

Л. 68.

архив

В. Г. ЛОБАЧЕВ

**ГРАФИКИ и ТАБЛИЦЫ
ДЛЯ РАСЧЕТА
ВОДОПРОВОДНЫХ
и КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РСФСР

1948

40/10/1948

П.2-51
Л.68.

Проверено

Проф. В. Г. ЛОБАЧЕВ

ГРАФИКИ и ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДОПРОВОДНЫХ И КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

9360

4299



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РСФСР
Москва 1948 Ленинград

к

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Таблица принятых обозначений	5

Глава I. Водопровод

Раздел I. Трубопроводы

1. Гидравлические зависимости при движении воды по трубам	7
2. Таблицы для расчета чугунных и стальных труб	10
3. Таблицы для расчета труб из различных материалов	13
4. Таблицы величин сопротивлений s	20

Раздел II. Местные сопротивления и истечение из отверстий	24
---	----

Раздел III. Приемы расчета водопроводных сетей

А. Расчет одиночных линий	39
Б. Расчет кольцевых сетей	40
В. Приближенные и упрощенные способы расчета сетей	45
Г. Расчет спринклерных систем	52

Раздел IV. Расчет пожарных струй и подачи воды по гибким рукавам	58
--	----

Глава II. Канализация

Раздел I. Равномерное движение

А. Формулы для расчета движения жидкости по каналам	69
Б. Прием расчета каналов круглого сечения	74
В. Обобщенный метод гидравлического расчета каналов различных форм и шероховатости при равномерном движении	75

Раздел II. Неравномерное движение

А. Расчетная формула для неравномерного движения	81
Б. Таблицы и формулы величин безразмерных функций $X(\xi)$, $F(\xi)$, $B(\xi)$, $\Omega(\xi)$ и $\Lambda(\xi)$	83
В. Способ интегрирования уравнения неравномерного движения в призматических каналах	89

Редактор *И. М. Шухер*

Техн. редактор *О. А. Гурова*

Сдано в набор 10/XI 1947 г.

Подписано к печати 26/II 1948 г.

Тираж 3000.

Печ. л. 53³/₄.

Уч.-изд. л. 11.

Зн. в 1 печ. л. 76000

Л92639

Формат бумаги 60 × 92¹/₁₆.

Типография изд-ва „Московский рабочий“. Москва, Петровка, 17.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый труд представляет собой сборник вспомогательных таблиц и графиков для расчета водопроводных и канализационных сетей. Он предназначен для облегчения работы лиц, проектирующих указанные сооружения.

Автором ставилась цель дать такой материал, который не заставлял бы проектировщика искать примеры расчета, гидравлические характеристики и пр. в различных курсах и справочниках, а позволял бы иметь этот материал собранный в одном месте, сведенный в таблицы и графики.

Автор также стремился облегчить труд работников периферии, которым приходится самостоятельно решать вопросы, ответы на которые нельзя дать, пользуясь только стандартными таблицами типа таблиц проф. Н. Н. Гениева, Г. Л. Зака и других. Указанные целевые установки и наложили отпечаток на настоящую работу.

В главе „Водопровод“ собран и приводится материал для расчета движения жидкости по напорным трубам из различных материалов и различных диаметров и, кроме того, материал по местным сопротивлениям. Далее приводится метод расчета кольцевых водопроводных сетей, не требующий от пользующихся этим методом особых навыков в расчете. Этот метод позволяет рядовому инженеру произвести расчет любой водопроводной сети.

Кроме того, приводится метод расчета спринклерных сетей, предложенный кандидатом технических наук Тарасовым-Агалаковым, упрощающий расчет и делаящий его доступным широкой массе инженеров.

Наконец, приводятся данные для расчета подачи воды по гибким рукавам на пожарные нужды, основанные на последних работах Центрального научно-исследовательского института противопожарной обороны Министерства внутренних дел СССР (ЦНИИПО МВД СССР).

В главе „Канализация“ собран материал для расчета движения жидкости по каналам любой формы и шероховатости. (Под словом „канализация“ в этой работе подразумевается более широкое, чем обычно, понятие, а именно понятие подачи или отвода жидкости при помощи каналов или труб с незаполненным сечением). В этой главе приводятся два метода для расчета жидкости при равномерном состоянии потока: один — только для каналов круглого сечения, позволяющий пользоваться обычными водопроводными (сокращенными) таблицами, другой — обобщенный, позволяющий производить расчеты для каналов любой формы и шероховатости. Далее приводится метод для расчета движения жидкости при неравномерном движении потока (подпор, спад и пр.).

Неравномерное движение потока по существу является наиболее часто встречающимся в природе случаем движения жидкости в каналах. Равномерное же движение представляет только частный случай неравномерного движения,

Поэтому в дальнейшем, при желании иметь более надежные расчеты, чаще будет являться потребность учитывать неравномерность движения потока.

Уже в настоящее время работникам в области водопровода и канализации часто встречаются вопросы неравномерного движения, например, при расчете каналов, наполняющих или опорожняющих резервуары или водоемы, а также при коротких каналах, работающих с подпором или спадом.

В предлагаемой работе даны таблицы и приемы расчета каналов любой формы и шероховатости, работающих при неравномерном движении жидкости.

Следует отметить, что применяющиеся у нас формулы иностранных авторов для гидравлических расчетов труб и каналов являются несовершенными и ограниченными по диапазону возможного их применения. Поэтому пользование такими формулами должно быть осмотнительным.

Задачей нашей отечественной инженерной гидравлики является выработка более совершенных формул, отображающих все многообразие явлений сопротивления движению жидкости по трубам и каналам.

А В Т О Р

Таблица 1

ТАБЛИЦА ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

(применительно к ГОСТ 2970-45)

Обозначения	Т е р м и н ы	Единицы измерения	Размерность
L	Длина трубопровода (водовода)	м	L
l	Участок трубопровода (водовода)	м	L
D	Внутренний диаметр трубы	м, мм, см	L
d	Диаметр насадка, сопла	м, мм, см	L
χ	Смоченный периметр	м	L
ω	Площадь живого сечения трубы	} м^2	L^2
ω	Площадь сечения трубы		
R	Гидравлический радиус	м	L
i	Пьезометрический и гидравлический уклон	} кг/см^2	Безразмерная величина $F \cdot L^{-2}$
p	Давление (на единицу площади)		
p	Внутреннее давление в трубе		
H	Напор	м	L
h_l	Потерянный напор по длине	м	L
h_r	Потерянный напор на местные сопротивления	м	L
h	Глубина потока	м	L
h_n	Нормальная глубина потока	м	L
h_k	Критическая глубина потока	м	L
h_s	Высота всасывания	м	L
b	Ширина канала по низу	} м	L
b	Ширина водослива в свету		
B	Ширина канала на уровне воды	м	L
β	Отношение $\frac{b}{h}$	Безразмерная величина	
i	Уклон дна потока	То же	
i_k	Критический уклон	"	
z	Вертикальные координаты в уравнении Бернулли		
v и V	Скорость	м/сек	$\frac{L}{T}$
Q	Расход жидкости в единицу времени, выраженный в единицах объема	$\frac{\text{м}^3}{\text{сек}}, \frac{\text{л}}{\text{сек}}, \frac{\text{л}}{\text{мин}}$	$L^3 T^{-1}$
q	Часть полного расхода	$\frac{\text{м}^3}{\text{сек}}, \frac{\text{л}}{\text{сек}}, \frac{\text{л}}{\text{мин}}$	$L^3 T^{-1}$
C	Коэффициент Шези	—	$L^{1/2} T^{-1}$
n	Коэффициент шероховатости в формулах Гангиле—Куттера и Маннинга	—	$L^{-1/2} T$
γ	То же в формуле Базена	—	$L^{1/2}$
γ	Вес единицы объема жидкости	кг/м^3	$F \cdot L^{-3}$

Обозначения	Т е р м и н ы	Единицы измерения	Размерность
ρ	Плотность $\rho = \frac{\gamma}{g}$	кг/м ³ · сек ²	$FL^{-2}T^{-2}$
g	Ускорение силы тяжести	м/сек ²	LT^{-2}
μ	Вязкость	кг/м · сек	$F \cdot L^{-1}T^{-1}$
ν	Кинематический коэффициент вязкости	м ² /сек	$L^2 \cdot T^{-1}$
μ	Коэффициент расхода при истечении из отверстий	Безразмерная величина	
ε	Коэффициент сжатия	То же	
φ	Коэффициент скорости	”	
φ	Коэффициент в формуле Люгера при определении высоты струи	—	L^{-1}
λ	Коэффициент Дарси—Вейсбаха	Безразмерная величина	
ζ	Коэффициент сопротивления	То же	
Δ	Величина абсолютной шероховатости	м, мм	L
r	Радиус труб	м, мм	L
$\frac{\Delta}{r}$	Относительная шероховатость	Безразмерная величина	
A_T	Удельное сопротивление трубопровода	сек ² /м ⁶	$T^2 \cdot L^{-6}$
K_T	Пропускная способность трубопровода	м ³ /сек	$L^3 \cdot T^{-1}$
A_s	Удельное сопротивление местных сопротивлений” или истечения	сек ² /м ⁶	$T^2 \cdot L^{-6}$
или A_u			
K_s	Пропускная способность, или модуль расхода	м ³ /сек	$L^3 \cdot T^{-1}$
или K_u			
S	Сопротивление	сек ² /м ⁵	$L^{-5} \cdot T^2$
p	Проводимость	м ^{1/2} /сек	$L^{1/2} \cdot T^{-1}$
B	Характеристика	м ⁵ /сек ²	$L^5 T^{-2}$
Re	Число Рейнольдса, отнесенное к диаметру	Безразмерная величина	
$Re(r)$	Число Рейнольдса, отнесенное к гидравлическому радиусу	То же	

Примечание. Обозначения размерностей: L — длина (линейное измерение), F — сила, T — время.

Г Л А В А I

ВОДОПРОВОД

Раздел I. Трубопроводы

1. Гидравлические зависимости при движении воды по трубам

Основное уравнение потери напора при движении жидкости по трубам имеет вид:

$$i = \lambda \frac{v^2}{2gD} \quad \text{или} \quad i = \lambda \frac{16}{\pi^2 2gD^5} \cdot Q^2. \quad (1)$$

Обозначая величину $\lambda \frac{16}{\pi^2 2gD^5}$ буквой A_T , получаем выражение гидравлического уклона в таком виде:

$$i = A_T Q^2. \quad (2)$$

Потеря напора при этом будет равна:

$$h_l = il = A_T l Q^2 = s Q^2, \quad (3)$$

где: s — сопротивление,

A_T — удельное сопротивление.

Вводя обозначение $\lambda \frac{16}{\pi^2 2gD^5} = \frac{1}{K_T^2}$, получим следующую формулу расхода:

$$Q = K_T \sqrt{i} \quad (4)$$

или, заменяя i через $\frac{h}{l}$, будем иметь:

$$Q = K_T \sqrt{\frac{h}{l}} = \frac{K_T}{\sqrt{l}} \sqrt{h} = p \sqrt{h}, \quad (5)$$

где: K_T — пропускная способность по Бахметеву, или модуль расхода,
 p — проводимость.

Для определения величин удельного сопротивления A_T и пропускной способности K_T необходимо знать величины коэффициента λ . Коэффициент λ при ламинарном потоке ($Re < 2300$) может быть определен по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (6)$$

Сводка принятых формул гидравлических зависимостей при движении воды по трубам

	Формулы, выраженные через скорость движения жидкости v	Формулы, выраженные через:			
		удельное сопротивление A_T	пропускную способность K_T	сопротивление s	проводимость p
Гидравлический уклон	$i = \lambda \frac{v^2}{2g}$	$i = A_T Q^2$	$i = \frac{1}{K_T^2} Q^2$	—	—
Потери напора $h = il = iL$	$h = \lambda l \cdot \frac{v^2}{2g}$	$h = A_T l Q^2$	$h = \frac{1}{K_T^2} l Q^2$	$h = s Q^2$	$h = \frac{1}{p^2} Q^2$
Расход жидкости	$Q = \omega v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v$	$Q = \sqrt{\frac{i}{A_T}}$ $Q = \sqrt{\frac{h}{A_T l}}$	$Q = K_T \sqrt{i}$ $Q = K_T \sqrt{\frac{h}{l}}$	$Q = \sqrt{\frac{h}{s}}$	$Q = p \sqrt{h}$

где число Рейнольдса $Re = \frac{Vd}{\nu}$. (7)

При турбулентном потоке ($Re > 2300$) коэффициент λ определяется в зависимости от характера шероховатости внутренней поверхности трубы.

А. Для совершенно гладких труб:

1) по Прандтлю

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log (Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8, \quad (8)$$

2) по Кольбуку (приближенно)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \log \frac{Re}{7} \text{ или } \lambda = \left(\frac{1}{1,8 \log \frac{Re}{7}} \right)^2. \quad (9)$$

Б. Для не вполне шероховатых труб:

1) однородная шероховатость по Прандтлю—Никурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \left(a + b \log Re \sqrt{\lambda} + c \log \frac{r}{\Delta} \right), \quad (10)$$

2) неоднородная шероховатость по Кольбуку

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\Delta}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right); \quad \lambda = \left[2 \log \left(\frac{\Delta}{3,7 D} + \frac{2,81}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \right]^2. \quad (11)$$

В. Для вполне шероховатых труб:

1) по Прандтлю—Никурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{r}{\Delta} + 1,74 = 2 \log \frac{D}{2 \Delta} + 1,74 = 2 \log \frac{D}{\Delta} + 1,44, \quad (12)$$

2) по Кольбуку (приближенно)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A \left(\frac{D}{\Delta} \right)^n \text{ или } \lambda = \frac{1}{A^2} \left(\frac{\Delta}{D} \right)^{2n}; \quad (13)$$

здесь: 1) при $\frac{D}{\Delta}$ от 10 до 200 $n = 0,20$ и $A = 2,03$,

2) при $\frac{D}{\Delta}$ от 200 до 1000 $n = 0,111$ и $A = 3,25$.

Приведенные выше для сравнения формулы указывают на сложность и многообразие явлений, сопровождающих движение жидкости по трубам, и находят определенное отображение в них.

В. Академик Н. Н. Павловский дает формулу для шероховатых труб, имеющую вид

$$C = \frac{1}{n} R^y \text{ или } \lambda = \frac{8gn^2}{R^{2y}},$$

где $y = 2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,10)$.

При постоянной величине $y = 1/6$ формула принимает вид

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}.$$

Эту последнюю формулу обычно называют формулой Маннинга.

В другой транскрипции эта формула имеет вид

$$\lambda = 124,6 \frac{n^2}{\sqrt[3]{D}},$$

где (приблизленно): $n = 0,0396 \sqrt[6]{\Delta}$ для Δ , выраженной в метрах,

$n = 0,0125 \sqrt[6]{\Delta}$ для Δ , выраженной в миллиметрах.

Приводимые ниже табл. 3 и 4 подсчитаны по формуле Маннинга, имеющей вид:

$$\lambda = 124,6 \frac{n^2}{\sqrt[3]{D}} \quad (14)$$

при $n = 0,012$.

Так как $i = \lambda \frac{v^2}{2gD}$, то, заменяя v через $\frac{Q}{\omega}$ и подставляя значения ω и λ , получим:

$$i = \frac{124,6 \times 0,012^2 \times 16 Q^2}{2g \pi^2 D^{5,33}} = 0,0014825 \frac{Q^2}{D^{5,33}}. \quad (15)$$

Сравнивая формулы (15) и (2), находим, что удельное сопротивление A_T может быть представлено в виде:

$$A_T = \frac{0,0014825}{D^{5,33}}. \quad (16)$$

Вычисленные значения A_T для труб различных диаметров приводятся в табл. 3 и 4.

Более точная связь коэффициента шероховатости n с величиной абсолютной шероховатости выражается формулой

$$h = \frac{\sqrt{\frac{r}{\Delta}} \cdot \sqrt[6]{2}}{11,14 (2 \log \frac{r}{\Delta} + 1,74)} \sqrt[6]{\Delta} = Z \sqrt[6]{\Delta}.$$

При $\frac{r}{\Delta} = 10$; $z = 0,03954$ при Δ , выражен. в метрах

при $\frac{r}{\Delta} = 100$; $z = 0,03780$ "

при $\frac{r}{\Delta} = 100$; $z = 0,04116$ "

На основании указанного возможно сделать вывод, что если коэффициент шероховатости n для труб средних диаметров будет принят $n = 0,012$, то при той же абсолютной шероховатости для труб больших диаметров величина коэффициента n будет эквивалентна $n = 0,013$.

2. Таблицы для расчета чугунных и стальных труб

Таблица 3

Таблица удельного сопротивления A_T , пропускной способности K_T и квадрата пропускной способности K_T^2 для расчета трубопроводов из чугунных труб нормального сортамента при расходе воды, выраженном в л/сек

(Таблица подсчитана по формуле Маннинга с коэффициентом шероховатости $n = 0,012$)

Диаметр D в м	Величина удельного сопротивления A_T в (сек/л) ²	Величина пропускной способности K_T в л/сек	Величина квadrата пропуск- ной способности K_T^2 в (л/сек) ²
0,040	0,0423	4,86	23,6
0,050	0,0129	8,81	77,6
0,075	0,00148	26,0	675
0,100	0,000319	56,0	3130
0,125	0,0000972	101	10300
0,150	0,0000367	165	27200
0,200	0,00000792	355	126000
0,250	$2,41 \times 10^{-6}$	644	415000
0,300	$0,911 \times 10^{-6}$	1050	1100000
0,350	$0,401 \times 10^{-6}$	1580	2500000
0,400	$0,196 \times 10^{-6}$	2260	5090000
0,450	$0,105 \times 10^{-6}$	3080	9520000
0,500	$0,060 \times 10^{-6}$	4090	$16,7 \times 10^{-6}$
0,600	$0,0226 \times 10^{-6}$	6650	$44,2 \times 10^{-6}$
0,700	$0,00993 \times 10^{-6}$	10500	101×10^{-6}
0,800	$0,00487 \times 10^{-6}$	14320	205×10^{-6}
0,900	$0,00260 \times 10^{-6}$	19620	385×10^{-6}
1,000	$0,00148 \times 10^{-6}$	25980	675×10^{-6}
1,200	$0,000561 \times 10^{-6}$	44210	1782×10^{-6}

Таблица удельного сопротивления A_T , пропускной способности K_T и квадрата пропускной способности K_T^2 для расчета чугунных трубопроводов из труб ненормированных диаметров при расходе воды, выраженном в м³/сек

(Таблица подсчитана по формуле Маннинга с коэффициентом шероховатости $n = 0.012$)

Диаметр D в мм	Величина удельного сопротивления A_T в (сек/м ³) ²	Величина пропускной способности K_T в м ³ /сек	Величина квадрата пропускной способности K_T^2 в (м ³ /сек) ²	Диаметр D в мм	Величина удельного сопротивления A_T в (сек/м ³) ²	Величина пропускной способности K_T в м ³ /сек	Величина квадрата пропускной способности K_T^2 в (м ³ /сек) ²
100	319	0,0560	$3,13 \times 10^{-3}$	210	6,11	0,405	$1,64 \times 10^{-1}$
105	246	0,0638	$4,07 \times 10^{-3}$	220	4,77	0,458	$2,10 \times 10^{-1}$
110	192	0,0722	$5,21 \times 10^{-3}$	230	3,76	0,516	$2,66 \times 10^{-1}$
115	152	0,0811	$6,58 \times 10^{-3}$	240	3,00	0,557	$3,33 \times 10^{-1}$
120	121	0,0909	$8,26 \times 10^{-3}$	250	2,41	0,644	$4,15 \times 10^{-1}$
125	97,2	0,101	$1,03 \times 10^{-2}$	260	1,96	0,714	$5,10 \times 10^{-1}$
130	77,8	0,113	$1,285 \times 10^{-2}$	270	1,60	0,791	$6,25 \times 10^{-1}$
135	64,5	0,1245	$1,55 \times 10^{-2}$	280	1,32	0,871	$7,58 \times 10^{-1}$
140	53,2	0,137	$1,88 \times 10^{-2}$	290	1,095	0,956	$9,13 \times 10^{-1}$
145	44,0	0,151	$2,27 \times 10^{-2}$	300	0,911	1,05	1,10
150	36,7	0,165	$2,72 \times 10^{-2}$	310	0,766	1,14	1,31
155	30,9	0,180	$3,24 \times 10^{-2}$	320	0,648	1,24	1,54
160	26,0	0,196	$3,85 \times 10^{-2}$	330	0,550	1,35	1,82
165	22,1	0,213	$4,52 \times 10^{-2}$	340	0,468	1,46	2,14
170	18,9	0,230	$5,29 \times 10^{-2}$	350	0,401	1,58	2,50
175	16,2	0,248	$6,17 \times 10^{-2}$	360	0,346	1,70	2,89
180	13,9	0,268	$7,19 \times 10^{-2}$	370	0,298	1,83	3,36
185	12,0	0,289	$8,33 \times 10^{-2}$	380	0,259	1,96	3,86
190	10,45	0,309	$9,57 \times 10^{-2}$	390	0,2255	2,11	4,44
195	9,07	0,332	$1,103 \times 10^{-1}$	400	0,196	2,26	5,09
200	7,92	0,335	$1,26 \times 10^{-1}$				

Диаметр D в мм	Величина удельного сопротивления A_T в (сек/мм ³) ²	Величина пропускной способности K_T в мм ³ /сек	Величина квadrата пропускной способности K_T^2 в (мм ³ /сек) ²	Диаметр D в мм	Величина удельного сопротивления A_T в (сек/мм ³) ²	Величина пропускной способности K_T в мм ³ /сек	Величина квadrата пропускной способности K_T^2 в (мм ³ /сек) ²
410	0,1725	2,41	5,80	920	0,00232	20,76	431
420	0,1515	2,57	6,60	940	0,00206	22,02	485
430	0,1317	2,73	7,48	960	0,00184	23,30	543
440	0,118	2,91	8,48	980	0,00165	24,62	606
450	0,105	3,08	9,52	1000	0,00148	25,98	675
460	0,0934	3,27	10,71	1050	0,001145	29,55	873
470	0,0834	3,46	11,99	1100	0,000892	33,48	1121
480	0,0745	3,66	13,42	1150	0,000704	37,68	1420
490	0,0666	3,87	15,00	1200	0,000561	42,21	1782
500	0,0598	4,09	16,70	1250	0,000453	46,89	2208
520	0,0485	4,54	20,62	1300	0,000366	52,27	2732
540	0,0397	5,02	25,2	1350	0,000295	58,22	3390
560	0,0328	5,52	30,5	1400	0,000246	63,76	4065
580	0,0271	6,07	36,9	1450	0,000204	70,00	4900
600	0,0226	6,65	44,2	1500	0,000171	76,47	5848
620	0,0191	7,24	52,36	1550	0,0001435	83,48	6969
640	0,0161	7,88	62,1	1600	0,000121	90,91	8265
660	0,0136	8,57	73,5	1650	0,0001025	98,77	9756
680	0,0116	9,28	86,2	1700	0,0000875	108,9	11429
700	0,00993	10,05	101	1750	0,0000750	115,3	13333
720	0,00855	10,32	117	1800	0,0000645	124,3	15504
740	0,00738	11,64	135,5	1850	0,0000558	133,4	17921
760	0,00641	12,49	156	1900	0,0000483	144,0	20704
780	0,00557	13,40	179,5	1950	0,0000421	154,1	23753
800	0,00487	14,32	205	2000	0,0000368	164,6	27174
820	0,00427	15,30	234	2100	0,0000321	187,7	35211
840	0,00376	16,31	266	2200	0,0000281	212,7	45249
860	0,00332	17,35	301	2300	0,0000241	239,0	57143
880	0,00294	18,44	340	2400	0,0000201	268,2	71942
900	0,00260	19,62	385	2500	0,0000161	298,8	89286

Примеры пользования табл. 3 и 4

Пример 1. Водовод из чугунных труб диаметром $D=400$ мм имеет в длину 1500 м. Требуется определить потери напора при расходе воды $Q=100$ л/сек.

Решение. По табл. 3 находим $A_T = 0,196 \times 10^{-6}$. По формуле (3) при $Q=100$ л/сек и длине $L=1500$ м получим:

$$h = A_T L Q^2 = 0,196 \times 10^{-6} \times 1500 \times 100^2 = 2,94 \text{ м.}$$

Пример 2. Требуется определить расход воды, проходящей по водоводу диаметром 500 мм и длиной 2000 м, если потери напора в водоводе составляют 5 м.

Решение. По табл. 3 величина пропускной способности $K_T = 4090$ л/сек. По формуле (5) находим, что расход воды Q равен:

$$Q = K_T \sqrt{\frac{h}{L}} = 4090 \sqrt{\frac{5}{2000}} = 4090 \times 0,05 = 204,5 \text{ л/сек.}$$

Пример 3. Водовод из чугунных труб диаметром 1250 мм имеет в длину 4000 м. Требуется определить потерю напора при расходе воды $Q=1,2$ м³/сек.

Решение. По табл. 4 $A_T = 0,000453$. Потерю напора определим по формуле (3):

$$h = A_T L Q^2 = 0,000453 \times 4000 \times 1,2^2 \approx 2,61 \text{ м.}$$

Другое решение возможно получить, определив сначала величину квадрата пропускной способности K_T^2 . По табл. 4 $K_T^2 = 2208$.

Тогда

$$h = \frac{4000}{2208} \times 1,2^2 \approx 2,61 \text{ м.}$$

Так как диаметр 1250 мм является большим диаметром, то коэффициент шероховатости n надо брать равным $n=0,013$.

Тогда потеря напора может быть определена таким образом:

$$h = 2,61 \cdot \left(\frac{0,013}{0,012} \right)^2 = 3,07 \text{ м.}$$

3. Таблицы для расчета труб из различных материалов

Для определения потерь напора в трубопроводах из различных материалов удобнее всего пользоваться формулой Маннинга (14), составив для каждого рода стенок труб соответствующие переходные таблицы коэффициентов шероховатости.

Так как приведенные выше основные табл. 3, 4 и 5 составлены по формуле Маннинга с коэффициентом шероховатости $n=0,012$, то при других коэффициентах шероховатости определение по таблицам величины удельного сопротивления A_T следует умножать на коэффициент η :

$$\eta = \left(\frac{n_x}{0,012} \right)^2 = 6944 n_x^2 \approx 7000 n_x^2, \quad (17)$$

где n_x — действительный коэффициент шероховатости данного трубопровода.

Если пользоваться формулой Прандтля—Никурадзе для вполне шероховатых труб (равномерная шероховатость), то формула (17) принимает вид:

$$\eta = \left(\frac{n_x}{n_{\text{таб}}} \right)^2 \approx \sqrt[3]{\frac{\Delta_x}{\Delta_{\text{таб}}}}, \quad (18)$$

Трубы стальные

(с учетом допусков по ОСТ и уменьшения сечения труб вследствие их загрязнений)

Таблица удельного сопротивления A_T , пропускной способности K_T и квадрата пропускной способности K_T^2 для расчета трубопроводов из стальных труб (ГОСТ 18828-39 — обыкновенные трубы) при расходе воды, выраженном в л/сек.

(Таблица подсчитана по формуле Маннинга с коэффициентом шероховатости $n=0,012$)

Номинальный диаметр по ОСТ в дюймах	Величина удельного сопротивления A_T в (сек/л) ³	Величина пропускной способности K_T в л/сек	Величина квадрата пропускной способности K_T^2 в (л/сек) ²	Номинальный диаметр по ОСТ в дюймах	Величина удельного сопротивления A_T в (сек/л) ³	Величина пропускной способности K_T в л/сек	Величина квадрата пропускной способности K_T^2 в (л/сек) ²
3/8	68,81	0,12	0,0145	2	0,01286	8,82	77,8
1/2	16,96	0,169	0,0590	2 1/2	0,003185	17,7	314
3/4	2,242	0,668	0,446	3	0,001122	29,8	891
1	0,518	1,39	1,93	4	0,0002726	60,6	3670
1 1/4	0,118	2,91	8,47	5	0,00008557	108,2	11700
1 1/2	0,0484	4,55	20,66	6	0,00003304	174	30300

т. е. поправочный (переводный) коэффициент η равняется кубическому корню из отношения абсолютной шероховатости данной трубы Δ_x к абсолютной величине шероховатости.

Для упрощения подсчетов приводим таблицу коэффициента η .

