

$$K = \sqrt{\frac{Q^2 l}{H - \frac{Q^2}{\omega_0^2 2g\mu_{cp}^2}}} = \sqrt{\frac{0,04^2 \cdot 900}{22 - \frac{0,04^2}{0,003^2 \cdot 2 \cdot 9,80 \cdot 0,92^2}}} = 0,357 \text{ м}^3/\text{с} = 357 \text{ л/с.}$$

Зная  $K$ , по табл. 5-3 (см. стр. 212) находим диаметр трубопровода  $D = 200$  мм. Как видно, в качестве такого диаметра мы приняли сортаментный диаметр, дающий ближайшую к установленной выше величину  $K$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 5-1. Абелев А. С. Сельскохозяйственное водоснабжение и основы гидравлики. — Л.: Сельхозгиз, 1959.
- 5-2. Абрамов Н. Н., Поспелова М. М. Расчет водопроводных сетей. — М.: Госстройиздат, 1962.
- 5-3. Андрияшев М. М. Гидравлический расчет водопроводных сетей. — М.: Стройиздат, 1964.
- 5-4. Мошин Л. Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей. — М.: Госстройиздат, 1950.
- 5-5. Симмаков Г. В. Сифонные водосбросы (пособие к курсовому и дипломному проектированию). — Л.: из-дво ЛПИ им. М. И. Калинина, 1974.
- 5-6. Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных и пластмассовых водопроводных труб. — М.: Стройиздат, 1970.

#### ГЛАВА ШЕСТАЯ

### РАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

#### § 6-1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Ограничимся рассмотрением только турбулентного движения воды, относящегося к квадратичной области сопротивления (в доквадратичной области обычные каналы, встречающиеся в гидротехнической практике, могут работать относительно редко).

На рис. 3-29 (см. § 3-21) была представлена схема рассматриваемого движения, из которой видно, что уклон дна канала

$$i = \sin \theta, \quad (6-1')$$

поскольку величина  $l$  измеряется вдоль наклонной линии дна канала (угол  $\theta$  см. на рисунке). Такое движение воды получается в искусственных цилиндрических каналах.

В том случае, когда канал имеет, в частности, земляное русло (что особенно часто встречается в практике) скорости  $v$  в канале назначаются сравнительно малыми (чтобы не получить размыва грунта); при этом и уклоны дна земляных каналов получаются также небольшими. В связи с этим для земляных (и некоторых других) каналов можно считать, что

$$i = \sin \theta \approx \text{tg } \theta. \quad (6-1'')$$

Как видно, здесь мы можем поступать следующим образом: а) расстояние  $l$  — измерять по горизонтали, б) живые же сечения потока считать вертикальными, измеряя глубины  $h$  — по вертикали (см. рис. 6-1). Очевидно, в этом случае рис. 6-1 (на котором дно канала показано с большим уклоном)

следует рассматривать как чертеж, выполненный в искаженном масштабе (вертикальном масштабе — относительно крупном, горизонтальном — относительно мелком; именно поэтому уклон дна канала на этом рисунке получился большим). Ниже мы ограничимся изучением только случая, характеризуемого схемой, представленной на рис. 6-1.

Основные зависимости, используемые при расчете таких каналов (когда  $J_e = J = i = \text{tg } \theta$ ), следующие:

$$(I) \quad Q = \omega v = \text{const (вдоль потока)}; \quad (6-2)$$

$$v = C\sqrt{RJ}; \quad (6-3)$$

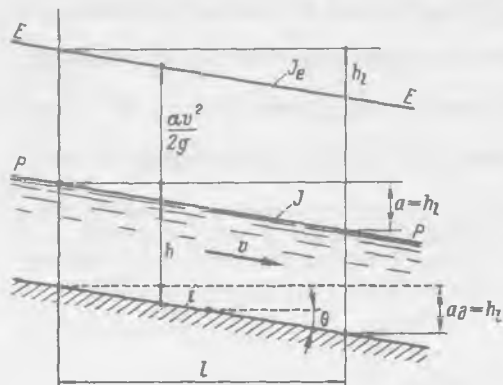


Рис. 6-1. Схема (в искаженном масштабе) равномерного движения воды в канале с малым уклоном дна ( $\sin \theta \approx \text{tg } \theta$ )

последнюю зависимость, учитывая, что в данном случае  $h_1 = a = a_0$  (см. рис. 6-1) и что

$$J = i. \quad (6-4)$$

переписываем в виде

$$(II) \quad v = C\sqrt{Ri}. \quad (6-5)$$

Дополнительно будем пользоваться еще формулами:

$$(III) \quad i = \frac{v^2}{C^2 R}; \quad (6-6)$$

$$(IV) \quad h_1 = il = \frac{v^2}{C^2 R} l; \quad (6-7)$$

$$(V) \quad Q = \omega C\sqrt{Ri}. \quad (6-8)$$

Кроме того, иногда будем применять зависимости:

$$\left. \begin{aligned} K &= \omega C\sqrt{R}; & W &= C\sqrt{R}; \\ K &= \frac{Q}{\sqrt{i}}; & W &= \frac{v}{\sqrt{i}}; \end{aligned} \right\} \quad (6-9)$$

$$Q = K\sqrt{i}; \quad v = W\sqrt{i}; \quad (6-10)$$

$$i = \frac{Q^2}{K^2}; \quad i = \frac{v^2}{W^2}. \quad (6-11)$$

Что касается коэффициента Шези  $C$ , то он определяется так, как это было пояснено в § 4-13.

## § 6-2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЖИВОГО СЕЧЕНИЯ ПОТОКА В КАНАЛЕ

Наиболее часто встречаются поперечные сечения каналов, показанные на рис. 6-2. Приведем ниже формулы, служащие для определения величин  $\omega$ ,  $\chi$  и  $R$ .

1°. Симметричное трапецидальное поперечное сечение (рис. 6-2, а). Здесь  $b$  — ширина канала по дну;  $h$  — глубина наполнения канала; величина  $m$ , указанная на чертеже, — коэффициент откоса:

$$m = \text{ctg } \psi, \quad (6-12)$$

где угол  $\psi$  (см. чертеж) задают не по соображениям гидравлического расчета, а учитывая устойчивость грунта откоса (если откосы канала образуются не скальным грунтом). Ширина потока поверху:

$$B = b + 2mh \quad (6-13)$$

Величины живого сечения  $\omega$  и смоченного периметра  $\chi$  удобно вычислять по следующим геометрическим зависимостям:

$$\omega = (b + mh)h; \quad (6-14)$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}. \quad (6-15)$$

Зная  $\omega$  и  $\chi$ , определяем величину  $R$ :

$$R = \omega/\chi. \quad (6-16)$$

Иногда при расчете каналов пользуются понятием относительной ширины канала по дну:

$$\beta = b/h. \quad (6-17)$$

Величины  $\omega$  и  $\chi$  через  $\beta$  выражаются следующим образом:

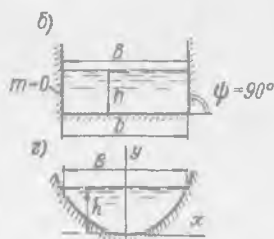
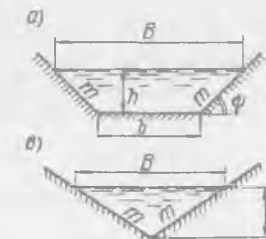


Рис. 6-2. Примеры поперечного сечения каналов

$$\omega = h^2(\beta + m); \quad (6-18)$$

$$\chi = h(\beta + 2\sqrt{1 + m^2}). \quad (6-19)$$

2°. Прямоугольное поперечное сечение (рис. 6-2, б). Здесь

$$B = b; \quad m = \text{ctg } 90^\circ = 0. \quad (6-20)$$

$$\omega = bh; \quad \chi = b + 2h: \quad (6-20)$$

в случае весьма широкого прямоугольного русла

$$\chi \approx b. \quad (6-21)$$

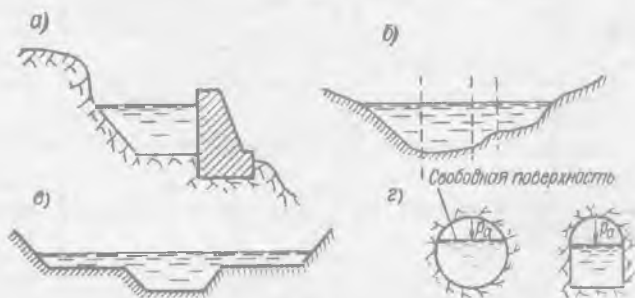


Рис. 6-3. Примеры поперечного сечения каналов

3°. Треугольное поперечное сечение (рис. 6-2, в). Здесь

$$\left. \begin{aligned} b = 0; \quad B = 2mh; \\ \omega = mh^2; \quad \chi = 2h\sqrt{1 + m^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6-22)$$

4°. Параболическое поперечное сечение (рис. 6-2, з). Уравнение параболы, образующей смоченный периметр, имеет вид:

$$x^2 = 2py, \quad (6-23)$$

где  $p$  — параметр параболы; оси  $x$  и  $y$  указаны на рис. 6-2, г. Для такого русла ширина потока поверху  $B$  может быть найдена (для заданной глубины  $h$ ) из уравнения (6-23);

$$\omega = \frac{2}{3} Bh; \quad (6-24)$$

$$\left. \begin{aligned} \chi &\approx B && \text{при } (h:B) \leq 0,15; \\ \chi &\approx B \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{h}{B} \right)^2 \right] && \text{при } (h:B) \leq 0,33; \\ \chi &\approx 1,78h + 0,61B && \text{при } 0,33 < (h:B) < 2,00; \\ \chi &\approx 2h && \text{при } 2,00 \leq (h:B). \end{aligned} \right\} \quad (6-25)$$

5°. Прочие поперечные сечения. Отметим следующие профили:

- а) несимметричный профиль (рис. 6-3, а);
- б) неправильный профиль (рис. 6-3, б); в этом случае, как и в предыдущем, величины  $\omega$  и  $\chi$  приходится вычислять, разбивая поперечное сечение канала на отдельные части;
- в) составной профиль (рис. 6-3, в);
- г) замкнутые профили (рис. 6-3, г); здесь имеем так называемый закрытый канал.

