

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

## ГИДРАВЛИКА

Методические указания для решения задач по гидравлике

Часть II

Гидродинамика

Составители В.А. Каныгин, Е.В. Цветкова



© Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Волгоградский государственный  
архитектурно-строительный университет», 2013

Волгоград  
ВолгГАСУ  
2013

УДК 532 (0758)  
ББК 22.235.3я73  
Г 464

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ *С.М. Мусаелян*

**Г 464 Гидравлика** [Электронный ресурс] : методические указания для решения задач по гидравлике. Ч. II. Гидродинамика / М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т ; сост. В.А. Каныгин, Е.В. Цветкова. — Электронные текстовые и графические данные (124 Мбайт). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2013. — Учебное электронное издание комбинированного распространения : 1 CD-диск. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; 2-скоростной дисковод CD-ROM; Adobe Reader 6.0. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

В методических указаниях приводятся краткие теоретические сведения и алгоритмы решения основных типов задач по гидродинамике. Методические указания включают в себя 41 задачу по основным темам курса.

Для студентов специальностей ПГС, ПСК, ТГВ дневной формы обучения.

**УДК 532 (0785)**  
**ББК 22.253.3я73**

Нелегальное использование данного продукта запрещено

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Уравнение Бернулли и правила его применения	4
2. Определение потерь напора по длине	5
3. Определение потерь напора на местных сопротивлениях	8
4. Построение напорной и пьезометрической линий	9
5. Задачи на применение уравнения Бернулли без учета потерь напора	12
6. Задачи на определение режима течения	17
7. Задачи на применение уравнения Бернулли с учетом потерь напора	18
8. Расчет тупиковых (разветвленных) водопроводных сетей	23
9. Приложения	26
Библиографический список	33

## 1. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ И ПРАВИЛА ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Уравнение Бернулли, составленное для двух расчетных сечений потока вязкой жидкости, имеет вид

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_w \quad (1.1)$$

где  $z$  – геометрическая высота или расстояние от горизонтальной плоскости сравнения 0 – 0 до центра тяжести сечения по вертикали;

$P$  – давление,  $\frac{P}{\rho g}$  – пьезометрическая высота;  $z + \frac{P}{\rho g}$  – пьезометрический

напор;  $V$  – средняя скорость в сечении;  $\frac{\alpha V^2}{2g}$  – скоростной или динамический

напор;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, для течения в трубе можно принимать  $\alpha = 1$ ;  $h_w = h_l + \sum h_M$  – общая потеря напора;  $h_l$  – потеря напора по длине;

$\sum h_M$  – потеря напора на местных сопротивлениях.

С энергетической точки зрения уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии в потоке движущейся жидкости.

Геометрическая высота выражает удельную потенциальную энергию положения, пьезометрическая высота – удельную потенциальную энергию давления, пьезометрический напор – полную удельную потенциальную энергию, скоростной напор – удельную кинетическую энергию жидкости. Сумма пьезометрического и скоростного напора дает полный напор, выражающий полную удельную энергию движущейся жидкости в данном сечении. Потеря напора – это потеря удельной энергии между сечениями 1 – 1 и 2 – 2.

Для того чтобы применить уравнение Бернулли для решения задачи следует, во-первых, выбрать два сечения и, во-вторых, горизонтальную плоскость сравнения 0 – 0.

Расчетные сечения выбираются так, чтобы движение в них было плавноизменяющимся, т.е. с незначительной кривизной линий тока.

Одно из расчетных сечений выбирается там, где неизвестны либо скорость  $V$ , либо давление  $P$ , либо координата  $z$ , а другое выбирается так, чтобы были известны и  $z$  и  $P$  и  $V$ .

Нумеровать сечения нужно так чтобы жидкость двигалась от первого сечения ко второму, иначе теряется знак потери напора.

Плоскость сравнения выбирается так, чтобы размеры  $z_1$  и  $z_2$  находились в положительной полуплоскости.

Если в уравнение Бернулли входит ряд неизвестных скоростей, применяют уравнение постоянства расхода. Для напорных труб круглого сечения оно примет вид

$$V_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = V_2 \frac{\pi d_2^2}{4} \quad (1.2)$$

Или

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (1.3)$$

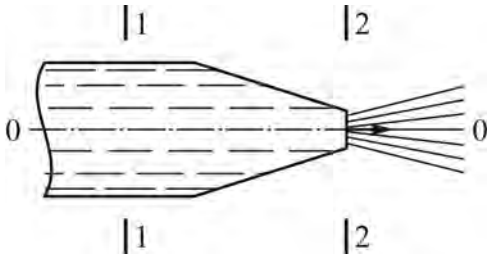


Рис. 1.1

Пример 1. Определить давление  $P_1$  в сечении 1 — 1 горизонтально расположенного сопла гидромонитора (рис. 1.1) необходимое для придания скорости воде в выходном сечении 2 — 2  $V_2 = 40$  м/с если скорость движения воды в сечении 1 — 1  $V_1 = 36$  м/с. Определить диаметр сопла

монитора  $d_2$  если  $d_1 = 100$  мм.