Таблица 6

n_x	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017
$\eta = \left(\frac{n_x}{0,012} \right)^3$	0,5625	0,694	0,840	1,00	1,173	1,360	1,562	1,777	2,00

Пример 4. Требуется определить потерю напора в старом трубопроводе, коэффициент шероховатости в котором, по опытам, $n_x=0,0145$. Длина трубопровода $l=1000$ м, диаметр — 400 мм, расход — 100 л/сек.

По табл. 3 $A_T = 0,196 \times 10^{-6}$. Потеря напора h при коэффициенте $n=0,012$ будет: $h = A_T l Q^2 = 0,196 \times 10^{-6} \times 1000 \times 100^2 = 1,96$ м. Потеря напора h при коэффициенте $n_x=0,0145$ будет: $h = 1,96 \times \eta = 1,96 \times 1,46 = 2,86$ м (коэффициент η можно брать по табл. 5 или по графику, рис. 1).

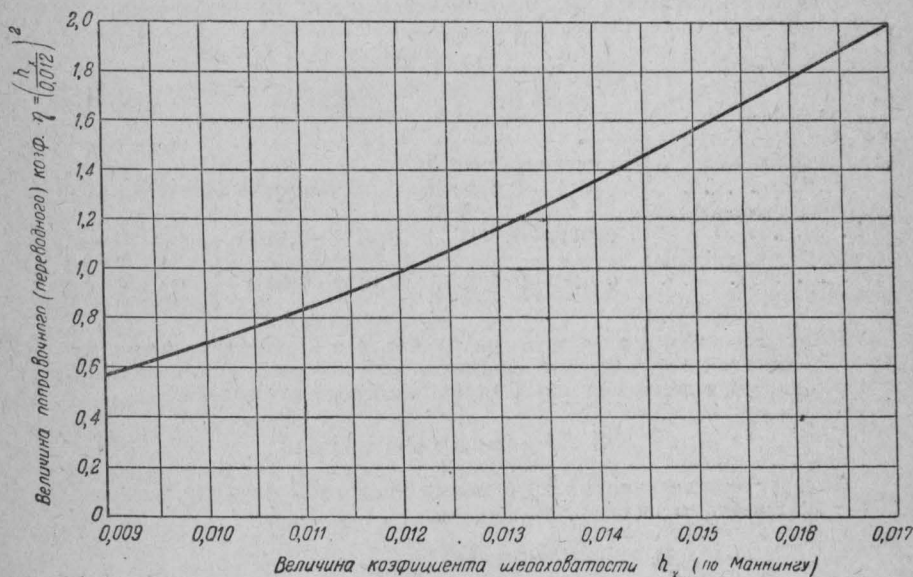


Рис. 1. График переводного коэффициента η .

а) Железобетонные трубы

Железобетонные трубы можно рассчитывать по формуле Скобея:

$$i = a \frac{v^2}{D^{1,25}} \quad (19)$$

Значения коэффициента a приводятся в табл. 7.

Таблица 7

Класс	Характеристика трубопроводов	Величина <i>a</i>
II	Трубы, изготовленные в деревянной опалубке	0,001135
III	Трубы, изготовленные с применением металлической опалубки и покрытые штукатуркой из чистого цемента с железнением, при хорошем качестве работ	0,000917
IV	Трубы, изготовленные с применением металлической, смазанной маслом, опалубки, тщательно зажеженные, при особо высоком качестве работ	0,000797

Если заменить эту формулу формулой Маннинга, то приближенно

$$i = 6,35 \cdot \frac{n^2}{D^{1,33}} \cdot v^2, \quad (20)$$

то соответствующие коэффициенты шероховатости *n* можно брать по табл. 8.

Таблица 8

Значения коэффициентов шероховатости *n* для железобетонных труб

Класс	Диаметр труб <i>D</i> в мм		
	300—500	500—1000	1000—3000
II	0,0127—0,0130	0,0130—0,0134	0,0134—0,0141
III	0,0114—0,0117	0,0117—0,0120	0,0120—0,0127
IV	0,0106—0,0109	0,0109—0,0112	0,0112—0,0117

Пользуясь табл. 8 и расчетными табл. 3, 4 и 5, составленными по формуле Маннинга с коэффициентом шероховатости $n = 0,12$, можно подсчитывать потерю напора в железобетонных трубах любого изготовления.

б) Деревянные трубы

Для расчета деревянных труб можно применять формулу Скобея (ГОСТ 3393—46), имеющую вид:

$$i = 0,000885 \frac{v^{1,8}}{D^{1,17}}. \quad (21)$$

Приведя эту формулу к формуле Маннинга (14), получим следующее выражение для коэффициента шероховатости *n*:

$$n = 0,392 \sqrt{0,00088 \cdot D^{0,3}}. \quad (22)$$

Отсюда для труб различных диаметров имеем следующие коэффициенты шероховатости *n* из формулы Маннинга:

при $D = 300 \div 500$ мм $n = 0,0125 - 0,0114$, в среднем 0,0113,

при $D = 500 \div 1000$ мм $n = 0,0114 - 0,0116$, в среднем 0,0115,

при $D = 1000 \div 3000$ мм $n = 0,0116 - 0,012$, в среднем 0,0118.

в) Асбоцементные трубы

Асбоцементные трубы можно рассчитывать по следующим формулам:
при новых трубах

$$i = 0,000591 \frac{v^{1,783}}{D^{1,214}} \text{ (формула Шимеми);} \quad (23)$$

$$i = 0,000698 \frac{v^{1,832}}{D^{1,204}} \text{ (формула проф. Людина)} \quad (24)$$

$$i = 0,000551 \frac{v^{1,818}}{D^{1,236}} \text{ (формула А. М. Кукушкина)}$$

при инкрустированных (старых) трубах

$$i = 0,0007047 \frac{v^{1,852}}{D^{1,204}} \text{ (формула проф. Людина).} \quad (25)$$

Приведя эти формулы к формуле Маннинга, получим следующие значения коэффициентов шероховатости n формулы Маннинга, сведенные в табл. 9.

Таблица 9

Значения коэффициентов шероховатости n для асбоцементных труб

Наименование формул	Диаметры труб от 100 до 300 мм	Диаметры труб от 300 до 500 мм
Шимеми для новых труб	0,0097 — 0,0102	0,0102 — 0,0104
Людина:		
для новых труб	0,0100 — 0,0103	0,0103 — 0,0105
для инкрустированных труб . .	0,0109 — 0,0111	0,0111 — 0,0113
Кукушкина:		
для новых труб	0,00905 — 0,00907	0,00907 — 0,00912

г) Стальные трубы

Для стальных труб часто пользуются формулой Скобея, имеющей вид:

$$i = \alpha \cdot \beta \frac{v^{1,9}}{D^{1,10}}, \quad (26)$$

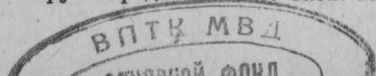
где: i — гидравлический уклон,

v — скорость в м/сек,

D — диаметр в метрах,

α и β — коэффициенты, зависящие от типа швов трубы и срока ее службы.

Коэффициент α для новых труб определяется по табл. 10.



Класс	Характеристика трубопровода	α
I	Трубопроводы с клепаными продольными и поперечными швами:	
	при толщине стенок $\delta = 5$ мм со швом внахлестку	0,00098
	то же при $\delta = 6 \div 11$ мм со швом внахлестку . .	0,00114
	то же при $\delta = 6 \div 11$ мм со швом встык с накладками	0,00124
	то же при $\delta > 12$ мм со швом встык с накладками	0,00134
II	Трубы с продольными сварными или клепаными швами при поперечных швах с выступающими заклепочными головками	0,00088
III	Трубопроводы с гладкими поперечными и продольными швами, не дающими практически заметных сопротивлений	0,00083

Для средних условий работы сварных трубопроводов, применяемых в настоящее время, возможно указать следующие значения коэффициента шероховатости n в формуле Маннинга:

$$\begin{aligned} \text{при } D = 300 \div 500 \text{ мм } n &= 0,011 - 0,0115, \\ \text{при } D = 500 \div 1000 \text{ мм } n &= 0,0115 - 0,012, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{при } D = 1000 \div 3000 \text{ мм } n = 0,012 - 0,0135. \quad (28)$$

д) Гладкие трубы

Для гладких труб (например, медных, латунных, свинцовых и др.), изготовленных из любого материала, часто применяется формула вида:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \xi, \quad (29)$$

где λ_0 — величина коэффициента шероховатости, подсчитанная по формуле Прандтля—Никурадзе (8):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_0}} = 2 \log (Re \sqrt{\lambda_0}) - 0,8$$

или по приближенным выражениям

$$\lambda_0 = \left(\frac{0,735}{\log Re - 0,4} \right)^{2,19}, \quad (30)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{\left(1,8 \log \frac{Re}{7} \right)^2} \quad (\text{по Кольбруку}) \quad (31)$$

или по формуле Блазиуса

$$\lambda_0 = 0,3164 \frac{1}{\sqrt[4]{Re}} \quad (32)$$

Коэффициентом ξ называют коэффициент шероховатости второго рода или коэффициент волнистости. Величина его принимается:

а) для асфальтированного железа $\xi = 1,2 \div 1,5$,

б) для деревянных труб $\xi = 1,5 \div 2,0$.

е) Старые трубы

Пропускная способность труб изменяется в зависимости от срока их службы. Для учета срока службы трубопровода можно пользоваться ориентировочными данными, пересчитанными на коэффициент шероховатости n из формулы Маннинга.

Для учета влияния срока службы труб на шероховатость труб и увеличение потери напора составлена на основании опытных данных следующая табл. № 11.

В этой таблице за единицу принята потеря напора для среднего значения опытов для новых чугунных гудронированных труб.

Таблица 11

№ по пор.	Характеристика срока службы и покрытия	Трубы малых диаметров		Трубы больших диаметров		Среднее значение	
		коэф. увел. потери напора	увелич. коэф. шерох. n	коэф. увел. потери напора	увелич. коэф. шерох. n	коэф. увел. потери напора	увелич. коэф. шерох. n
1	Новые чугунные гудронированные трубы	1,07	1,03	0,93	0,96	1,0	1,0
2	Чугунные трубы по истечении 5 лет	1,85	1,36	1,20	1,1	1,49	1,22
3	Чугунные трубы по истечении 10 лет	2,63	1,62	1,49	1,22	1,97	1,40
4	Чугунные трубы по истечении 20 лет	4,90	2,21	1,85	1,36	2,90	1,70
5	Чугунные трубы по истечении 30 лет	7,10	2,66	2,19	1,48	3,80	1,95

Для сравнения приводятся также поправочные коэффициенты для гладких труб.

6	Трубы с очень гладкими стенками	0,82	0,91	0,725	0,85	0,77	0,88
---	---------------------------------	------	------	-------	------	------	------

Примечания: 1. Ныне широко применяемый коэффициент шероховатости $n = 0,012$ соответствует сроку службы чугунных труб (при плохом внутреннем покрытии) в 4—5 лет.

2. При учете увеличения потери напора в связи со сроком службы необходимо учитывать коррозионные свойства воды, а также и возможность отложений на стенках труб, связанные со свойствами подаваемой воды.

4. Таблицы величин сопротивлений s

К формуле $h = sQ^2$

Таблица 12

Величина сопротивления s сек²/м⁵ для расходов, выраженных в л/сек

Чугунные трубы

Коэффициент шероховатости из формулы Маннинга $n = 0,012$

Длина в м	Диаметры в мм					
	100	125	150	200	250	300
100	0,03190	0,00972	0,00367	0,000792	0,002410	0,0000911
150	0,04785	0,01458	0,00551	0,001188	0,000361	0,0001367
200	0,06380	0,01944	0,00734	0,001584	0,000484	0,0001822
250	0,07975	0,02430	0,00917	0,001980	0,000603	0,00022795
300	0,09570	0,02916	0,01101	0,002376	0,000723	0,0002733
350	0,11165	0,03402	0,01284	0,002772	0,000844	0,00031885
400	0,12760	0,03888	0,01468	0,003168	0,000964	0,0003644
450	0,14355	0,04374	0,01651	0,003564	0,001085	0,00040995
500	0,15950	0,04860	0,01835	0,003960	0,001205	0,0004555
550	0,17545	0,05346	0,02018	0,004356	0,001325	0,00050605
600	0,19140	0,05832	0,02202	0,004752	0,001446	0,00054665
650	0,20735	0,06318	0,02385	0,005148	0,0015665	0,00059215
700	0,22330	0,06804	0,02569	0,005544	0,001687	0,0006377
750	0,23925	0,07290	0,02752	0,005940	0,0018075	0,00068325
800	0,25520	0,07776	0,02936	0,006336	0,001928	0,0007289
850	0,27115	0,08262	0,03119	0,006742	0,0020485	0,0007744
900	0,28710	0,08748	0,03303	0,007128	0,002169	0,0008199
50	0,30305	0,09234	0,03487	0,007524	0,0022895	0,00086545
1000	0,3190	0,09720	0,03670	0,007920	0,002410	0,0009110

Величина сопротивления s сек²/м⁵ для расходов, выраженных в м³/сек

Цикульные трубы

Коэффициент шероховатости из формулы Маннинга $n = 0,012$

Длина в м	Д и а м е т р ы в мм									
	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1200
50	20,05	9,8	5,25	2,99	1,13	0,497	0,244	0,130	0,074	0,0281
100	40,10	19,6	10,50	5,98	2,26	0,993	0,487	0,260	0,148	0,0561
150	60,15	29,4	15,75	8,97	3,39	1,490	0,731	0,390	0,222	0,0842
200	80,20	39,2	21,00	11,96	4,42	1,986	0,974	0,520	0,296	0,1122
250	100,25	49,0	26,25	14,95	5,65	2,483	1,218	0,650	0,370	0,1403
300	120,30	58,8	31,50	17,94	6,78	2,979	1,461	0,780	0,444	0,1683
350	140,35	68,6	36,75	20,93	7,91	3,476	1,705	0,910	0,518	0,1964
400	160,40	78,4	42,00	23,92	9,04	3,972	1,948	1,040	0,592	0,2244
450	180,45	88,2	47,25	26,91	10,17	4,469	2,192	1,170	0,676	0,2525
500	200,50	98,0	52,50	29,90	11,30	4,965	2,435	1,300	0,740	0,2805
550	220,55	107,8	57,75	32,89	12,43	5,462	2,679	1,430	0,814	0,3086
600	240,60	117,6	63,00	35,88	13,56	5,958	2,922	1,560	0,888	0,3366
650	260,65	127,4	68,25	38,87	14,69	6,455	3,166	1,690	0,962	0,3647
700	280,70	137,2	73,50	41,86	15,82	6,951	3,409	1,820	1,036	0,3927
750	300,75	147,0	78,75	44,85	16,95	7,448	3,653	1,950	1,110	0,4208
800	320,80	156,8	84,00	47,84	18,08	7,944	3,896	2,080	1,184	0,4488
850	330,85	166,6	89,25	50,83	19,21	8,441	4,140	2,210	1,258	0,4769
900	340,90	176,4	94,50	53,82	20,34	8,937	4,383	2,340	1,332	0,5049
950	360,95	186,2	99,75	56,81	21,47	9,434	4,627	2,470	1,406	0,5330
1000	401,00	196,0	105,00	59,80	22,60	9,930	4,870	2,600	1,480	0,5610

Величина сопротивления s для расхода, выраженного в л/сек

Чугунные трубы малого диаметра

Коэффициент шероховатости из формулы Маннинга $n = 0,012$

Длина в м	Диаметры в мм				
	50	75	100	125	150
5	0,0643	0,0074	0,00160	0,000480	0,000184
10	0,1290	0,0148	0,00319	0,000972	0,000367
15	0,01930	0,0222	0,00479	0,001460	0,000551
20	0,2570	0,0296	0,00638	0,001940	0,000734
25	0,3220	0,0370	0,00798	0,002430	0,000918
30	0,3860	0,0440	0,00957	0,002920	0,001100
35	0,4500	0,0518	0,01120	0,003400	0,001290
40	0,5140	0,0592	0,01280	0,003890	0,001470
45	0,5790	0,0666	0,01440	0,004370	0,001650
50	0,6430	0,0740	0,01600	0,004860	0,001840
55	0,7070	0,0814	0,01750	0,005350	0,002020
60	0,7720	0,0888	0,01910	0,005830	0,002200
65	0,8360	0,0962	0,02070	0,006320	0,002390
70	0,9000	0,1040	0,0223	0,006800	0,002570
75	0,9650	0,1110	0,0239	0,007290	0,002750
80	1,0300	0,1180	0,0255	0,007780	0,002940
85	1,0900	0,1260	0,0271	0,008260	0,003120
90	1,1600	0,1330	0,0287	0,008750	0,003300
95	1,2200	0,1410	0,0303	0,009230	0,003490
100	1,2900	0,1480	0,0319	0,009720	0,003670

Величина сопротивления s для расходов, выраженных в л/сек

Стальные трубы малого диаметра

(С учетом допусков по ОСТ и загрязнений)

Коэффициент шероховатости из формулы Маннинга $n=0,012$

Длина в м	Диаметры								
	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
5	84,8	11,2	2,60	0,59	0,242	0,0643	0,0159	0,00561	0,00136
10	170	22,4	5,18	1,18	0,484	0,1290	0,0319	0,0112	0,00273
15	254	33,6	7,77	1,74	0,726	0,1930	0,0478	0,0168	0,00409
20	339	44,8	10,4	2,36	0,968	0,237	0,0637	0,0224	0,00545
25	424	56,1	13,0	2,95	<u>1,21</u>	0,322	0,0796	0,0281	0,00682
<u>30</u>	509	67,3	<u>15,5</u>	3,54	1,45	0,386	0,0956	0,0337	0,00818
35	594	78,5	18,1	4,13	1,69	0,450	0,111	0,0393	0,00954
40	678	89,7	20,8	4,72	1,94	0,514	0,127	0,0449	0,0109
45	763	101	23,3	5,31	2,18	0,579	0,143	0,0505	0,0123
50	848	112	25,9	5,90	2,42	0,643	0,159	0,0561	0,0136
55	933	123	28,5	6,49	2,66	0,707	0,172	0,0617	0,0150
60	1018	135	31,1	7,08	2,90	0,772	0,191	0,0673	0,0164
65	1102	146	33,7	7,67	3,15	0,836	0,207	0,0729	0,0177
<u>70</u>	1187	157	<u>36,3</u>	8,26	3,39	0,900	0,223	0,0785	0,0191
75	1272	168	38,9	8,85	3,63	0,965	0,239	0,0842	0,0204
80	1357	179	41,4	9,44	3,87	1,03	0,255	0,0898	0,0218
85	1442	191	44,0	10,0	4,11	1,09	0,271	0,0954	0,0232
90	1526	202	46,6	10,6	4,36	1,16	0,287	0,101	0,0245
95	1611	213	49,2	11,2	4,60	1,22	0,303	0,107	0,0259
100	1696	224	51,8	11,84	4,84	1,29	0,319	0,112	0,0271

Раздел II. Местные сопротивления и истечение из отверстий

Определение потерь напора на местные сопротивления (задвижки, колена, тройники, водомеры и пр.) производится по формуле:

$$h = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} = \zeta \cdot \frac{Q^2}{\omega^2 2g}, \quad (33)$$

где ζ — коэффициент, зависящий от характера сопротивления (коэффициент сопротивления).

Для круглых сечений получим:

$$h = \zeta \cdot \frac{16}{\pi^2 2g D^4} \cdot Q^2 = \zeta A_c Q^2, \quad (34)$$

$$\text{где } A_c = \frac{16}{\pi^2 2g D^4} \text{ (удельное сопротивление).} \quad (35)$$

Формула (34) может быть представлена также в виде:

$$h = \zeta \cdot \frac{1}{K_c^2} \cdot Q^2, \quad (36)$$

$$\text{где } K_c^2 = \frac{1}{A_c} = \frac{\pi^2 2g D^4}{16} \text{ (квадрат пропускной способности).} \quad (37)$$

Значения A_c и K_c^2 приводятся ниже в табл. 16 и 17.

Напор, потребный при истечении из отверстия, определяется из формулы

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gh}, \quad (38)$$

откуда

$$h = \frac{1}{\mu^2 \omega^2 2g} \cdot Q^2. \quad (39)$$

Для отверстия круглого сечения

$$h = \frac{1}{\mu^2} \cdot \frac{16}{\pi^2 2g D^4} \cdot Q^2 = \frac{1}{\mu^2} \cdot A_\omega Q^2, \quad (40)$$

$$\text{где } A_\omega = \frac{16}{\pi^2 2g D^4}. \quad (41)$$

Из сравнения формул (35) и (41), (34) и (40) находим:

$$A_\omega = A_c. \quad (42)$$

Величина $\frac{1}{\mu^2}$ идентична коэффициенту сопротивления ζ .

Значения удельного сопротивления A_c и квадрата пропускной способности K_c^2 для местных сопротивлений и истечений из отверстий

Диаметры от 50 до 600 мм

Диаметр D в мм	Значения K_c^2		Значения A_c	
	для расхода, выраженного в м ³ /сек	для расхода, выраженного в л/сек	для расхода, выраженного в м ³ /сек	для расхода, выраженного в л/сек
50	$75,7 \times 10^{-6}$	75,7	13 200	0,0132
70	291×10^{-6}	291	3 440	0,00344
75	383×10^{-6}	383	2 610	0,00261
100	$1 210 \times 10^{-6}$	1 210	826	0,000826
125	$2 960 \times 10^{-6}$	2 960	338	0,000338
150	$6 130 \times 10^{-6}$	6 130	163	0,000163
200	$19 400 \times 10^{-6}$	19 400	51,5	0,0000515
250	$47 300 \times 10^{-6}$	47 300	21,1	0,0000211
300	$98 100 \times 10^{-6}$	98 100	10,2	0,0000102
350	$182 000 \times 10^{-6}$	182 000	5,49	0,00000549
400	$310 000 \times 10^{-6}$	310 000	3,23	0,00000323
450	$496 000 \times 10^{-6}$	496 000	2,02	0,00000202
500	$757 000 \times 10^{-6}$	757 000	1,32	0,00000132
600	$1 570 000 \times 10^{-6}$	1 570 000	0,637	0,000000637

Значения удельного сопротивления A_c и квадрата пропускной способности K_c^2 для местных сопротивлений и истечений из отверстий

Диаметры от 4 до 50 мм

Диаметр отвер- стий в мм	Значения K_c^2 для расхода, выраженного в л/сек	Значения A_c для рас- хода, выра- женного в л/сек	Диаметр отвер- стий в мм	Значения K_c^2 для рас- хода, выра- женного в л/сек	Значения A_c для расхода, выраженного в л/сек
4	0,003100	323	24	4,017	0,249
5	0,007563	132	25	4,728	0,211
6	0,001568	63,8	26	5,532	0,181
7	0,02905	34,4	27	6,430	0,156
8	0,04960	20,2	28	7,442	0,134
9	0,07939	12,6	29	8,558	0,117
10	0,1211	8,26	30	9,806	0,102
11	0,1771	5,65	31	11,379	0,0879
12	0,2511	3,98	32	12,694	0,0788
13	0,3456	2,89	33	14,349	0,0697
14	0,4651	2,15	34	16,145	0,0619
15	0,6126	1,63	35	18,167	0,0550
16	0,7934	1,26	36	20,333	0,0492
17	1,011	0,989	38	25,242	0,0396
18	1,271	0,787	40	30,991	0,0323
19	1,577	0,634	42	37,670	0,0265
20	1,937	0,516	44	45,374	0,0220
21	2,353	0,425	46	54,201	0,0185
22	2,836	0,352	48	64,263	0,0156
23	3,386	0,295	50	75,663	0,0132

1. Коэффициенты местных сопротивлений

Приводимые ниже коэффициенты сопротивления имеют большую или меньшую достоверность в том случае, когда прямой участок перед местным сопротивлением по крайней мере больше $20D$. Только в последнем случае при последовательном соединении фасонных частей возможно арифметически складывать величины коэффициентов сопротивления ζ .

При фасонных частях, расположенных друг от друга менее чем на расстоянии $20D$, стоящая впереди фасонная часть влияет на коэффициент сопротивления последующей. Поэтому коэффициент сопротивления рядом стоящих фасонных частей нельзя считать как сумму их коэффициентов, а надо считать как особый коэффициент.

Ниже приводятся значения коэффициентов сопротивления для различных случаев местных сопротивлений.

1. Вход в трубу при острых кромках — $\zeta = 0,5$.

2. Вход в трубу при закругленных кромках — $\zeta = 0,06$.

3. Вход в трубу с патрубками внутри сосуда (резервуара) — $\zeta = 1,0$.

4. Вход из трубы в бак — $\zeta = 1,0$.

5. Внезапное расширение, иногда называемое потерей на удар (рис. 2). Потеря напора в этом случае определяется по формуле:

$$h_r = \zeta_1 \cdot \frac{Q^2}{2g\omega_1^2} = \zeta_2 \cdot \frac{Q^2}{2g\omega_2^2}, \quad (43)$$



Рис. 2. Внезапное расширение.

$$\text{где: } \zeta_1 = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2; \quad \zeta_2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2;$$

ω_1 и ω_2 — площади сечений трубы;

ζ_1 и ζ_2 — соответствующие площади коэффициенты сопротивления. ζ_1 — относится к сечению ω_1 , ζ_2 — относится к сечению ω_2 .

Величины ζ_1 приводятся в табл. 18.

Таблица 18

Величины ζ_1 для внезапных расширений

$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ζ_1	0,98	0,81	0,64	0,36	0,16	0,04	0

6. Внезапное сужение, когда жидкость переходит с меньшей скорости v_1 на большую v_2 или, что то же, с большего сечения трубопровода на меньшее (рис. 3). Потеря напора для этого случая определяется по формуле:

$$h_r = \zeta_{суж} \cdot \frac{Q^2}{2g\omega_2^2}. \quad (44)$$

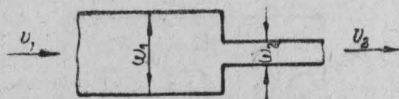


Рис. 3. Внезапное сужение.

Значения коэффициента $\zeta_{суж}$ приводятся в табл. 19. $\zeta_{суж}$ относится к меньшему сечению.

Таблица 19

Значения $\zeta_{суж}$ для внезапных сужений

$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\zeta_{суж}$	0,50	0,50	0,42	0,34	0,25	0,15	0

7. Расширяющиеся и сужающиеся трубы (переходы).

В сооружениях для водоснабжения употребляются фасонные части, называемые переходами, которые соединяют между собой трубы разных диаметров (рис. 4). Иногда расширяющиеся конические отрезки труб называют диффузорами, а сужающиеся — коллекторами, или конфузорами (Б. Юрьев, „Экспериментальная аэродинамика“).

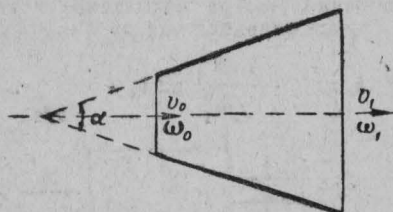


Рис. 4. Расширяющиеся и сужающиеся трубы.

а) Коэффициент сопротивления ζ_d для диффузоров определяется по формуле:

$$\zeta_d = \frac{\psi}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2} + \sin \alpha \left(\frac{n-1}{n} \right)^2. \quad (45)$$

б) Коэффициент сопротивления ζ_k для конфузоров определяется по формуле:

$$\zeta_k = \frac{\psi}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2}, \quad (46)$$

где: $n = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ — степень расширения диффузора,

$$\psi = \frac{\lambda}{4},$$

λ — коэффициент Дарси-Вейсбаха,

α — угол конусности.

Коэффициенты ζ относятся к меньшему сечению.

8. Коэффициент сопротивления ζ для диафрагм и сопел (рис. 5), по опытам можно представить следующими формулами:

для диафрагмы

$$\zeta_{\text{диаф}} = \frac{1 - 1,075 m}{m^2 \mu^2} \quad (\text{для } m < 0,803); \quad (47)$$

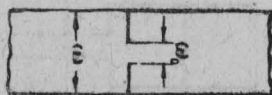


Рис. 5. Диафрагма.

для сопел

$$\zeta_{\text{сое}} = \frac{0,835 - 1,075 m}{m^2 \mu^2} \quad (\text{для } 0,30 < m < 0,805). \quad (48)$$

Здесь: $m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$,

d — диаметр сечения диафрагмы или сопла,

D — диаметр сечения трубы,

μ — коэффициент расхода.