### § 6-3. ГИДРАВЛИЧЕСКИ НАИВЫГОДНЕЙШИЙ ПОПЕРЕЧНЫЙ ПРОФИЛЬ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОГО КАНАЛА

Предположим, что нам заданы: 1) форма поперечного сечения канала — трапецидальная; 2) коэффициент откоса канала  $m = m_0$ ; 3) уклон дна канала  $i = i_0$ ; 4) коэффициент шероховатости  $n = n_0$ ; 5) расход  $Q = Q_0$ .

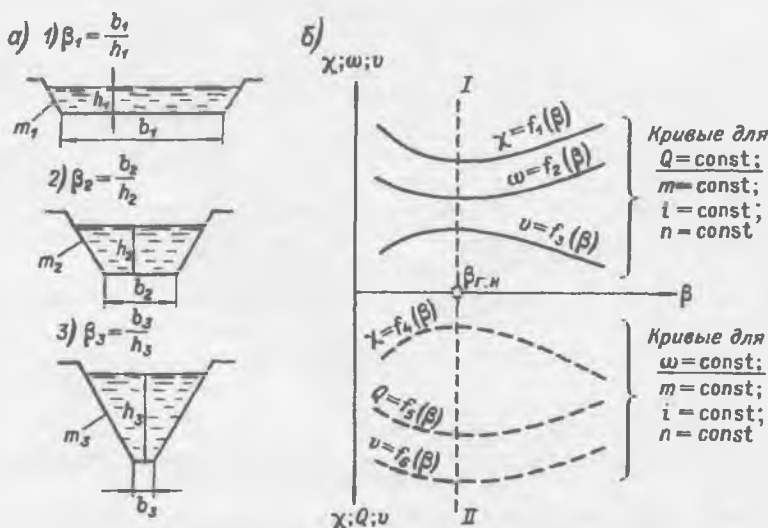


Рис. 6-4. Изменение элементов живого сечения ( $\chi$ ,  $\omega$ ,  $v$ ;  $Q$ ) с изменением относительной ширины  $\beta$  трапецидального канала

Положим, что, исходя из этих данных, требуется спроектировать поперечный профиль канала (т. е. найти его размеры).

Такая задача имеет много решений. Можно наметить целый ряд различных поперечных профилей канала, удовлетворяющих указанным условиям (см.

рис. 6-4, а); для этого чертежа имеем

$$\left. \begin{aligned} m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m_0 = \text{const}; \\ i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_0 = \text{const}; \\ n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_0 = \text{const}; \\ Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_0 = \text{const}, \end{aligned} \right\} \quad (6-26)$$

где индексами 1, 2 ... обозначены величины, относящиеся соответственно к 1, 2, 3-му, ... вариантам канала. На рисунке для примера показаны только три варианта; однако, рассматривая этот чертеж, надо себе представить множество таких вариантов, из которых первый характеризуется весьма малой глубиной, а последний — весьма малой шириной. Необходимая пропускная способность для первого варианта обеспечивается приданием каналу весьма большой ширины, а для последнего варианта — приданием каналу весьма большой глубины.

Для рассматриваемых вариантов будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots; \\ \chi_1 \neq \chi_2 \neq \chi_3 \neq \dots \end{aligned} \right\} \quad (6-27)$$

Легко видеть, что первый и последний варианты будут характеризоваться относительно большой поверхностью трения, определяемой размером  $\chi$ , равным  $b$  (для первого варианта) и  $2h$  (для последнего варианта); поэтому скорость  $v$  для этих крайних вариантов должна быть относительно малой. Из сказанного вытекает, что среди ряда рассматриваемых вариантов имеется такой промежуточный, для которого средняя скорость  $v$  оказывается максимальной

$$v = v_{\text{макс}} \quad (6-28)$$

а следовательно, площадь живого сечения  $\omega$  (равная  $Q_0 : v$ ) — минимальной:

$$\omega = \omega_{\text{мин}} \quad (6-29)$$

Поперечный профиль, удовлетворяющий этим условиям, и является гидравлически наивыгоднейшим. Как видно, гидравлически наивыгоднейшим профилем трапецеидального канала называется профиль, который (при заданных  $m$ ,  $i$ ,  $n$ ,  $Q$ ) характеризуется максимально возможной средней скоростью  $v$ , а следовательно, минимальной площадью живого сечения.

Обозначим относительную ширину по дну гидравлически наивыгоднейшего профиля через  $\beta_{г.н}$ :

$$\beta_{г.н} = \left( \frac{b}{h} \right)_{г.н} \quad (6-30)$$

При этом все сказанное представим кривыми<sup>1</sup>  $\chi = f_1(\beta)$ ;  $\omega = f_2(\beta)$  и  $v = f_3(\beta)$ , показанными на рис. 6-4, б сплошными линиями (расположенными выше оси  $\beta$ ).

Дополнительно ниже оси  $\beta$  на данном графике изобразим штриховыми линиями кривые  $\chi = f_4(\beta)$ ;  $Q = f_5(\beta)$  и  $v = f_6(\beta)$ , построенные в предположении, что для проектирования вариантов, показанных на рис. 6-4, а, нам задано не  $Q = \text{const}$ , а  $\omega = \text{const}$ ; расход  $Q$  с изменением  $\beta$  (при заданных  $\omega$ ,  $m$  и  $i$ ) — меняется. Из рассмотрения штриховых кривых видно, что гидравлически наивыгоднейшим профилем трапеце-

<sup>1</sup> Указанные кривые для данного конкретного случая могут быть построены в результате решения задачи № 5 (см. § 6-4).

идального канала может быть назван также профилем, который (при заданных  $m, i, n, \omega$ ) характеризуется максимально возможной пропускной способностью.

Вертикаль  $I-II$  на рис. 6-4, б отвечает максимумам и минимумам соответствующих функций, а следовательно, и величине  $\beta_{г.н}$ . Рассматривая сплошные кривые графика, расположенные выше оси  $\beta$ , для определения величины  $\beta_{г.н}$  можем написать следующую систему двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega}{d\beta} &= 0; \\ \frac{d\chi}{d\beta} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (6-31)$$

как видно, для отыскания  $\beta_{г.н}$  мы здесь приравняли нулю соответствующие производные (поскольку  $\beta_{г.н}$  отвечает минимуму функций  $\omega$  и  $\chi$ ).

Подставляя в (6-31) выражения (6-18) и (6-19) и выполняя дифференцирование, получаем:

$$\frac{d\omega}{d\beta} = 2h\beta_{г.н} \left( \frac{dh}{d\beta} \right)_{г.н} + h^2 + 2mh \left( \frac{dh}{d\beta} \right)_{г.н} = 0; \quad (6-32)$$

$$\frac{d\chi}{d\beta} = \beta_{г.н} \left( \frac{dh}{d\beta} \right)_{г.н} + h + 2\sqrt{1+m^2} \left( \frac{dh}{d\beta} \right)_{г.н} = 0. \quad (6-33)$$

Решая эту систему уравнений, находим

$$\beta_{г.н} = \left( \frac{b}{h} \right)_{г.н} = 2(\sqrt{1+m^2} - m). \quad (6-34)$$

Выражение (6-34) можно было бы найти и из рассмотрения кривой  $\chi = f_4(\beta)$ , показанной на графике штриховой линией ниже оси  $\beta$ . При этом пришлось бы только решать совместно уравнение (6-33) и уравнение  $\omega = h^2(\beta + m) = \text{const}$ .

Выше мы искали гидравлически наиболее выгодные размеры заданной формы (трапециевидной). Можно, разумеется, поставить здесь и иную задачу: среди всех возможных форм поперечного сечения русла искать гидравлически наиболее выгодную форму. Легко показать, что гидравлически наиболее выгодной формой живого сечения является полукруг (поскольку в этом случае мы имеем минимальную величину  $\chi$ , а следовательно, минимальную поверхность трения).



Рис. 6-5. Несовпадение минимальной площади живого сечения потока с минимальной площадью поперечного сечения земляной выемки

Стремясь получить минимальную стоимость каналов, откапываемых в грунте, их иногда проектируют, соблюдая условие  $\beta = \beta_{г.н}$ , так как при этом условии площадь живого сечения оказывается минимальной. Надо, однако, подчеркнуть, что в практике достаточно часто и отступают от указанного условия, причем проектируют каналы, принимая иные значения  $\beta$  ( $\beta \neq \beta_{г.н}$ ). Такое положение объясняется тем, что гидравлически наиболее выгодные профили далеко

не всегда оказываются экономически наиболее выгодными. Действительно, экономически наиболее выгодный профиль канала должен характеризоваться минимумом объема земляных работ, а следовательно, для канала, выполняемого в выемке, минимальным значением площади выемки  $\Omega = \omega + \omega_0$ , а не площади живого сечения  $\omega$  (рис. 6-5).

Дополнительно необходимо учитывать следующее важное обстоятельство.

Гидравлически наивыгоднейшие каналы получаются относительно глубокими; величина  $\beta$  для них оказывается сравнительно малой. Такие глубокие каналы часто затруднительно откапывать в грунте и эксплуатировать. Вместе с тем можно показать, что кривая  $\omega = f_2(\beta)$ , схематично представленная на рис. 6-4, б, является весьма пологой (ее минимум выражен весьма слабо); достаточно принять для проектируемого канала площадь живого сечения равной не  $\omega_{\min}$ , а, например,  $1,03\omega_{\min}$  (т. е. увеличить  $\omega_{\min}$  всего на 3%), и мы при этом величину  $\beta$  получим относительно большой.

