя в сечении скорость потока при глубине  $h = 1$  м не должна быть менее 0,3 м/с.

## § 7.5. Определение нормальной глубины протекания потока. Гидравлические элементы живого сечения потока.

Нормальной, или бытовой, глубиной протекания потока  $h_0$  называется глубина равномерного движения в данном конкретном русле при соответствующем расчетном расходе

Таким образом, при определении нормальной (бытовой) глубины  $h_0$  заданными являются: форма и размеры поперечного сечения, продольный уклон дна  $i$ , состояние (коэффициент шероховатости)



тости  $n$ ) поверхности дна и стенок русла, а также расчетный расход  $Q$

Нормальная глубина не может быть установлена непосредственно, аналитическим путем, из основного уравнения или основных формул равномерного движения. При ее определении приходится прибегать к универсальному, но весьма кропотливому способу подбора или использовать приближенные методы решения, вспомогательные графики или таблицы, обращаться к помощи ЭВМ, поскольку для подобного решения имеются готовые стандартные программы

Способ подбора применим при определении нормальной глубины в русле какого угодно поперечного сечения. При этом задаются глубинами  $h_1, h_2, \dots, h_m$ , вычисляют соответствующие им значения площади живого сечения потока  $\omega$ , смоченного периметра  $\chi$ , гидравлического радиуса  $R$ , находят (как правило, по таблицам) значения скоростных характеристик  $W$  и подсчитывают расходные характеристики  $K = \omega W$ , которые сравнивают с расчетным значением расходной характеристики

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} \quad (7.36)$$

Если  $K_m = K_0$ , то искомая нормальная глубина  $h_0 = h_m$

Подбор значительно можно упростить построением графика расходных характеристик. По нескольким произвольно заданным глубинам строится график зависимости  $K = f(h)$  (рис. 7.5), по которому находят глубину, соответствующую расчетному значению расходной характеристики  $K_0$ .

Нормальную глубину можно найти, используя так называемый «показательный закон» согласно которому

$$\frac{K_2}{K_1} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{x_1}, \quad (7.37)$$

где  $x_1$  — гидравлический показатель русла.

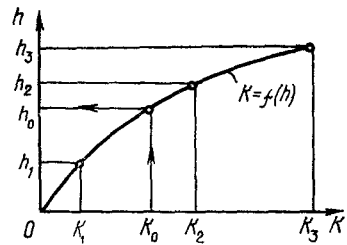


Рис 7.5

Задавшись двумя произвольными глубинами  $h_1$  и  $h_2$ , подсчитывают соответствующие им значения расходных характеристик  $K_1$  и  $K_2$  и определяют гидравлический показатель русла

$$x_1 = \frac{\lg \frac{K_2}{K_1}}{\lg \frac{h_2}{h_1}} \quad (7.38)$$

Зная расчетное значение расходной характеристики  $K_0$ , искомую нормальную глубину можно найти по зависимости

$$h_0 = h_1 \left( \frac{K_0}{K_1} \right)^{\frac{1}{x_1}} \quad (7.39)$$

Наиболее распространенное поперечное сечение открытых русел — трапециевидное (прямоугольное и треугольное русла — частный случай такого сечения)

Если коэффициент заложения откоса трапециевидного русла  $m$  ( $m = \text{ctg } \beta$ , рис 7.6), ширина русла по дну  $b$ , а глубина потока в рассматриваемом сечении  $h$ , то площадь живого сечения

$$\omega = (b + mh)h; \quad (7.40)$$

смоченный периметр

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}, \quad (7.41)$$

ширина русла по свободной поверхности жидкости

$$B = b + 2mh. \quad (7.42)$$

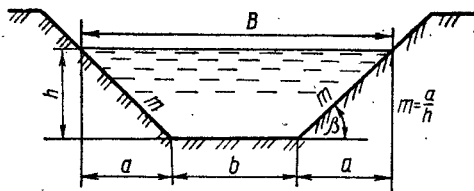


Рис. 7.6

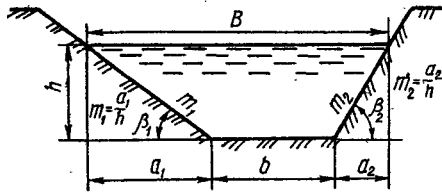


Рис. 7.7

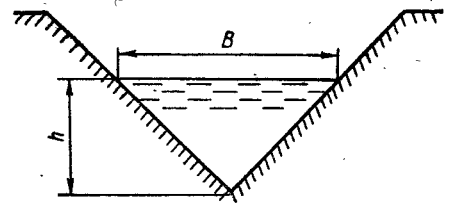


Рис. 7.9

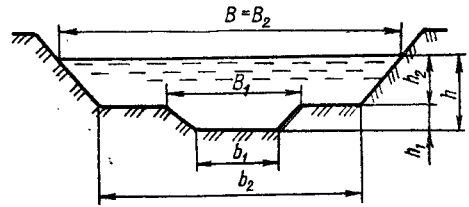


Рис. 7.10

Если известны площадь живого сечения русла  $\omega$ , его ширина по дну  $b$  и задан коэффициент заложения откосов  $m$ , то глубина потока

$$h = \frac{\sqrt{b^2 + 4m\omega} - b}{2m}. \quad (7.43)$$

При разной крутизне откосов (рис. 7.7) площадь сечения

$$\omega = (b + m_{\text{ср}}h)h, \quad (7.44)$$

где  $m_{\text{ср}}$  — усредненный коэффициент заложения откосов,

$$m_{\text{ср}} = \frac{m_1 + m_2}{2}; \quad (7.45)$$

смоченный периметр

$$\chi = b + h \left( \sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2} \right). \quad (7.46)$$