Величины коэффициента сопротивления ζ приведены в табл. 20. ζ относится к сечению трубы.

Таблица 20

Значения коэффициентов сопротивления ζ для диафрагм

$\frac{\omega_0}{\omega} = m$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Величина ζ	960	243	51,2	18,3	8,15	3,77	1,80	0,79	0,27	—	—

Значения коэффициентов расхода для нормальных диафрагм и сопел приводятся в табл. 21.

Примечание. Под понятием „нормальных“ подразумеваются диафрагмы и сопла, применяемые для измерения расходов жидкости согласно Правил № 169 по измерению расхода жидкостей и газа при помощи сопел и диафрагм 1938 г.”.

Таблица 21

Значения коэффициентов расхода для диафрагм и сопел

$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	Коэффициент расхода μ		$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	Коэффициент расхода μ	
	для диафрагм	для сопел		для диафрагм	для сопел
0,05	0,598	0,987	0,65	0,770	1,183
0,10	0,602	0,989	0,70	0,804	
0,20	0,615	0,999	0,75	0,848	
0,30	0,634	1,016	0,80	0,898	
0,40	0,661	1,041	0,85	0,864	
0,50	0,696	1,081	0,87	1,00	
0,60	0,742	1,142			

9. Косое соединение (рис. 6):

$$\zeta = 1.$$

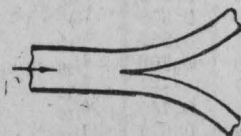


Рис. 6. Косое соединение.

10. Задвижка для круглого сечения (рис. 7). Значения ζ приводятся, в зависимости от величины открытия, в табл. 22. В этой же таблице приведены коэффициенты площади открытия задвижки m . Площадь открытия прохода задвижки может быть определена по формуле:

$$\omega_{от} = m\omega, \quad (49)$$

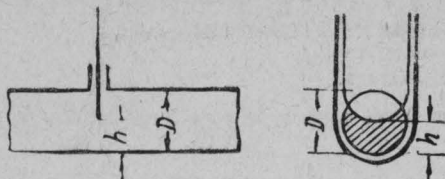


Рис. 7. Задвижка.

где: $\omega_{от}$ — площадь открытия,

ω — площадь при полном открытии.

Величина коэффициента m определяется по формуле:

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arccos \alpha - \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} \right). \quad (50)$$

Сопротивление задвижки s может подсчитываться по формуле:

$$s = \frac{\zeta}{m^2} \cdot A_c = \zeta A_s, \quad (51)$$

где: A_c — удельное сопротивление, указанное в табл. 16 и 17,

$a = \frac{h}{D}$ — степень открытия задвижки.

Таблица 22

Значения коэффициентов ζ и m для круглой задвижки при различных степенях открытия $a = \frac{h}{D}$

Степень открытия $a = \frac{h}{D}$		ζ		Коэффициент m	Степень открытия $a = \frac{h}{D}$		ζ		Коэффициент m
		по Вейсбаху	по Кейхлингу				по Вейсбаху	по Кейхлингу	
$\frac{16}{16}$	1	0,00	0,00	1,0	$\frac{8}{16}$	$\frac{1}{2}$	2,06	3,27	0,610
$\frac{15}{16}$	$\frac{15}{16}$	0,02	0,03	0,982	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{16}$	3,35	5,35	0,538
$\frac{14}{16}$	$\frac{7}{8}$	0,07	0,12	0,948	$\frac{6}{16}$	$\frac{3}{8}$	5,52	8,63	0,467
$\frac{13}{16}$	$\frac{13}{16}$	0,12	0,23	0,905	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$	7,92	11,89	—
$\frac{12}{16}$	$\frac{3}{4}$	0,26	0,41	0,855	$\frac{5}{16}$	$\frac{5}{16}$	9,80	14,0	0,392
$\frac{11}{16}$	$\frac{11}{16}$	0,44	0,66	0,798	$\frac{4}{16}$	$\frac{1}{4}$	17,0	22,08	0,317
$\frac{10}{16}$	$\frac{2}{3}$	0,57	0,77	—	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	34,5	36,5	0,240
$\frac{9}{16}$	$\frac{5}{8}$	0,81	1,08	0,740	$\frac{2}{16}$	$\frac{1}{8}$	97,8	83,0	0,160
	$\frac{9}{16}$	1,28	1,88	0,677	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$	—	—	0,08

11. Поворотный (горловой) клапан (рис. 8). Коэффициент сопротивления ζ , в зависимости от угла поворота α , приводится в табл. 23.



Рис. 8. Поворотный клапан

Т а б л и ц а 23

Значения коэффициента сопротивления ζ для поворотного (горлового) клапана

При $\alpha =$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	
Отношение сечений . .	0,913	0,826	0,741	0,658	0,577	0,500	0,426	
Значения ζ	0,24	0,52	0,90	1,54	2,51	3,91	6,22	
При $\alpha =$	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	90°
Отношение сечений . .	0,357	0,293	0,234	0,181	0,134	0,094	0,060	0,0
Значения ζ	10,8	18,7	32,8	58,8	118	258	751	∞

12. Пробковый кран (рис. 9). Коэффициент сопротивления ζ , в зависимости от угла поворота пробки крана, приводится в табл. 24.



Рис. 9. Пробковый кран.

Т а б л и ц а 24

Угол поворота α	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
Отношение сечений . .	0,926	0,850	0,772	0,692	0,613	0,535	0,458
Значения ζ	0,05	0,29	0,75	1,56	3,10	5,47	9,68
Угол поворота α	40°	45°	50°	55°	60°	65°	82½°
Отношение сечений . .	0,385	0,315	0,250	0,190	0,137	0,091	0
Значения ζ	17,3	31,2	52,6	106	206	486	∞

Значения коэффициента сопротивления ζ для шарнирного клапана (захлопки)

α	70°	65°	60°	55°	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°
ζ	1,7	2,3	3,2	4,6	6,6	9,5	14	20	30	42	62	90

Значения ζ для шарнирного клапана применимы также для обратного клапана (рис. 11).

14. Вход во всасывающую трубу (сетка с обратным клапаном) (рис. 12). В зависимости от конструкции $\zeta = 5 \div 10$. При расчете сетки принимают, что расчетная поверхность ячеек сетки составляет две трети от их действительной поверхности, следовательно

$$Q = \frac{2}{3} \omega v, \quad (52)$$

где ω — сумма площадей отверстий сетки.

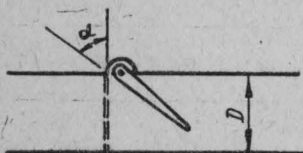


Рис. 10. Шарнирный клапан (захлопка).

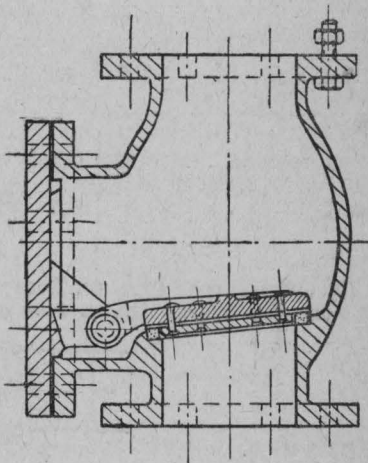


Рис. 11. Обратный клапан.

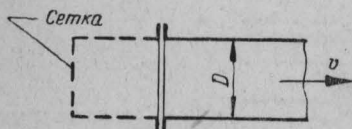


Рис. 12. Вход во всасывающую трубу.

15. Коэффициент сопротивления ζ для проходных вентилей (рис. 13) (дается для сравнения):

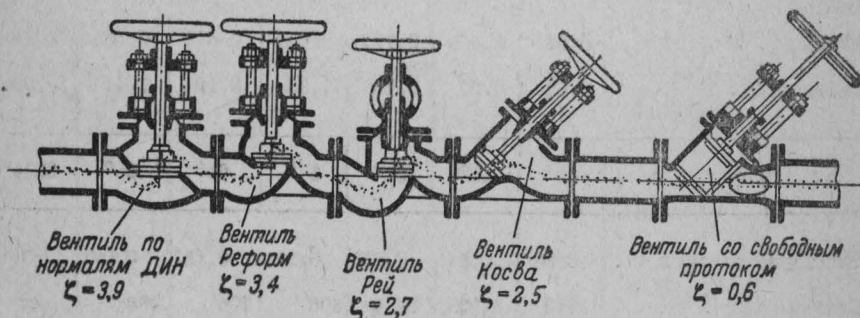


Рис. 13. Проходные вентили.

вентиль по нормам Дин — $\zeta = 3,9$,
 вентиль „Реформ“ — $\zeta = 3,4$,
 вентиль „Рей“ — $\zeta = 2,7$,
 вентиль „Косва“ — $\zeta = 2,5$,
 вентиль со свободным проходом — $\zeta = 0,6$.

16. Отвод круглого сечения. По данным Абрамовича, величина коэффициента местного сопротивления

$$\zeta = K \cdot a \cdot b, \quad (53)$$

где: $K = 0,73$; $a = f\left(\frac{R}{d}\right)$; $b = \varphi(\alpha)$;

R — радиус закругления,
 d — диаметр трубы,
 α — угол поворота.

Величины a и b приведены в графиках рис. 14 и 15.

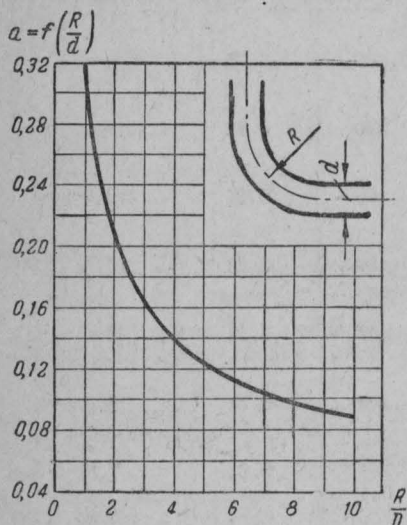


Рис. 14. График коэффициента a кривизны отвода.

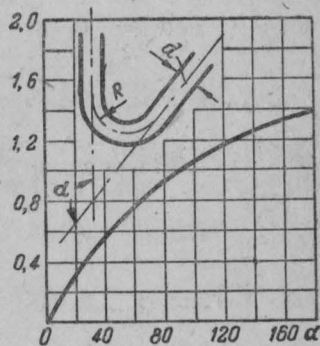


Рис. 15. График коэффициента b угла отвода.

17. Соединение отводов под углом в 90° :

а) соединение типа I (рис. 16, I): $\zeta_{\text{общ}} = 2\zeta_{\text{один}}$ (двойной отвод дает коэффициент сопротивления, в два раза больший, чем одиночный);
 б) соединение типа II (рис. 16, II): $\zeta_{\text{общ}} = 3\zeta_{\text{один}}$ (двойной отвод дает коэффициент сопротивления, в три раза больший, чем одиночный);

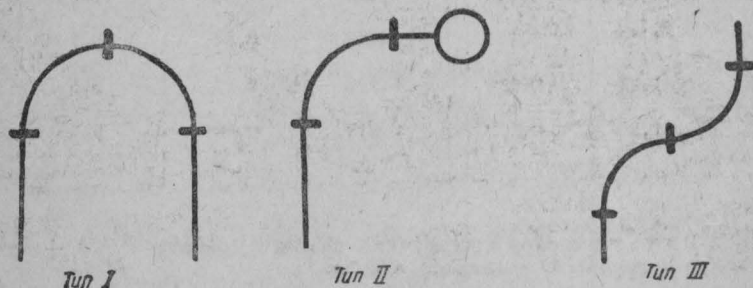


Рис. 16. Соединение отводов под углом в 90° .

в) соединение типа III (рис. 16, III): $\zeta_{\text{общ}} = 4 \zeta_{\text{один}}$ (двойной отвод дает коэффициент сопротивления, в четыре раза больший, чем одиночный).

18. Отводы, всасывающие, тарельчатые и обратные клапаны. Коэффициенты сопротивления для отводов, всасывающих, тарельчатых и обратных клапанов, по данным различных исследователей, приведены в табл. 26.

Таблица 26
Значения ζ для отводов, всасывающих, тарельчатых и обратных клапанов

Диаметр в мм	$\frac{\rho}{D}$	При глад- ких трубах $\zeta_{\text{повор}}^*$	При желез- ных трубах $\zeta_{\text{повор}}^*$	При чугу- ных трубах $\zeta_{\text{повор}}^*$	Всасываю- щий или тарельча- тый клапан ζ	Обрат- ный клапан ζ
20 ($\frac{3}{4}$ ")	6,0	0,350	0,500	0,75	—	—
35 ($1\frac{1}{4}$ ")	3,90	0,123	0,220	0,40	—	—
40 ($1\frac{1}{2}$ ")	3,50	0,120	0,160	0,24	12,0	22,0
50 (2")	3,00	0,105	0,135	0,21	10,0	18,0
65 ($2\frac{1}{4}$ ")	2,55	0,100	0,138	0,21	8,8	13,5
80 (3")	2,20	0,100	0,143	0,21	8,0	10,0
100	2,00	0,100	0,145	0,22	7,0	8,0
125	1,80	0,100	0,152	0,23	6,5	7,0
150	1,67	0,120	0,158	0,24	6,0	6,5
200	1,50	0,130	0,170	0,26	5,2	5,5
250	1,40	0,138	0,182	0,28	4,4	4,5
300	1,33	0,145	0,191	0,29	3,7	3,5
350	1,28	0,150	0,199	0,30	3,4	3,0
400	1,25	0,155	0,206	0,31	3,1	2,5
450	1,22	0,160	0,215	0,32	2,8	2,0
500	1,20	0,160	0,217	0,33	2,5	1,8

Примечание. При составлении таблицы принято $\frac{\rho}{D} 1 + \frac{100}{D}$, где: ρ — радиус поворота, D — диаметр отвода.

* $\zeta_{\text{повор}}$ обозначает общие потери как на трение в отводе, так и на самый поворот.

19. Тройники (рис. 17 и 18). При определении коэффициента сопротивления тройников надо рассматривать отдельно соединение и разделение потоков.

Потеря напора при этом вычисляется по формулам:

$$h_{пот} = \zeta_{отв} \cdot \frac{v_{совм}^2}{2g}, \quad (54)$$

$$h_{пот} = \zeta_{прох} \cdot \frac{v_{совм}^2}{2g}. \quad (55)$$

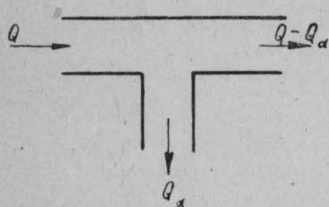


Рис. 17. Разделение потоков.

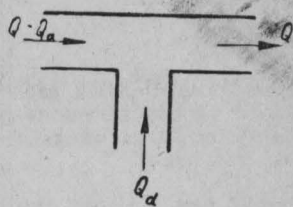


Рис. 18. Соединение потоков.

Здесь: индекс *прох* относится к главному потоку,
индекс *отв* относится к потоку ответвления,
индекс *совм* относится к объединенному потоку.

Коэффициенты сопротивления ζ для случая разделения потока даны в табл. 27, для случая соединения потоков — в табл. 28.

Таблица 27

Разделение потоков

$\frac{Q_\alpha}{Q}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\zeta_{отв}$	0,95	0,88	0,89	0,95	1,10	1,28
$\zeta_{прох}$	0,04	-0,08	-0,05	+0,07	+0,21	+0,35

Таблица 28

Соединение потоков

$\frac{Q_\alpha}{Q}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\zeta_{отв}$	-1,2	-0,4	+0,08	+0,47	+0,72	+0,01
$\zeta_{прох}$	0,04	0,17	0,30	0,41	0,51	0,60

20. Потери напора в гидрантах и стендерах приводятся в табл. 29.

Таблица 29

Потери напора в гидрантах и стендерах



Тип гидранта и стендера и характеристика его работы	Расход в л/сек	Потери напора в м-трах водяного столба		
		в гидранте	в стендере	общие по- тери напора
Ленинградский тип	5	0,9	0,5	1,4
	10	3,6	2,1	5,7
	20	14,4	8,4	22,8
Московский тип. Полный рас- ход воды пропускается че- рез два штуцера (подача двумя рукавами)	10	0,20	0,80	1,00
	20	0,80	2,30	3,10
	40	3,20	9,20	12,40
Московский тип. Полный рас- ход воды пропускается че- рез один штуцер (подача одним рукавом)	10	0,20	1,10	1,30
	20	0,80	4,40	5,20
	40	3,20	13,20	16,40

21. Коэффициенты сопротивлений некоторой арматуры и соединений трубо-
проводов, по данным Всесоюзного теплотехнического института, приведены
в табл. 30.

Таблица 30

Коэффициенты сопротивлений ζ некоторой арматуры и соединений трубо-
проводов

№ п/п.	Наименование арматуры	Диаметр прохода в мм				Завод-изготовитель
		50	76	100	150	
1	Задвижка Лудло чугу- ная	0,47	0,27	0,18	0,08	З-д им. Маленкова, Глав- армалит
2	Вентиль запорный флан- цевый (проходной)	8,8	7,3	7,9	8,7	То же
3	То же, вход под клапа- ном	—	4,8	4,9	—	„
4	Вентиль запорный флан- цевый, типа Р, прямо- точный	0,5	0,5	—	—	„
5	Компенсатор сальнико- вый, односторонний	—	0,21	0,21	0,21	Местное изготовление
6	То же, стакан со сто- роны выхода	—	0,21	—	—	То же
7	Грязеуловитель сварной	4,2	4,2	4,2	—	Конструкция теплосети Л. нэверго

№ п/п	Наименование арматуры	Диаметр прохода в мм				Завод-изготовитель
		50	76	100	150	
8	Водомер Вольмана	—	1,0	1,0	—	З-д Точприбор. Киев
9	То же с заstopоренной крыльчаткой	—	—	3,1	—	То же
10	Клапан обратный „Захлопка“	—	1,3	1,3	—	З-д Арматура им. Молотова, Главармалит
11	Сварной шов трубы (газовая сварка)	0,03	0,07	0,10	0,03	Местное изготовление
12	 -образный гладкотрубный компенсатор	3,2	—	—	—	То же
13	 -образный гладкотрубный компенсатор	1,9	—	—	—	„

22. Водомеры. Потери напора в водомерах могут быть определены по формуле:

$$H = \frac{Q^2}{B_c} = s_c Q^2, \quad (56)$$

где: B_c — характеристика водомера,
 s_c — сопротивление водомера.

Величины характеристик и сопротивлений приводятся в табл. 31, 32 и 33.

Таблица 31

а) Скоростные водомеры

Калибр водомера в мм	Теоретическая пропускная спо- собность при по- тере напора в 10 м водяного столба в м³/час	Величина харак- теристики B_c (для расходов в л/сек)	Величина сопро- тивления s_c (для расхода в л/сек)
10—13	2	0,031	32
15	3	0,070	14
20	5	0,193	5,2
25	7	0,378	2,6
30	10	0,772	1,3
40	20	3,09	0,32
50	30	6,95	0,144
60	40	12,34	0,081
80	50	49,25	0,052
100	100	77,20	0,013

Примерно такие же величины характеристик и сопротивлений дают водомеры „Космос“ (по Луговьеру).

б) Водомеры Вольтмана

Калибр водомера в мм	Величина характеристики <i>B</i> для расхода в л/сек		Величина сопротивления <i>s</i> для расхода в л/сек	
	фирма Сименс- Гальске *	завод Точприбор	фирма Сименс- Гальске	завод Точприбор
50	77	38	0,013	0,026
70	309	—	0,00323	—
80	695	482	0,00144	0,00207
100	1 925	1 496	0,000519	0,000669
125	4 940	—	0,000202	—
150	11 100	7 720	0,000090	0,000130
200	30 900	22 300	0,0000324	0,0000448
250	74 100	52 200	0,0000135	0,0000192
300	156 000	123 500	0,00000641	0,00000313
400	577 000	—	0,00000179	—
500	1 200 000	—	0,000000833	—
750	6 050 000	—	0,000000165	—

Таблица 33

в) Дисковые водомеры

Калибр водомера в мм	10—13	15	20	25	30	40
Теоретическая пропускная способность при потере напора в 10 м водяного столба в м³/час	2	3	5	7	10	20
Величина характеристики <i>B</i> для расхода в л/сек	0,031	0,070	0,193	0,378	0,772	3,09
Величина сопротивления <i>s</i> для расхода в л/сек	32	14	5,2	2,6	1,3	0,32

г) Диафрагмовые водомеры. Подсчет потерь напора производится по табл. 20 и 21.

д) Водомеры со вставными соплами (нормализованными). Подсчет потерь производится по табл. 20 и 21.

е) Водомеры типа Вентури. Потери напора составляют 5% потерь напора в диафрагмовом водомере того же диаметра.

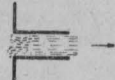


2. Истечение из отверстий

Как уже указывалось, расход воды из отверстий может быть вычислен по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gh}.$$

Значения коэффициента расхода μ для различных отверстий приводятся в табл. 34.

* Данные для фирмы Сименс-Гальске приводятся для расчета уже установленных ранее водомеров такого типа.

Вид отверстия	Эскиз отверстия	μ	μ^2
Отверстие в тонкой стенке		0,61	0,372
Насадок Вентури длинный ($l = 3d \div 4d$)		0,82	0,672
Насадок Вентури короткий ($l < 2d$)		0,61	0,372
Насадок Борда		0,71	0,504
Конический сходящийся насадок.		0,920 0,945 0,857	0,846 0,893 (макс.) 0,734
Насадок по форме сжатой струи . .		0,97	0,941
Пожарный насадок (наконечник ствола, sprysk)		По Фриману 0,97—0,98 По Ясюковичу 1,0	~ 0,95 1,0
Головка спринклера		0,70—0,75	~ 0,50—0,56

Раздел III. Приемы расчета водопроводных сетей

А. Расчет одиночных линий

1. Расчет линий с расходом воды в конце (или линия с транзитным расходом) (рис. 19). Потери напора по длине трубопровода могут быть определены посредством формулы:

$$h = A_T l Q^2 = s Q^2,$$

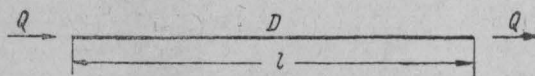


Рис. 19. Схема линии с расходом на конце.

где: A_T — удельное сопротивление, величина которого берется в зависимости от диаметра трубы и ее материала по табл. 3, 4 и 5,
 s — сопротивление трубопровода, величина которого берется по табл. 12, 13, 14 и 15.

2. Линия, нагруженная равномерным путевым расходом (рис. 20). Такое распределение может быть заменено эквивалентным ему распределением сосредоточенных расходов (рис. 21).

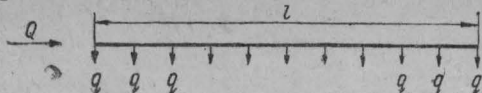


Рис. 20. Схема линии с равномерным расходом.

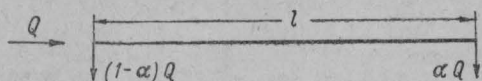


Рис. 21. Схема замены равномерного расхода эквивалентными расходами по концам линии.

Величина коэффициента эквивалентности α колеблется в пределах от 0,50 до 0,60.

Наиболее употребительное значение $\alpha = 0,50$.

Б. Расчет кольцевых сетей*

а) Распределение путевого равномерного расхода по узлам (рис. 22). Правило распределения заключается в том, что узловой расход равен сумм: расходов, эквивалентных путевым расходам линий, примыкающих к узлу.

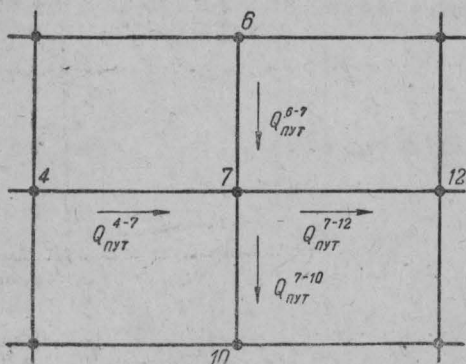


Рис. 22. Схема для определения узлового расхода.

Так, из узла 7 (см. рис. 22) получаем:

$$Q_7^{узл} = (1 - \alpha) Q_{пут}^{7-12} + (1 - \alpha) Q_{пут}^{7-10} + \alpha Q_{пут}^{6-7} + \alpha Q_{пут}^{4-7},$$

где: $Q_7^{узл}$ — узловой расход;

$Q_{пут}^{7-12}$, $Q_{пут}^{7-10}$, $Q_{пут}^{6-7}$ и $Q_{пут}^{4-7}$ — путевые расходы по примыкающим к узлу линиям.

При наиболее употребительной величине $\alpha = 0,50$ имеем:

$$Q_7^{узл} = 0,5 (Q_{пут}^{7-12} + Q_{пут}^{7-10} + Q_{пут}^{6-7} + Q_{пут}^{4-7}),$$

т. е. узловой расход равен половине суммы путевых расходов линий, подходящих к узлу.

б) Расчет замкнутых сетей. Расчет замкнутых сетей заключается в следующих операциях:

* Более подробно — „Водоснабжение промышленных предприятий и населенных мест“, ч. II, под. ред. проф. Н. Н. Геніева (см. проф. В. Г. Лобачев, гл. X).

1. Сначала определяют полный расход, поступающий в сеть,
2. Определяют удельный расход на единицу длины всей сети:

$$q_{уд} = \frac{Q_{пол}}{\Sigma l} = \frac{Q_{пол}}{L}, \quad (57)$$

где $L = \Sigma l$.

3. Определяют путевые расходы по линиям сети по формуле:

$$Q_{пут} = l q_{уд} = \frac{l}{L} \cdot Q_{пол}. \quad (58)$$

Полученные путевые расходы наносят на сеть (рис. 23).

4. Распределяют (заменяют) путевые расходы по узлам сети по приведенному выше правилу.

5. Если на линиях или в узлах будут какие-либо сосредоточенные расходы, то они прибавляются к узловым расходам или заносятся на схему по отдельным точкам сети.

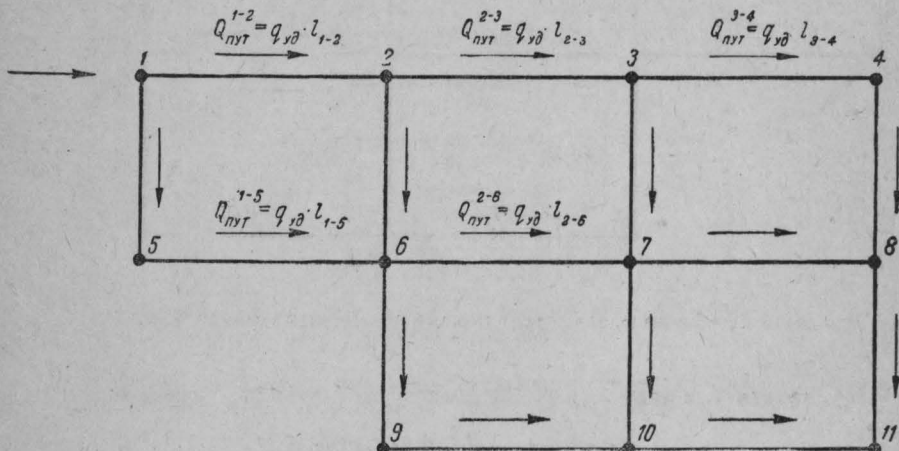


Рис. 23. Схема водопроводной сети с путевыми расходами.

6. После этого получают расчетную схему сети, нагруженной в узлах и отдельных точках примерно так, как это показано на приводимой ниже схеме (рис. 24).

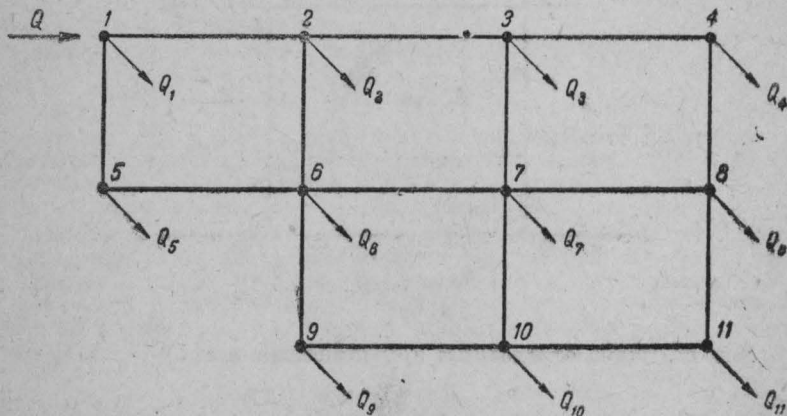


Рис. 24. Схема водопроводной сети с эквивалентными узловыми расходами.