В связи со сказанным, можно ввести понятие практически наивыгоднейшей величины  $\beta_{г.н}$  (обозначим ее через  $\beta_{г.н}^0$ ), при которой величина  $\omega$  будет отличаться от  $\omega_{\min}$  менее, чем на 3–4%, причем каналы будут получаться сравнительно малой глубины. Величина  $\beta_{г.н}^0$  может иметь любое значение, лежащее в пределах:

$$\beta_{г.н} \leq \beta_{г.н}^0 \leq (\beta_{г.н})_{\text{пред}}$$

где  $\beta_{г.н}^0$  — такая величина  $\beta$ , при которой  $\omega$  отличается от  $\omega_{\min}$  на 3–4%; значение  $(\beta_{г.н})_{\text{пред}}$  можно найти по формуле (предложенной нами):<sup>1</sup>

$$(\beta_{г.н})_{\text{пред}} = 2,5 + \frac{m}{2}. \quad (6-34')$$

#### § 6-4. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ РАСЧЕТЕ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ НА РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ

Трапецеидальный канал характеризуется следующими шестью величинами  $b$ ,  $h$ ,  $m$  (эти три величины целиком определяют размеры живого сечения канала),  $n$ ,  $i$ ,  $Q$  (или  $v = Q/\omega$ ). Некоторые из приведенных величин бывают заданы теми или другими условиями проектирования. Задача гидравлического расчета обычно состоит в том, чтобы, зная пять из названных величин, найти шестую. Ниже излагаются установившиеся в практике шаблоны решения такого рода вопросов, связанных с расчетом и проектированием каналов (слово «задача» здесь применяется в несколько условном смысле).

1°. Задачи, в которых живое сечение канала задано, т. е. в число заданных величин входят  $b$ ,  $h$  и  $m$ . Эти задачи решаются непосредственно, без подбора искомой величины.

Задача 1. Даны все размеры живого сечения (т. е. величины  $b$ ,  $h$ ,  $m$ ), уклон дна  $i$  и коэффициент шероховатости  $n$ . Требуется найти шестую величину — расход  $Q$  воды в канале.

Ход решения задачи:

1) Зная размеры живого сечения, находим  $\omega$  и  $\chi$  [по зависимостям (6-14) и (6-15)];

2) находим  $R = \omega/\chi$ ;

3) зная  $R$  и  $n$ , по данным § 4-13 находим  $C$ ;

4) зная  $C$  и  $R$ , определяем  $v$ :

$$v = C\sqrt{Ri};$$

5) зная  $v$  и  $\omega$ , находим  $Q$ :

$$Q = \omega v.$$

<sup>1</sup> Формула (6-34') дана для условий, когда  $C$  вычисляется по Маннингу. При вычислении  $C$  по Павловскому формула (6-34') приводит нас к большим отклонениям  $\omega$  от  $\omega_{\min}$  (например, до 10%).

Задача об установлении области практически наивыгоднейших величин  $\beta$  была решена ранее (в несколько другом виде) А. А. Угинчусом [6-4] и А. М. Латышенковым (см. Тр. ин-та ВОДГЕО, вып. 21, Инженерная гидравлика, 1968).

Задача 2. Даны все размеры живого сечения (т. е. величины  $b$ ,  $h$ ,  $m$ ),  $n$  и  $Q$ . Требуется найти шестую величину — неизвестную  $i$ , т. е. уклон дна канала, при котором канал заданного поперечного сечения и шероховатости будет пропускать заданный расход  $Q$ .

Ход решения задачи:

1) так же, как и выше, находим величины  $\omega$ ,  $\chi$ ,  $R$ ,  $C$ ;

2) зная  $\omega$ , находим  $v$ :

$$v = Q/\omega;$$

3) по формуле (6-6)

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

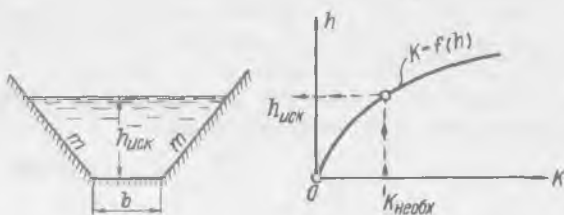


Рис. 6-6. К задаче 3

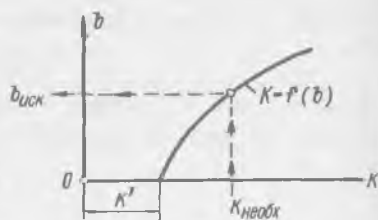


Рис. 6-7. К задаче 4

вычисляем  $i$ .

2°. Задачи, в которых живое сечение канала не задано, т. е. в число искомых величин входит  $b$  или  $h$ .<sup>1</sup> Задачи этой группы всегда решаются путем подбора искомой величины.

Задача 3. Даны  $m$ ,  $b$ ,  $n$ ,  $i$ ,  $Q$ . Требуется найти глубину наполнения канала  $h$ .

Ход решения задачи:

1) находим модуль расхода, которым должен характеризоваться рассчитываемый канал. Этот модуль будем называть **необходимым** и обозначать через  $K_{\text{необх}}$ ; очевидно,

$$K_{\text{необх}} = \frac{Q}{\sqrt{i}};$$

2) составляем таблицу по форме 1, в которой задаемся рядом значений  $h$ , и для каждого  $h$  вычисляем соответствующий модуль расхода  $K$ ;

3) по данным 1-й и 10-й строк таблицы строим на рис. 6-6 график  $K = f(h)$ ;

4) по этому графику, зная  $K_{\text{необх}}$ , находим искомое  $h$ , как показано на чертеже (см.  $h_{\text{иск}}$ ).

Заметим, что кривая  $K = f(h)$  имеет выпуклость, обращенную в сторону оси  $h$ , и проходит через начало координат (так как при  $h = 0$  значение  $K = 0$ ).

Задача 4. Даны  $m$ ,  $h$ ,  $n$ ,  $i$ ,  $Q$ . Требуется подобрать необходимую ширину канала по дну  $b$ .

Ход решения задачи:

1) находим **необходимый** модуль расхода:

$$K_{\text{необх}} = \frac{Q}{\sqrt{i}};$$

<sup>1</sup> Коэффициент откоса  $m$ , как правило, бывает задан для гидравлического расчета



№ строки	Величина или расчетная формула	Единица измерения	Задаваемые и находимые численные значения				Примечания
			$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	
1	$h$	м					$m = \dots$ $b = \dots$
2	$mh$	м					
3	$b + mh$	м					
4	$\omega = (b + mh)h$	м <sup>2</sup>					$2\sqrt{1+m^2} = \dots$
5	$h(2\sqrt{1+m^2})$	м					
6	$\chi = b + h(2\sqrt{1+m^2})$	м					по формуле при $n = \dots$
7	$R = \omega / \chi$	м					
8	$C$	$\sqrt{\frac{M}{c^2}}$					
9	$\sqrt{R}$	$\sqrt{M}$					
10	$K = \omega C \sqrt{R}$	м <sup>3</sup> /с					

Примечания. 1) При построении такого рода плавных кривых желательно (с целью экономии времени) вычислять возможно меньшее число точек; вместе с тем намечать менее четырех точек нельзя (четвертая точка должна рассматриваться как контрольная); в данном частном случае четвертой точкой может являться начало координат. Подчеркнем, что всякого рода вычисления, подобные поясненным выше, всегда должны выполняться в виде таблиц (а не в «строчку»). Форма таких таблиц должна быть предварительно разработана с таким расчетом, чтобы в них помещались результаты в сх арифметических вычислений.

2) Необходимо иметь в виду, что расчеты, осуществляемые методом подбора и выполняемые, например, в табличной форме, как то пояснено выше, не включаются в пояснительные записки к проектам сооружений. Такого рода расчеты остаются в черновиках. В пояснительной же записке указывается только окончательно найденное значение и дается поверочный расчет.

№ строки	Величина или расчетная формула	Единица измерения	Задаваемые и находимые численные значения				Примечания
			$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	
1	$b$	м					$m = \dots$ ; $mh = \dots$ $h = \dots$
2	$b + mh$	м					
3	$\omega = (b + mh)h$	м <sup>2</sup>					
4	$\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2}$	м					$2h\sqrt{1+m^2} = \dots$
5	$R = \frac{\omega}{\chi}$	м					По формуле при $n = \dots$
6	$C$	$\sqrt{\frac{M}{c^2}}$					
7	$\sqrt{R}$	м					
8	$K = \omega C \sqrt{R}$	м <sup>3</sup> /с					

2) составляем таблицу по форме 2, в которой задаемся рядом значений  $b$  и для каждого  $b$  вычисляем соответствующий модуль расхода  $K$ ;

3) по данным 1-й и 8-й строк таблицы строим график (рис. 6-7)  $K = f(b)$ ;

4) по этому графику, зная  $K_{\text{необ}}$ , находим искомое  $b$ .

Заметим, что кривая  $K = f(b)$  не проходит через начало координат. Модуль расхода  $K'$ , указанный на графике, отвечает треугольному руслу (когда  $b = 0$ ).

**Задача 5.** Даны  $m, n, i, Q, \beta$ . Требуется найти  $b$  и  $h$ .

Ход решения задачи:

1) находим необходимый модуль расхода:

$$K_{\text{необх}} = \frac{Q}{\sqrt{i}};$$

2) составляем таблицу по форме 1, дополняя ее одной строкой:  $b = \beta h$ . В этой таблице задаемся рядом значений  $h$  (в строке 1) и затем в дополнительной строке 2 вычисляем соответствующие значения  $b$ ; после этого вычисляем соответствующие значения  $K$ ;

3) строим график (рис. 6-6)

$$K = f(h);$$

4) по этому графику находим искомую глубину  $h_{\text{иск}}$ ;

5) зная  $h$ , определяем  $b$  ( $b = \beta h$ ).