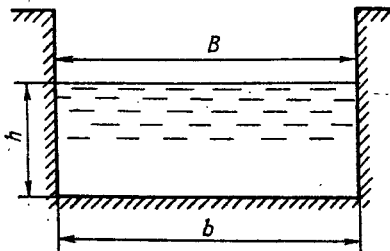


Рис. 7.8

При расчете русел прямоугольного (рис. 7.8) и треугольного (рис. 7.9) поперечного сечения принимают для первых  $m = 0$ , для вторых —  $b = 0$ .

Русла полигонального профиля (рис. 7.10) могут рассматриваться состоящими из основания сечения, имеющего форму трапеции или треугольника, и расположенных над ним ряда участков, имеющих трапецидальную форму. Следовательно, при наличии  $n$  участков в симметричном русле:

площадь живого сечения

$$\omega = \sum_{i=1}^n (b_i + m_i h_i) h_i; \quad (7.47)$$

смоченный периметр

$$\chi = b_n + 2 \left( \sum_{i=1}^n h_i \sqrt{1 + m_i^2} - \sum_{i=1}^{n-1} m_i h_i \right); \quad (7.48)$$

ширина русла по свободной поверхности

$$B = b_n + 2m_n h_n, \quad (7.49)$$

где  $h_i$  — глубина в пределах соответствующего участка;  $h = \sum_{i=1}^n h_i$  — глуби-

на потока в рассматриваемом сечении; в случае треугольной формы основания  $b_1 = 0$ .

Для русел параболического поперечного сечения (рис. 7.11) с параметром квадратичной параболы  $p$ :

площадь живого сечения

$$\omega = \frac{4}{3} \sqrt{2ph^2}^{\frac{3}{2}}; \quad (7.50)$$

ширина русла по свободной поверхности

$$B = 2\sqrt{2ph}; \quad (7.51)$$

смоченный периметр

$$\chi = p \left[ \sqrt{2 \frac{h}{p} \left(1 + 2 \frac{h}{p}\right)} + \ln \left( \sqrt{2 \frac{h}{p}} + \sqrt{1 + 2 \frac{h}{p}} \right) \right]. \quad (7.52)$$

При этом уравнение квадратичной параболы имеет вид

$$\chi^2 = 2ph \quad (7.53)$$

При определении нормальной глубины протекания потока весьма эффективно использование ЭВМ. В качестве примера ниже приводится методика такого расчета применительно к руслам трапециевидального поперечного сечения.

С этой целью общую зависимость для определения расхода при равномерном движении

$$Q = \omega W \sqrt{i}, \quad (7.54)$$

решим относительно искомой нормальной глубины.

Обозначив относительную ширину русла по дну

$$\frac{b}{h_0} = \beta, \quad (7.55)$$

будем иметь:

площадь живого сечения

$$\omega = (b + mh_0)h_0 = (\beta + m)h_0^2; \quad (7.56)$$

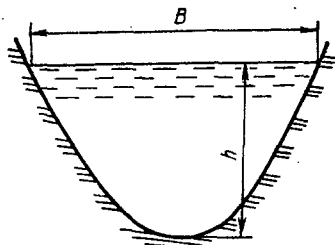


Рис. 7.11

смоченный периметр

$$\begin{aligned} \chi &= b + 2h_0 \sqrt{1 + m^2} = \\ &= (\beta + 2) \sqrt{1 + m^2} h_0; \end{aligned} \quad (7.57)$$

скоростную характеристику

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{n} R^2 = \frac{1}{n} \left( \frac{\omega}{\chi} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{n} \left( \frac{\beta + m}{\beta + 2 \sqrt{1 + m^2}} \right)^2 h_0^2; \end{aligned} \quad (7.58)$$

расход

$$Q = (\beta + m) \frac{1}{n} \left( \frac{\beta + m}{\beta + 2 \sqrt{1 + m^2}} \right)^2 h_0^{2+z} \sqrt{i}. \quad (7.59)$$

Следовательно, искомая глубина равномерного движения

$$h_0 = \left[ \frac{Qn}{\sqrt{i}} \left( \frac{\beta + 2 \sqrt{1 + m^2}}{\beta + m} \right)^2 \frac{1}{\beta + m} \right]^{\frac{1}{2+z}}. \quad (7.60)$$

Отсюда  $h_0$  находится методом последовательных приближений (итерации) в такой последовательности:

1. Задаютя каким-нибудь значением глубины  $h_1$ .

2. Определяют отношение  $\beta_1 = \frac{b}{h_1}$ .

3. Вычисляют  $h_2$  во втором приближении.