Решение. Плоскость сравнения 0 — 0 следует провести через ось сопла. За расчетные сечения выбираем сечения 1 — 1 в подводящей трубе и 2 — 2 на выходе из сопла. Геометрические высоты сечений  $z_1 = z_2 = 0$  и уравнение Бернулли принимает вид

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g}$$

Давление в сечении 2 — 2 атмосферное, а значит избыточное  $P_2 = 0$ . Коэффициент Кориолиса примем равным  $\alpha = 1$ . Выразим искомое давление  $P_1$

$$P_1 = P_2 + \rho g \left( \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

$$P_1 = 0 + 1000 \cdot 9,81 \left( \frac{40^2}{2 \cdot 9,81} - \frac{3,6^2}{2 \cdot 9,81} \right) = 793520 \text{ Па} = 793,5 \text{ кПа}$$

Диаметр сопла монитора выразим из уравнения непрерывности

$$d_2 = \sqrt{d_1^2 \frac{V_1}{V_2}} = \sqrt{0,1^2 \frac{3,6}{40}} = 0,03 \text{ м}$$

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Суммарная потеря напора  $h_w$  складывается из потерь напора по длине  $h_l$  и потерь напора на местных сопротивлениях  $\sum h_M$ .

$$h_w = h_l + \sum h_M \quad 2.1$$

Потери напора по длине определяются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_l = \lambda \frac{l V^2}{d 2g} \quad 2.2$$

где  $h_l$  — потеря напора в метрах столба той жидкости, движение которой рассматривается.

$\lambda$  — коэффициент Дарси или коэффициент гидравлического трения.

Коэффициент  $\lambda$  зависит от многих факторов. В общем виде

$$\lambda = f(R_e, \bar{\Delta}) \quad 2.3$$

где  $R_e$  — число Рейнольдса, которое определяется по формуле

$$R_e = \frac{Vd}{\nu}; \quad 2.4$$

$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d}$  — относительная шероховатость стенок трубы;

$\nu$  — кинетическая вязкость жидкости;

$\Delta$  — эквивалентная шероховатость, то есть высота воображаемых выступов на внутренней поверхности трубы, при которой потери напора получаются такими же как в реальных условиях.

Величины  $R_e$  и  $\bar{\Delta}$  безразмерные.

Зависимость  $\lambda = f(R_e, \bar{\Delta})$  изображают в виде графика сопротивлений (рис. 2.1), на котором можно выделить четыре зоны:

1) зона ламинарного течения ( $R_e < 2320$ ).

В этой зоне  $\lambda$  зависит только от числа  $R_e$  и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \quad 2.5$$

Область турбулентного течения разбивается на три зоны:

2) зона гидравлически гладких труб. Здесь также  $\lambda = f(R_e)$ . Определить  $\lambda$  можно по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{R_e^{0,25}} \quad 2.6$$

3) до квадратичная зона сопротивления. Здесь  $\lambda = f(R_e, \bar{\Delta})$ ; для этой зоны рекомендуется формула Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \bar{\Delta} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad 2.7$$

4) квадратная зона, называется также зоной вполне развитой турбулентности или зоной совершенной шероховатости. Коэффициент  $\lambda$  зависит только от относительной шероховатости и не зависит от числа Рейнольдса  $\lambda = f(\bar{\Delta})$ .