**3. Задачи, в которых среди заданных величин — средняя скорость  $v$ .** Рассмотрим следующие задачи.

**Задача 6.** Даны  $m, b, h$  (т. е. задано живое сечение),  $n, v$ . Требуется найти  $Q$  и  $i$ .

Ход решения задачи:

1) вычисляем площадь живого сечения  $\omega$ :

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

2) находим расход  $Q$ :

$$Q = \omega v;$$

3) определяем уклон дна  $i$ :

$$i = \frac{v^2}{C^2 R},$$

где  $C$  и  $R$  легко могут быть найдены предварительно (см., например, задачу 1).

**Задача 7.** Даны: а)  $m, n, Q, v$ ; б) одна из величин:  $h$  или  $b$ . Требуется найти: а) уклон  $i$ ; б) величину  $b$  или  $h$ .

Ход решения задачи:

1) вычисляем площадь живого сечения  $\omega$ :

$$\omega = Q/v;$$

2) имеем известное геометрическое уравнение

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

это уравнение содержит одно неизвестное:  $b$  или  $h$ . Решая данное уравнение, находим недостающий размер живого сечения;

3) уклон  $i$  определяем по формуле:

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

**Задача 8.** Даны  $m, n, Q, i, v$ . Требуется найти  $b$  и  $h$ .

Ход решения задачи:

1) вычисляем величину  $\omega$  и модуль скорости  $W$ :

$$\omega = \frac{Q}{v} = A \text{ (обозначение);}$$

$$W = \frac{v}{\sqrt{i}} = B \text{ (обозначение);}$$

2) выписываем систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$(I) \quad \omega = (b + mh)h = f_1(b, h);$$

$$(II) \quad W = C\sqrt{R} = f_2(b, h).$$

Эта система двух уравнений может быть переписана в виде

$$\left. \begin{array}{l} (I) \quad (b + mh)h = A, \\ (II) \quad C\sqrt{R} = B, \end{array} \right\}$$

где  $A$  и  $B$  — известные числа;

3) искомые величины находим, решая указанную систему уравнений с неизвестными  $b$  и  $h$  (путем подбора или графически).

### § 6-5. ОГРАНИЧЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ ПРИ РАСЧЕТЕ КАНАЛОВ. ПЕРЕПАДЫ

Рассмотрим вначале земляной канал, смоченная поверхность которого не покрыта каким-либо защитным слоем, предохраняющим грунт от размыва его движущейся водой.

В такой канал (или на тот или другой его участок) может поступать (со стороны) вода: а) или «чистая», т. е. практически не содержащая взвешенных частиц грунта, б) или содержащая взвешенные частицы грунта.<sup>1</sup>

Проектируя так называемый «статически устойчивый» земляной канал, т. е. канал, не подвергающийся в процессе его эксплуатации существенным деформациям (вызванными его размывом или заилением), необходимо требовать, чтобы средняя скорость  $v$  движения воды в канале удовлетворяла следующим условиям:<sup>2</sup>

1) в случае, когда в канал поступает «чистая» вода, скорость в проектируемом канале должна быть:

$$v \leq v_{\text{макс}} \quad (6-35)$$

где  $v_{\text{макс}}$  — так называемая максимальная допускаемая скорость при равномерном движении воды; эту скорость называют также максимальной неразмывающей скоростью; считают, что при  $v > v_{\text{макс}}$  русло канала будет размываться водой;

2) в случае, когда в канал поступает (со стороны) вода со взвешенными наносами, скорость  $v$  должна удовлетворять соотношению:

$$v_{\text{мин}} < v < v_{\text{макс}} \quad (6-36)$$

где  $v_{\text{мин}}$  — так называемая минимальная допускаемая скорость при равномерном движении воды; эту скорость также называют минимальной незаиляющей скоростью; считают, что при  $v < v_{\text{мин}}$  русло канала будет заиляться отлагающимися в нем наносами, которые несет поток.

Действительная средняя скорость  $v$  движения воды в канале зависит, например, от уклона дна канала; что касается  $v_{\text{макс}}$ , то эта скорость не

<sup>1</sup> Вопроса о возможном поступлении в канал так называемых «донных наносов» касаться не будем.

<sup>2</sup> См. Е. Н. Кожевникова. О допускаемых скоростях при гидравлическом расчете земляных каналов. Сборник научно-методических статей по гидравлике. Вып. 2. — М.: Высшая школа, 1978.

зависит от уклона дна канала, она должна зависеть от рода материала, образующего канал (в данном случае от качества грунта); как показывают опыты, эта скорость зависит также от глубины воды в канале.

При скорости  $v > v_{\text{макс}}$  вертикальные пульсационные скорости  $u'_z$  получаются столь большими, что поверхностные частицы грунта (образующего русло канала), оторвавшись от дна, поддерживаются во взвешенном состоянии.

Для примера можно привести в табл. 6-1 приближенные значения  $v_{\text{макс}}$ ; эти данные относятся как к грунтам, так и к некоторым защитным покрытиям, используемым для защиты каналов от размыва (подробные сведения о  $v_{\text{макс}}$  даются в соответствующих нормах; см., например, [6-9]). Данные табл. 6-1 относятся к прямолинейным (в плане) каналам. Для извилистых (в плане) каналов некоторые авторы рекомендуют снижать  $v_{\text{макс}}$  на  $5 \div 20\%$  [6-6].

Таблица 6-1

Максимальные допустимые скорости при равномерном движении воды

Материал смоченной поверхности канала	$v_{\text{макс}}$ , м/с	Материал смоченной поверхности канала	$v_{\text{макс}}$ , м/с
Несвязные грунты:		Скальные породы:	
пыль, ил . . . . .	0,15 ÷ 0,20	осадочные . . . . .	2,5 ÷ 4,5
песок . . . . .	0,20 ÷ 0,60	кристаллические . . . . .	20 ÷ 25
гравий . . . . .	0,60 ÷ 1,20	Крепления:	
Связные грунты:		одиночная мостовая . . . . .	3,0 ÷ 3,5
супесь и суглинок . . . . .	0,7 ÷ 1,0	двойная мостовая . . . . .	3,5 ÷ 4,5
глина . . . . .	1,0 ÷ 1,8	бетонная облицовка . . . . .	5,0 ÷ 10,0

Что касается минимальной допускаемой (минимальной незаилающей) скорости  $v_{\text{мин}}$ , то численное значение этой скорости может быть установлено для данного конкретного случая по одной из имеющихся эмпирических формул [см., например, формулу (20-12)]; подобные формулы основаны на использовании понятия о так называемой «транспортирующей способности» потока (см. гл. 20).

Необходимо учитывать, что в случае, когда поток воды, поступающий в канал, оказывается сильно насыщенным взвешенными наносами (хотя бы весьма мелкими), скорость  $v_{\text{мин}}$  может оказаться больше скорости  $v_{\text{макс}}$ , т. е.  $v_{\text{мин}} > v_{\text{макс}}$ . При таком соотношении этих скоростей запроектировать статически устойчивый канал не представляется возможным; здесь мы будем получать статически неустойчивое русло (как правило, существенно деформирующееся во времени).<sup>1</sup>

Иногда (при обычно встречающемся условии, когда  $v_{\text{мин}} < v_{\text{макс}}$ ), проектируя статически устойчивый канал, не удастся выдержать соотношение  $v > v_{\text{мин}}$ . В таком случае приходится идти на периодическую очистку канала от отложившихся в нем наносов. Что касается условия  $v \leq v_{\text{макс}}$ , то для статически устойчивого канала, т. е. канала, проектируемого как недеформирующегося (во времени), это условие всегда должно быть выдержано.

В том случае, когда на первом этапе расчета получаем неприемлемое соотношение  $v > v_{\text{макс}}$ , приходится предусматривать те или другие мероприятия, позволяющие или увеличить скорость  $v_{\text{макс}}$  или уменьшить скорость  $v$  и в результате добиться соотношения  $v \leq v_{\text{макс}}$ .

1°. Мероприятия по увеличению скорости  $v_{\text{макс}}$ . Здесь приходится применять, например, покрытие откосов и дна канала каким-либо креплением в виде

<sup>1</sup> Проектирование и расчет таких каналов имеют свою теорию, основанную на использовании «транспортирующей способности потока».

каменной мостовой, бетонной облицовки и т. п. Предусмотрев такое крепление для канала, выполненного в грунте, мы, естественно, увеличим  $v_{\text{макс}}$ .

2°. Мероприятия по уменьшению скорости  $v$ . Скорость  $v = C\sqrt{Ri}$ . Как видно, чтобы уменьшить  $v$ , необходимо уменьшить или  $R$ , или  $C$ , или  $i$ . В соответствии с этим здесь приходится различать три разных приема:

1) изменение формы поперечного сечения канала, чтобы несколько уменьшить гидравлический радиус; однако за счет изменения  $R$  не удастся ощутимо снизить скорость  $v$ ;

2) создание так называемой искусственной шероховатости, в результате чего повышается численное значение коэффициента шероховатости  $n$  и снижается численное значение коэффициента Шези  $C$ ; этот прием в случае достаточно длинных каналов бывает неприемлем с экономической точки зрения;



Рис. 6-8. Устройство перепада для снижения скорости  $v$



Рис. 6-9. Схема ирригационного канала с перепадами

3) уменьшение уклона  $i$  дна канала; обычно приходится обращаться именно к такому приему; при этом по длине канала устраивают перепады.