4. Если  $|h_2 - h_1| < \epsilon$  (где  $\epsilon$  — наперед заданная точность определения  $h_0$ ), то расчет закончен. В противном случае вычисляют  $\beta_2 = \frac{b}{h_2}$  и расчет

повторяют, начиная с п. 3. Расчет продолжается до тех пор, пока наступает неравенство

$$|h_{n+1} - h_n| < \varepsilon.$$

5. Определив  $h_0$ , находят площадь живого сечения потока  $\omega_0 = (b + mh_0) h_0$  и среднюю скорость

$$V_0 = \frac{Q}{\omega_0}.$$

### § 7.6. Выбор расчетной скорости. Гидравлически наиболее выгодное сечение русла

Как уже отмечалось ранее, при проектировании оросительных каналов, дорожного водоотвода и других открытых русел для экономии сил и средств при строительстве расчетную скорость  $V_{рас}$  желательно принимать равной максимально допустимой или близкой к ней. Это позволяет уменьшить поперечные размеры русла (а, следовательно, объем земляных работ, расход материалов), максимально использовать работоспособность крепления, увеличить уклон дна (уменьшая, тем самым, длину русла и лучше вписываясь в рельеф местности).

Однако при заданных расходе  $Q$ , форме поперечного сечения русла и обстановке, в которой происходит движение потока (то есть при известных угле дна  $i$  и коэффициенте шероховатости  $n$ ), гидравлический расчет открытых русел по максимальной допустимой скорости можно производить лишь в том случае, когда эта скорость меньше или равна наибольшей возможной для заданных условий средней в сечении скорости  $V_{max}$ .

Расход при равномерном движении воды в открытых руслах по (7.54) с учетом (7.28) может быть представлен так:

$$Q = \omega \frac{1}{n} R^2 \sqrt{i}. \quad (7.61)$$

Из этого выражения следует, что если задана форма поперечного сечения

русла, тип его укрепления (то есть задан коэффициент шероховатости  $n$ ) и уклон дна  $i$ , то при заданном расчетном расходе  $Q$  наибольшая возможная средняя в сечении скорость будет при наименьшей площади живого сечения  $\omega_{min}$ , а при заданной (ограниченной) площади живого сечения  $\omega$  наибольшая пропускная способность будет при минимальном смоченном периметре  $\chi_{min}$ , в результате чего максимально возможным при заданных условиях будет гидравлический радиус  $R_{max}$ .

Такие русла принято называть *руслами гидравлически наиболее выгодного профиля поперечного сечения*.

При сооружении каналов с гидравлически наиболее выгодными сечениями производится минимум земляных работ (минимальная площадь живого сечения) или минимум работ по укреплению берегов и дна (минимальный смоченный периметр).

Из разных форм поперечного сечения наиболее выгодным будет полукруговое сечение, поскольку оно при заданной площади имеет минимальный смоченный периметр. Однако на практике полукруговые сечения почти не используются, поскольку в верхней части они имеют вертикальные стенки и требуют бетонного или железобетонного укрепления даже в тех случаях, когда по допустимой с точки зрения размыва скорости в этом нет необходимости.

Умножив и разделив в (7.61) правую часть выражения на  $R^2$ , после простых преобразований получим

$$\frac{Qn}{\frac{\omega}{R^2} \sqrt{i}} = R^{2+z}, \quad (7.62)$$

или, обозначив

$$\frac{\omega}{R^2} = \Psi, \quad (7.63)$$

$$\frac{Qn}{\Psi \sqrt{i}} = R^{2+z}. \quad (7.64)$$

Для русел гидравлически наиболее выгоднейшего профиля поперечного сечения *максимальный гидравлический радиус*

$$R_{\max} = \left( \frac{Qn}{\Psi_{г.н} \sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{2+z}}, \quad (7.65)$$

где безразмерное соотношение

$$\Psi_{г.н} = \frac{\omega}{R_{\max}^2} \quad (7.66)$$

определяется в зависимости от формы поперечного сечения русла.

Например, для сегментного русла гидравлически наиболее выгоднейшее значение  $\Psi_{г.н} = \Psi_{\min}$  соответствует полукругу, когда площадь живого сечения

$$\omega = \frac{\pi d^2}{8}; \quad (7.67)$$

смоченный периметр

$$\chi = \frac{\pi d}{2} \quad (7.68)$$

и, следовательно, гидравлический радиус

$$R_{\max} = \frac{\omega}{\chi} = \frac{\pi d^2 2}{8 \pi d} = \frac{d}{4}. \quad (7.69)$$

Тогда из (7.63) получим, что

$$\Psi_{г.н} = \frac{\omega}{R_{\max}^2} = \frac{\pi d^2 16}{8 d^2} = 2\pi = 6,28. \quad (7.70)$$

Для трапецидального русла из (7.40) следует, что

$$\frac{\omega}{h} = b + mh. \quad (7.71)$$

Подставляя (7.71) в (7.41), получим

$$\begin{aligned} \chi - \frac{\omega}{h} &= b + 2h \sqrt{1 + m^2} - b - mh = \\ &= (2 \sqrt{1 + m^2} - m) h. \end{aligned} \quad (7.72)$$

Поскольку смоченный периметр

$$\chi = \frac{\omega}{R}, \quad (7.73)$$

из (7.63) следует, что площадь живого сечения

$$\omega = \Psi R^2; \quad (7.74)$$

смоченный периметр

$$\chi = \Psi R. \quad (7.75)$$

Деля обе части выражения (7.72) на  $R$ , с учетом (7.74) и (7.75) получим

$$\Psi - \Psi \frac{R}{h} = (2 \sqrt{1 + m^2} - m) \frac{h}{R}. \quad (7.76)$$

Введя новую переменную

$$\eta = \frac{h}{R} \quad (7.77)$$

и обозначив постоянную для условий расчета величину

$$2 \sqrt{1 + m^2} - m = m_0, \quad (7.78)$$

будем иметь

$$\Psi = m_0 \frac{\eta^2}{\eta - 1}. \quad (7.79)$$

Совершенно очевидно, что при заданном коэффициенте заложения откосов трапецидального русла  $\Psi$  зависит от  $\eta$ . Для определения гидравлически наиболее выгоднейшего значения  $\Psi_{г.н} = \Psi_{\min}$ , исследуем выражение (7.79) на минимум. Для этого, взяв первую производную, приравняем ее к нулю.