7. Распределяют потоки воды по линиям сети. При этом, начиная распределение с конечного узла, например, с узла 11 (рис. 25), переходят постепенно от одного узла к другому. Эти распределения до известной степени произвольны. Число такого рода произвольных допущений равно числу узлов без единицы.

После распределения потоков воды по линиям расчетная схема сети будет иметь вид, аналогичный показанному на рис. 25.

Правильность распределения проверяется равенством баланса притока—расхода узла.

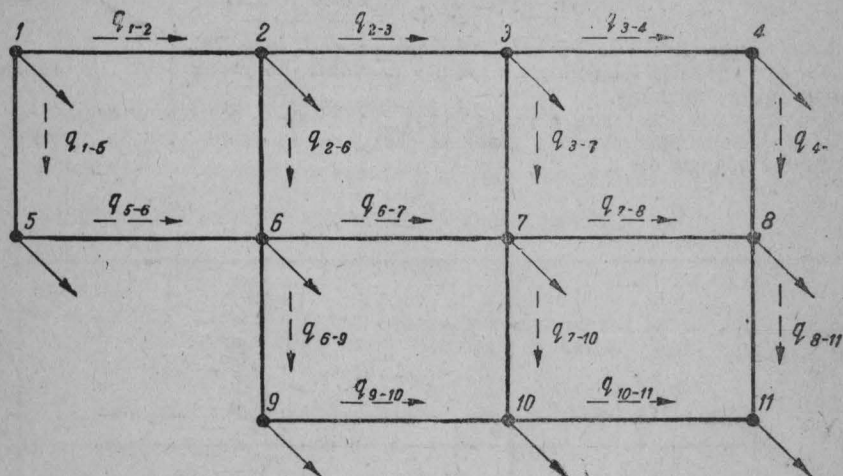


Рис. 25. Схема с распределенными расчетными расходами.

Так, например, в узле 7 (рис. 25) должно существовать равенство:

$$\frac{q_{6-7} + q_{37}}{\text{приход}} = \frac{Q_{\text{узел}}^7 + q_{7-10} + q_{7-8}}{\text{расход}}.$$

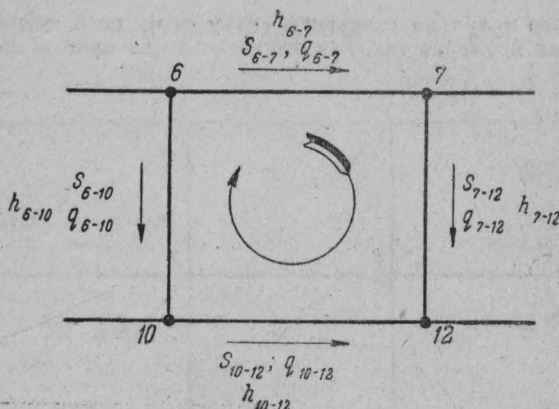


Рис. 26. Схема определения правила знаков для Σh кольца.

8. По намеченным линейным расходам, пользуясь приводимой ниже диаграммой (рис. 27), назначают диаметры сети.

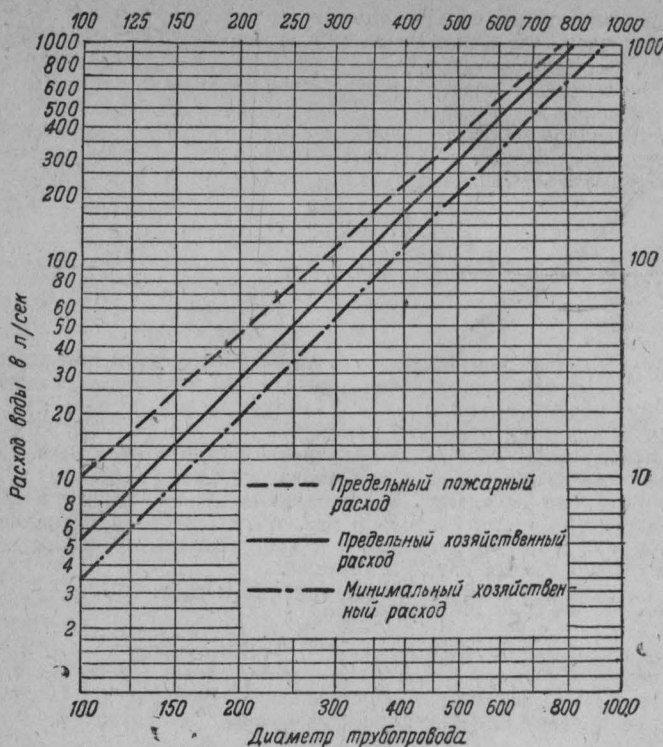


Рис. 27. График для ориентировочного определения диаметра трубопровода по заданному расходу.

9. После назначения диаметров вычисляются потери напора по кольцам сети.

Для этого сначала подсчитывают сопротивления линий сети по формуле:

$$s = A_T l,$$

где A_T — удельное сопротивление.

Далее подсчитывают потери напора по линиям по формуле:

$$h = sq^2.$$

И, наконец, алгебраически складывая потери напора по контурным линиям кольца, получают сумму потерь напора Σh , которая при правильном распределении должна быть равна нулю, а при неправильном даст какую-то разницу, называемую „невязкой“ и обозначаемую Δh .

Для подсчета потерь напора по контуру кольца рекомендуется пользоваться следующим правилом: ведя подсчет по часовой стрелке, величину потери напора считают положительной там, где направление потока совпадает с ходом часовой стрелки, и отрицательной там, где направление потока противоположно ходу часовой стрелки.

Так, для схемы, показанной на рис. 26, имеем:

$$\Sigma h = h_{6-7} + h_{7-12} - h_{10-12} - h_{6-10}$$

или

$$\Sigma h = s_{6-7} q_{6-7}^2 + s_{7-12} q_{7-12}^2 - s_{10-12} q_{10-12}^2 - s_{6-10} q_{6-10}^2.$$

При правильном распределении $\Sigma h = 0$; при неправильном — $\Sigma h = \Delta h$.

10. Основной задачей расчета сети является такое распределение расходов, при котором невязки Δh по кольцам сводятся к минимуму.

Обычно считают достаточным, чтобы $\Delta h \leq 0,5$ м.

11. Невязка в кольцах сети исправляется при помощи так называемых поправочных расходов Δq .

При этом величина поправочного расхода по отдельным кольцам сети определяется по формуле:

$$\Delta q = \frac{\Delta h}{2 \Sigma s q}, \quad (59)$$

где: Δh — полученная невязка,
 s — сопротивление,
 q — линейный расход.

При положительной „невязке“ поправочный расход вычитается из линейных расходов тех линий, направление потока воды в которых является положительным, и прибавляется к линейным расходам тех линий, направление воды в которых является отрицательным.

12. При отрицательной „невязке“ следует поступить обратным порядком. После исправления линейных расходов снова вычисляют потери напора по кольцам и определяют „невязку“. Прodelывая подсчет невязок и исправление их поправочными расходами несколько раз, получают распределение расходов, все более и более приближающееся к действительному расходу.

Покажем способ увязки сети на примере.

в) Примерный расчет сети (рис. 28 и табл. 35).

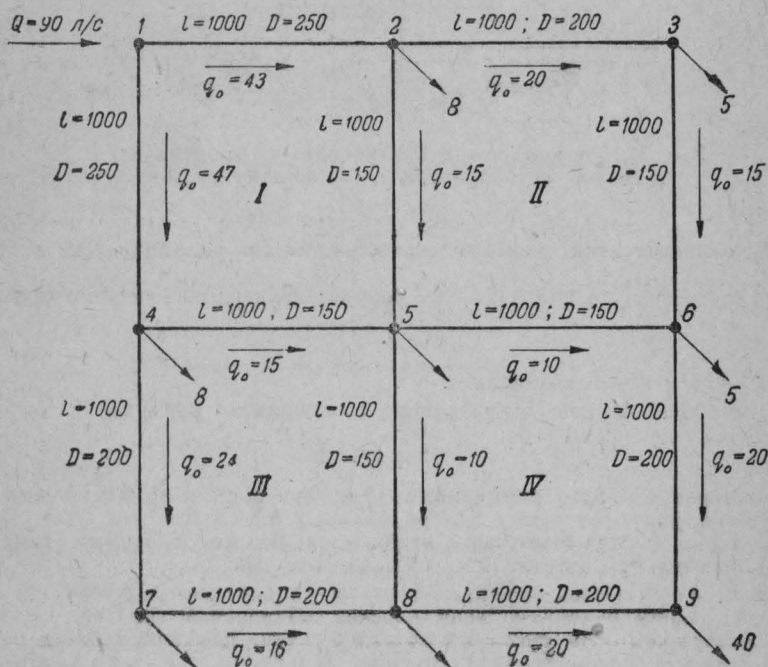


Рис. 28. Схема к примеру расчета кольцевой сети.

Положим, что нам дана сеть с уже распределенными, в первом приближении, расходами так, как это указано на рис. 28.

Расчет сети сводим в табл. 35.

В вертикальные графы 1, 2, 3, 4 и 5 заносим данные из расчетной схемы (рис. 28) Пользуясь табл. 12, 13, 14 и 15 или табл. 3. 4 и 5, определяем величины сопротивлений s отдельных линий и заносим их в вертикальную графу 6. В графу 7 вносим произведения сопротивлений s на расходы q (величины sq).

В каждом кольце подсчитываем сумму sq , т. е. Σsq (без учета знака, считая s и q положительными).

В графу 8 вносим величины $sq^2 = h$; величина h вносится в графу 8 со знаком, определяемым по следующему правилу: обход кольца ведется по часовой стрелке, и если направление потока одинаково с направлением обхода, то ставится знак (+) плюс, если обратное — то знак (—) минус.

В каждом кольце подсчитываем алгебраическую сумму величин h , т. е. $\Sigma h = \Sigma sq^2 = \Delta h$.

Далее определяем величину поправочного расхода Δq по формуле:

$$\Delta q = \frac{\Delta h}{2 \Sigma sq}.$$

Поправочные расходы заносим в графу 9 со знаком, обратным знаку потери напора h . Для линий, входящих в два смежных кольца, поправочный расход заносится от каждого кольца с тем же правилом знаков. Так, например, в I кольце для линии 2—5 поправочный расход от I кольца $+0,33$ л/сек, так как $\Delta q = -0,33$, а линия 2—5 имеет потерю напора со знаком $+$; поправочный расход II кольца $-2,92$ л/сек, так как для I кольца $\Delta q = -2,92$, а линия 2—5, считая по второму кольцу, имеет знак потери напора —.

В графу 10 заносим исправленные расходы:

$$q_1 = q \pm \Delta q.$$

В графу 11 заносим исправленные величины sq_1 и подсчитываем Σsq_1 .

В графу 12 заносим исправленные величины потерь напора $h_1 = sq_1$ и подсчитываем алгебраические суммы по отдельным кольцам $\Sigma h_1 = \Sigma sq_1^2 = \Delta h_1$.

Далее вычисляем поправочный расход:

$$\Delta q_1 = \frac{\Sigma h_1}{2 \Sigma sq_1}.$$

Этот поправочный расход учитывается по линиям сети так же, как это было указано выше. Расчет продолжается до тех пор, пока невязка в каждом кольце не будет менее желаемой величины, обычно принимаемой равной 0,5 м.

В данном примере третье исправление дало нам невязки меньше 0,5, вследствие чего дальнейших исправлений расходов не требуется.

В. Приближенные и упрощенные способы расчета сетей

1. Расчет замкнутых сетей. Кроме изложенного выше общего способа расчета замкнутых сетей, существуют приближенные способы, к которым относятся:

1) способ исключения из расчета линий второстепенного значения и
2) способ совмещения пьезометров узлов сети. Применение этих упрощенных методов лучше всего проследить на следующем примере.

№ колец	Наименование линии		Расход q л/сек	Длина линии l м	Диаметр D мм	Величина сопротивле- ния s	Вели- чина sq	Вели- чина потерь напора $h = sq^2$	Первое исправление			
									поправоч- ный расход Δq_1	исправленный расход q_1	исправленная величина sq_1	потеря напора $h_1 = sq_1^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
I	1—2	43	1000	250	0,00241	0,104	+4,46	+0,33	43,33	0,104	+4,60	
	2—5	15	1000	150	0,03670	0,550	+8,26	+0,33—2,92	12,41	0,455	+5,65	
	5—4	15	1000	150	0,03670	0,550	—8,26	—3,33—2,16	12,51	0,458	—5,73	
	4—1	47	1000	250	0,00241	0,113	—5,33	—0,33	46,67	0,112	—5,25	
						$\Sigma sq =$ $= 1,317$	$\Delta h =$ $= -0,87$	$\Delta q_1 = -\frac{0,87}{2,634}$	$\Sigma sq_1 =$ $= 1,129$ $\Delta h_1 =$ $= -0,73$			
II	2—3	20	1000	200	0,00792	0,158	+3,17	+2,92	22,92	0,181	+4,15	
	3—6	15	1000	200	0,00792	0,1185	+1,78	+2,92	17,92	0,142	+2,54	
	6—5	10	1000	150	0,03670	0,367	—3,67	—2,92	7,08	0,267	—1,84	
	5—2	15	1000	150	0,03670	0,550	—8,26	—2,92+0,33	12,41	0,458	—5,73	
						$\Sigma sq =$ $= 1,194$	$\Delta h =$ $= -6,98$	$\Delta q_1 = -\frac{6,98}{2,388}$	$\Sigma sq_1 =$ $= 1,048$ $\Delta h_1 =$ $= -0,88$			
III	4—5	15	1000	150	0,03670	0,550	+8,26	—2,16—0,33	12,51	0,458	+5,73	
	5—8	10	1000	150	0,03670	0,367	+3,67	—2,16	7,84	0,287	+2,26	
	8—7	16	1000	200	0,00792	0,1265	—2,03	+2,16	18,16	0,144	—2,62	
	7—4	24	1000	200	0,00792	0,190	—4,56	2,16	28,16	0,206	—5,42	
						$\Sigma sq =$ $= 1,234$	$\Delta h =$ $= +5,34$	$\Delta q_1 = +\frac{5,34}{2,463}$	$\Sigma sq_1 =$ $= 1,095$ $\Delta h_1 =$ $= -0,05$			
IV	5—6	10	1000	150	0,03670	0,367	+3,67	0,0+2,92	7,08	0,267	+1,84	
	6—9	20	1000	200	0,00792	0,158	+3,17	0,0	20,0	0,158	+3,17	
	9—8	20	1000	200	0,00792	0,158	—3,17	0,0	20,0	0,158	—3,17	
	8—5	10	1000	150	0,03670	0,367	—3,17	0,0—2,16	7,84	0,287	—2,26	
						$\Sigma sq =$ $= 1,050$	$\Delta h = 0$	$\Delta q_1 = 0$	$\Sigma sq_1 =$ $= 0,870$ $\Delta h_1 =$ $= +0,42$			

Второе исправление				Третье исправление			
второй поправочный расход Δq_2	второй исправ- ленный расход q_2	величина sq_2	потери напора $h_2 = sq_2^2$	третий поправочный расход Δq_3	третий исправ- ленный расход q_3	величина sq_3	потери напора $h_3 = sq_3^2$
13	14	15	16	17	18	19	20
+0,32	43,65	0,105	+4,60	+0,22	43,87	0,106	+4,65
+0,32—0,42	12,31	0,452	+5,54	+0,22—0,10	12,43	0,456	+5,65
—0,32+0,02	12,21	0,447	—5,46	—0,22+0,19	12,18	0,447	—5,43
—0,32	46,35	0,111	—5,18	—0,22	46,13	0,111	—5,15
$\Delta q_2 = -\frac{0,73}{2,258}$		$\Sigma sq_2 = 1,115$	$\Delta h_2 = -0,50$	$\Delta q_3 = -\frac{0,50}{2,23}$		$\Delta h_3 = -0,28$	
+0,42	23,34	0,184	+4,32	+0,10	23,44	0,185	+4,35
+0,42	18,34	0,153	+2,68	+0,10	18,44	0,146	+2,70
—0,42+0,24	6,90	0,249	—1,75	—0,10+0,14	6,94	0,254	—1,77
—0,42+0,32	12,31	0,452	—5,46	—0,10+0,22	12,43	0,456	—5,65
$\Delta q_2 = -\frac{0,88}{2,096}$		$\Sigma sq_2 = 1,038$	$\Delta h_2 = -0,21$	$\Delta q_3 = -\frac{0,21}{2,076}$		$\Delta h_3 = -0,37$	
+0,02—0,32	12,21	0,447	+5,46	+0,19—0,22	12,18	0,447	+5,43
+0,02—0,24	7,62	0,280	+2,13	+0,19—0,14	7,67	0,271	+2,16
—0,02	18,14	0,144	—2,60	—0,19	17,95	0,142	—2,53
—0,02	26,14	0,205	—5,40	—0,19	25,95	0,205	—5,32
$\Delta q_2 = -\frac{0,05}{2,190}$		$\Sigma sq_2 = 1,076$	$\Delta h_2 = -0,41$	$\Delta q_3 = -\frac{0,41}{2,155}$		$\Delta h_3 = -0,26$	
+0,24—0,42	6,90	0,249	+1,75	+0,14—0,10	6,94	0,254	+1,77
+0,24	20,23	0,160	+3,24	+0,14	20,47	0,162	+3,33
—0,24	19,77	0,156	—3,10	—0,14	19,63	0,155	—3,05
—0,24+0,02	7,62	0,280	—2,13	—0,14+0,19	7,63	0,271	—2,16
$\Delta q_2 = \frac{0,42}{1,74}$		$\Sigma sq_2 = 0,845$	$\Delta h_2 = -0,24$	$\Delta q_3 = -\frac{0,24}{1,69}$		$\Delta h_3 = -0,11$	

Пример. Требуется определить потери напора в сети, конфигурация которой представлена на рис. 29. Расход воды — транзитный (из насосной станции НС в водонапорную башню ВБ), равный 70 л/сек. Длины линий и

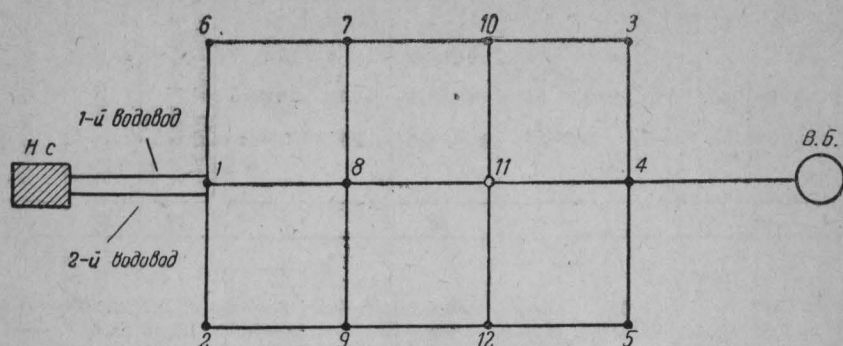


Рис. 29. Схема к примеру упрощенного расчета водопроводной сети.

их диаметры приведены в табл. 36, в которой указаны также значения сопротивлений $s = A_T l$ (где A_T — удельное сопротивление) и проводимостей

$$p = \sqrt{\frac{1}{s}} = \sqrt{\frac{1}{A_T l}} = K_T \sqrt{\frac{1}{l}}.$$

Таблица 36

Расчетные данные к примеру (рис. 29)

Наименование линий	Диаметр трубопро- вода D мм	Длина трубопро- вода l м	Сопротив- ление $s = Al$	Проводи- мость $p = \sqrt{\frac{1}{s}}$
НС-1 — первый водовод .	260	500	0,003960	15,89
НС-1 — второй водовод .	250	500	0,001205	28,84
Линия 1-6-7	150	210	0,007340	11,67
Линия 1-8	200	150	0,001188	29,00
Линия 1-2-9	150	300	0,011010	9,53
Линия 7-10	150	200	0,007340	11,67
Линия 8-11	200	200	0,001584	25,13
Линия 9-12	150	200	0,007340	11,67
Линия 10-5-4	150	200	0,007340	11,67
Линия 11-4	200	150	0,001188	29,00
Линия 12-3-4	150	300	0,011010	9,53
Линия 4-ВБ	300	200	0,000182	—

Диаметры линий 7-8, 8-9, 10-11 и 11-12 — неизвестны.

а) Первый способ. По первому способу исключаем из расчета линии 7-8, 10-11, 8-9 и 11-12. В этом случае расчетная схема будет иметь вид, показанный на рис. 30.

Складывая проводимости первого и второго водоводов, работающих параллельно, получим:

$$p = p_{нс-I}^I + p_{нс-I}^{II} = 15,89 + 28,81 = 44,7;$$

соответствующее сопротивление их будет равно:

$$s = \frac{1}{p^2} = \frac{1}{44,7^2} = 0,0005.$$

Линии 1-6-3-4, 1-4 и 1-2-5-4 (рис. 30) работают также параллельно, вследствие чего их общая проводимость будет равна:

$$p = p_{1-6-3-4} + p_{1-4} + p_{1-2-5-4}.$$

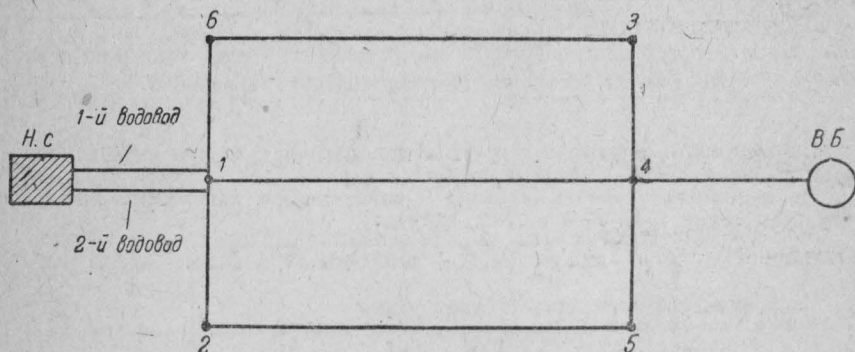


Рис. 30. Схема по первому способу упрощения.

Но проводимости $p_{1-6-3-4}$, p_{1-4} и $p_{1-2-5-4}$ вычисляются по формулам:

$$p_{1-6-3-4} = \sqrt{\frac{1}{\sum s_{1-6-3-4}}}; \quad p_{1-4} = \sqrt{\frac{1}{\sum s_{1-4}}}; \quad p_{1-2-5-4} = \sqrt{\frac{1}{\sum s_{1-2-5-4}}},$$

откуда:

$$p_{1-6-3-4} = \frac{1}{\sqrt{0,007340 + 0,07340 + 0,07340}} = 6,74;$$

$$p_{1-4} = \frac{1}{\sqrt{0,001188 + 0,001584 + 0,001188}} = 15,89;$$

$$p_{1-2-5-4} = \frac{1}{\sqrt{0,01101 + 0,00734 + 0,01101}} = 5,84.$$

Общую проводимость линий 1-6-3-4, 1-4 и 1-2-5-4 получим как сумму $p_{1-6-3-4}$, p_{1-4} , $p_{1-2-5-4}$:

$$p = 6,74 + 15,89 + 5,84 = 28,47.$$

Сопротивление s будет равно:

$$s = \frac{1}{p^2} = \frac{1}{28,47^2} = 0,00123.$$

Сопротивление линии 4-ББ находим из табл. 36: $s = 0,00018$.

Все сопротивление системы получается равным:

$$s_{\text{системы}} = s_{\text{водоводов}} + s_{\text{линий } 1-6-3-4, 1-4, 1-2-5-4} + s_{\text{линии } 4-ВБ} = \\ = 0,00050 + 0,00123 + 0,00018 = 0,00191.$$

По найденному значению сопротивления системы $s_{\text{системы}}$ определяем потери напора в сети:

$$h = s_{\text{системы}} Q^2 = 0,00191 \times 70^2 \approx 9,4 \text{ м.}$$

б) Второй способ. Второй способ заключается в том, что пьезометры в точках 7, 8 и 9, а также в точках 10, 11 и 12 принимаются равными между собой. Тогда схема сети принимает вид, показанный на рис. 31.

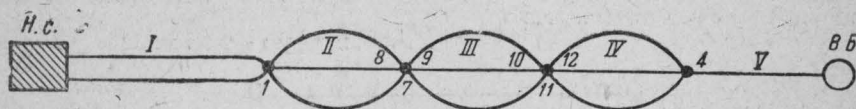


Рис. 31. Схема по второму способу упрощения.

Проводимость первого и второго водоводов, как и при первом способе, будет равна $p = 44,7$, а сопротивление $s = 0,0005$.

Проводимость элемента (кольца) II определяется как сумма проводимостей трех линий 1—7, 1—8 и 1—9, откуда:

$$p_{II} = \Sigma p = 11,67 + 29,00 + 9,53 = 50,20.$$

Сопротивление элемента II будет равно:

$$s_{II} = \frac{1}{p_{II}^2} = \frac{1}{50,20^2} = 0,00040.$$

Точно так же определяем и проводимость элемента (кольца) III:

$$p_{III} = 11,67 + 25,13 + 11,67 = 48,47.$$

Сопротивление элемента III будет равно:

$$s_{III} = \frac{1}{p_{III}^2} = \frac{1}{48,47^2} \approx 0,00043.$$

Проводимость элемента (кольца) IV, по аналогии, равняется:

$$p_{IV} = 11,67 + 29,00 + 9,53 = 50,20.$$

Сопротивление элемента IV:

$$s_{IV} = \frac{1}{p_{IV}^2} = \frac{1}{50,20^2} = 0,00040.$$

Сопротивление линии 4—ВБ, по предыдущему, равно:

$$s_{4-ВБ} = 0,00018.$$

Полное сопротивление всей системы определится как сумма вычисленных выше сопротивлений:

$$s_{\text{системы}} = \Sigma s = 0,0005 + 0,00040 + 0,00043 + 0,00040 + 0,00018 = 0,00191.$$

По найденному значению сопротивления системы $s_{\text{системы}}$ при $Q = 70$ л/сек находим потери напора в сети:

$$h = sQ^2 = 0,00191 \times 70^2 \approx 9,4 \text{ м.}$$

При применении указанных выше упрощенных (приближенных) способов расчета необходимо иметь в виду следующие положения:

1) при последовательном соединении элементов, по которым движется вода, надо складывать сопротивления $s = AI$;

2) при параллельном соединении элементов надо складывать их проводимости:

$$P = \frac{1}{\sqrt{s}};$$

3) упрощение конфигурации сети производится таким образом, чтобы получить ряд последовательно и параллельно соединенных элементов, проводимости и сопротивления которых могут быть легко вычислены посредством приводимых выше формул.

2. Замена двух или нескольких трубопроводов одним, эквивалентным по потерям напора, трубопроводом. Если мы имеем два трубопровода разных диаметров, но одинаковой длины, то их возможно заменить одним эквивалентным трубопроводом. Так, например, для схемы, показанной на рис. 32, диаметр эквивалентного трубопровода может быть определен по формуле:

$$D_{эк} = D_1 \left[1 + \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{5,33}{2}} \right]^{\frac{2}{5,33}}. \quad (60)$$

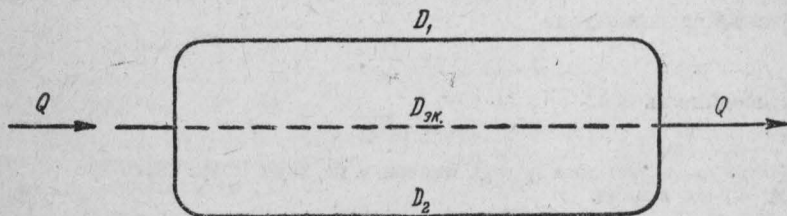


Рис. 32. Схема замены линий кольца эквивалентным диаметром.

Формула (60) выведена из формул Маннинга (14 и 15). Вводя обозначения

$$\alpha = \frac{D_2}{D_1} \text{ и } \beta = \left[1 + \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{5,33}{2}} \right]^{\frac{2}{5,33}}, \text{ получим:} \quad D_{эк} = \beta D_1; \quad (D_2 < D_1). \quad (61)$$

Величина коэффициента эквивалентности β приводится в табл. 37.