Поясним устройство перепадов, руководствуясь рис. 6-8.<sup>1</sup>

Стремясь получить минимальный объем земляных работ, линию дна  $AB$  канала назначают примерно параллельной поверхности земли. Таким образом, уклон  $i$  дна канала на первом этапе расчета принимается равным уклону поверхности земли.

Если, приняв этот уклон и выполнив гидравлический расчет, получим  $v > v_{\text{макс}}$ , то в этом случае следует устроить в канале перепад  $AD$  и уменьшить уклон  $i$  до величины  $i'$ ; уклон  $i'$ , как правило, определяют, исходя из условия<sup>2</sup>

$$v = v_{\text{макс}}$$

легко видеть, что такое решение будет, с одной стороны, технически приемлемо, с другой же стороны, экономически наиболее выгодно (при  $v < v_{\text{макс}}$  будем получать большую величину  $\omega$ , меньшую величину  $i'$ , а следовательно, будем иметь увеличение объема земляных работ).

Из чертежа видно, что высота перепада  $c$  будет

$$c = \overline{AC} - \overline{DC} = il - i'l',$$

где  $l$  и  $l'$  — длины канала.

Так как уклоны  $i$  каналов вообще малы, то можно считать, что

$$l \approx l' \approx l_0,$$

где  $l_0$  — длина горизонтальной проекции канала. Учитывая это, можем написать, что

$$c = (i - i') l_0.$$

<sup>1</sup> Для примера ниже будем иметь в виду каналы, устраиваемые для орошения земель (иригационные каналы).

<sup>2</sup> При этом приходится решать задачу № 7 (§ 6-4).

Если величина  $c$  получается большой (например, более 2–3 м), то по длине канала устраивают несколько перепадов, разбив общее падение на отдельные части (рис. 6-9). Сами перепады устраивают в виде подпорных стен и т. п.

Надо заметить, что в районе перепадов получается неравномерное движение воды, которое будет изучаться нами далее.

В заключение приведем следующее замечание: указанные выше численные значения  $v_{\max}$  относятся только к случаю равномерного движения воды, когда во всех живых сечениях имеется «нормальная» эпюра осредненных скоростей, свойственная равномерному движению. При нарушении этой эпюры, что имеет место, например, в районе упомянутых выше перепадов, численные значения  $v_{\max}$  изменяются.

#### § 6-6. РАСЧЕТ КАНАЛОВ, ИМЕЮЩИХ СОСТАВНОЙ ПОПЕРЕЧНЫЙ ПРОФИЛЬ

Представим на рис. 6-10 так называемый составной профиль канала. Этот профиль является «неправильным» (см. начало § 4-2). Поэтому его нельзя рассчитывать, следуя тому методу, который был изложен в § 6-4. Здесь приходится поступать следующим образом.

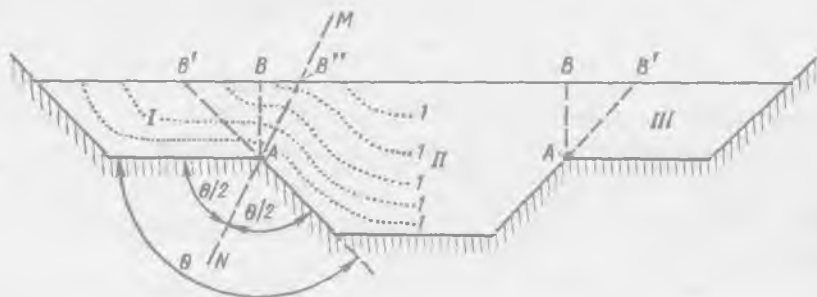


Рис. 6-10. Канал составного поперечного профиля  
I – изотахи

Проводим линии  $AB$  или линии  $AB'$ , причем разбиваем все живое сечение на отдельные части I, II и III.

Далее каждую выделенную часть рассчитываем как самостоятельный канал (см. § 6-4), не включая при этом расчете участки  $AB$  (или  $AB'$ ) в длины соответствующих смоченных периметров.

Определив для отдельных частей канала (I, II, III) величины расхода ( $Q_I$ ,  $Q_{II}$ ,  $Q_{III}$ ), полный расход воды, движущейся в канале, считаем равным:

$$Q = Q_I + Q_{II} + Q_{III} \quad (6-37)$$

При указанном расчете, например, границу между «пойменным» участком I и «коренным» руслом II логичнее, вообще говоря, намечать не по линии  $AB$  (или  $AB'$ ), а по линии  $AB''$ , назначенной вдоль направления  $M-N$ , ортогонального к получающимся здесь изотахам I (линиям равных скоростей), показанным на рис. 6-10 пунктиром. Это ясно из того, что для такого сечения  $AB''$  продольные касательные напряжения  $\tau$ , ортогональные к плоскости чертежа, равны нулю (как и для свободной поверхности потока).

В первом приближении линию  $M-N$  можно намечать, например, так, чтобы она делила пополам угол  $\theta$  (рис. 6-10).

§ 6-7. РАСЧЕТ КАНАЛОВ,  
ИМЕЮЩИХ ЗАМКНУТЫЙ ПОПЕРЕЧНЫЙ ПРОФИЛЬ

Примерами каналов, имеющих замкнутый профиль, могут являться: а) канализационные трубы, б) дренажные трубы, в) гидротехнические туннели. Эти водотоки работают как безнапорные (см. рис. 6-3, г). Поэтому с гидравлической точки зрения они ничем не отличаются от открытых каналов.

**Г. Канализационные трубы.** Канализационные трубы могут быть различного поперечного сечения. На рис. 6-11 для примера представлены:

круглое поперечное сечение (схема а);

овальное сечение — «нормальный тип 3/2» (схема б); это сечение применяется, когда в процессе эксплуатации имеются значительные колебания расхода  $Q$ ;

лотковое сечение (схема в), применяемое при так называемой ливневой канализации.

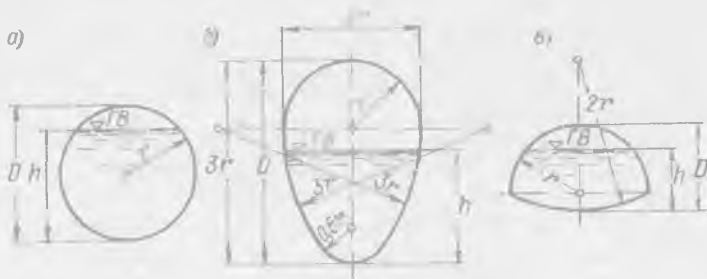


Рис. 6-11. Сечения канализационных труб

Обозначим через  $h$  глубину наполнения трубы и через  $D$  полную ее высоту. Отношение

$$\frac{h}{D} = a \text{ (обозначение)} \quad (6-38)$$

называется степенью наполнения. В практике обычно принимают:

$$a = 0,50 \div 0,75. \quad (6-39)$$

Замкнутые профили характеризуются следующей особенностью.

Представим на рис. 6-12 замкнутый профиль любого очертания. Предположим, что при  $i = \text{const}$  глубина наполнения этого профиля изменяется в пределах от  $h = 0$  до  $h = D$ . При этом средняя скорость  $v$  и расход  $Q$  будут также изменяться от нуля до некоторых значений  $v_{II}$  и  $Q_{II}$ , отвечающих полному наполнению рассматриваемого канала.

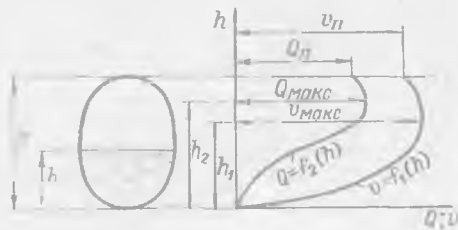


Рис. 6-12. Изменение  $Q$  и  $v$  с изменением  $h$  (при  $i = \text{const}$ ) для замкнутого профиля

Существенным является то обстоятельство, что функции  $v = f_1(h)$ ;  $Q = f_2(h)$  в случае замкнутых профилей имеют максимум, чего не наблюдаем для обычных открытых русел.

Непосредственными подсчетами по формуле Шези было показано, что:

а) глубина  $h_1$ , отвечающая  $v_{\text{макс}}$ , лежит обычно в пределах:

$$h_1 \approx (0,80 \div 0,85) D; \quad (6-40)$$

б) глубина же  $h_2$ , при которой мы получаем  $Q_{\text{макс}}$ , лежит обычно в пределах:

$$h_2 \approx (0,93 \div 0,95) D. \quad (6-41)$$

Как видно, некоторый расход  $Q$ , находящийся в пределах

$$Q_{\text{п}} < Q < Q_{\text{макс}}$$

имеет место в случае равномерного движения воды в трубе при двух различных глубинах:  $h' < h_2$  и  $h'' > h_2$ . Таким образом, при расходе, лежащем в указанных пределах, возможно изменение условий протекания воды: глубина  $h'$  может «переключаться» в глубину  $h''$  и наоборот.

Наличие максимума расхода  $Q = \omega v$  в случае замкнутых профилей с физической точки зрения может быть объяснено следующим образом: представим себе наполнение трубы  $h$  только немногим меньше высоты трубы  $D$ ; дадим далее величине  $h$  малое приращение  $\delta h$ ; при таком приращении глубины  $h$  благодаря тому, что горизонт воды стоит почти у самого замка свода, получим ничтожно малое приращение живого сечения  $\omega$ , однако смоченный периметр, определяющий поверхность трения, увеличится значительно. В результате увеличения  $\chi$  скорость  $v$  уменьшится, и это уменьшение скорости будет более существенным, чем увеличение  $\omega$ .

Следует, однако, иметь в виду, что все сказанное выше получается в результате формального анализа зависимости Шези, без учета того обстоятельства, что между свободной поверхностью и замком свода имеется воздушная прослойка (прослойка «газообразной жидкости»), которая тоже приходит в движение при движении воды в трубе. Наличие этой воздушной прослойки, обуславливающей возникновение на свободной поверхности потока соответствующих сил трения, в некоторой мере искажает описанную выше картину движения воды.