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi}{d\eta} &= m_0 \frac{2\eta(\eta - 1) - \eta^2}{(\eta - 1)^2} = \\ &= m_0 \frac{\eta^2 - 2\eta}{(\eta - 1)^2} = 0. \end{aligned} \quad (7.80)$$

Таким образом, получим

$$\eta_{г.н}^2 - 2\eta_{г.н} = 0, \quad (7.81)$$

или

$$\eta_{г.н} = \left( \frac{h}{R} \right)_{г.н} = 2. \quad (7.82)$$

Следовательно, для всех гидравлически наиболее выгоднейших сечений трапецидальных русел гидравлический радиус, являющийся максимальным, равен

Таблица 7.3. Максимальный гидравлический радиус  $R_{\max}$ , м, соответствующий руслу гидравлически наивыгоднейшего профиля

$R_{\max}$ , м	Значения $\frac{Qn}{\Psi_{г.н} \sqrt{i}}$ при $z$		
	0,65	0,7	0,75
0,1	0,002	0,002	0,002
0,2	0,012	0,013	0,01
0,3	0,041	0,039	0,037
0,4	0,088	0,084	0,08
0,5	0,159	0,154	0,149
0,75	0,467	0,459	0,453
1	1	1	1
1,5	2,9	2,99	3,05
2	6,28	6,5	6,73
2,5	11,34	11,87	12,43
3	18,38	19,42	20,52

половине глубины потока:

$$R_{\max} = \frac{h_{г.н}}{2}. \quad (7.83)$$

Подставляя значение  $\eta_{г.н} = 2$  в формулу (7.79), с учетом (7.78) будет иметь для русел трапецидального поперечного сечения

$$\Psi_{г.н} = 4m_0 = 8\sqrt{1+m^2} - 4m. \quad (7.84)$$

Для примера приведем некоторые значения  $\Psi_{г.н}$ , подсчитанные по формуле (7.84) для наиболее часто встречающихся на практике значений коэффициента заложения откосов  $m$ :

$m$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$\Psi_{г.н}$	8	6,944	7,312	8,424	9,888	11,54	13,3

Аналогично исследуя минимум функцию  $\Psi$  для русел параболического поперечного сечения (вывод, содержащийся, например, в работах И. И. Агроскина на опуске), получим, что

$$\Psi_{г.н} = \Psi_{\min} = 6,56. \quad (7.85)$$

Решая задачу нахождения максимальной возможной в данном русле средней в сечении скорости, будем иметь

$$V_{\max} = W_{\max} \sqrt{i}, \quad (7.86)$$

где максимальная скоростная характеристика

$$W_{\max} = \frac{1}{n} R_{\max}^z. \quad (7.87)$$

Порядок определения  $R_{\max}$  и  $V_{\max}$  следующий: при известных  $Q$ ,  $n$  и  $i$  в зависимости от формы поперечного сечения определяется  $\Psi_{г.н}$  и подсчитывается соотношение

$$\frac{Qn}{\Psi_{г.н} \sqrt{i}}. \quad (7.88)$$

Затем выбирается расчетное значение показателя степени (см. § 7.3) и по зависимости (7.65) или вспомогательной таблице (ее фрагмент — табл. 7.3) находится  $R_{\max}$ .

При известных  $R_{\max}$  и коэффициенте шероховатости  $n$  из таблиц скоростных характеристик (например, табл. 7.1) определяется  $W_{\max}$  и по зависимости (7.86) вычисляется наибольшая возможная средняя в сечении скорость  $V_{\max}$ .

### § 7.7. Расчет русел трапецидального поперечного сечения

На соотношениях, полученных для русел гидравлически наивыгоднейшего профиля, основан способ определения нормальной (бытовой) глубины протекания и других элементов потока с использованием *относительных характеристик живого сечения*.