Таблица 37
Значения коэффициента эквивалентности β

Отношение $\frac{D_2}{D_1} = \alpha$	Величина коэффи- циента β	Отношение $\frac{D_2}{D_1} = \alpha$	Величина коэффи- циента β
0,0	1,0	0,6	1,089
0,1	1,001	0,7	1,130
0,2	1,005	0,8	1,179
0,3	1,015	0,9	1,236
0,4	1,032	1,0	1,297
0,5	1,057	—	—

Формулы (60) и (61) удобны, например, для подсчетов, связанных с усилением проводимости водопровода по какому-либо направлению при помощи прокладки параллельного трубопровода (например, при интенсификации водоснабжения).

Пример. Существующий трубопровод имеет диаметр 300 мм, параллельно ему предполагается уложить трубопровод диаметром 500 мм. Требуется определить диаметр эквивалентного трубопровода. Коэффициент

$$\alpha = \frac{D_2}{D_1} = \frac{300}{500} = 0,6.$$

Этому отношению по табл. 37 соответствует коэффициент эквивалентности $\beta = 1,089$.

Следовательно, эквивалентный трубопровод должен иметь диаметр $D_{\text{эк}} = \beta D_1 = 1,089 \times 500 = 545$ мм. Дальнейший расчет ведется по таблице трубопроводов (табл. 3).

Г. Расчет спринклерных систем

Расчет спринклерных систем удобно вести методом характеристик.

Характеристикой какого-либо элемента или системы называется величина, обратная сопротивлению.

Следовательно,

$$B = \frac{1}{s}. \quad (62)$$

Отсюда сопротивление

$$s = \frac{1}{B}. \quad (63)$$

Проводимость

$$p = \sqrt{B}. \quad (64)$$

Основные выражения потерь напора и расхода могут быть представлены в этом случае в виде:

$$h = \frac{Q^2}{B}; \quad Q = \sqrt{B} \cdot \sqrt{h}. \quad (65)$$

На основании указанных положений инж. Тарасов-Агалаков (см. Научно-технический бюллетень № 1 за 1939 г. ЦНИПО НКВД СССР, статью „Упрощенный расчет спринклерных сетей“, стр. 61—79) разработал графики (рис. 33—43), позволяющие производить упрощенные расчеты спринклерных сетей.

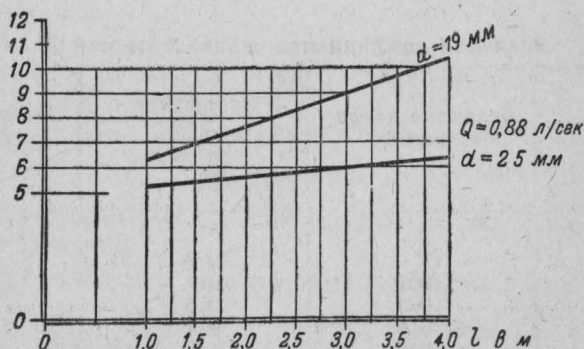


Рис. 33. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

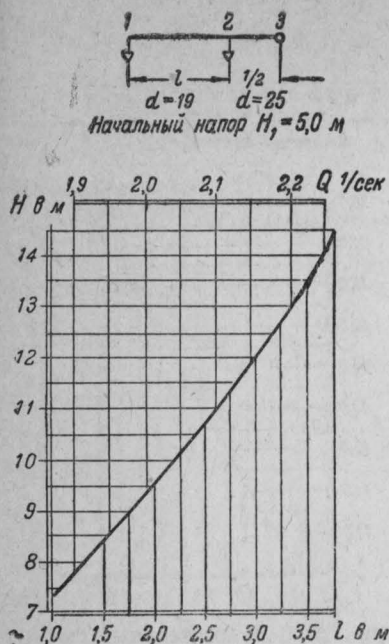


Рис. 34. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

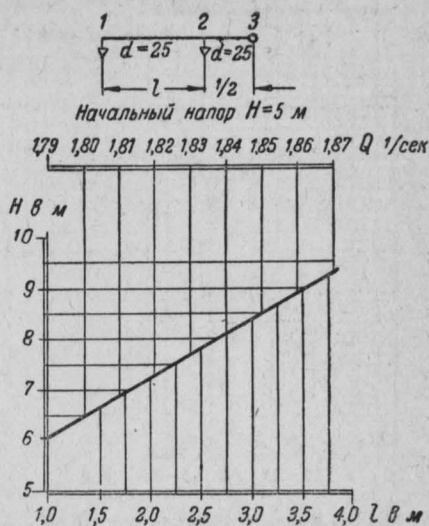


Рис. 35. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

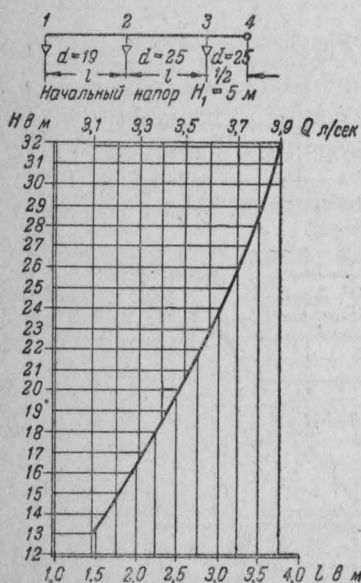


Рис. 36. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

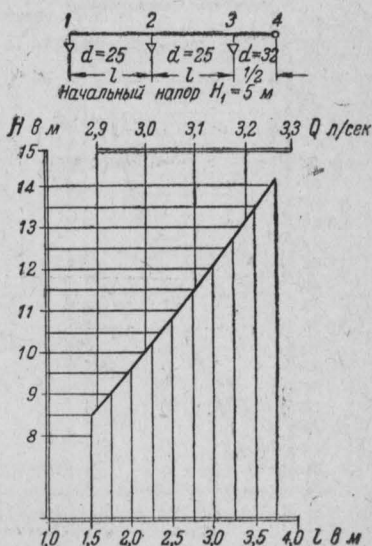


Рис. 37. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

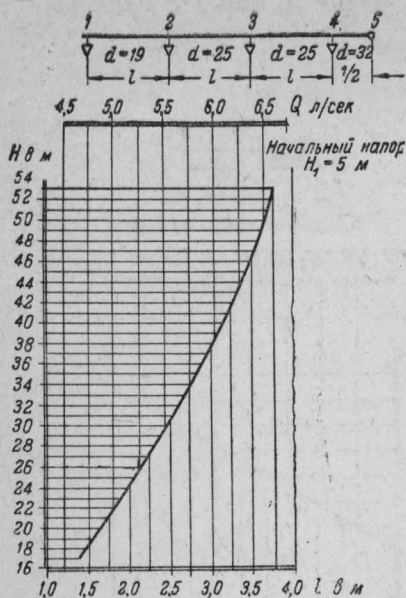


Рис. 38. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

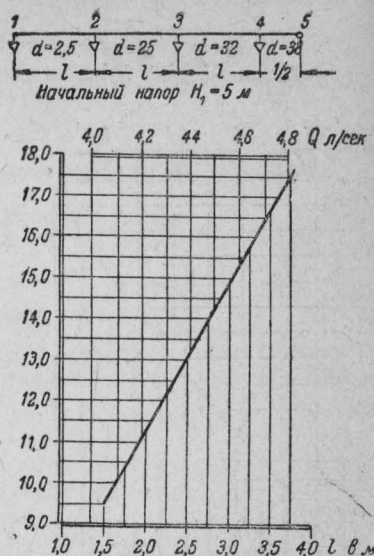


Рис. 39. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

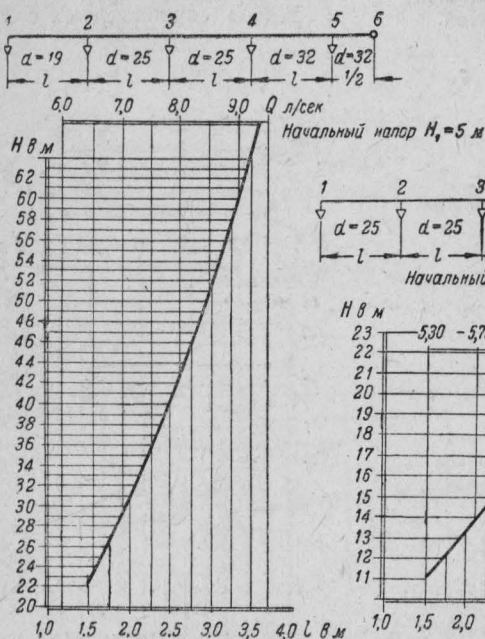


Рис. 40. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

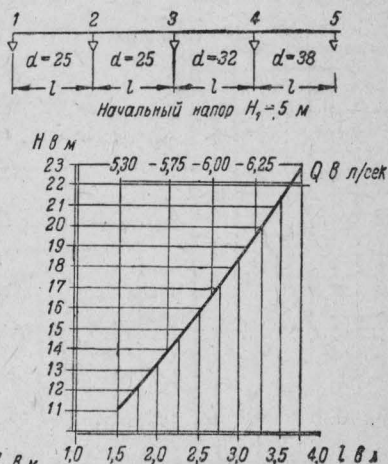


Рис. 41. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков спринклерных сетей.

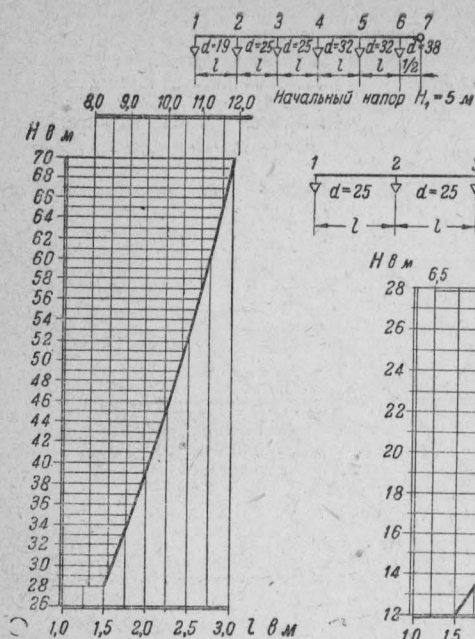


Рис. 42. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков sprinkлерных сетей.

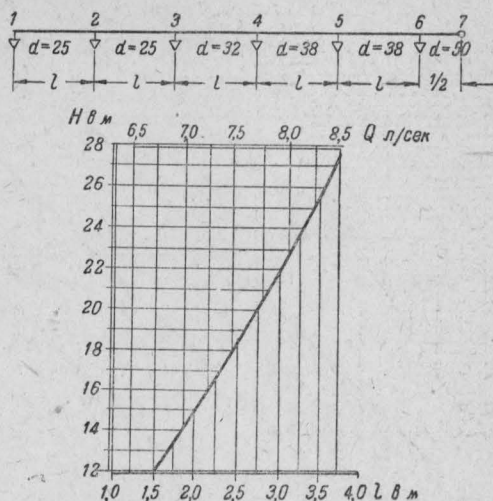


Рис. 43. Вспомогательный график для расчета распределительных рядков sprinkлерных сетей.

Расчет ведется из условия заданного минимального напора у самого дальнего sprinkлера, равного 5 м.

Диаметры труб могут быть приняты в зависимости от количества sprinkлерных головок, по табл. 38.

Таблица 38

Диаметры труб sprinkлерной сети в зависимости от количества sprinkлерных головок

Диаметр труб в дм	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6
Таблица А	1	3	5	9	18	28	46	115	150	150
Таблица Б	—	2	3	5	10	20	36	80	140	больше 140

Так как диаметры по распределительным рядкам нормированы, то, по существу, в зависимости от числа sprinkлеров в рядке и принятого случая А и Б всегда возможно получить характеристики для различных комбинаций распределительных рядков.

Прикладываемые графики инж. Тарасова-Агалакова дают возможность быстро определить потери напора и расход воды в распределительных рядках sprinkлерной сети.

Примерный ход расчета спринклерной сети. Сеть задана с конфигурацией и диаметрами труб согласно схеме на рис. 44.

Сначала по графику 4 (рис. 36) определяем расход воды и напор для рядка 1—3 в точке 3 при $l=3$ и $H=5$.

$$H_3 = 23,7 \text{ м}; \quad Q_{1-3} = 3,63 \text{ л/сек};$$

$$B_{1-3} = \frac{Q^2}{H} = \frac{3,63^2}{23,7} = 0,557.$$

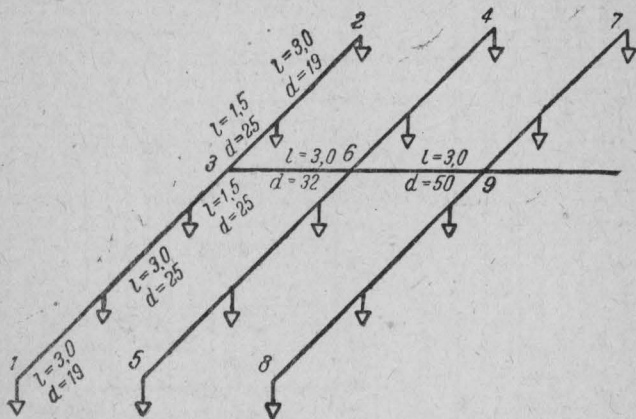


Рис. 44. Схема спринклерной сети.

Далее по графику 2 (рис. 34) определяем расход воды и напор для рядка 2—3 в точке 3.

$$H'_3 = 12,0 \text{ м}; \quad Q_{2-3} = 2,15 \text{ л/сек}.$$

$$B_{2-3} = \frac{Q^2}{H'_3} = \frac{2,15^2}{12} = 0,386.$$

При напоре $H_3 = 23,7$ расход воды по рядку 3—2 будет равен:

$$Q_{2-3} = \sqrt{B_{2-3}} \sqrt{H_3} = \sqrt{0,386} \times \sqrt{23,7} \approx 3,04 \text{ л/сек}.$$

Потерю напора по линии 3—6 определим по формуле:

$$h = sQ^2 = A_T l Q^2$$

(имея в виду, что $B = \frac{1}{s}$).

Величина удельного сопротивления A_T может быть определена по табл. 5, с исправлением на коэффициент сопротивления n , принимаемым для спринклерных сетей равным 0,0106.

Коэффициент исправления η берется по графику (рис. 1): $\eta = 0,8$.

Значение s можно брать непосредственно по табл. 15:

$$s_{3-6} = \frac{3,54}{10} = 0,354$$

(так как длины 3 м в табл. 15 нет, берем значение s для $l=30$ м и уменьшаем в 10 раз).

Исправленное значение s будет равно:

$$s_{испр} = s_{3-6} \eta = 0,354 \times 0,8 = 0,2832.$$

$$B_{3-6} = \frac{1}{s_{испр}} = \frac{1}{0,2832} = 3,53.$$

Потери напора на линии 3—6 получится равной:

$$h_{3-6} = \frac{(Q_{1-3} + Q_{2-3})^2}{B_{3-6}} = \frac{(3,63 + 3,04)^2}{3,53} = 12,7 \text{ м.}$$

Напор в точке 6 определится как сумма H_3 и h_{3-6} :

$$H_6 = H_3 + h_{3-6} = 23,7 + 12,7 = 36,4 \text{ м.}$$

Так как распределительный рядок 5—6 одинаков с распределительным рядком 1—3, то

$$B_{5-6} = B_{1-3} = 0,557,$$

откуда

$$Q_{5-6} = \sqrt{B_{5-6} H_6} = \sqrt{0,557 \cdot 36,4} = 4,58 \text{ л/сек.}$$

Расход воды по рядку 4—6 (по аналогии с рядком 2—3):

$$Q_{4-6} = \sqrt{B_{4-6} H_6} = \sqrt{0,586 \times 36,4} = 3,74 \text{ л/сек.}$$

Расход, идущий по линии 6—9, будет равен:

$$Q_{6-9} = Q_{3-6} + Q_{5-6} + Q_{4-6} = 6,67 + 4,58 + 3,74 = 14,99 \approx 15 \text{ л/сек.}$$

Потери напора по линии 6—9 определим по формуле:

$$h_{6-9} = \frac{Q_{6-9}^2}{B_{6-9}}, \text{ где } B_{6-9} = \frac{1}{s_{6-9}}.$$

Сопротивление s_{6-9} находим из табл. 15:

$$s_{6-9} = \frac{0,386}{10} = 0,0386 \text{ (так как длины 3 м в табл. 15 нет, берем значе-}$$

ние s для $l = 30$ м и уменьшаем в десять раз):

$$s_{испр} = 0,0386 \times 0,8 \approx 0,0309.$$

$$B_{испр} = \frac{1}{0,0309} = 32,4,$$

отсюда:

$$h_{6-9} = \frac{Q_{6-9}^2}{B_{6-9}} \approx \frac{15^2}{32,4} = 6,9 \text{ м.}$$

Напор в точке 9 будет равен:

$$H_9 = H_6 + h_{6-9} = 36,4 + 6,9 = 43,3 \text{ м.}$$

Дальнейший ход расчета аналогичен изложенному.

Таким образом, для расчета спринклерных сетей можно пользоваться только графиками инж. Тарасова-Агалакова и таблицей сопротивлений для стальных труб (с учетом допусков по ГОСТу и загрязнения с коэффициентом $n=0,012$), исправленных поправочным коэффициентом $\eta=0,8$.

Раздел IV. Расчет пожарных струй и подачи воды по гибким рукавам

Для целей пожаротушения вода применяется: 1) в виде цельной струи, 2) в виде дождевой струи, 3) в виде сильно разпыленного туманообразного состояния. Здесь рассматриваются только струи 1 и 2.

Дождевые или раздробленные струи применяются также и при устройстве фонтанов и орошения.

А. Раздробленные струи

а) Вертикальные раздробленные струи. Высота, до которой достигают крайние капли струи, определяется теоретически по одной из нижеследующих формул:

$$1) S_s = \frac{H}{1 + \frac{K_1}{d} H}; \quad 2) S_s = H \left(1 - K_2 \frac{H}{d} \right)^*.$$

Частные преобразования этих формул приводят к общеизвестным формулам:

$$\text{Формула } S_s = \frac{H}{1 + \frac{K_1}{d} H} \text{ обращается в формулу Люгера } S_s = \frac{H}{1 + \varphi H},$$

где: коэффициент φ берется по табл. 39,

H — напор у spryska.

Таблица 39

Значения коэффициента φ по Люгеру

Диаметр спрыска в мм	Величи- на коэф- фици- ента φ	Диаметр спрыска в мм	Величи- на коэф- фици- ента φ	Диаметр спрыска в мм	Величи- на коэф- фици- ента φ	Диаметр спрыска в мм	Величи- на коэф- фици- ента φ
0,010	0,0228	0,017	0,0114	0,024	0,0066	0,035	0,0032
0,011	0,0203	0,018	0,0105	0,025	0,0061	0,040	0,0024
0,012	0,0183	0,019	0,0097	0,026	0,0057	0,045	0,0018
0,013	0,0165	0,020	0,0090	0,027	0,0053	0,050	0,0014
0,014	0,0149	0,021	0,0083	0,028	0,0050	—	—
0,015	0,0136	0,022	0,0077	0,029	0,0047	—	—
0,016	0,0124	0,023	0,0071	0,030	0,0044	—	—

Формула $S_s = H \left(1 - K_2 \frac{H}{d} \right)$ при величине $K_2 = 0,000113$ превращается в формулу Фримана $S = H \left(1 - 0,000113 \frac{H}{d} \right)$. (67)

Наибольшее распространение в СССР получила формула Люгера.

б) Наклонные раздробленные струи. Радиусом действия раздробленной струи называется расстояние от spryska до точки, лежащей

* Подробный вывод формул см. „Научно-технический бюллетень № 1, 1940, ЦНИИПО НКВД СССР, статья проф. В. Г. Лобачева.

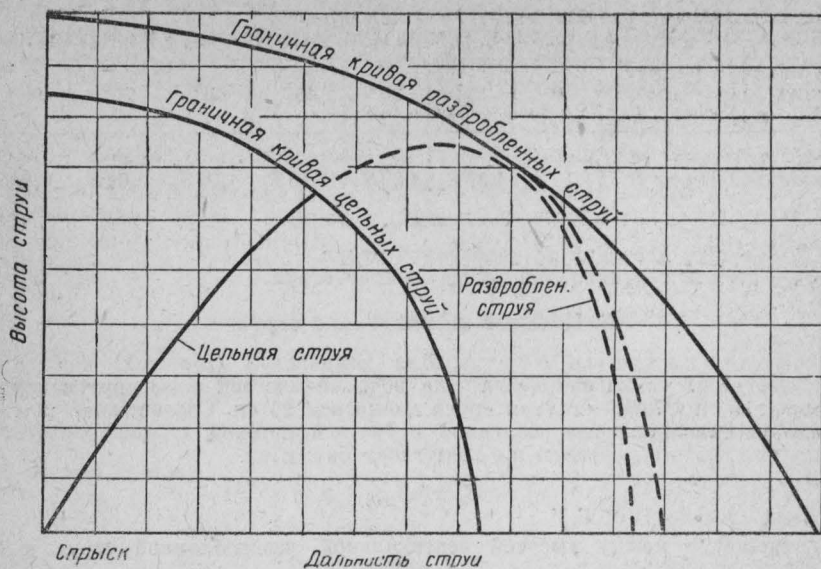


Рис. 45. График дальности полета раздробленных и компактных струй.

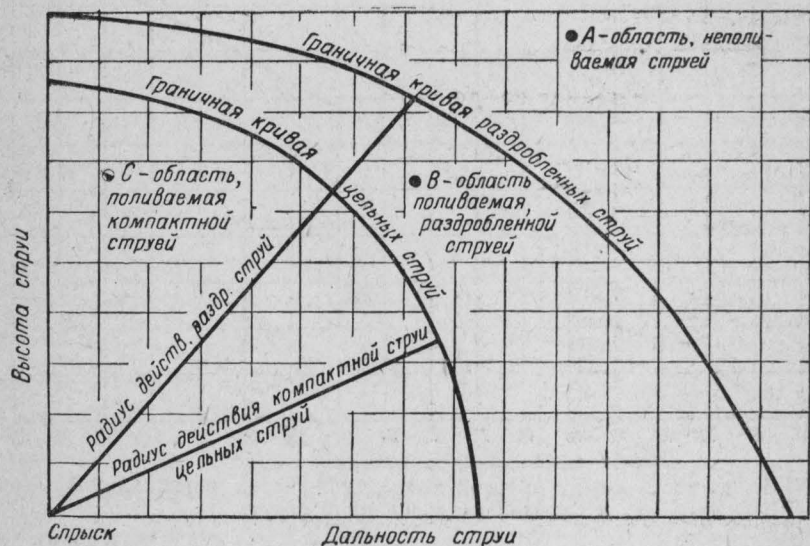


Рис. 46. График дальности полета раздробленных и компактных струй.

на кривой, огибающей крайние капли наклонных, под разными углами, струй (рис. 45 и 46).

Величина радиуса действия раздробленной струи определяется в зависимости от высоты вертикальной раздробленной струи и угла наклона радиуса действия струи к горизонту по ориентировочной табл. 40.

Таблица для пересчета вертикальных раздробленных струй на наклонные

Угол наклона радиуса действия раздробленной струи	0	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Радиус действия раздробленной струи R	$1,40 S_g$	$1,30 S_g$	$1,20 S_g$	$1,12 S_g$	$1,06 S_g$	$1,02 S_g$	$1,0 S_g$
$R = \beta S_g$							(68)

где: R — радиус действия раздробленной струи,
 S_g — высота вертикальной раздробленной струи.

Б. Цельные (компактные) струи

а) Вертикальные струи. Для компактной (хорошей) пожарной струи требуется, чтобы она несла еще 90% количества воды внутри круга диаметром 38 см и 75% — внутри круга диаметром 26 см. Соотношение между высотой вертикальной раздробленной струи и величиной компактной части струи может быть определено по следующей формуле:

$$S_g = \alpha S_k, \quad (69)$$

где $\alpha \approx 1,19 + 80 (0,01 S_k)^4$.

Соотношение между высотой вертикальной раздробленной струи и ее компактной частью дано в табл. 41 и на рис. 47.

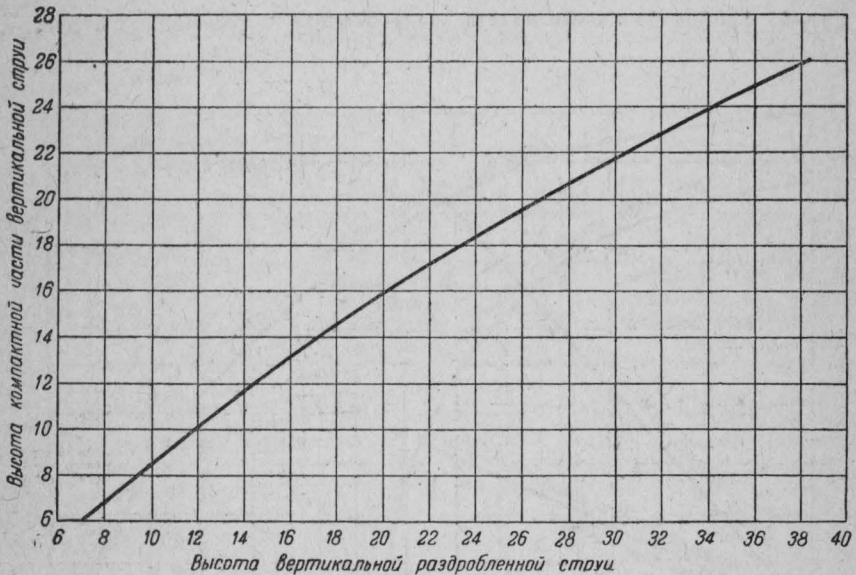


Рис. 47. Зависимость между высотой компактной части вертикальной струи и высотой раздробленной струи.

Таблица 41

Соотношение между высотой вертикальной раздробленной струи и ее компактной частью

Высота вертикальной раздробленной струи	7	9,5	12	14,5	17,2	20	24,5	26,8	30,5	35	40	48,5
Высота компактной части струи	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

Зависимость высоты компактной части вертикальной струи от напора и диаметра sprыска можно выразить эмпирической формулой:

$$S_k = K \cdot \frac{H - 10}{H + 10} + 0,08 H + 5,7, \quad (70)$$

где: H — напор у sprыска в метрах водяного столба,

K — коэффициент, значения которого приводятся в табл. 42.

Таблица 42

Значения коэффициента K к формуле (70)

Диаметр sprыска	13 мм (1/2")	16 мм (5/8")	19 мм (3/4")	22 мм (7/8")	25 мм (1")	28,5 мм (1 1/8")	32 мм (1 1/4")	35 мм (1 3/8")	38 мм (1 1/2")
Величина коэффициента K . .	16	18,5	20,7	21,8	23	25,2	26,1	26,7	27,0

б) Наклонные компактные струи (см. рис. 45 и 46). Для практических целей радиус действия нормальных наклонных компактных струй можно считать равным высоте вертикальной компактной струи, т. е.

$$R_k = S_k, \quad (71)$$

где: R_k — радиус действия наклонной компактной струи,
 S_k — высота вертикальной компактной струи.

Для определения радиуса действия компактных (хороших) пожарных струй, получаемых из лафетных стволов, можно пользоваться приводимыми ниже графиками (рис. 48—51).

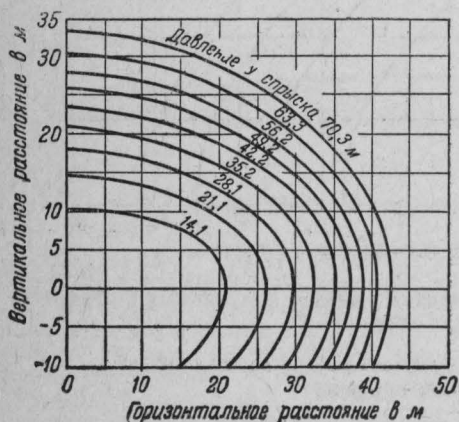


Рис. 48. График огибающих кривых компактных струй, получаемых из лафетных стволов со sprыском $d = 1\frac{1}{2}''$.

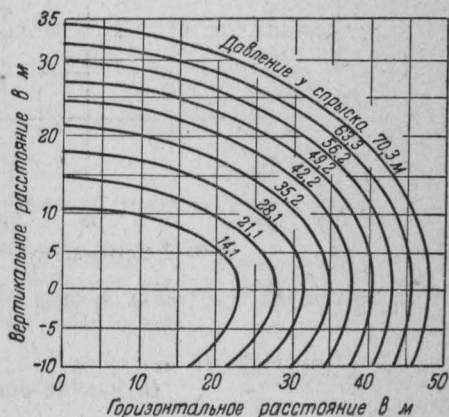


Рис. 49. График огибающих кривых компактных струй, получаемых из лафетных стволов со sprыском $d = 2''$.