Обратимся к расчету канализационных труб.

Коэффициент шероховатости  $n$  для канализационных труб принимается равным

$$n = 0,012 \div 0,014$$

обычно вне зависимости от материала, из которого выполнены стенки труб, так как такие трубы с течением времени покрываются осадками, что в значительной мере сглаживает различие шероховатостей разных материалов.

В связи с тем, что величины  $\omega$  и  $\chi$  для канализационных труб определять по тем или иным геометрическим формулам затруднительно (эти формулы в данном случае получают слишком сложный вид), при выполнении практических расчетов приходится пользоваться различными расчетными таблицами  $n$ : графиками, приводимыми в справочной литературе.

Таблица 6-2

Значения  $K_{\text{п}}$  и  $W_{\text{п}}$  для круглых труб при  $n = 0,013$  по Гашилье-Куттеру

$D$ , м	$K_{\text{п}}$ , л/с	$W_{\text{п}}$ , м/с	$D$ , м	$K_{\text{п}}$ , л/с	$W_{\text{п}}$ , м/с	$D$ , м	$K_{\text{п}}$ , л/с	$W_{\text{п}}$ , м/с
0,15	134,3	7,60	0,50	3 718	19,09	0,90	18 410	28,98
0,20	302,8	9,64	0,55	4 838	20,38	1,00	24 350	30,99
0,25	551,7	11,26	0,60	6 132	21,70	1,10	31 480	33,09
0,30	908,2	12,86	0,65	7 913	22,97	1,20	39 660	35,07
0,35	1393	14,48	0,70	9 340	24,27	1,30	49 090	37,04
0,40	2028	16,12	0,75	11 270	25,52	1,40	60 100	39,05
0,45	2825	17,76	0,80	13 490	26,61	1,50	72 470	41,02



Поясним здесь для примера только расчет кругового профиля.

Задачи, с которыми приходится сталкиваться при расчете канализационных труб, следующие:

1) даны тип поперечного профиля и его размеры, а также величины  $a$  и  $i$ ; требуется найти расход  $Q$ ;

2) даны тип профиля и его размеры, а также величины  $a$  и  $Q$ ; требуется найти уклон дна  $i$  и т. п.

Решение таких задач выполняется следующим образом.

1. Обозначим через  $K_n$  и  $W_n$  модули расхода и скорости, отвечающие полному заполнению трубы, когда  $h = D$  и  $a = 1$ . В приводимой табл. 6-2 даются величины  $K_n$  и  $W_n$  в зависимости от  $D$ , где  $D$  в данном случае является диаметром трубы:

$$K_n = f_1(D); \quad W_n = f_2(D). \quad (6-42)$$

2. Введем обозначения

$$\frac{K}{K_n} = M; \quad \frac{W}{W_n} = N, \quad (6-43)$$

где  $K$  и  $W$  — модули расхода и скорости, отвечающие действительной глубине  $h$ , имеющейся в трубе.

Оказывается, что величины  $M$  и  $N$  практически не зависят от размеров рассматриваемой трубы; как показывают соответствующие подсчеты, величины  $M$  и  $N$  зависят только от формы поперечного профиля трубы и от степени наполнения трубы  $a$ . Имея это в виду, в литературе даются графики для разных форм поперечного профиля труб, в частности, для кругового профиля (рис. 6-13):

$$M = f_1(a); \quad N = f_2(a). \quad (6-44)$$

3. Для расчета труб имеем известные формулы:

$$v = W\sqrt{i}; \quad Q = K\sqrt{i}. \quad (6-45)$$

Эти формулы можно представить в виде

$$v = W_n \frac{W}{W_n} \sqrt{i}; \quad Q = K_n \frac{K}{K_n} \sqrt{i} \quad (6-46)$$

или в виде

$$v = NW_n \sqrt{i}; \quad Q = MK_n \sqrt{i}. \quad (6-47)$$

Пользуясь формулами (6-47), а также указанными выше таблицами и графиками, и ведем расчет. Например, требуется найти для трубы кругового профиля расход  $Q$ , если известны  $D$ ,  $a$ ,  $i$ . Для решения этой задачи поступаем следующим образом:

а) для заданного  $D$  по приведенной таблице находим  $K_n$  и  $W_n$ ;

б) для заданного  $a$  по графику на рис. 6-13 находим  $M$  и  $N$  (более точно величины  $M$  и  $N$  можно определить по графику на рис. 6-16);

в) наконец, по формулам (6-47) вычисляем  $v$ , а также  $Q$ .

2°. **Дренажные трубы.** Дренажные трубы применяют, в частности, для осушения земель. На рис. 6-14, а представлена сеть дренажных труб в плане; на рис. 6-14, б дается разрез по линии  $AB$ . Как видно из чертежа на рис. 6-14, б, грунтовая вода поступает в дренажные трубы через отверстия, имеющиеся

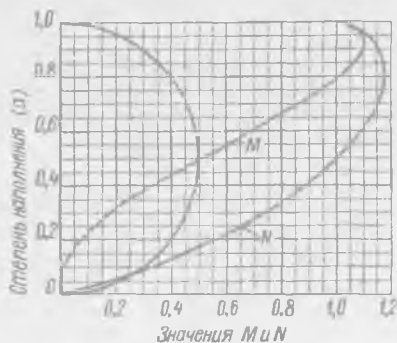


Рис 6-13. К расчету круглых канализационных труб

в их стенках, причем горизонт грунтовых вод снижается до положения, показанного пунктиром. В результате получаем осушение грунта на глубину  $y$ .

Грунтовая вода, попавшая в трубы, течет по ним и затем сбрасывается в водоприемник. Очевидно, уклон и размеры поперечного сечения труб должны быть достаточными для пропуска расхода воды, поступающей из грунта в трубы (для гидравлического расчета труб этот расход следует считать заданным), величина этого расхода устанавливается на основании расчета движения грунтовых вод (см. гл. 17).

Расчет дренажных труб ведется так же, как и расчет канализационных труб, но при сплошном их заполнении (рис. 6-15), т. е. величина  $a$  для дренажных труб принимается

$$a = 1; \quad (6-48)$$

однако дренажная труба все же считается безнапорной; давление в точке А принимается равным атмосферному.

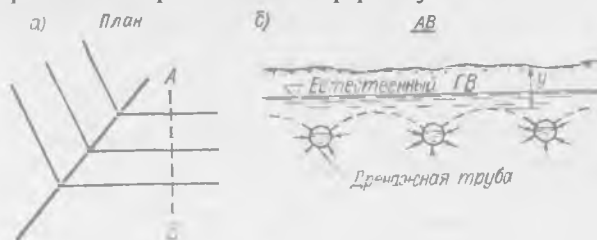


Рис. 6-14 Дренаж для осушения земли

Для случая круглых труб, которые часто применяются для устройства дренажа, имеем следующие расчетные зависимости, написанные с учетом (6-48):

$$h = D; \quad \omega = \frac{\pi D^2}{4}; \quad \chi = \pi D;$$

$$R = \frac{D}{4}; \quad (6-49)$$

$$v = C\sqrt{Ri} = C\sqrt{\frac{D}{4}i} = 0,5C\sqrt{Di}; \quad (6-50)$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4}v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 0,5C\sqrt{Di} = \frac{\pi}{8} CD^{5/2}\sqrt{i}. \quad (6-51)$$

Коэффициент Шези  $C$  иногда определяют здесь по эмпирической формуле Куттера. Эта формула имеет вид:

$$C = \frac{100}{1 + \frac{k}{\sqrt{R}}} = \frac{100}{1 + \frac{2k}{\sqrt{D}}}, \quad (6-52)$$

где  $k$  — особый коэффициент шероховатости, принимаемый для гончарных труб равным 0,27;  $R$  и  $D$  — в м;  $v$  — в м/с.

Допустимые скорости для гончарных труб обычно принимают равными:

- минимальную скорость  $v_{\min} = 0,15 \div 0,20$  м/с;
- максимальную скорость  $v_{\max} = 1,0$  м/с.

3°. **Безнапорные туннели.** Безнапорные гидротехнические туннели могут иметь самое различное поперечное сечение (см. рис. 6-3, з). Расчет таких водотоков производится в соответствии со всем сказанным выше о каналах и безнапорных трубах. Дополнительные указания о гидравлическом расчете гидротехнических туннелей даются в курсах «Гидротехнические сооружения» (см., например [6-7]).