Установим зависимости геометрических характеристик русел, отличающихся от гидравлически наивыгоднейших, от максимального гидравлического радиуса  $R_{\max}$ . С этой целью разделим все члены уравнения (7.76) на  $\Psi$  и с учетом (7.84) запишем его в таком виде:

$$1 - \frac{R}{h_0} - \frac{h_0}{R} \frac{\Psi_{г.н}}{4\Psi} = 0. \quad (7.89)$$

С учетом (7.64) и (7.65) получим

$$\frac{\Psi_{г.н}}{\Psi} = \left( \frac{R}{R_{\max}} \right)^{2+z}. \quad (7.90)$$

Умножив выражение (7.89) на  $\frac{R_{\max}^2}{h_0 R}$ ,  
будем иметь

$$\left(\frac{R_{\max}}{h_0}\right)^2 - \frac{R_{\max}^2}{h_0 R} + \frac{1}{4} \left(\frac{R}{R_{\max}}\right)^2 = 0. \quad (7.91)$$

Введем такие обозначения:  
относительная глубина

$$\eta_h = \frac{h_0}{R_{\max}}; \quad (7.92)$$

относительный гидравлический радиус

$$\eta_R = \frac{R}{R_{\max}}, \quad (7.93)$$

относительная ширина живого сечения по дну

$$\eta_b = \frac{b}{R_{\max}}; \quad (7.94)$$

относительная площадь живого сечения

$$\eta_\omega = \frac{\omega}{\omega_{\Gamma, H}}. \quad (7.95)$$

С учетом указанных относительных величин выражение (7.91) можно записать так:

$$\frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{\eta_R} \cdot \frac{1}{\eta_h} + \frac{1}{4} \eta_R^2 = 0. \quad (7.96)$$

Решая это уравнение относительно  $\eta_h$ , получим

$$\eta_h = \frac{2\eta_R}{1 \pm \sqrt{1 - (\eta_R)^{2+z}}}, \quad (7.97)$$

откуда искомая нормальная глубина

$$h_0 = \frac{2R}{1 \pm \sqrt{1 - (\eta_R)^{2+z}}}. \quad (7.98)$$

Каждому значению  $\eta_R$  в общем случае могут соответствовать два значения  $h_0$ . Одно получается при  $R = R_{\max}$ , то есть при  $\eta_R = 1$ , в этом случае русло является гидравлически наиболее выгодным и  $h_0 = 2R_{\max}$ . Если же  $R < R_{\max}$ ,

то есть  $\eta_R < 1$ , то при знаке (+) перед корнем  $h_0 < 2R$ , что соответствует расширенному (по сравнению с гидравлически наиболее выгодным) сечению, а при знаке (-)  $h_0 > 2R$ , что соответствует суженному сечению.

Чтобы найти зависимость площади живого сечения  $\omega$  от относительного гидравлического радиуса  $\eta_R$  подставим в (7.90) значение  $\Psi$  из (7.63). Тогда

$$\left(\frac{R}{R_{\max}}\right)^{2+z} = \frac{\Psi_{\Gamma, H}}{\omega} R^2, \quad (7.99)$$

или

$$\frac{\omega}{\Psi_{\Gamma, H} R^2} = \left(\frac{R_{\max}}{R}\right)^{2+z}. \quad (7.100)$$

Поделив обе части уравнения на  $\left(\frac{R_{\max}}{R}\right)^2$ , получим

$$\frac{\omega}{\Psi_{\Gamma, H} R_{\max}^2} = \left(\frac{R_{\max}}{R}\right)^z. \quad (7.101)$$

В соответствии с (7.93) и (7.95) и учитывая, что из (7.66)

$$\Psi_{\Gamma, H} R_{\max}^2 = \omega_{\Gamma, H}, \quad (7.102)$$

в относительных величинах будем иметь

$$\eta_\omega = \frac{\omega}{\omega_{\Gamma, H}} = \frac{1}{\eta_R^z}. \quad (7.103)$$

Относительная ширина живого сечения по дну  $\eta_b$  может быть найдена из выражения (7.40) с учетом зависимости (7.101):

$$\frac{\omega}{h_0} = b + mh_0, \quad (7.104)$$

откуда

$$b = \frac{\omega}{h_0} - mh_0, \quad (7.105)$$

Разделив обе части на  $R_{\max}$ , получим

$$\frac{b}{R_{\max}} = \frac{\omega}{h_0 R_{\max}} \frac{R_{\max} \Psi_{\Gamma, H}}{R_{\max} \Psi_{\Gamma, H}} - m \frac{h_0}{R_{\max}}. \quad (7.106)$$

Таблица 7.4 Основные геометрические соотношения для каналов трапецидального поперечного сечения

	$\eta_R = \frac{R}{R_{\max}}$	$\eta_{h_0} = \frac{h_0}{R_{\max}}$	$\eta_{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{гн}}$	$\eta_b = \frac{b}{R_{\max}}$ при $m$			
				0	1	2	
Область гидравлически выгодных сечений	0,7	0,78	1,28	13,12	11,22	14,65	Расширенные сечения
	0,8	0,96	1,17	9,8	7,98	10,17	
	0,9	1,2	1,08	7,16	5,35	6,46	
	0,92	1,22	1,06	6,67	4,83	5,8	
	0,94	1,35	1,044	6,2	4,31	4,95	Гидравлически наивыгоднейшие сечения
	0,98	1,6	1,014	5,07	3,04	3,07	
	0,998	1,87	1,001	4,3	2,07	1,58	
	1	2	1	4	1,66	0,94	Суженные сечения
	0,999	2,1	1,001	3,8	1,37	0,54	
	0,997	2,19	1,002	3,65	1,15	0,13	
0,97	2,7	1,021	3,03	0,08			
0,94	3,09	1,047	2,7				
0,92	3,34	1,06	2,54				
0,85	4,21	1,12	2,13				

или с учетом (7.94), (7.92) и (7.103) в относительных величинах

$$\eta_b = \frac{\Psi_{гн}}{\eta_h \eta_R^z} - m \eta_h \quad (7.107)$$

Так как влияние показателя степени  $z$  в приведенных расчетных зависимостях существенно не сказывается на величинах  $R$ ,  $h_0$ ,  $b$  и  $\omega$ , то с достаточной для практики степенью точности можно принять его усредненное значение  $z \approx 0,7$  и задаваясь различными значениями относительного гидравлического радиуса  $\eta_R$ , составить вспомогательную таблицу для определения относительных величин  $\eta_h$ ,  $\eta_{\omega}$  и  $\eta_b$  (последняя — для соответствующих стандартных значений коэффициента заложения откосов  $m$ ) Фрагмент подобной таблицы приведен в табл. 7.4.