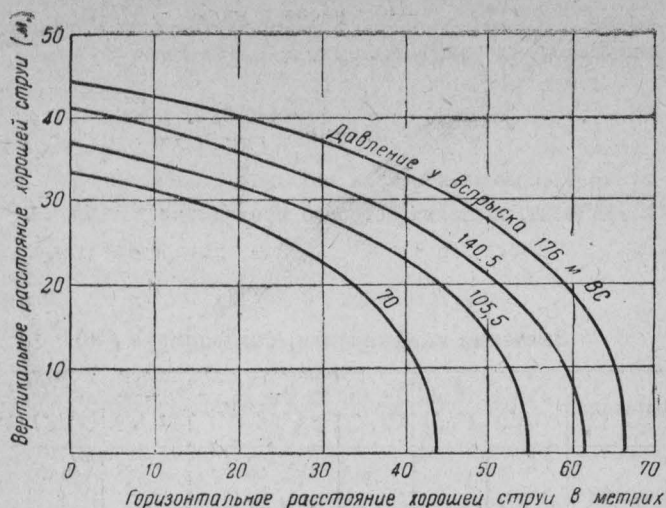


Рис. 50. График огибающих кривых компактных струй, получаемых из лафетных стволов со sprыском $d=1\frac{1}{2}$ ".

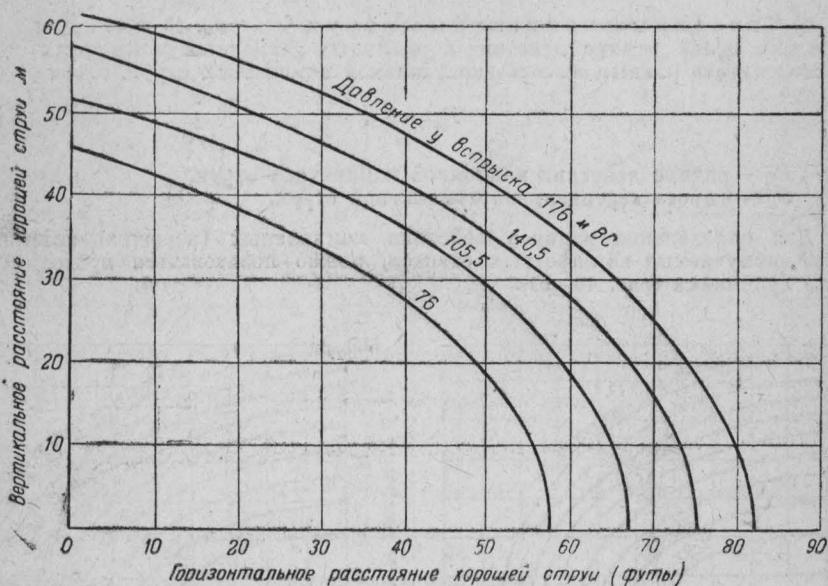


Рис. 51. График огибающих кривых компактных струй, получаемых из лафетных стволов со sprыском $d=2$ ".

В. Расход воды из sprыска

Расход воды зависит от диаметра sprыска и напора и определяется по формуле:

$$Q = \mu V \sqrt{2gH},$$

где μ — коэффициент расхода (см. табл. 34).

Эта формула может быть представлена в виде:

$$Q = p \sqrt{H}, \quad (72)$$

где p — проводимость срыска:

$$p = \omega \mu \sqrt{2g} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \mu \sqrt{2g}.$$

Для срысков типа Фримана (конические, сходящиеся) μ можно принять равным единице.

Величины проводимостей для срысков употребительных диаметров приведены в табл. 43.

Таблица 43

Величины проводимостей срысков

Диаметр срыска в мм	Проводи- мость	Диаметр срыска в мм	Проводи- мость	Диаметр срыска в мм	Проводи- мость
10	0,348	17	1,01	26	2,35
11	0,421	18	1,13	28	2,73
12	0,501	19	1,26	30	3,13
13	0,588	20	1,39	32	3,56
14	0,682	22	1,68	35	4,26
15	0,783	24	2,00	48	5,02
16	0,891	25	2,17	50	5,57

Если ствол оборудовать манометром, как это указано на рис. 52, то по его показаниям, пользуясь формулой (72), можно определить расход воды и, следовательно, использовать ствол с манометром в качестве водомера.

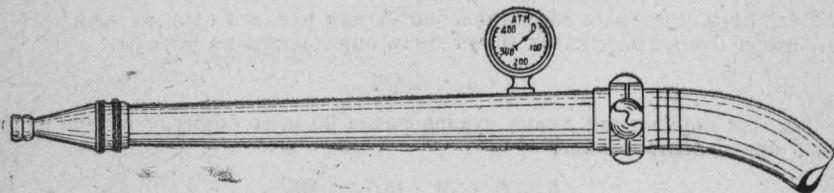


Рис. 52. Ствол с манометром (как водомер).

Зависимость между радиусом действия компактной струи, диаметром срыска, напором и расходом воды дана на рис. 53 и в табл. 44.

На графике рис. 53, кроме кривых зависимости напора у срыска от диаметра срыска при различных величинах радиуса действия компактной струи, показаны опытные точки для хороших рабочих пожарных струй (годных для тушения чердачных пожаров). Указанные точки, полученные на основании опытов 1942 г. ЦНИИПО МВД СССР, довольно хорошо ложатся на кривую радиуса действия струи $R = 17$ м. Поэтому радиус действия компактной струи, равный 17 м, надо считать расчетным радиусом для получения хороших рабочих пожарных струй. Для ориентировочных подсчетов возможно принимать напор у срыска 2,5—3,0 атм для получения хороших рабочих пожарных струй.

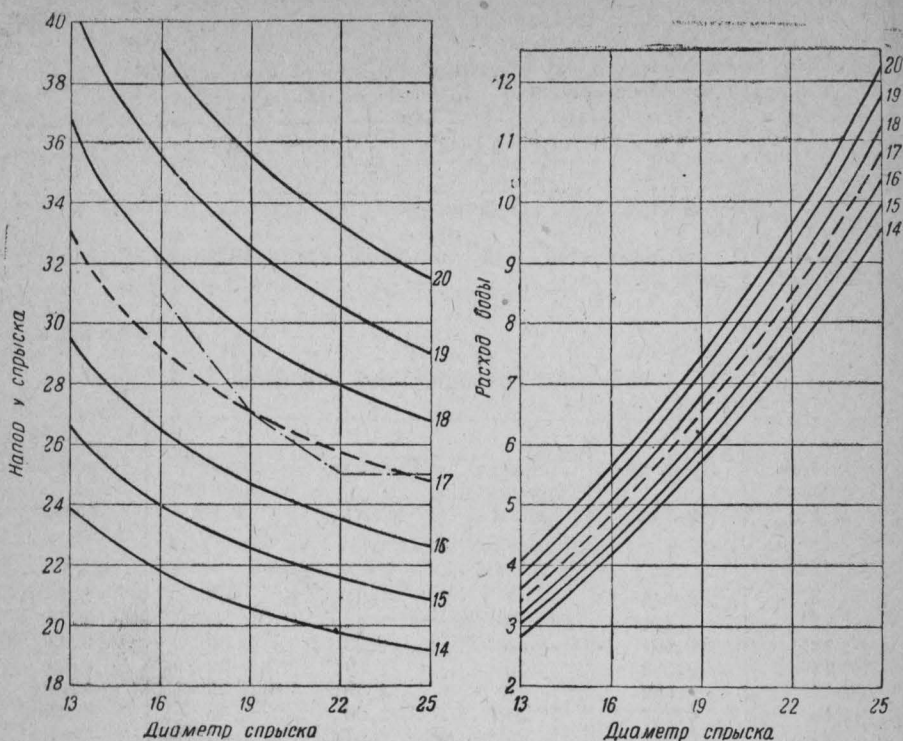


Рис. 53. Зависимость между радиусом действия компактной струи, диаметром спрека, напором и расходом воды.

Г. Потери напора в рукавах

Величины удельных сопротивлений A для рукавов приводятся в табл. 45. Потери напора в рукавах могут быть определены по формуле:

$$h = A l Q^2.$$

Так как нормальная длина рукава равна 20 м, то формулу потери напора можно представить в виде:

$$h = A \cdot 20 \cdot n Q^2 = z n Q^2, \quad (73)$$

где z — удельное сопротивление рукава длиной 20 м.

Для пользования этой формулой ниже приводится краткая табл. 46 потерь напора в рукавах длиной 20 м, при расходах от 1 до 20 л/сек.

Д. Приемы расчета рукавных схем

1. Одиночная линия без разветвления диаметром 65 мм (рис. 54)

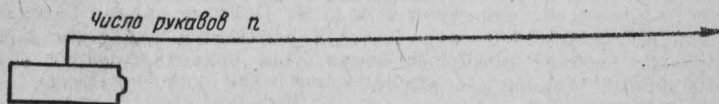


Рис. 54. Схема рукавной линии без разветвления.

Таблица зависимости между радиусом действия R компактной струи, расходом Q , напором у срыска H и диаметром срыска d

Радиус действия R_k	$d=13$		$d=16$		$d=19$		$d=22$		$d=25$	
	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
	м	л/сек	м	л/сек	м	л/сек	м	л/сек	м	л/сек
6	8,1	1,7	7,8	2,5	7,7	3,5	7,6	4,6	7,5	5,9
7	9,6	1,8	9,2	2,7	9,0	3,8	8,9	5,0	8,7	6,4
8	11,2	2,0	10,7	2,9	10,4	4,1	10,2	5,4	10,1	6,9
9	13,0	2,1	12,4	3,1	12,0	4,3	11,7	5,8	11,5	7,4
10	14,9	2,3	14,1	3,3	13,6	4,6	13,2	6,1	12,9	7,8
11	15,9	2,4	15,8	3,5	15,2	4,9	14,7	6,5	14,4	8,3
12	19,1	2,6	17,7	3,8	16,9	5,2	16,3	6,8	15,9	8,7
13	21,4	2,7	19,7	4,0	18,7	5,4	18,0	7,2	17,5	9,1
14	23,9	2,9	21,8	4,2	20,5	5,7	19,8	7,5	19,2	9,6
15	25,7	3,0	24,0	4,4	22,6	6,0	21,6	7,8	20,9	10,0
16	29,7	3,2	26,5	4,6	24,7	6,2	23,6	8,2	22,7	10,4
17	33,2	3,4	29,2	4,8	27,1	6,5	25,7	8,5	24,7	10,8
18	37,1	3,5	32,2	5,1	29,6	6,8	28,0	8,9	26,8	11,3
19	41,7	3,8	35,6	5,3	32,5	7,1	30,5	9,3	29,1	11,7
20	46,8	4,0	39,4	5,6	35,6	7,5	33,2	9,7	31,5	12,2
21	53,3	4,3	43,7	5,9	39,1	7,8	36,3	10,1	34,3	12,8
22	60,9	4,5	48,7	6,2	43,1	8,2	39,6	10,6	37,3	13,3
23	70,3	4,9	54,6	6,6	47,6	8,7	43,4	11,1	40,6	13,9
24	82,2	5,3	61,5	7,0	52,7	9,1	47,7	11,7	44,3	14,5
25	98,2	5,8	70,2	7,5	58,9	9,6	52,7	12,2	48,6	15,2
26			80,6	8,0	61,2	10,2	58,5	12,9	53,5	15,9
27			94,2	8,6	75,1	10,9	65,3	13,7	59,1	16,8
28					86,2	11,6	75,5	14,5	65,8	17,7
29							83,7	15,4	73,8	18,7
30							95,4	16,5	82,8	19,8

Подчеркнут радиус действия рабочей компактной струи, годной для тушения чердачных пожаров, рекомендуемый на основании опытов ЦНИИПО (1942 г.).

Таблица 45

Таблица величин удельного сопротивления A для рукавов

Характеристика рукавов	Диаметры рукавов в мм			
	45	50	65	76
1. Рукава прорезиненные	0,0133	0,0075	0,00175	0,00075
2. Рукава непрорезиненные отечественного производства, по опытам ЦНИИПО МВД СССР	0,0275	0,0155	0,00385	0,0015

Краткая таблица для определения потерь напора в рукавах

Потери напора указаны в метрах водяного столба на один рукав

Длина одного рукава принята равной 20 м

Расход воды в л/сек	Рукава прорезиненные, диаметры в мм				Рукава непрорезиненные, диаметры в мм			
	45	50	65	76	45	50	65	76
1,0	0,266	0,150	0,085	0,015	0,55	0,310	0,077	0,030
1,5	0,600	0,338	0,079	0,034	1,24	0,697	0,173	0,068
2,0	1,06	0,600	0,140	0,060	2,20	1,24	0,308	0,120
2,5	1,66	0,940	0,218	0,094	3,44	1,94	0,481	0,188
3,0	2,40	1,35	0,315	0,135	4,95	2,79	0,694	0,270
3,5	3,26	1,84	0,429	0,184	6,74	3,80	0,943	0,368
4,0	4,26	2,40	0,560	0,240	8,80	4,96	1,23	0,480
4,5	5,39	3,04	0,710	0,304	11,0	6,22	1,55	0,608
5,0	6,65	3,75	0,875	0,375	13,7	7,75	1,93	0,750
5,5	8,05	4,55	1,06	0,455	16,5	9,33	2,32	0,908
6,0	9,57	5,40	1,26	0,540	19,8	11,2	2,77	1,08
6,5	11,3	6,36	1,48	0,636	23,2	13,1	3,26	1,27
7,0	13,0	7,35	1,71	0,735	26,9	15,2	3,78	1,47
7,5	15,0	8,45	1,97	0,845	30,9	17,4	4,33	1,69
8,0	17,0	9,60	2,24	0,960	35,2	19,9	4,93	1,92
8,5	19,2	10,9	2,53	1,09	39,8	22,4	5,56	2,17
9,0	21,6	12,2	2,84	1,22	44,5	25,1	6,25	2,43
9,5	24,0	13,6	3,16	1,36	49,5	28,0	6,95	2,71
10,0	26,6	15,0	3,50	1,50	55,0	31,0	7,70	3,00
10,5			3,86	1,66			8,50	3,31
11,0			4,23	1,81			9,33	3,63
11,5			4,63	1,99			10,2	3,97
12,0			5,04	2,16			11,1	4,32
12,5			5,46	2,34			12,0	4,69
13,0			5,92	2,54			12,8	5,07
13,5			6,36	2,74			14,0	5,47
14,0			6,85	2,94			15,1	5,88
14,5			7,36	3,16			16,2	6,31
15,0			7,87	3,38			17,3	6,75
15,5			8,41	3,61			18,5	7,21
16,0			8,96	3,84			19,7	7,68
16,5			9,54	4,08			21,0	8,17
17,0			10,5	4,34			22,2	8,67
17,5			10,1	4,60			23,6	9,19
18,0			11,4	4,86			25,0	9,72
18,5			12,0	5,15			26,4	10,3
19,0			12,7	5,41			27,8	10,8
19,5			13,3	5,70			29,3	11,4
20			14,0	6,00			30,8	12,0

Потребный напор у спырка и расход воды определяются по табл. 44 при радиусе действия компактной струи не менее 17–16 м.

Потери напора в рукавах определяются по табл. 46.

Подсчет производится согласно приводимому примеру.

Пример. Требуется определить требуемый напор у автонасоса при рукавной линии длиной 400 м (20 рукавов), диаметром $2\frac{1}{2}$ дм. Рукава резиновые. Диаметр спырка 19 мм. Подъем ствола по отношению к автонасосу 20 м. Радиус действия компактной струи 17 м.

Напор у спырка по табл. 44 при $R_k = 17$ м будет $H = 27,1$ м.

Расход воды по табл. 44 равен 6,5 л/сек.

Потеря напора на один рукав (20 м) при расходе 6,5 л/сек равна 1,48 м.

Потеря напора в рукавной линии длиной 400 м (20 рукавов) составит $1,48 \times 20 = 29,6$ м.

Подъем ствола 20,0 м.

Требуемый напор у автонасоса: $27,1 + 29,6 + 20,0 = 76,7$ м, или $\approx 7,7$ атм.

II. Разветвление на два ствола (см. схему на рис. 55)

Магистраль диаметром 65 мм; две линии разветвления с рукавами диаметром 50 мм. Спырки одинаковых диаметров.

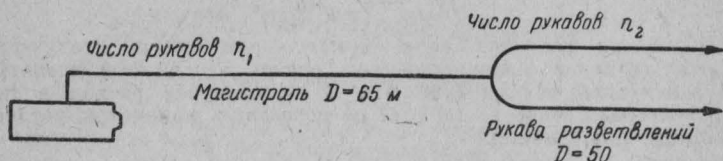


Рис. 55. Схема рукавной линии с двумя разветвлениями.

Требуемый напор и расход воды из одного спырка определяются по табл. 44. Затем подсчитывается число рукавов n_1 магистрали и к нему прибавляется число рукавов по одной из ветвей разветвления, имеющей наибольшую длину n_2 , т. е. расчетное число рукавов будет равно:

$$n_p = n_1 + n_2. \quad (74)$$

(Решение приближенное).

Это решение получается потому, что сопротивление одного рукава диаметром 50 мм при расходе Q_1 примерно равно сопротивлению одного рукава диаметром 65 мм при удвоенном расходе $Q = 2Q_1$.

Далее по удвоенному расходу одного спырка и по расчетному числу рукавов n_p по табл. 46 определяем потери напора в рукавной линии.

Требуемый напор у автонасоса будет равен:

$$H = h_{\text{под}} + h_{\text{спр}} + h_{\text{пот}}, \quad (75)$$

где: $h_{\text{под}}$ — высота подъема ствола,
 $h_{\text{спр}}$ — требуемый напор у спырка,
 $h_{\text{пот}}$ — потери напора в рукавах.

III. Разветвление на три ствола (рис. 56)

Магистраль диаметром 65 мм и три линии разветвления с рукавами по 50 мм. Спырки одинаковых диаметров. Требуемый напор и расход воды из одного спырка определяются по табл. 44.

Расчетное (условное) число рукавов определяется по следующему правилу: к числу рукавов магистрали n_1 прибавляется половинное число рукавов одной из линий разветвления n_2 (с наибольшим числом рукавов), т. е.

$$n_p = n_1 + 0,5 n_2.$$

(Решение приближенное).

Это решение получается потому, что сопротивление одного рукава диаметром 50 мм при расходе Q_1 примерно равно половине (0,5) сопротивления рукава диаметром 65 мм при тройном расходе $Q = 3Q_1$.

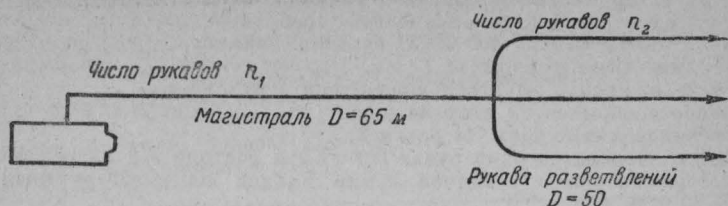


Рис. 56. Схема рукавной линии с тремя разветвлениями.

Далее по утроенному расходу одного spryska и по расчетному (условному) числу рукавов n_p по табл. 46 определяем потери напора в рукавной линии.

Требуемый напор у автонасоса будет равен:

$$H_{\text{нас}} = h_{\text{под}} + h_{\text{ср}} + h_{\text{пот}}.$$

Для замера расходов воды может применяться следующая схема, состоящая из одного непрорезиненного рукава длиной 20 м, диаметром 65 мм с различными spryskami (рис. 57). В этом случае расход воды определяет непосредственно из табл. 47 по показанию манометра, установленного в начале рукавной линии.

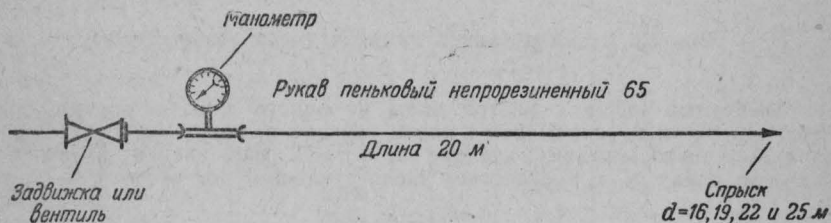


Рис. 57. Схема прокладки рукавной линии для определения расхода воды.

Таблица 47

Расход воды по показаниям манометра при схеме, показанной на рис. 57

Напор H м	\sqrt{H}	Расходы в л/сек			
		$d = 16$	$d = 19$	$d = 22$	$d = 25$
5	2,24	1,94	2,55	3,40	4,15
10	3,16	2,72	3,76	4,76	5,86
15	3,87	3,24	4,60	5,85	7,20
20	4,47	3,87	5,33	6,80	8,30
25	5,0	4,33	5,95	7,40	9,30
30	5,48	4,75	6,53	8,30	10,20
35	5,92	5,12	7,05	9,00	11,00
40	6,32	5,48	7,54	9,60	11,80
45	6,71	5,81	8,00	10,20	12,50
50	7,07	6,12	8,40	10,70	13,20
55	7,42	6,43	8,85	11,30	13,80
60	7,75	6,70	9,25	11,80	14,40
65	8,06	7,00	9,64	12,10	15,00
70	8,37	7,25	10,0	12,70	15,60

ГЛАВА II

КАНАЛИЗАЦИЯ

Раздел I. Равномерное движение

А. Формулы для расчета движения жидкости по каналам

Для того, чтобы иметь возможность ознакомиться с появившимися новейшими формулами для расчета движения жидкости по каналам, и, кроме того, чтобы иметь возможность сопоставлять эти формулы с теми формулами, которые применялись и применяются в настоящее время, ниже приводятся такого рода формулы и дается перевод последних на широко применяющуюся в СССР для расчета формулу Маннинга.

Новые формулы. В новых формулах обычно дают значение коэффициента ψ для общей формулы вида:

$$i = \psi \frac{v^2}{2gR}, \quad (76)$$

где: i — уклон,
 v — скорость,
 R — гидравлический радиус.

Для турбулентного режима ($Re(r) > 4000$) величина ψ дается в зависимости от шероховатости стенок канала

Для совершенно гладких стенок Зегеда дает формулу вида:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 4 \log (Re(r) \sqrt{\psi}) + 2,0, \quad (77)$$

где $Re(r)$ — число Рейнольдса, отнесенное к гидравлическому радиусу. Кэллеган дает формулу вида:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 4,08 \log (Re(r) \sqrt{\psi}) + 1,7. \quad (78)$$

Кроме того, дается приближенная формула вида:

$$\psi = 0,056 R_{e(r)}^{-0,25}. \quad (79)$$

Приближенно Кэллеган дает формулу вида:

$$\psi = a R_{e(r)}^{-0,25}. \quad (80)$$

Значения коэффициента a , в зависимости от характера шероховатости стенок канала, приведены в табл. 48.

Значения коэффициента a (формула 80)

№ п/п.	Характер внутренней поверхности стенок	Величина a
1	По Блазиусу для совершенно гладких стенок	0,0560
2	По Кэллегану для гладких лотков (каналов)	0,0578
3	То же для деревянных лотков (каналов) с полированными поверхностями	0,0690
4	То же для каналов (лотков) со строганными деревянными стенками	0,1110

Для совершенно шероховатых стенок, по Зегжда:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 4 \log \frac{R}{\Delta} + 4,25, \quad (81)$$

где: R — гидравлический радиус,
 Δ — абсолютная величина шероховатости.

Проф. В. Н. Кузнецов для формулы Шези ($v = C \sqrt{Ri}$) дает формулу коэффициента C вида:

$$C = \sqrt{g} \left(2,5 \ln \frac{h}{\Delta} + 6 \right) \quad (82)$$

(для широких прямоугольных каналов).

Принимая во внимание, что $C = \sqrt{\frac{2g}{\psi}}$ и $h \approx R$, получим:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 4,05 \log \frac{R}{\Delta} + 4,25. \quad (83)$$

Кэллеган, на основании опытов Базена, дает для каналов с совершенно шероховатыми стенками формулу вида:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 4,08 \log \frac{R}{\Delta} + 4,43. \quad (84)$$

Приближенные формулы для каналов с совершенно шероховатыми стенками Кэллеган дает в виде:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 6,4 \left(\frac{R}{\Delta} \right)^{1/7} \quad \text{или} \quad \psi = 0,0244 \left(\frac{\Delta}{R} \right)^{7/4}; \quad (85)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 5,76 \left(\frac{R}{\Delta} \right)^{1/6} \quad \text{или} \quad \psi = 0,0301 \left(\frac{\Delta}{R} \right)^{3/2}. \quad (86)$$

По исследованиям академика Н. Н. Павловского более точное значение коэффициента C в формуле Шези получается по предложенной им показательной формуле $C = \frac{1}{n} R^y$,

где $y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 10)$.

При постоянной величине показателя $n = 1/6$ формула акад. Павловского принимает упрощенный вид $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, которую обычно называют формулой Маннинга.

Если сравнить формулу Маннинга с формулой проф. В. Н. Кузнецова, то получим:

$$\text{по Маннингу } C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}; \quad (87)$$

$$\text{по Кузнецову } C = V \sqrt{g} \left(2,5 \ln \frac{R}{\Delta} + 6 \right). \quad (88)$$

Делая равными коэффициенты Шези C , получаем:

$$n = \frac{1}{2,5 \sqrt{g}} \left[\frac{\left(\frac{R}{\Delta} \right)^{1/6}}{\ln \frac{R}{\Delta} + 2,4} \right] \cdot \Delta^{1/6} = \frac{A}{2,5 \sqrt{g}} \cdot \Delta^{1/6}. \quad (89)$$

При различных величинах $\frac{R}{\Delta}$ от 10 до 500 величина $A = 0,312$. (90)

После этого легко определяется значение коэффициента n из формулы Маннинга:

$$\text{или } n \approx 0,04 \sqrt[6]{\Delta} \text{ при } \Delta, \text{ выраженной в метрах,} \quad (91)$$

$$n \approx 0,0127 \sqrt[6]{\Delta} \text{ при } \Delta, \text{ выраженной в миллиметрах.} \quad (92)$$

Так как

$$C = \sqrt{\frac{2g}{\psi}} = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6},$$

то

$$\psi = \frac{2gn^2}{R^{1/6}}. \quad (93)$$

Подставляя $n = 0,04 \sqrt[6]{\Delta}$, получаем:

$$\psi = 0,0314 \left(\frac{\Delta}{R} \right)^{1/3}. \quad (94)$$

или

$$\frac{1}{V \psi} = 5,65 \left(\frac{\Delta}{R} \right)^{1/6}, \quad (95)$$

т. е. формулу, близкую к формуле Кэллегана.

Величины Δ можно брать из табл. 49.

Таблица 49

Величина абсолютной шероховатости Δ по Кэллегану

Характер внутренней поверхности стенок канала	Величина Δ
Цемент	0,014
Кирпич	0,118
Мелкий гравий диаметром от 1 до 2 см	0,952
Крупный гравий диаметром от 3 до 4 см	2,88
Струганные доски	0,053

Таким образом, для вполне шероховатых стенок, в которых обычно и происходит движение жидкости, возможно применять формулу Маннинга, дающую наилучшую аппроксимацию более точных формул. Для формулы Маннинга коэффициент Шези C имеет вид:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}.$$

Другие формулы могут быть выражены приближенно через формулу Маннинга.

Так, для формулы Базена коэффициент Шези C имеет вид:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{V\sqrt{R}}}. \quad (96)$$

По Маннингу
$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}.$$

Приравнивая формулы (87) и (96), получим:

$$n = \frac{V\sqrt{R} + \gamma}{87 R^{1/3}}. \quad (97)$$

Точно так же для формулы Куттера:

$$n = \frac{V\sqrt{R} + m}{100 R^{1/3}}. \quad (98)$$

Для формулы Гангилье—Куттера:

$$n = n_{ГК} \frac{1}{\sqrt[3]{R}} \cdot \frac{V\sqrt{R} + 2,3 n_{ГК}}{1 + 23 n_{ГК}}. \quad (99)$$

В табл. 50, 51 приводятся величины коэффициента n из формулы Маннинга, выраженные через соответствующие величины коэффициентов из формул Базена и Гангилье—Куттера.