Рис. 6-15. Дренажная труба

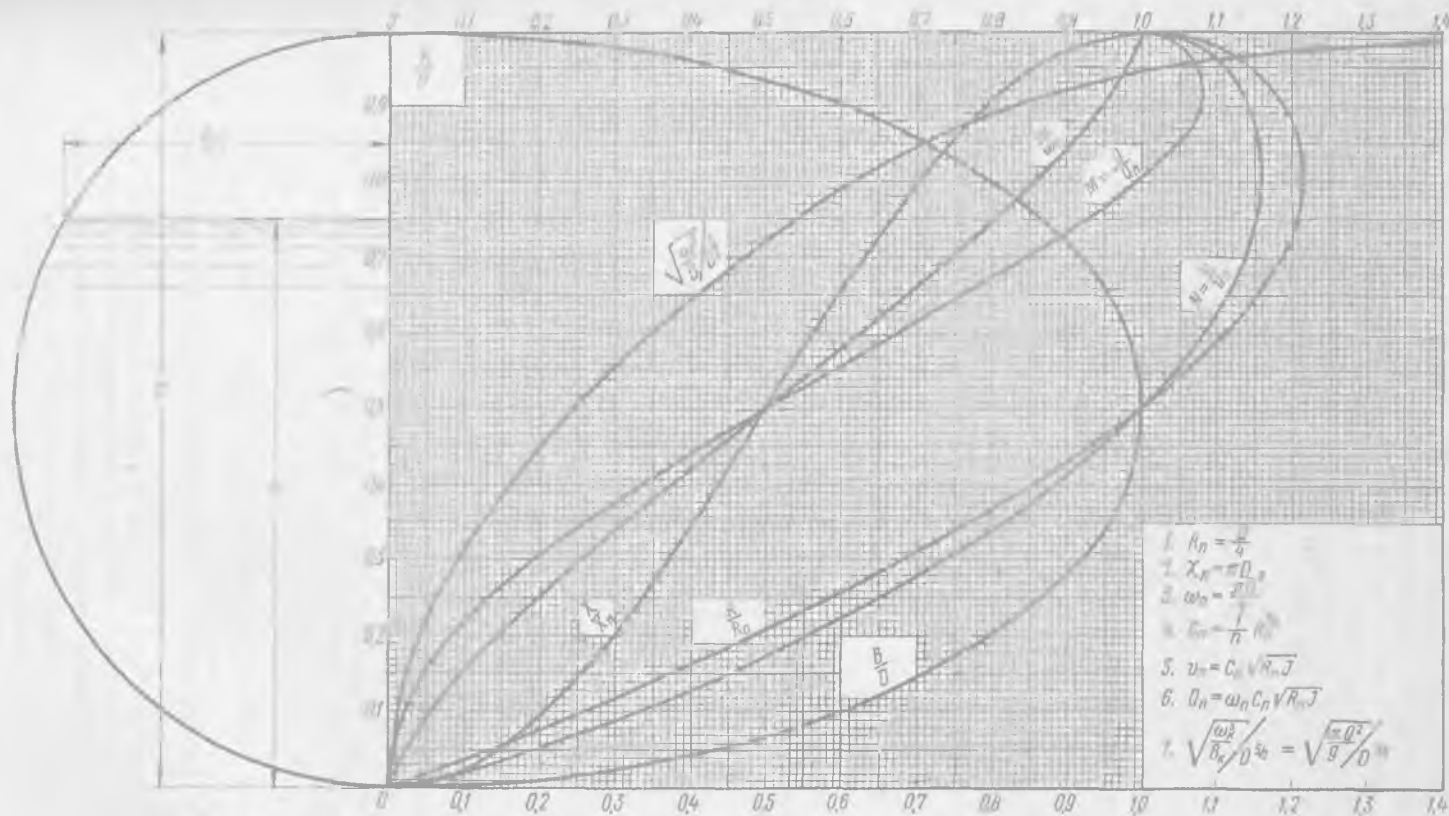


Рис. 6-16. График для определения гидравлических элементов безнапорного потока в цилиндрическом канале круглого поперечного сечения

На рис. 6-16 приводится график, служащий для гидравлического расчета безнапорных гидротехнических туннелей круглого поперечного сечения. На этом графике, построенном в безразмерных координатах, индексом «п» отмечены величины, относящиеся к случаю, когда  $h$  (глубина наполнения) равна  $D$  (диаметр туннеля), т. е. когда имеем полное наполнение туннеля.

По вертикальной оси графика отложено относительное наполнение туннеля  $h/D$ ; по горизонтальной оси — величины  $M$  и  $N$  (см. выше п. 1), а также величины:

$$\frac{B}{D}; \frac{R}{R_n}; \frac{\chi}{\chi_n}; \frac{\omega}{\omega_n}; \sqrt{\frac{\omega^3}{B}} : D^{5/2}.$$

В экспликации к графику приведены отдельные формулы, служащие для определения  $R_n, \chi_n, \omega_n, C_n, v_n, Q_n$ ; кроме того, дается формула (см. п. 7 экспликации), исходя из которой можно найти для круглого поперечного сечения канала так называемую критическую глубину (об этом см. далее § 7-5).

Как видно, при помощи данного графика, зная  $R_n, \chi_n, \omega_n, C_n, Q_n$ , легко найти также величины  $R, \chi, \omega, B, v, Q, K, W$  для любого наполнения круглого туннеля.

Необходимо однако отметить, что расчет гидротехнических туннелей на равномерное движение (с использованием формул Шези при коэффициенте шероховатости  $n = \text{const}$ ) является иногда несколько условным. Дело в том, что длина таких туннелей часто бывает соизмерима с длиной так называемого начального участка [см. формулу (4-66)], в пределах которого имеет место неравномерное движение воды.

#### § 6-8. РАСЧЕТ ЕСТЕСТВЕННЫХ РУСЕЛ НА РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ

Естественные русла имеют неправильную форму. Поэтому движение воды в них всегда неравномерное. Однако иногда с некоторым приближением можно все же считать, что на том или другом участке естественного русла имеет место равномерное движение. В этих случаях поступают таким образом:



Рис. 6-17. Естественные русла

1) уклон дна намеченного условного призматического русла принимают равным:

а) или уклону свободной поверхности воды в действительном естественном русле;

б) или уклону, полученному в результате осреднения уклонов дна естественного русла;

3) полученное условное русло рассчитывают, как призматический (цилиндрический) канал, по приведенным выше формулам; найденные для этого русла величины принимают для естественного русла.

#### § 6-9. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О РАСЧЕТЕ КАНАЛОВ

1. Об экономическом расчете каналов. Рассчитываемый канал можно проектировать различно: дну канала можно придать разный уклон; можно принять различную относительную ширину канала по дну  $\beta = b:h$  и т. п.

Окончательно в проекте должен быть принят тот вариант канала, который оказывается наиболее выгодным с экономической точки зрения (а также с точки зрения удобства постройки его, эксплуатации и т. п.).

В связи с этим возникает необходимость сопоставлять между собой различные варианты данного канала, в частности, в экономическом отношении;

при этом приходится дополнительно проводить особые экономические расчеты, тесно связанные с гидравлическими расчетами. Эта сторона вопроса проектирования каналов изучается в специальных курсах: «Использование водной энергии», «Инженерная мелиорация» и т. п.

2. О лимитных значениях коэффициента шероховатости. Часто при расчете канала трудно заранее предугадать, какое численное значение получит коэффициент шероховатости после устройства канала. В связи с этим расчет проектируемого канала ведут на некоторое наиболее вероятное значение  $n$ ; дополнительно запроектированный канал проверяют:

а) на заведомо большое значение  $n$  ( $n = n_{\text{макс}}$ ), в отношении которого можно утверждать, что  $n_{\text{макс}} \geq n_{\text{действ}}$ , где  $n_{\text{действ}}$  — действительное значение  $n$ ;

б) на заведомо малое значение  $n$  ( $n = n_{\text{мин}}$ ), в отношении которого можно утверждать, что  $n_{\text{мин}} \leq n_{\text{действ}}$ .

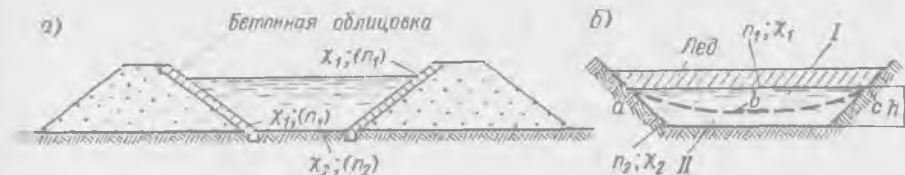


Рис. 6-18. Поперечные сечения русел, неоднородных в отношении коэффициента шероховатости

$I$  — первая часть потока ( $n = n_1$ );  $II$  — вторая часть потока ( $n = n_2$ )

Выполняя проверку на  $n_{\text{макс}}$ , получаем предельно возможное максимальное наполнение канала; выполняя же проверку канала на  $n_{\text{мин}}$ , получаем предельно возможную максимальную скорость в канале.

Величины  $n_{\text{макс}}$  и  $n_{\text{мин}}$  могут быть названы лимитными значениями коэффициента шероховатости. В табл. 4-3 даются численные значения  $n_{\text{макс}}$  и  $n_{\text{мин}}$ , помимо наиболее вероятного («нормального») значения  $n$ .

3. О каналах, поперечное сечение которых неоднородно в отношении коэффициента шероховатости. В практике встречаются случаи, когда по длине смоченного периметра канала коэффициент шероховатости  $n$  различен. Например:

1) откосы дамб, образующих канал, покрыты бетонной облицовкой ( $n_1 = 0,014$ ), а дно канала не покрыто такой облицовкой ( $n_2 \neq 0,014$ ) — рис. 6-18, а;

2) свободная поверхность воды в канале покрыта льдом (расчет канала ведется для условий зимней<sup>1</sup> его работы) — рис. 6-18, б. Здесь имеем также два разных коэффициента шероховатости:  $n_1$  — для поверхности льда протяженностью, равной  $\chi_1$ , и  $n_2$  — для поверхности стенок и дна русла протяженностью, равной  $\chi_2$ , причем  $n_1 \neq n_2$ .

В указанных случаях приходится осреднять значение  $n$  по длине смоченного периметра канала. Существуют различные способы такого осреднения  $n$ .

Для случая на рис. 6-18, б, когда поток со всех сторон окружен твердыми стенками, причем имеем только два коэффициента шероховатости ( $n_1$  и  $n_2$ ) различной величины, наиболее рациональным способом осреднения  $n$  является следующий.

Намечаем линию  $abc$ , проходящую по точкам живого сечения, отвечающим максимальным скоростям  $u$  (в разных вертикальных продольных сечениях потока). Эта линия расчленяет живое сечение потока на две части: часть  $I$ , внутри которой скорости  $u$  в основном зависят от коэффициента шероховатости  $n_1$ , и часть  $II$ , внутри которой скорости  $u$  в основном зависят от коэффициента шероховатости  $n_2$ . После этого вводим допущение, согласно которому  $v_1 = v_2 = v$ , где  $v_1$  и  $v_2$  — средние скорости соответственно

<sup>1</sup> Расчет каналов для условий зимнего режима их работы дает иногда наибольшую глубину наполнения  $h$ .