В этой таблице область, в которой площадь менее чем на 5 % отличается от минимальной (то есть там, где  $\eta_{\omega} \leq 1,05$ ) можно считать областью гидравлически выгодных сечений. В пределах этой области глубина  $h_0$  и ширина по дну  $b$  могут приниматься из эксплуатационных или конструктивных соображений, при этом объем земляных работ будет близок к минимальному.

Табл. 7.4 позволяет при известной одной из четырех величин  $b$ ,  $\omega$ ,  $h_0$  или  $R$ , отнести ее к  $R_{\max}$ , найти три остальные искомые величины

При расчете русла трапецидального поперечного сечения с использованием метода относительных характеристик живого сечения по зависимости (7.84) устанавливают значение  $\Psi_{гн}$  (для прямоугольного поперечного сечения  $\Psi_{гн} = 8$ )



и подсчитывают соотношение по (7.88). Выбрав расчетное значение  $z$  (принимая  $z \approx 0,7$  или руководствуясь данными § 7.3, или специальными справочниками) по зависимости (7.65) или из вспомогательной табл. 7.3 находится максимальный гидравлический радиус  $R_{\max}$ .

Затем в зависимости от заданного значения  $\omega$ ,  $b$ ,  $R$  или  $h_0$  находят соответствующую относительную величину и по ней в табл. 7.4 все остальные необходимые для расчета величины. Например, если была ограничена ширина русла по дну  $b$ , то определяем относительную ширину по дну  $\eta_b = \frac{b}{R}$ , и найдя близкие к вычисленным ее значения для заданного коэффициента заложения откосов  $m$ , получим в соответствующей строке  $\eta_R$ ,  $\eta_h$ ,  $\eta_\omega$ , то есть найдем:

гидравлический радиус

$$R = \eta_R R_{\max}; \quad (7.108)$$

искомую нормальную глубину протекания потока

$$h_0 = \eta_h R_{\max}; \quad (7.109)$$

площадь живого сечения

$$\omega = \eta_\omega \Psi_{\Gamma} R_{\max}^2. \quad (7.110)$$

### § 7.8. Вычисление геометрических элементов русел замкнутого сечения при безнапорном движении

При гидравлическом расчете труб, коллекторов, тоннелей и других водопроводных и водопропускных сооружений замкнутого поперечного сечения при безнапорном движении справедливы все основные положения и расчетные зависимости, полученные для открытых русел (поскольку при безнапорном движении потока последний имеет свободную поверхность). При определении геометрических и гидравлических элементов в ходе практических расчетов возникают определенные трудности. Поэтому для облегчения расчетов русел круг-

Таблица 7.5. Основные геометрические элементы труб круглого поперечного сечения при различном наполнении

$\Delta = \frac{h}{r}$	$B' = \frac{B}{r}$	$\omega' = \frac{\omega}{r^2}$	$\chi' = \frac{\chi}{r}$	$R' = \frac{R}{r}$
0,2	1,2	0,164	1,29	0,127
0,4	1,6	0,447	1,86	0,241
0,6	1,83	0,793	2,32	0,342
0,8	1,96	1,174	2,74	0,429
1	2	1,571	3,14	0,5
1,2	1,96	1,968	3,54	0,555
1,4	1,83	2,349	3,97	0,593
1,6	1,6	2,694	4,43	0,608
1,626	1,56	2,735	4,49	0,609
1,8	1,2	2,978	5	0,596
2	0	3,142	6,28	0,5

лого поперечного сечения и других замкнутых сечений при безнапорном движении потока составлены вспомогательные таблицы, где в зависимости от относительной глубины наполнения  $\Delta = \frac{h}{r}$  приведены относительные величины  $\omega'$ ,  $\chi'$ ,  $B'$ ,  $R'$ .

При вычислении гидравлических элементов круглого поперечного сечения радиусом  $r$  относительная глубина наполнения

$$\Delta = \frac{h}{r}; \quad (7.111)$$

относительная ширина русла по свободной поверхности

$$B' = \frac{B}{r} = 2\sqrt{1-\Delta^2}; \quad (7.112)$$

относительная площадь живого сечения

$$\omega' = \frac{\omega}{r^2} = \frac{1}{2}\varphi - \sin\varphi, \quad (7.113)$$

относительный смоченный периметр

$$\chi' = \frac{\chi}{r} = \varphi, \quad (7.114)$$

где  $\varphi$  — центральный угол сегмента.

По этим зависимостям и подсчитываются данные вспомогательной расчетной таблицы. Ее фрагмент — табл. 7.5.