Таблица 50

Таблица сравнения коэффициента γ из формулы Базена с коэффициентом n из формулы Маннинга

R	$\gamma = 0,06$	$\gamma = 0,16$	$\gamma = 0,46$	$\gamma = 0,85$	$\gamma = 1,30$	$\gamma = 1,75$	$\gamma = 3,0$
	Значения n						
0,1	0,0093	0,0118	0,0192	0,0288	0,0400	0,0512	0,0821
0,3	0,0104	0,0124	0,0173	0,0240	0,0316	0,0394	0,0650
0,5	0,0112	0,0126	0,0170	0,0226	0,0291	0,0356	0,0587
1,0	0,0122	0,0133	0,0168	0,0213	0,0260	0,0317	0,0460
1,6	0,0131	0,0140	0,0169	0,0206	0,0252	0,0294	0,0413
3,0	0,0143	0,0151	0,0175	0,0207	0,0242	0,0278	0,0379
6,0	0,0159	0,0165	0,0184	0,0208	0,0237	0,0265	0,0345

Таблица сравнения коэффициента шероховатости $n_{ГК}$ из формулы Гангилье — Куттера с коэффициентом n из формулы Маннинга

$n_{ГК}$	$R=0,1$	$R=0,2$	$R=0,3$	$R=0,5$	$R=1,0$	$R=1,6$	$R=2,0$
	Значения n						
0,010	0,00945	0,00945	0,0095	0,00960	0,0100	0,0103	0,0106
0,015	0,0159	0,0151	0,0148	0,0148	0,0150	0,0153	0,0156
0,020	0,0229	0,0213	0,0207	0,0201	0,0200	0,0202	0,0204
0,0,5	0,0304	0,0278	0,0266	0,0258	0,0250	0,0248	0,0250
0,030	0,0384	0,0345	0,0328	0,0312	0,0300	0,0296	0,0296
0,040	0,0553	0,0485	0,0457	0,0427	0,0400	0,0390	0,0385
0,050	0,0735	0,0630	0,0590	0,0543	0,0500	0,0480	0,0473

Перевод коэффициента шероховатости из формулы Куттера можно делать по табл. 50, составленной для перевода коэффициента шероховатости из формулы Базена, умножая данные этой таблицы на поправочный коэффициент 0,87.

В табл. 52 показаны коэффициенты шероховатости n для формулы Маннинга и Гангилье — Куттера.

Таблица 52

Общая таблица коэффициентов шероховатости n для формул Гангилье — Куттера и Маннинга

№ п/п.	Род стенки	n	$\frac{1}{n}$
1	Исключительно гладкие поверхности; поверхности, покрытые эмалью или глазурью	0,009	111,1
2	Весьма тщательно строганные доски, хорошо пригнанные. Лучшая штукатурка из чистого цемента	0,010	100,0
3	Лучшая цементная штукатурка. Чистые (новые) гончарные, чугунные и железные трубы, хорошо уложенные и соединенные. Хорошо строганные доски	0,011	91,0
4	Нестроганные доски, хорошо пригнанные. Водопроводные трубы в нормальных условиях, без заметной инкрустации; весьма чистые водосточные трубы. Хорошая бетонировка	0,012	83,3
5	Тесовая кладка в лучших условиях, хорошая кирпичная кладка. Водосточные трубы в нормальных условиях, несколько загрязненные водосточные трубы	0,013	76,9
6	Загрязненные трубы (водопроводные, водосточные), бетонировка каналов среднего качества	0,014	71,4

№ п/п.	Род стенки	n	$\frac{1}{n}$
7	Хорошая сухая кладка. Большие земляные каналы в средних условиях содержания и ремонта и малые в хороших. Реки в весьма благоприятных условиях (чистое прямое ложе со свободным течением, без обвалов и глубоких промоин)	0,025	40,0
8	Земляные каналы: большие в условиях содержания и ремонта ниже средней „нормы“, малые в средних условиях	0,0275	36,4
9	Земляные каналы в сравнительно плохих условиях (например, местами с водорослями, булыжником или гравием по дну, заметно заросшие травой, с местными обвалами откосов и пр.). Реки в благоприятных условиях течения	0,030	33,3
10	Каналы, находящиеся в весьма плохих условиях (с неправильным профилем, заметно заросшие камнем и водорослями и пр.). Реки в сравнительно благоприятных условиях, но с некоторым количеством камней и водорослей	0,035	28,6
11	Каналы в исключительно плохих условиях (значительные промоины и обвалы, заросли камыша, густые корни, крупные камни по руслу и ил). Реки при дальнейшем ухудшении условий течения (по сравнению с предыдущими параграфами): увеличение количества камней и водорослей, извилистое ложе с небольшим количеством промоин и отмелей и т. д.	0,040	25,0

Б. Прием расчета каналов круглого сечения

Каналы круглого сечения при различных степенях наполнения можно рассчитывать, пользуясь величинами удельного сопротивления, выведенными для движения жидкости по напорным трубопроводам.

При этом формулы принимают вид:

$$i = (A \cdot Q^2) \cdot f(\xi) \cdot \eta, \quad (100)$$

где: $f(\xi)$ — функция степени наполнения $\left(\xi = \frac{h}{D} \right)$ канала,

η — поправочный коэффициент на изменение коэффициента шероховатости n из формулы Маннинга, равное 0,012, на какой-либо иной коэффициент шероховатости (см. табл. 6).

Значения $f(\xi)$ приведены в табл. 53.

Скорость движения жидкости по круглому каналу при различных степенях наполнения выражается формулой:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{\omega_0} \varphi(\xi) = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \cdot \varphi(\xi) = \frac{4Q}{\pi D^2} \cdot \varphi\left(\frac{h}{D}\right). \quad (101)$$

Таблица величин $f(\xi) = f\left(\frac{h}{D}\right)$

$\xi = \frac{h}{D}$	$f(\xi)$	$\xi = \frac{h}{D}$	$f(\xi)$	$\xi = \frac{h}{D}$	$f(\xi)$
0	—	0,35	14,3	0,70	1,43
0,05	43700	0,40	8,82	0,75	1,20
0,10	2295	0,45	5,76	0,80	1,05
0,15	420	0,50	4,00	0,85	0,942
0,20	131	0,55	2,95	0,90	0,880
0,25	50,9	0,60	2,24	0,95	0,873
0,30	26,7	0,65	1,75	1,0	1,00

Значения функции $\varphi(\xi)$ приводятся в табл. 54.

Таблица 54

Таблица величин $\varphi(\xi) = \varphi\left(\frac{h}{D}\right)$

$\xi = \frac{h}{D}$	$\varphi(\xi)$	$\xi = \frac{h}{D}$	$\varphi(\xi)$	$\xi = \frac{h}{D}$	$\varphi(\xi)$
0,05	—	0,35	3,21	0,70	1,34
0,10	19,6	0,40	2,67	0,75	1,24
0,15	11,0	0,45	2,30	0,80	1,17
0,20	7,14	0,50	2,00	0,85	1,09
0,25	5,21	0,55	1,77	0,90	1,05
0,30	3,97	0,60	1,60	0,95	1,02
—	—	0,65	1,46	1,00	1,00

Пример. Дан канал круглого сечения диаметром 500 мм, при степени наполнения $\xi = \frac{h}{D} = 0,70$. Расход воды $Q = 100$ л/сек. Коэффициент шероховатости, по Маннингу, для данного канала принят $n = 0,014$. Требуется определить гидравлический уклон i :

$$i = (AQ^2) \cdot f(\xi) \cdot \eta.$$

По табл. 3 $A = 0,060 \times 10^{-6}$; по табл. 53 $f(\xi) = 1,43$; по табл. 6 $\eta = 1,36$.

Тогда: $i = 0,060 \times 10^{-6} \times 100 \times 1,43 \times 1,36 = 0,00117$.

В. Обобщенный метод гидравлического расчета каналов различных форм и шероховатости при равномерном движении*

Краткое изложение метода. Сущность метода заключается в следующем: представим площадь любого сечения как произведение квадрата какого-либо выбранного нами линейного размера канала (например, основания канала, высоты канала, диаметра и т. п.) на какую-то функцию отношения наполнения канала к выбранному размеру:

$$\omega = b^2 F(\xi), \quad (102)$$

* Более подробное изложение см. проф. В. Г. Лобачев „Обобщенный метод гидравлического расчета каналов различных форм и шероховатости“. 1939.

где: $\xi = \frac{h}{b}$;

h — величина наполнения,
 b — выбранный линейный размер.

Точно так же смоченный периметр можно изобразить в виде:

$$\chi = bX(\xi). \quad (103)$$

В формулах (102) и (103) $F(\xi)$ и $X(\xi)$ — безразмерные параметры площади и смоченного периметра, выраженные в функции отношения степени наполнения ξ .

Если принятые нами формулы площади ω и смоченного периметра χ вставить в основные уравнения движения жидкости:

$$\text{в формулу Шези } v = C \sqrt{Ri},$$

где, по Маннингу, $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, и

$$\text{в выражение неразрывности потока } Q = \omega v,$$

то эти основные выражения примут вид:

$$v = \frac{1}{n} \left[\frac{b^2 \cdot F(\xi)}{bX(\xi)} \right]^{2/3} \sqrt{Ri}, \quad (104)$$

откуда

$$\left[\frac{X(\xi)}{F(\xi)} \right]^{2/3} = \frac{b^{2/3} i^{1/2}}{n \cdot v} = U(\xi),$$

где

$$U(\xi) = \left[\frac{X(\xi)}{F(\xi)} \right]^{2/3} \quad (105)$$

$$Q = b^2 v F(\xi). \quad (106)$$

Подставляя в формулу (105), поочередно, вместо v величину $\frac{Q}{b^2 F(\xi)}$ и вместо b величину $\left(\frac{Q}{v F(\xi)} \right)^{1/2}$ из формулы (106), получаем:

$$\frac{U(\xi)}{F(\xi)} = \frac{b^{3/2} i^{1/2}}{nQ} = Z(\xi),$$

где

$$Z(\xi) = \frac{U(\xi)}{F(\xi)}, \quad (107)$$

и далее

$$U(\xi) F(\xi)^{1/2} = \frac{Q^{1/2} i^{1/2}}{n v^{1/2}}; \quad (108)$$

возводя последнее выражение в третью степень, имеем:

$$U(\xi)^3 F(\xi) = \frac{Q^{3/2} i^{3/2}}{n^3 v^{3/2}} = \Phi(\xi),$$

где

$$\Phi(\xi) = U(\xi)^3 F(\xi). \quad (109)$$

Таким образом, получаем следующие расчетные формулы:

$$F(\xi) = \frac{Q}{b^2 v}; \quad (110)$$

$$\Phi(\xi) = \frac{Q i^{3/2}}{n^3 \nu^4}; \quad (111)$$

$$U(\xi) = \frac{b^{2/3} i^{1/2}}{n \nu}; \quad (112)$$

$$Z(\xi) = \frac{b^{3/3} i^{1/2}}{n \cdot Q}, \quad (113)$$

откуда
$$i = \left[\Phi(\xi) \right]^{2/3} \cdot \frac{\nu^{3/3} n^2}{Q^{1/3}} = \left[U(\xi) \right]^2 \frac{n^2 \nu^2}{b^{1/3}} = \left[Z(\xi) \right]^2 \frac{n^2 Q^2}{b^{10/3}}. \quad (114)$$

Здесь независимых формул, по существу, две (считая коэффициент шероховатости заданным), а переменных величин—пять (Q , ν , i , b и ξ).

Таким образом, задавая три из них, мы получаем решение для двух остальных величин.

Для решения 10 возможных в этом случае задач ниже приводятся таблицы и формулы, с помощью которых могут быть определены функции: $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ для наиболее употребительных профилей каналов.

Формулы и таблицы для определения функций $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ для каналов различных профилей.

1. Треугольный профиль (рис. 58)

а)
$$F(\xi) = \frac{F}{h^3} = \operatorname{ctg} \varphi = m, \quad (115)$$

где
$$m = \frac{c}{h}; \quad (116)$$

б)
$$\Phi(\xi) = \frac{8}{\sin 2\varphi} = \frac{4(1+m^2)}{m}; \quad (117)$$

в)
$$U(\xi) = \left(\frac{4}{\cos^2 \varphi} \right)^{1/3} = \left[\frac{4 \cdot (1+m^2)}{m^2} \right]^{1/3}; \quad (118)$$

г)
$$Z(\xi) = \left(4 \operatorname{tg}^3 \varphi \frac{1}{\cos^2 \varphi} \right)^{1/3} = \left[\frac{4(1+m^2)}{m^5} \right]^{1/3}. \quad (119)$$

2. Прямоугольный профиль (рис. 59)

а)
$$F(\xi) = \xi,$$

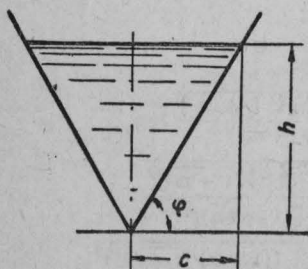


Рис. 58. Треугольное сечение.

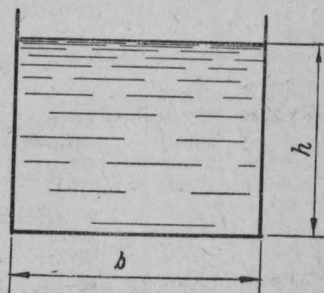


Рис. 59. Прямоугольное сечение.

где

$$\xi = \frac{h}{b}; \quad (120)$$

$$\text{б) } \Phi(\xi) = 4\xi + 4 + \frac{1}{\xi}; \quad (121)$$

$$\text{в) } U(\xi) = \sqrt[3]{4 + \frac{4}{\xi} + \frac{1}{\xi^2}}; \quad (122)$$

$$\text{г) } Z(\xi) = \frac{1}{\xi} \sqrt[3]{4 + \frac{4}{\xi} + \frac{1}{\xi^2}}. \quad (123)$$

Величины функций $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ приводятся в табл. 55.

Таблица 55

Таблица функций $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ для каналов прямоугольного профиля

$\xi = \frac{h}{b}$	$F(\xi)$	$\Phi(\xi)$	$U(\xi)$	$Z(\xi)$	$\xi = \frac{h}{b}$	$F(\xi)$	$\Phi(\xi)$	$U(\xi)$	$Z(\xi)$
0,10	0,10	14,40	5,24	52,42	1,0	1,00	9,00	2,08	2,08
0,15	0,15	11,25	4,22	28,27	1,50	1,50	10,65	1,92	1,28
0,20	0,20	9,80	3,66	18,30	2,00	2,00	12,50	1,84	0,921
0,25	0,25	9,00	3,30	13,22	2,50	2,50	14,40	1,79	0,718
0,30	0,30	8,53	3,05	10,17	3,00	3,00	16,33	1,76	0,586
0,40	0,40	8,10	2,70	6,81	4,00	4,00	20,25	1,72	0,429
0,50	0,50	8,00	2,52	5,04	5,50	5,50	26,20	1,68	0,306
0,55	0,55	8,02	2,44	4,44	7,50	7,50	34,10	1,66	0,221
0,75	0,75	8,35	2,23	2,98	10,0	10,0	44,10	1,64	0,164

3. Трапециoidalное сечение (рис. 60)

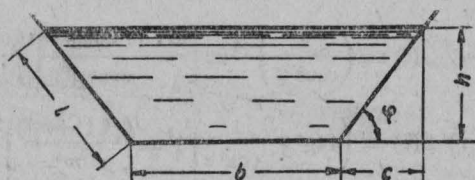


Рис. 60. Трапециoidalное сечение.

$$\text{а) } F(\xi) = \xi(1+m\xi); \quad (124)$$

$$\xi = \frac{h}{c}; \quad (125)$$

$$m = \operatorname{ctg} \varphi; \quad (126)$$

$$\text{б) } \Phi(\xi) = \frac{(1+2\xi\sqrt{1+m^2})^2}{\xi(1+m\xi)}; \quad (127)$$

$$\text{в) } U(\xi) = \sqrt[3]{\frac{(1+2\xi\sqrt{1+m^2})^2}{[\xi(1+m\xi)]^2}}; \quad (128)$$

$$\text{г) } Z(\xi) = \frac{1}{\xi(1+m\xi)} \sqrt[3]{\frac{(1+2\xi\sqrt{1+m^2})^2}{[\xi(1+m\xi)]^2}}. \quad (129)$$

Таблица величин $2\sqrt{1+m^2}$

$m = \operatorname{ctg} \varphi$	$2\sqrt{1+m^2}$	$m = \operatorname{ctg} \varphi$	$2\sqrt{1+m^2}$	$m = \operatorname{ctg} \varphi$	$2\sqrt{1+m^2}$
0	2,000	0,50	2,236	1,50	3,606
0,10	2,010	0,75	2,500	2,00	4,472
0,20	2,040	1,00	2,828	2,50	5,385
0,25	2,062	1,25	3,202	3,00	6,325

Таблицы функций $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ здесь не приводятся, так как величина $m = \operatorname{ctg} \varphi$ может варьировать в больших пределах, в зависимости от угла откоса канала.

4. Круглое сечение (рис. 61)

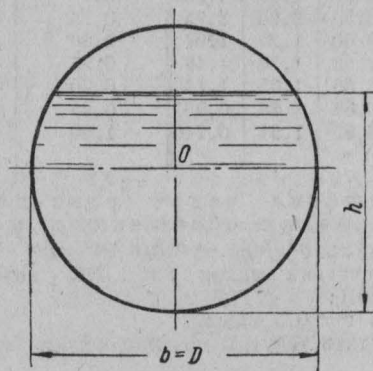


Рис. 61. Круглое сечение.

Расчетных формул функций $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ не приводим ввиду их громоздкости.

Здесь дается только таблица величин $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ (табл. 57).

Таблица 57

Таблица функций $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ для круглого сечения

Величина $\xi = \frac{h}{D} = \frac{h}{b}$	$F(\xi)$	$\Phi(\xi)$	$U(\xi)$	$Z(\xi)$	Величина $\xi = \frac{h}{D} = \frac{h}{b}$	$F(\xi)$	$\Phi(\xi)$	$U(\xi)$	$Z(\xi)$
0,05	0,0153	12,65	10,30	670,0	0,55	0,448	6,30	2,47	5,51
0,10	0,0408	10,00	6,25	153,5	0,60	0,493	6,37	2,36	4,79
0,15	0,0714	8,84	4,70	65,8	0,65	0,543	6,48	2,30	4,24
0,20	0,1111	7,72	4,00	38,0	0,70	0,588	6,66	2,25	3,83
0,25	0,151	7,23	3,45	24,0	0,75	0,633	6,88	2,22	3,51
0,30	0,198	6,76	3,20	15,15	0,80	0,676	7,26	2,22	3,28
0,35	0,246	6,51	2,95	12,45	0,85	0,719	7,65	2,23	3,12
0,40	0,294	6,40	2,80	9,54	0,90	0,746	8,40	2,25	3,01
0,45	0,345	6,32	2,66	7,70	0,95	0,769	9,26	2,27	2,99
0,50	0,392	6,28	2,52	6,41	1,00	0,785	12,57	2,52	3,21

5. Овоидальное сечение (рис. 62 на стр. 85)

Для овоидального сечения приводим таблицы величин $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ в зависимости от $\xi = \frac{h}{3r}$ (за основной размер b принят радиус r).

Таблица 58

Таблица функций $F(\xi)$, $\Phi(\xi)$, $U(\xi)$ и $Z(\xi)$ для овоидального сечения

$\xi = \frac{h}{3r}$	$F(\xi)$	$\Phi(\xi)$	$U(\xi)$	$Z(\xi)$	$\xi = \frac{h}{3r}$	$F(\xi)$	$\Phi(\xi)$	$U(\xi)$	$Z(\xi)$
0,0667	0,1111	7,76	4,11	—	0,55	2,33	7,15	1,45	0,631
0,10	0,196	7,00	3,29	16,82	0,60	2,62	7,33	1,41	0,537
0,15	0,355	6,63	2,65	7,46	0,65	2,92	7,53	1,37	0,475
0,20	0,537	6,55	2,30	4,28	0,70	3,22	7,73	1,34	0,415
0,25	0,748	6,55	2,06	2,75	0,75	3,52	7,94	1,31	0,372
0,30	0,977	6,60	1,89	1,94	0,80	3,80	8,31	1,30	0,341
0,35	1,22	6,63	1,76	1,45	0,85	4,07	8,70	1,29	0,318
0,40	1,468	6,68	1,65	1,14	0,90	4,28	9,40	1,30	0,304
0,45	1,752	6,85	1,58	0,902	0,95	4,49	10,04	1,31	0,295
0,50	2,036	6,95	1,51	0,740	1,00	4,59	13,70	1,445	0,313

Примеры решения задач равномерного движения жидкости по каналам обобщенным методом.

Дано. Расход $Q = 16$ л/сек $= 0,016$ м³/сек;

гидравлический уклон $i = 0,001$, коэффициент шероховатости $n = 0,010$;

скорость $v = 0,5$ м/сек.

Требуется определить размеры сечения канала при различных его профилях.

Вначале определяем функцию $\Phi(\xi)$:

$$\Phi(\xi) = \frac{Q i^{3/2}}{n^3 v^4} = \frac{0,016 \times 0,001^{3/2}}{0,5^4 \times 0,01^3} = 8,05.$$

Далее определяем величину отношения наполнения к выбранному размеру $\xi = \frac{h}{b}$.

1. Для прямоугольного сечения

$$\Phi(\xi) = 4\xi + 4 + \frac{1}{\xi} = 8,05,$$

откуда имеем два решения: $\xi_1 = 0,427$ и $\xi_2 = 0,585$.

Так как $F(\xi) = \xi$, то основной размер b определится из формулы:

$$F(\xi) = \frac{Q}{b^2 v},$$

откуда

$$b = \sqrt{\frac{Q}{v \cdot F(\xi)}};$$

$$b = \sqrt{\frac{0,016}{0,5 F(\xi)}},$$

откуда имеем два решения:

$$b_1 = \frac{0,179}{\sqrt{0,427}} = 0,274 \text{ и } b_2 = \frac{0,179}{\sqrt{0,585}} = 0,234.$$

Величина наполнения будет:

$$h_1 = b_1 \xi_1 = 0,274 \times 0,427 = 0,117 \text{ м и } h_2 = b_2 \xi_2 = 0,234 \times 0,585 = 0,137.$$

Те же решения можно получить и по табл. 55.

2. Для трапециевидального сечения при $m = \operatorname{ctg} \varphi = 1$

$$\Phi(\xi) = \frac{(1+2\xi\sqrt{1+m^2})^2}{\xi(1+m\xi)} = \frac{(1+2,828\xi)^2}{\xi(1+\xi)} = 8,05,$$

откуда реальное значение $\xi = 0,414$.

$$F(\xi) = \xi(1+m\xi) = 0,414 \times 1,414 \approx 0,585.$$

Основной размер b определится из формулы:

$$b = \sqrt{\frac{0,016}{0,5 \times 0,585}} = 0,234.$$

Величина наполнения h будет равна:

$$h = \xi b = 0,414 \times 0,234 = 0,097.$$

3. Для круглого сечения

Пользуясь табл. 57, находим посредством интерполяции по заданной величине $\Phi(\xi) = 8,05$ величины ξ и $F(\xi)$;

получаем

$$\xi_1 = 0,185, \quad \xi_2 = 0,877;$$

$$F_1(\xi) = 0,099 \text{ и } F_2(\xi) = 0,734.$$

Следовательно, для данного случая получим два решения.

По له этого основной размер b , в данном случае равный диаметру D будет:

$$D_1 = b_1 = \sqrt{\frac{0,016}{0,5 \times 0,099}} = 0,570;$$

$$D_2 = b_2 = \sqrt{\frac{0,016}{0,5 \times 0,734}} = 0,206.$$

Величины наполнения получим равными:

$$h_1 = D_1 \xi_1 = 0,185 \times 0,570 = 0,105;$$

$$h_2 = D_2 \xi_2 = 0,878 \times 0,206 = 0,181.$$

Раздел II. Неравномерное движение*

А. Расчетная формула для неравномерного движения

Издаваемый здесь способ основан на применении безразмерных величин — площади ω , смоченного периметра χ и ширины потока B по урезу воды, — выраженных в функции отношения величины наполнения к выбранному линейному размеру b .

* Более подробное изложение метода см. в отчете института „ВОДГЕО“ — «Разработка метода гидравлического расчета открытых потоков при неравномерном движении». Проф. В. Г. Лобачев, 1941.

Основная формула неравномерного движения в дифференциальной форме, при учете трения жидкости о стенки канала по формуле Маннинга, имеет вид:

$$ds = \frac{b}{i} \left[\frac{1 - \frac{\Omega(\xi)}{\Omega(\xi_{кр})}}{1 - \frac{\Lambda(\xi)}{\Lambda(\xi_{нор})}} \right] d\xi. \quad (130)$$

В этой формуле:

b — основной размер,

i — уклон дна,

ds — элементарная часть длины,

$d\xi$ — элементарная величина отношения наполнения к выбранному размеру,

$\Omega(\xi)$ — безразмерная величина, представляющая собой отношение $\frac{B(\xi)}{F(\xi)^{2/3}}$,

где $B(\xi)$ — безразмерная величина ширины потока по урезу воды:

$$B(\xi) = \frac{B}{b} \text{ или } B = bB(\xi);$$

$F(\xi)$ — безразмерная величина площади живого сечения:

$$F(\xi) = \frac{\omega}{b^2} \text{ или } \omega = b^2 F(\xi);$$

$\Lambda(\xi)$ — безразмерная величина, представляющая собой отношение

$$\frac{X(\xi)^{4/3}}{F(\xi)^{10/3}},$$

где $X(\xi)$ — безразмерная величина смоченного периметра:

$$X(\xi) = \frac{\chi}{b} \text{ или } \chi = bX(\xi);$$

$\Omega(\xi_{кр})$ — безразмерная величина при критическом состоянии потока:

$$\Omega(\xi_{кр}) = \frac{B(\xi_{кр})}{F(\xi_{кр})} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{gb^5}{Q^2},$$

где: α — коэффициент Кориолиса,

g — ускорение силы тяжести,

b — основной размер,

Q — расход,

$\Lambda(\xi_{нор})$ — безразмерная величина при равномерном движении потока, при так называемом нормальном наполнении канала.

При пользовании для расчета формулой Маннинга $\Lambda(\xi_{нор})$ принимает вид:

$$\Lambda(\xi_{нор}) = \frac{ib^{10/3}}{n^2 Q^2},$$

где: i — уклон дна,

b — основной размер,

Q — расход,

n — коэффициент шероховатости в формуле Маннинга.

Для возможности пользования приведенной формулой здесь даются таблицы величин $F(\xi)$, $X(\xi)$, $B(\xi)$, $\Omega(\xi)$ и $\Lambda(\xi)$ для некоторых форм сечения каналов, а также метод интегрирования дифференциального уравнения методом трапеций.