для I и II частей потока;  $v$  — средняя скорость для всего живого сечения. Исходя из указанного допущения и учитывая, что  $R = (\omega_1 + \omega_2):(\chi_1 + \chi_2)$ , можно написать систему трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \sqrt{R_1 J} &= C \sqrt{R J}; \\ C_2 \sqrt{R_2 J} &= C \sqrt{R J}; \\ R &= \frac{\chi_1 R_1 + \chi_2 R_2}{\chi_1 + \chi_2} \end{aligned} \right\} \quad (A)$$

где индексами «1» и «2» обозначены элементы, относящиеся соответственно к I и II выделенным потокам. Разумеется, уклон  $J$  является одинаковым для всех трех рассматриваемых потоков: «первого», «второго» и «суммарного» (т. е. действительного). Элементы которого в приведенной зависимости даются без индексов.

А. Л. Можевитинов решил составленную им систему уравнений (A), содержащую три неизвестные величины:  $R_1$ ,  $R_2$  и  $n_{cp}$ , где  $n_{cp}$  — искомое осредненное значение  $n$  (для данного живого сечения); при помощи  $n_{cp}$  коэффициент Шези выражается в виде

$$C = \frac{1}{n_{cp}} R^y. \quad (B)$$

Если положить в поясненном решении А. Л. Можевитинова  $y = 1/6$  (согласно Маннингу), то окончательно формулу для осредненного коэффициента шероховатости получаем (для случая на рис. 6-18, б) в виде:

$$n_{cp} = \sqrt[3]{\left(\frac{\sqrt{n_1^3 + a} \sqrt{n_2^3}}{1 + a}\right)^2}. \quad (6-53)$$

где  $a = \chi_2 : \chi_1$ , причем  $\chi_1$  и  $\chi_2$  указаны на рис. 6-18. <sup>1</sup>

Что касается решений, относящихся к случаю на рис. 6-18, а, то их касаться здесь не будем (они часто не удовлетворяют условию  $v_1 = v_2 = v$  и носят несколько неопределенный характер).

**4°. О графиках для расчета канала.** В литературе приводится много различных графиков и таблиц, составленных разными авторами, служащих для облегчения и ускорения расчетов каналов на равномерное движение воды в них.

**5°. О начальном участке канала.** Необходимо иметь в виду, что приведенные выше расчеты, будучи распространены на начальный участок канала (см. рис. 4-20 и 4-21), имеющий длину, например,  $(25 \div 50) h$ , могут иногда дать ощутимую погрешность.

**6°. Замечания о «методе влекущей силы».** В § 6-5 был изложен обычный метод, в соответствии с которым площадь живого сечения потока, в частности, в случае земляного канала, определяется путем деления заданного расхода  $Q$  на  $v_{max}$ . Этот метод может быть назван «методом допускаемой средней скорости»; в соответствии с таким методом форму живого сечения (достаточно правильного очертания) можно назначить произвольной (она расчетом не устанавливается).

Помимо «метода допускаемой скорости» существуют и другие методы расчета каналов, например, «статический» <sup>2</sup> метод влекущей силы». Этот метод [6-6] используется для песчаных грунтов (лишенных сил сцепления), причем он позволяет достаточно обоснованно назначать форму живого сечения потока.

Идея этого метода заключается в следующем.

<sup>1</sup> Формула (6-53), исходя из соображений, отличных от описанных выше, была получена также П. Н. Белоконом.

<sup>2</sup> «Статический» в том смысле, что в этом способе пульсация касательных напряжений  $\tau_0$  (см. ниже) не учитывается.

Рассматривая отдельные точки смоченного периметра  $\chi$ , устанавливаем для них:

а) продольные (направленные по течению воды в канале) касательные напряжения  $\tau_0$ , приложенные со стороны потока к грунту;

б) продольные касательные напряжения  $\tau_{\text{сопр}}$  грунта, сопротивляющиеся сдвигу его песчинок потоком.

Значения  $\tau_0$  приходится устанавливать на основании тех или других приближенных гидравлических расчетов. Значения же  $\tau_{\text{сопр}}$  находят, например, по формуле:

$$\tau_{\text{сопр}} = N \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта и  $N$  — сила нормального прижатия некоторой «расчетной песчинки» грунта к ее основанию [для горизонтального в данном поперечном сечении дна канала  $N = G$ , где  $G$  — вес «песчинки»; для откоса канала  $N = G \cos \varphi$  (см. рис. 6-2)].

Окончательное поперечное сечение канала устанавливают такой формы, при которой  $\tau_0 \approx \tau_{\text{сопр}}$  во всех точках смоченного периметра. При этом мы получаем канал, во всех точках смоченного периметра которого грунт будет находиться в равнопрочном и предельно прочном состоянии.

В связи со сказанным, следует подчеркнуть, что метод допускаемой скорости, в отличие от метода влекущей силы, дает нам такие живые сечения потока, у которых предельная допускаемая прочность грунта (на размыв) имеет место в районе только одной точки смоченного периметра; в остальных точках смоченного периметра, согласно этому методу, грунт будет иметь излишний запас прочности.

## § 6-10. ЗАМЕЧАНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗЕМЛЯНЫХ КАНАЛОВ

1°. **О построении продольного профиля канала.** При расчете канала, состоящего из нескольких участков, имеющих, например, разные уклоны дна, часто получаем различные глубины  $h$  на этих участках (рис. 6-19):  $h_I \neq h_{II} \neq h_{III}$ .

В этом случае продольный профиль канала обычно проектируют так:

1) вначале на чертеже продольного профиля канала намечают линию свободной поверхности потока (с теми уклонами  $i$ , которые были приняты при расчете или были получены в результате расчета);

2) затем от построенной линии свободной поверхности откладывают вниз найденные глубины  $h$ , причем получают проектную линию дна канала.

В районе узлов  $A$  (рис. 6-19), где дно канала получает некоторые «уступы», движение воды будет неравномерным; однако этим обстоятельством обычно пренебрегают.

2°. **Дополнительные замечания.** При проектировании каналов в виде земляных русел (особенно больших каналов) необходимо иметь в виду, что расчеты, описанные выше, относятся, разумеется, к некоторым идеализированным схемам каналов. Рассматривая работу канала в действительных условиях, мы часто будем сталкиваться с различными, так сказать, «искажающими факторами» — с факторами, искажающими ту идеализированную картину, которая выше полагалась в основу расчета. К числу этих искажающих факторов можно отнести, например, следующие: 1) зимний режим работы каналов, при котором поверхность воды не только покрывается льдом, но, вместе с тем, живые сечения потока (подо льдом) могут забиваться шугой и снегом; 2) покрытие дна канала у берегов растительностью (в большей или меньшей мере); 3) наличие поворотов канала (искривление оси канала в плане), в связи с чем в канале могут возникать «вторичные течения» (см.



Рис. 6-19. Проектирование продольного профиля канала

стр. 204); 4) возникновение волн на поверхности воды различного происхождения [ветровых, корабельных, если канал судоходен, волн перемещения (см. гл. 9)]; 5) отклонение (в плане) динамической оси потока (вдоль которой мы имеем скорости  $u_{\max}$ ) от геометрической оси потока, вызванное случайными причинами; при таком отклонении поток «прижимается» к одному берегу и скорости  $u$  у этого берега возрастают, что может способствовать размыву данного берега; здесь надо иметь в виду, что при больших  $\beta$  (например, при  $\beta > 10,0$ ) динамическая ось канала является иногда недостаточно устойчивой (в плане); такая неустойчивость объясняется тем, что максимум эпюры скоростей (в плане), построенных для различных живых сечений, оказывается (при больших  $\beta$ ) выраженным не резко.

Разумеется, «борьба» с некоторыми перечисленными «искажающими факторами» может осуществляться в процессе эксплуатации канала, при помощи соответствующих ремонтных работ. Вместе с тем, ряд других «искажающих факторов» приходится учитывать при расчете канала, вводя в расчет соответствующие коэффициенты запаса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 6-1. Агроскин И. И. Гидравлический расчет каналов.— М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958.
- 6-2. Павловский Н. Н. Гидравлический справочник.— Л.-М.: ОНТИ НКТП, 1937.
- 6-3. Угичус А. А. Каналы и сооружения на них.— М.: Госстройиздат, 1952.
- 6-4. Угичус А. А. Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов.— М.: Стройиздат, 1965.
- 6-5. Чертоусов М. Д. Гидравлика. Специальный курс.— М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
- 6-6. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов.— М.: Стройиздат, 1969.
- 6-7. Чугаев Р. Р. Гидротехнические сооружения. Глухие плотины.— М.: Высшая школа, 1975.
- 6-8. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Деривационные каналы гидроэлектростанций.— М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
- 6-9. СНиП II-52—74. Сооружения мелиоративных систем.— М.: Стройиздат, 1975.

### ГЛАВА СЕДЬМАЯ

## НЕРАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ РУСЛАХ

### § 7-1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ УКАЗАНИЯ

Как и в предыдущей главе, будем рассматривать только турбулентное движение воды, относящееся к квадратичной области сопротивления. При этом будем иметь в виду в основном неравномерное плавно изменяющееся движение. Данный случай движения представлен на рис. 7-1.<sup>1</sup>

Если твердое тело начинает падать в воздушной среде, то вначале движение этого тела является ускоренным; по мере увеличения скорости падения данного тела сопротивление воздуха растет, поэтому ускоренное движение тела постепенно переходит в равномерное; при таком равномерном движении сила

<sup>1</sup> Рисунок 7-1, равно как и многие другие рисунки, приводимые далее (на которых изображается продольный профиль потока), представлен в искаженном масштабе.