### § 7.8. Типы задач по расчету открытых русел трапецидального поперечного сечения при равномерном движении

Помимо приведенного в § 7.5 определения нормальной (бытовой) глубины протекания потока при равномерном движении могут иметь место некоторые другие типичные случаи расчета каналов и водоотводных русел трапецидальной формы поперечного сечения.

С л у ч а й 1. Известны расчетный расход  $Q$  (определяемый методами гидрологии), задана форма поперечного сечения (трапецидальная, прямоугольная, треугольная) и уклон дна  $i$  русла (который прежде всего диктуется профилем местности), тип грунтов, в которых устраивается русло или материал, из которого выполняется лоток (то есть известен коэффициент шероховатости  $n$ , допускаемая средняя в сечении скорость  $V_{\text{доп}}$  и ограничены минимальные значения коэффициента заложения откосов для неукрепленного русла  $m$ ).

Определяются в этом случае глубина равномерного движения потока  $h_0$ , ширина русла по дну  $b$  (при трапецидальной или прямоугольной форме его поперечного сечения), а если средняя в сечении скорость протекания потока  $V_0$  превосходит допустимую для данного типа грунтов скорость  $V_{\text{доп}}$ , то и необходимый тип крепления.

Порядок расчета следующий.

По таблицам, приводимым в специальных справочниках, ТУ, СНиПах, устанавливается допускаемая неразмывающая средняя в сечении скорость  $V_{\text{доп}}$  для заданного типа грунта (то есть без крепления).

По зависимости (7.84) для выбранного коэффициента заложения откосов подсчитывается  $\Psi_{\text{гн}}$  и по зависимости (7.65) или по табл. 7.3 (с подсчетом в последнем случае вспомогательного соотношения (7.88)) вычисляется максимальный гидравлический радиус  $R_{\text{max}}$ .

По зависимости (7.87) или табл. 7.1 в зависимости от  $R_{\text{max}}$  и  $n$  определяется максимально возможная средняя в сечении скорость для условий расчета  $V_{\text{max}}$ .

Сопоставляются значения  $V_{\text{max}}$  и  $V_{\text{доп}}$ : если  $V_{\text{max}} \leq V_{\text{доп}}$ , то укреплять русло не нужно, если  $V_{\text{max}} > V_{\text{доп}}$  — находят необходимый тип крепления русла и новое, соответствующее ему значение коэффициента шероховатости  $n$  и расчет повторяется до тех пор, пока не определится тот тип крепления, для которого  $V_{\text{max}} \leq V_{\text{доп}}$ . После этого в качестве расчетной средней в сечении скорости принимается  $V_p = V_{\text{max}}$ .

Полагая, что  $\eta_h = 2$  (то есть стремясь получить русла гидравлически наилучшего профиля) по табл. 7.4 находят относительную величину  $\eta_b = \frac{b}{R_{\text{max}}}$  и вычисляют ширину русла по дну  $b$ , которая округляется в большую сторону до целых дециметров; при этом ее минимальные значения обычно ограничиваются условиями проектирования, например, 0,5 м для дорожного водоотвода.

По новому значению ширины по дну  $b_1$  подсчитывается  $\eta_b = \frac{b_1}{R_{\text{max}}}$  и из таблицы находится соответствующая ей относительная глубина  $n_h$ .

Искомая нормальная глубина  $h_0 = \eta_h R_{\text{max}}$ .

Для проверки расчета необходимо при полученных значениях  $b$  и  $h_0$  вычислить расход воды  $Q$  и сопоставить его с заданным значением расхода. Если расхождение превысит 5 %, то расчет нужно уточнить.

При проведении такого расчета с использованием ЭВМ формулу (7.86) с учетом (7.65) следует представить в таком виде:

$$V_{\text{max}} = \frac{n}{\sqrt{i}} \left( \frac{Qn}{\chi_{\text{гн}} \sqrt{i}} \right)^{\frac{z}{2+z}}. \quad (7.115)$$

Затем она преобразуется в соответствии с выбранным осредненным значением  $z$ . Например, при  $z = 2/3$

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{Q_i^2 \frac{3}{2}}{n^3} \cdot \frac{1}{4(2\sqrt{1+m^2}-m)}}. \quad (7.116)$$

Определив по формуле (7.116) максимальную скорость для неукрепленного русла, сопоставляют ее с допускаемой.

При  $V_{\max} \leq V_{\text{доп}}$  расчетная средняя в сечении скорость  $V_{\text{рас}} = V_{\max}$ .

В этом случае минимальная площадь живого сечения русла определяется по формуле

$$\omega_{\min} = \frac{Q}{V_{\max}}, \quad (7.117)$$

и находится минимальная допускаемая для дорожного водоотвода глубина в русле при  $b = 0,5$  м

$$h = \frac{\sqrt{b^2 + 4m\omega_{\min}} - b}{2m}. \quad (7.118)$$

Поскольку, принимая произвольное значение ширины русла  $b$ , мы отклоняемся от русла гидравлически наиболее выгоднейшего профиля, нормальная глубина  $h_0$  будет несколько больше вычисленного значения  $h$ .

В связи с этим нормальная глубина  $h_0$  определяется подбором, который начинается с  $h$ , затем  $h_1 = h + 0,01$  м;  $h_2 = h_1 + 0,01$  м и т. д. Та первая глубина  $h_i$ , при которой вычисленный расход  $Q_i = \omega_i W_i \sqrt{i}$  станет больше заданного расхода  $Q$ , принимается за нормальную. На печать выводятся значения  $b$ ,  $h$ ,  $\omega$ ,  $V$ .