Б. Таблицы и формулы величин безразмерных функций

$X(\xi)$, $F(\xi)$, $B(\xi)$, $\Omega(\xi)$ и $\Lambda(\xi)$

Таблица 59

Таблицы величин безразмерных функций

$X(\xi)$, $F(\xi)$, $B(\xi)$, $\Omega(\xi)$ и $\Lambda(\xi)$

Для прямоугольного сечения (рис. 59)

ξ	$X(\xi)$	$F(\xi)$	$B(\xi)$	$\Omega(\xi)$	$\Lambda(\xi)$
0,10	1,20	0,10	1	1000,0	
0,11	1,22	0,11	1	751,3148	2044,09
0,12	1,24	0,12	1	578,704	1562,98
0,13	1,26	0,13	1	455,166	1222,77
0,14	1,29	0,14	1	364,4315	975,402
0,15	1,30	0,15	1	296,2963	791,195
0,16	1,32	0,16	1	244,141	651,172
0,17	1,34	0,17	1	203,542	542,801
0,18	1,36	0,18	1	171,468	457,587
0,19	1,38	0,19	1	145,794	389,634
0,20	1,40	0,20	1	125,000	334,761
0,22	1,44	0,22	1	93,89	252,972
0,24	1,48	0,24	1	72,33	196,425
0,26	1,52	0,26	1	56,88	155,792
0,28	1,56	0,28	1	45,56	125,981
0,30	1,60	0,30	1	37,037	103,535
0,32	1,64	0,32	1	30,516	86,2891
0,34	1,68	0,34	1	25,445	72,8026
0,36	1,72	0,36	1	21,432	62,0908
0,38	1,76	0,38	1	18,225	53,465
0,40	1,80	0,40	1	15,625	46,4331
0,42	1,84	0,42	1	13,497	40,6372
0,44	1,88	0,44	1	11,739	35,8123
0,46	1,92	0,46	1	10,273	31,7596
0,48	1,96	0,48	1	9,042	28,3271
0,50	2,00	0,50	1	8,000	25,3983
0,55	2,1	0,55	1	6,010	19,7279
0,60	2,2	0,60	1	4,630	15,7057
0,65	2,3	0,65	1	3,642	12,7622
0,70	2,4	0,70	1	2,915	10,5508
0,75	2,5	0,75	1	2,370	8,85212
0,80	2,6	0,80	1	1,953	7,52193
0,85	2,7	0,85	1	1,628	6,4628
0,90	2,8	0,90	1	1,372	5,60704
0,95	2,9	0,95	1	1,1633	4,9663
1,00	3,0	1,0	1	1,000	4,32673
1,1	3,2	1,1	1	0,751315	3,4207
1,2	3,4	1,2	1	0,578704	2,78420
1,3	3,6	1,3	1	0,455166	2,30104
1,4	3,8	1,4	1	0,364431	1,93175
1,5	4,0	1,5	1	0,29630	1,64356
1,6	4,2	1,6	1	0,24414	1,41448
1,7	4,4	1,7	1	0,20354	1,22962
1,8	4,6	1,8	1	0,17150	1,07837
1,9	4,8	1,9	1	0,14579	0,963107

ξ	$X(\xi)$	$F(\xi)$	$B(\xi)$	$\Omega(\xi)$	$\Lambda(\xi)$
2,0	5,0	2,0	1	0,1250	0,848253
2,2	5,4	2,2	1	0,19349	0,684092
2,4	5,8	2,4	1	0,07233	0,563031
2,6	6,2	2,6	1	0,05688	0,471277
2,8	6,6	2,8	1	0,04556	0,400126
3,0	7,0	3,0	1	0,03704	0,343868
3,2	7,4	3,2	1	0,03052	0,2986635
3,4	7,8	3,4	1	0,02514	0,261735
3,6	8,2	3,6	1	0,02143	0,231247
3,8	8,6	3,8	1	0,01822	0,205771
4,0	9,0	4,0	1	0,01562	0,1 4270
4,2	9,4	4,2	1	0,01350	0,165961
4,4	9,8	4,4	1	0,01174	0,150242
4,6	10,2	4,6	1	0,01027	0,136649
4,8	10,6	4,8	1	0,00904	0,124816
5,0	11,0	5,0	1	0,00800	0,114452
5,5	12	5,5	1	0,00601	0,0935473
6,0	13	6,0	1	0,00463	0,0778788
6,5	14	6,5	1	0,00464	0,0658352
7,0	15	7,0	1	0,002915	0,0563803
7,5	16	7,5	1	0,00237	0,0488826
8,0	17	8,0	1	0,001953	0,0427356
8,5	18	8,5	1	0,001628	0,0376385
9,0	19	9,0	1	0,00 372	0,0334345
9,5	20	9,5	1	0,001163	0,0298970
10	21	10,0	1	0,0010	0,0268919

Приводим также формулы безмерных функций

$X(\xi)$, $F(\xi)$, $B(\xi)$, $\Omega(\xi)$ и $\Lambda(\xi)$

для некоторых сечений каналов.

Для прямоугольного сечения (рис. 59)

Основной размер — ширина по дну b :

$$X(\xi) = \frac{\chi}{b} = (1 + 2\xi); \quad F(\xi) = \frac{\omega}{b^2} = \xi; \quad B(\xi) = \frac{B}{b} = 1; \quad (131)$$

$$\Omega(\xi) = \frac{B(\xi)}{F(\xi)^3} = \frac{1}{\xi^3}; \quad (132)$$

$$\Lambda(\xi) = \frac{X(\xi)^{4/3}}{F(\xi)^{10/3}} = \frac{(1+2\xi)^{4/3}}{(\xi)^{10/3}}. \quad (133)$$

Для трапециoidalного сечения (рис. 60)

Основной размер — ширина по дну b :

$$X(\xi) = 1 + 2\xi \sqrt{1 + m^2}, \quad (134)$$

где $m = \operatorname{ctg} \varphi$;

$$F(\xi) = \xi + m\xi^2; \quad (135)$$

$$B(\xi) = F^1(\xi) = 1 + 2m\xi; \quad (136)$$

$$\Omega(\xi) = \frac{1 + 2m\xi}{(\xi + m\xi^2)^3} \quad (137)$$

$$\Lambda(\xi) = \frac{(1 + 2\xi\sqrt{1 + m^2})^{4/3}}{(\xi + m\xi^2)^{10/3}} \quad (138)$$

Для круглого сечения (рис. 61)

Ввиду громоздкости формул приводится только табл. 60 (см. стр. 86).
Основной размер $b = D$ (диаметр).

Для оvoidального сечения (рис. 62)

так же, как и для круглого сечения, приводится только табл. 61 (см. стр. 87).

Основной размер радиуса построения r (рис. 62).

Вычисления и решение дифференциального уравнения в этом случае надо вести по формуле:

$$ds = \frac{3r}{i} \left[\frac{1 - \frac{\Omega(\xi)}{\Omega(\xi_{кр})}}{1 - \frac{\Lambda(\xi)}{\Lambda(\xi_{нор})}} \right] d\xi, \quad (139)$$

где $\xi = \frac{h}{3r}$.

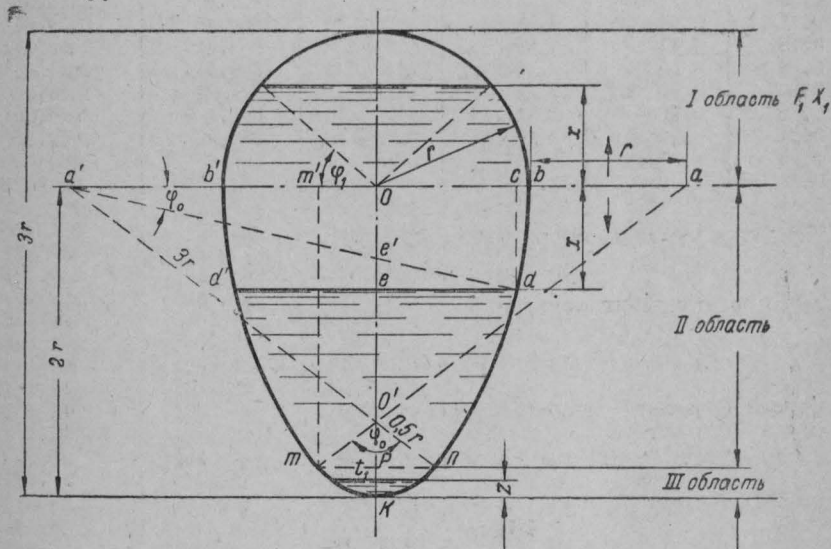


Рис. 62. Оvoidальное сечение.

Каналы сложных профилей

Для каналов, имеющих сложный или редко употребляющийся профиль сечения, выражающийся математически сложными формулами, возможно и удобно пользоваться графо-аналитическим приемом подсчета безразмерных функций. Этот графо-аналитический метод состоит в следующем:

- 1) вычерчивают в достаточно большом масштабе профиль сечения;
- 2) разделяют профиль по высоте на части, деля высоту профиля на 10 или 20 частей, в зависимости от желаемой точности;

Таблица безразмерных функций $X(\xi)$, $F(\xi)$, $B(\xi)$, $\Omega(\xi)$ и $\Lambda(\xi)$
для круглого сечения (рис. 61)

ξ	$X(\xi)$	$F(\xi)$	$B(\xi)$	$\Omega(\xi)$	$\Lambda(\xi)$
0,050	0,4510755	0,0149311	0,435890	130949,0	455714,0
0,055	0,43450	0,0169412	0,4559605	93942,8	296078,0
0,060	0,491985	0,0192451	0,4749737	66636,0	204985,0
0,065	0,515615	0,0216592	0,493052	48525,0	145991,0
0,070	0,535525	0,0241682	0,510294	36148,3	105729,0
0,075	0,554805	0,026760	0,526783	27489,9	79536,0
0,080	0,5735395	0,0294391	0,542864	21277,5	60488,0
0,085	0,591689	0,0321863	0,557763	16727,3	46333,3
0,090	0,609335	0,03449992	0,572364	13350,5	37694,0
0,095	0,626445	0,0379074	0,586430	10765,8	29305,5
0,10	0,64496	0,0408740	0,6000	8786,38	23618,7
0,11	0,676131	0,0470045	0,625780	6025,64	15871,3
0,12	0,707485	0,0533858	0,649923	4271,54	11003,7
0,13	0,737416	0,0599458	0,672707	3122,84	7902,91
0,14	0,766840	0,0667958	0,693974	2328,60	5803,64
0,15	0,795403	0,0738512	0,714141	1773,01	4361,05
0,16	0,823044	0,0811151	0,733412	1373,80	3338,53
0,17	0,849975	0,0885919	0,751266	1080,47	2599,91
0,18	0,876301	0,0961103	0,768375	855,492	2062,07
0,19	0,902054	0,1039065	0,784602	699,515	1651,65
0,20	0,927295	0,111829	0,8000	527,2133	1343,66
0,22	0,976410	0,128114	0,828443	393,979	914,501
0,24	1,02395	0,144945	0,854166	280,50	640,755
0,26	1,07014	0,162813	0,877268	203,266	464,410
0,28	1,11520	0,180020	0,897998	153,927	351,075
0,30	1,15928	0,198168	0,916570	117,778	263,425
0,32	1,20254	0,216669	0,932952	91,721	209,480
0,34	1,24507	0,235473	0,947418	72,5635	166,132
0,36	1,28695	0,254538	0,9600	58,2121	133,962
0,38	1,328447	0,273865	0,970773	47,2615	102,479
0,40	1,369439	0,293462	0,979796	38,7686	90,5491
0,42	1,410105	0,313042	0,987117	32,1781	75,9957
0,44	1,450506	0,332848	0,992774	26,9223	64,3141
0,46	1,490710	0,352742	0,996795	22,7104	54,9172
0,48	1,530785	0,372704	0,99920	19,3001	47,3520
0,50	1,570796	0,392699	1,00	16,5123	41,1744
0,52	1,610807	0,412694	0,99920	14,2157	36,9231
0,54	1,650883	0,432656	0,996795	12,3077	31,8528
0,56	1,691086	0,452650	0,992774	10,7115	28,3188
0,58	1,731488	0,472356	0,987117	9,36614	25,3315
0,60	1,772154	0,491936	0,979796	8,23019	22,8195
0,62	1,813146	0,511533	0,970773	7,25265	20,6547
0,64	1,854640	0,530868	0,9600	6,41670	18,8130
0,66	1,896526	0,549925	0,947418	5,69956	17,2293
0,68	1,939655	0,568729	0,932952	5,07158	15,8659
0,70	1,983313	0,581220	0,916570	4,52651	14,6857
0,72	2,026395	0,605378	0,897998	4,04758	13,6629
0,74	2,071452	0,622585	0,877218	3,63506	12,8154
0,76	2,117647	0,640453	0,854166	3,25148	12,0047
0,78	2,165183	0,657255	0,828423	2,91777	11,3480
0,80	2,214298	0,673375	0,8000	2,61778	10,7336
0,82	2,265292	0,689288	0,768375	2,34623	10,2850

ξ	$X(\xi)$	$F(\xi)$	$E(\xi)$	$\Omega(\xi)$	$\Delta(\xi)$
0,84	2,318549	0,704283	0,733212	2,09888	9,87334
0,86	2,374752	0,718602	0,693974	1,87016	9,53233
0,88	2,434107	0,732012	0,649923	1,65694	9,27244
0,90	2,498077	0,744524	0,60000	1,45384	8,93603
0,92	2,568053	0,755959	0,542586	1,25596	8,93603
0,94	2,646608	0,766153	0,474974	1,05614	8,88930
0,96	2,738833	0,772551	0,391918	0,84999	9,05732
0,98	2,857797	0, 81649	0,28000	0,586304	9,21877
1,00	3,141593	0,785398	0,000	0,000	10,2936

Таблица 61

Таблица безразмерных функций $X(\xi)$, $F(\xi)$, $B(\xi)$, $\Omega(\xi)$ и $\Delta(\xi)$
для овоидального сечения (рис. 62)

ξ	$X(\xi)$	$F(\xi)$	$B(\xi)$	$\Omega(\xi)$	$\Delta(\xi)$
0,06637	0,9268534	0,111280	0,800	580,505	1,363404
0,07	0,9524940	0,120373	0,814936	463,07	1,077445
0,08	1,0263804	0,144676	0,858972	283,65	651,170
0,09	1,0996957	0,170810	0,901877	173,241	410,539
0,10	1,173724	0,198778	0,943682	120,15	269,9625
0,11	1,2463746	0,228575	0,984416	82,431	183,8380
0,12	1,3177356	0,257839	1,024102	59,744	132,4166
0,13	1,3841086	0,289217	1,062666	43,926	96,8804
0,14	1,4596953	0,321588	1,10432	33,087	72,68593
0,15	1,5302736	0,355142	1,137120	25,386	55,59280
0,16	1,6001154	0,389717	1,172968	19,817	43,18676
0,17	1,6694754	0,425514	1,207650	15,675	34,17643
0,18	1,7383746	0,462248	1,241526	12,570	27,38589
0,19	1,8068460	0,499999	1,274504	10,173	22,18166
0,20	1,8748992	0,538729	1,306600	8,3624	18,17200
0,21	1,9425312	0,578385	1,337828	6,9144	15,03514
0,22	2,0097840	0,618880	1,368352	5,7714	12,55580
0,23	2,0766336	0,66430	1,397740	4,8521	10,56092
0,24	2,1431754	0,702705	1,426654	4,1210	8,45709
0,25	2,2093354	0,746029	1,454356	3,5027	7,64149
0,26	2,2762816	0,791033	1,480146	2,9903	6,541223
0,27	2,3407638	0,835019	1,507776	2,5897	5,664118
0,28	2,4059166	0,880551	1,533318	2,2458	4,930441
0,29	2,4708294	0,926921	1,558094	1,9564	4,301774
0,30	2,535496	0,974026	1,582114	1,7121	3,774337
0,32	2,6639100	1,070341	1,627034	1,3299	2,94496
0,34	2,7913428	1,169293	1,670836	1,0451	2,38491
0,36	2,9178696	1,27079	1,710918	0,83370	1,87679
0,38	3,0435288	1,374572	1,748164	0,67171	1,52886
0,40	3,1684032	1,480512	1,782732	0,54935	1,458193
0,42	3,2925624	1,588442	1,814604	0,45276	1,047469
0,44	3,4160771	1,698213	1,843834	0,37665	0,8809136
0,46	3,5390130	1,809674	1,870468	0,31488	0,7467519
0,48	3,6613902	1,922614	1,894540	0,26658	0,6385880

ξ	$X(\xi)$	$F(\xi)$	$B(\xi)$	$\Omega(\xi)$	$\Delta(\xi)$
0,50	3,7833120	2,036948	1,916080	0,22679	0,5502530
0,52	3,9051144	2,152946	1,935116	0,19391	0,4772373
0,54	4,0259446	2,269102	1,951672	0,16705	0,4171677
0,56	4,1467800	2,386647	1,965768	0,14459	0,3667084
0,58	4,2673176	2,504916	1,977424	0,12581	0,3250258
0,60	4,387708	2,623889	1,986652	0,10997	0,287415
0,62	4,507890	2,743261	1,993526	0,096565	0,2576588
0,64	4,6279812	2,863057	1,997866	0,085120	0,2332548
0,66	4,7480010	2,993003	1,999866	0,074007	0,2065336
0,6667	4,7880	3,023	2,00	0,072396	0,202078
0,67	4,8080007	3,04299983	1,999900	0,0709740	0,198736
0,68	4,862013	3,01297866	1,99839936	0,066876	0,189324
0,69	4,9281146	3,16288558	1,99509398	0,0630540	0,180563
0,70	4,9883348	3,22266614	1,98997488	0,0594823	0,172426
0,71	5,048738	3,28226581	1,98308798	0,0560816	0,164815
0,72	5,1093814	3,34162942	1,9740342	0,0529181	0,157748
0,73	5,173242	3,40070107	1,96356818	0,0499272	0,151167
0,74	5,2316290	3,45942447	1,9509974	0,0474510	0,146166
0,75	5,2933606	3,51774076	1,93649168	0,0444860	0,139347
0,76	5,3555882	3,57569410	1,920	0,0420007	0,134045
0,77	5,4183860	3,63292133	1,90147312	0,0396372	0,129114
0,78	5,4818338	3,68966155	1,88085088	0,0374450	0,124531
0,79	5,5460180	3,74575074	1,8580635	0,0353544	0,120276
0,80	5,6110336	3,80112285	1,83303028	0,0333759	0,116328
0,81	5,6769856	3,85570922	1,80565778	0,0315008	0,112670
0,82	5,7439904	3,9094370	1,77583734	0,0297207	0,109284
0,83	5,8121796	3,97223379	1,74344486	0,0280277	0,106166
0,84	5,8817018	4,01401735	1,70833252	0,0264140	0,103294
0,85	5,9527284	4,06470475	1,6703293	0,02487722	0,100660
0,86	6,0254574	4,11420625	1,62923284	0,0233950	0,098277
0,87	6,1001212	4,16242546	1,58480282	0,0219753	0,095793
0,88	6,1769970	4,20925844	1,53674982	0,0206066	0,0941206
0,89	6,2564176	4,25459074	1,4847222	0,0192784	0,0923794
0,90	6,3387950	4,29829748	1,42828568	0,0179856	0,0908561
0,91	6,4216440	4,34023841	1,36689428	0,0167184	0,0894998
0,92	6,5146262	4,38025463	1,29984614	0,0154661	0,0884775
0,93	6,6096180	4,41816340	1,22621368	0,0142179	0,0876521
0,94	6,7108220	4,45374908	1,14472704	0,0129575	0,087086
0,95	6,8199706	4,48675058	1,05356538	0,0116644	0,0868167
0,96	6,9397244	4,51683904	0,94984736	0,0103085	0,0868975
0,97	7,0745682	4,5436761	0,82921650	0,00884044	0,0864192
0,98	7,2332606	4,56633427	0,68234888	0,00716643	0,0855564
0,99	7,4384616	4,58354256	0,48620982	0,00500431	0,0907765
1,00	7,9295926	4,59379630	0,000	0,000	0,0981210

3) подсчитывают для различных величин наполнения, начиная с минимальной величины: а) χ — смоченный периметр, б) ω — площадь, в) B — ширину по урзу воды;

4) полученные величины, в зависимости от выбора основного размера (диаметра, ширины по дну и пр.), делят на основной размер b или b^2 , причем:

по $\frac{\chi}{b}$ получают функцию безразмерного смоченного периметра $X(\xi)$;

по $\frac{\omega}{b^2}$ получают безразмерную функцию $F(\xi)$;

по $\frac{B}{b}$ получают безразмерную функцию $B(\xi)$;

по $\frac{h}{b}$ получают условную величину степени наполнения ξ ;

5) вычисляют безразмерные функции $\Omega(\xi)$ и $\Lambda(\xi)$:

$$\Omega(\xi) = \frac{B(\xi)}{F(\xi)^3};$$

$$\Lambda(\xi) = \frac{X(\xi)^{4,8}}{F(\xi)^{10,3}}.$$

Таким образом можно производить расчет каналов при неравномерном движении для любых профилей сечения каналов, а так как в вышеприведенные формулы, кроме того, входит коэффициент шероховатости из формулы Маннинга n , то и при любых степенях шероховатости.

В. Способ интегрирования уравнения неравномерного движения в призматических каналах

Для интегрирования уравнения неравномерного движения в призматических каналах можно пользоваться правилом трапеций и правилом Симпсона.

1. Формула трапеции:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2n} (y_0 + 2y_1 + 2y_2 + \dots + 2y_{n-1} + y_n), \quad (140)$$

где n — число частей, на которые разбивается интервал $(b-a)$

2. Формула Симпсона:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{b-a}{2n} (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + \dots + 4y_{n-1} + y_n). \quad (141)$$

Формула трапеций позволяет получить непосредственно профиль сечения.

Формула Симпсона дает только конечное значение интеграла, хотя и имеет большую точность, чем правило трапеций.

Применение правил интегрирования проще всего усвоить на решении примера, приводимого ниже.

Для сокращения письма введем обозначения:

$$\frac{1}{\Omega(\xi_{кр})} = e \text{ и } \frac{1}{\Lambda(\xi_{нор})} = p, \quad (142)$$

тогда основное уравнение неравномерного движения принимает вид:

$$ds = \frac{b}{i} \left(\frac{1-e\Omega(\xi)}{1-p\Lambda(\xi)} \right) d\xi. \quad (143)$$

Пример. Жидкость поступает в водоем из канала с перепадом. Канал — кирпичный круглого сечения, диаметром $D=1,0$ м, с уклоном дна $i=0,001$. Расход жидкости $Q=700$ л/сек $=0,7$ м³/сек. Коэффициент шероховатости, по Маннингу, принят $n=0,014$.

Решение. Так как жидкость поступает с перепадом, то на конце канала устанавливается критическое состояние потока.

1. Сначала определяем величину $\Omega(\xi_{кр})$, т. е. функцию $\Omega(\xi)$ при критическом состоянии потока, по формуле:

$$\Omega(\xi_{кр}) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{g \cdot b^5}{Q^2} = \frac{1}{e}. \quad (144)$$

Принимая $\alpha = 1,1$, получим:

$$\Omega(\xi_{кр}) = \frac{9,81 \times 1,0^5}{1,1 \times 0,70^2} = 18,2 = \frac{1}{e}. \quad (145)$$

После этого по таблице величин функций для круглого сечения (табл. 60) получаем соответствующую величину наполнения:

$$\xi_{кр} = 0,489 \text{ (по интерполяции)}$$

Далее определяем величину функции $\Lambda(\xi_{нор})$, т. е. величину функции $\Lambda(\xi)$ при нормальном состоянии потока:

$$\Lambda(\xi_{нор}) = \frac{i \cdot b^{10/3}}{n^2 Q^2};$$

$$\Lambda(\xi) = \frac{0,001 \times 1,0^{10/3}}{0,014^2 \times 0,72} = 10,417.$$

Нормальная степень наполнения $\xi_{нор}$ находится по табл. 60; по величине функции $\Lambda(\xi_{нор}) = 10,417$ $\xi_{нор} = 0,814$.

Решение сводим в таблицу (табл. 62).

В графу 1 табл. 62 вносятся величины ξ с интервалами, примерно равными 0,04. К концу столбца эти интервалы уменьшаются вдвое для получения более точных результатов.

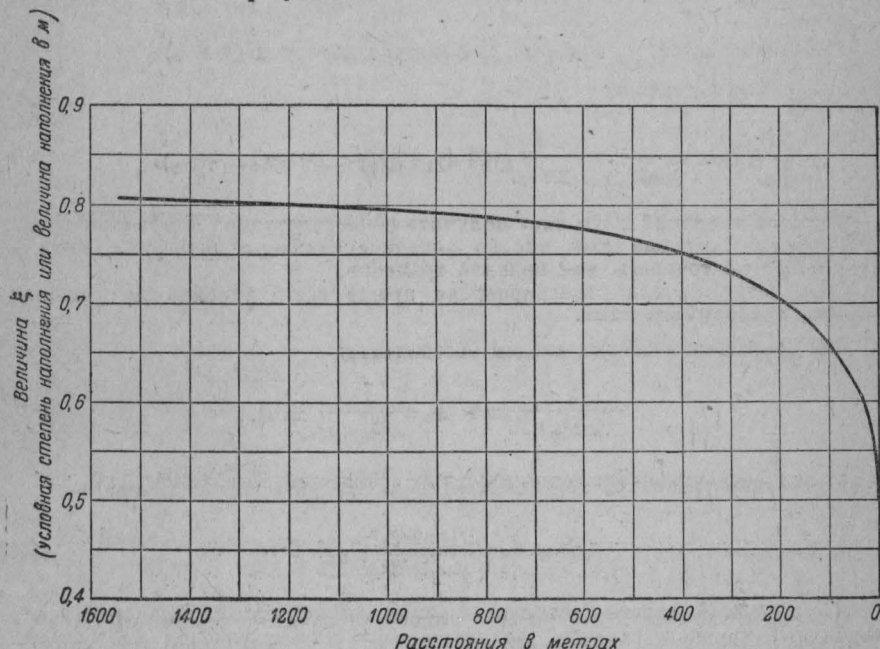


Рис. 63. Кривая спада (к примеру на неравномерное движение).

Таблица 62

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ξ	$\Omega(\xi)$	$e\Omega(\xi)$	$1-e\Omega(\xi)$	$\Delta(\xi)$	$p\Delta(\xi)$	$1-p\Delta(\xi)$	K	K_{cp}	$K_{cp}\Delta(\xi)$	ΔS	$S=\Sigma\Delta S$	Округ- ленные значения S	ξ_{cp}
0,49	17,9065	0,9835	0,0165	44,2032	4,23	-3,23	0,00512						
0,52	14,2157	0,780	0,220	36,9231	3,53	-2,53	0,0870	0,09212	0,0027636	2,77	2,77	3	0,505
0,56	10,7115	0,597	0,403	28,3138	2,72	-1,72	0,235	0,161	0,00644	6,44	9,21	9	0,54
0,60	8,23019	0,450	0,550	22,8195	2,19	-1,19	0,463	0,349	0,01396	13,96	23,17	23	0,58
0,64	5,69956	0,311	0,689	17,2293	1,65	-0,65	1,060	0,7615	0,03046	30,46	53,63	54	0,62
0,68	5,07158	0,278	0,722	15,8659	1,52	-0,52	1,390	1,225	0,0490	49,0	102,63	103	0,66
0,72	4,04758	0,221	0,779	13,6629	1,31	-0,31	2,51	1,915	0,0766	76,6	179,23	179	0,70
0,76	3,25148	0,177	0,823	12,0047	1,15	-0,15	5,496	4,00	0,1600	160	339,23	339	0,74
0,78	2,91777	0,160	0,840	11,3480	1,09	-0,09	9,34	7,40	0,1540	154	493,23	493	0,77
0,80	2,61778	0,143	0,857	10,7336	1,03	-0,03	28,57	18,955	0,3791	379,1	872,33	872	0,79
0,81	2,4820	0,136	0,864	10,5093	1,0086	-0,0086	100,0	64,285	0,64285	640,85	1515,18	1515	0,805

В графу 2 вносятся величины $\Omega(\xi)$, которые берутся из табл. 60; в графу 3 вносятся величины $e\Omega(\xi) = \frac{\Omega(\xi)}{\Omega(\xi_{кр})} = \frac{\Omega(\xi)}{18,2}$; в графу 4 вносятся величины $1 - e\Omega(\xi)$; в графу 5 вносятся величины $\Lambda(\xi)$; в графу 6 вносятся величины $p\Lambda(\xi) = \frac{\Lambda(\xi)}{\Lambda(\xi_{нор})} = \frac{\Lambda(\xi)}{0,814}$; в графу 7 вносятся величины $1 - p\Lambda(\xi)$; в графу 8 вносятся величины K ; $K = \frac{1 - e\Omega(\xi)}{1 - p\Lambda(\xi)}$; в графу 9 вносятся величины K_{cp} (между двумя значениями); в графу 10 вносятся величины $K_{cp}\Delta(\xi)$; в графу 11 вносятся величины $\Delta s = \frac{b}{i} K_{cp}\Delta(\xi)$; [в нашем случае $\Delta s = \frac{1}{0,001} K_{cp}\Delta(\xi)$]; в графу 12 вносятся величины S расстояния от начальной точки: $S = \sum \Delta S$, и, наконец, в графу 13 вносятся округленные значения S ; в графу 14 вносятся соответствующие (средние) значения величины $\xi = \frac{h}{b}$ (условная величина степени наполнения).

Характер кривой спада приводится на графике рис. 63, построенном по данным табл. 62.

Величины наполнения в метрах могут быть определены по формуле: $h = \xi b$.

О П Е Ч А Т К И

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
62	Подпись под рис. 51	(футы)	(метры)	Автора
87	Табл. 61, гра- фа 6, строка 1 и 2	1,363404 1,077445	1363,404 1077,445	Типографии

Проф. Лобачев В. Г.