Если  $V_{\max} > V_{\text{доп}}$  для неукрепленного русла, в расчет последовательно вводят допускаемые скорости для стандартных типов укрепления и при окончании счета на печать выводится номер типа укрепления.

С л у ч а й 2. В русле трапецидального поперечного сечения необходимо определить ширину русла по дну  $b$  при заданных: форме русла, уклоне дна  $i$ , коэффициенте шероховатости  $n$ , расходе  $Q$  и ограниченной глубине протекания воды  $h$ .

Порядок расчета: по заданному коэффициенту заложения откосов вычисляется  $\chi_{гн}$  (см. зависимость (7.84)) и вычисляется соотношение

$$\frac{Qn}{\chi_{гн} \sqrt{i}}. \quad (7.119)$$

По табл. 7.3 находится  $R_{\max}$  и вычисляется

$$\eta_h = \frac{h_0}{R_{\max}}. \quad (7.120)$$

Затем, найдя по табл. 7.4 соотношение  $\eta_b = \frac{b}{R_{\max}}$ , соответствующее полученному  $\eta_h$  и заданному  $m$ , вычисляют ширину русла по дну

$$b = \eta_b R_{\max}. \quad (7.121)$$

С л у ч а й 3. При расчете известны уклон дна  $i$ , форма сечения (коэффициент заложения откосов  $m$  и ширина по дну  $b$ ), характеристика поверхности русла (коэффициент шероховатости  $n$ ) и глубина равномерного движения  $h_0$ .

Необходимо определить среднюю в сечении скорость протекания потока  $V_0$  и расход  $Q$ .

Вычисляются:

площадь живого сечения

$$\omega = (b + mh_0) h_0; \quad (7.122)$$

смоченный периметр

$$\chi = b + 2h_0 \sqrt{1+m^2}; \quad (7.123)$$

гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (7.124)$$

По табл. 7.1 по  $n$  и  $R$  определяется скоростная характеристика  $W$  и подсчитываются такие параметры:

средняя в сечении скорость равномерного движения

$$V_0 = W \sqrt{i}; \quad (7.125)$$

расход в русле

$$Q = \omega V_0. \quad (7.126)$$

Случай 4. При определении размеров и скорости протекания воды в безнапорных дорожных и канализационных трубах, а также гидротехнических тоннелях заданными являются расход  $Q$ , рекомендуемая относительная глубина наполнения  $\Delta$ , уклон дна  $i$ , состояние поверхности стенок (коэффициент шероховатости  $n$ ).

В общем случае задача может быть решена способом подбора. При этом необходимо учитывать, что диаметры сечений должны приниматься в соответствии с установленными стандартами.

При подборе принимаются радиусы сечения  $r_1, r_2, \dots, r_m$ , затем вычисляются с помощью табл. 7.5 соответствующие заданной относительной глубине наполнения  $\Delta$  площади живого сечения  $\omega = \omega' r^2$ , гидравлические радиусы  $R = R' r$ , определяются значения скоростной характеристики  $W$  (по табл. 7.1) и расходной характеристики  $K = \omega W$ . Последнее сравнивается с расчетным значением  $K_0 = \frac{Q}{V i}$ . Если значения  $K_0$

окажутся между значениями  $K_{n-1}$  и  $K_n$ , соответствующими двум соседним стандартным значениям  $r_{n-1}$  и  $r_n$ , то принимается  $r$  с ближайшим к  $K_0$  значением  $K$ . Затем следует уточнить относительную глубину наполнения  $\Delta$  и определить среднюю в сечении скорость протекающей воды  $V = W \sqrt{i}$ .

Дренажные трубы рассчитывают как безнапорные, но при условии полного их наполнения. С учетом этого определяется значение расчетной расходной характеристики  $K_0$ , по которой подбирается необходимый диаметр трубы (ближайший больший).

#### Вопросы для самопроверки

1. Условие существования равномерного движения.
2. Основное уравнение равномерного движения.
3. Средняя в сечении скорость и расход при равномерном движении.
4. Скоростная и расходная характеристики и их физический смысл.
5. Русло гидравлически наивыгоднейшего профиля.
6. Нормальная (бытовая) глубина и порядок ее определения.
7. Допускаемые (максимальная и минимальная) средние в сечении скорости при движении воды в открытых руслах.
8. Ограничения, накладываемые при назначении расчетной скорости в ходе проектирования каналов и других открытых русел.

## Глава 8. НАПОРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ

### § 8.1. Гидравлический расчет коротких и сифонных трубопроводов

Напорные трубопроводы подразделяются на короткие и длинные.

Для коротких трубопроводов местные потери соизмеримы с потерями по длине. К таким трубопроводам относятся всасывающие трубы центробежных насосов, сбросные трубы или сливные патрубки, сифоны, короткие трубопроводы из участ-

ков с разными диаметрами и т. п. В коротких трубопроводах местные потери составляют более 5—10 % общих потерь. Обычно трубы длиной менее 50 м относятся к коротким.

Для длинных трубопроводов потери напора по длине значительно превосходят местные потери, которыми в расчетах рассматриваемых трубопроводов пренебрегают. К длинным трубопроводам относятся водопроводы, газопро-