Для определения  $\lambda$  используется формула Шифринсона

$$\lambda = 0,11 (\bar{\Delta})^{0,25} \quad 2.8$$

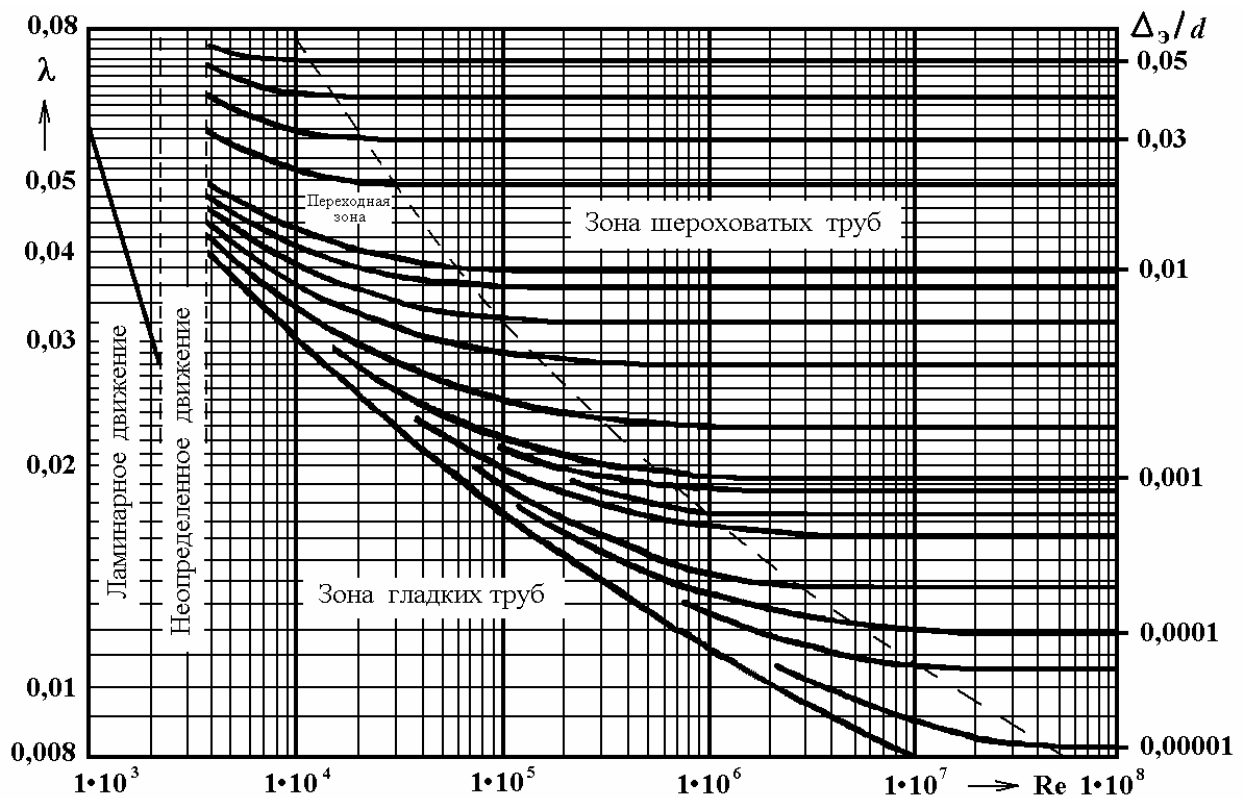


Рис. 2.1

Определить к какой зоне графика сопротивлений относится течение жидкости, в рассматриваемой задаче, можно приближенно, сравнивая число Рейнольдса с его граничными значениями.

При  $Re < 2320$  течение ламинарное, имеем первую зону.

При  $4000 \leq Re < Re'_{гр}$  получаем зону гидравлически гладких труб. Здесь  $Re'_{гр} = 10/\bar{\Delta}$ . При  $Re'_{гр} < Re < Re''_{гр}$  имеем до квадратичную зону и пользуемся формулой Альтшуля. Здесь  $Re''_{гр} = \frac{500}{\bar{\Delta}}$ .

При  $Re > Re''_{гр}$  имеем квадратичную область сопротивления и пользуемся формулой Шифринсона.

Если в задаче заданы расход жидкости и диаметр трубопровода, легко найти скорость течения

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2}; \quad 2.9$$

Рассчитать число Рейнольдса и выбрать формулу для определения  $\lambda$ .

В тех случаях когда расход (или скорость) еще только предстоит определить, делается предположение, что течение происходит в квадратичной зоне и коэффициент  $\lambda$  находится по формуле Шифринсона. После нахождения скорости следует определить число  $R_e$  и проверить правильность сделанного предположения. Если расхождение велико, расчет повторяют вычисляя  $\lambda$  по формуле Альтшуля, используя полученное значение  $R_e$ .

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА НА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Местным сопротивлением называется любое изменение формы стенок трубопровода, приводящее к изменению скорости течения по величине и (или) направлению. К местным гидравлическим сопротивлениям относятся изменения диаметров труб, повороты (отводы), краны, вентили, задвижки, диафрагмы и т.д.

Потеря напора на местном сопротивлении вычисляется по формуле Вейсбаха

$$h_M = \zeta \frac{V^2}{2g}; \quad 3.1$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления.

Значение  $\zeta$  не поддается теоретическому определению, поэтому его находят по справочным данным, составленным по результатам экспериментов (прил. II). Исключением является коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении потока. Он определяется по формуле Борда

$$\zeta_{\text{вн.р}} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2; \quad 3.2$$

или для труб

$$\zeta_{\text{вн.р}} = \left( \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 1 \right)^2; \quad 3.3$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – площади живых сечений соответственно до и после расширения.

Если скорости до и после местного сопротивления не одинаковы, принято в формулу  $h_M$  подставлять скорость за сопротивлением. Исключением



является истечение струи под уровень жидкости в большой резервуар. При этом полностью теряется скоростной напор, имевшийся в трубе. Коэффициент сопротивления в этом случае принимается  $\zeta_{\text{вых}} = 1$  и берется скорость течения в трубе до выхода.

#### 4. ПОСТРОЕНИЕ НАПОРНОЙ И ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛИНИЙ

Напорной линией, или линией энергии, называется график изменения полного напора вдоль потока. Из уравнения Бернулли следует, что полный напор изменяется только за счет потерь по длине и на местных сопротивлениях. Поэтому напорная линия вдоль потока всегда понижается.

Пьезометрической линией называется график изменения пьезометрического напора вдоль потока. Поскольку пьезометрический напор отличается от полного на величину скоростного напора, пьезометрическая линия всегда располагается ниже напорной на расстоянии, равном  $\frac{v^2}{2g}$ .

Решая задачи, по условию которых требуется построить напорную и пьезометрическую линии, целесообразно начинать построение с напорной линии и строить ее по течению. При этом начало напорной линии всегда будет в точке, соответствующей полному напору перед входом в трубопровод. Пьезометрическую линию лучше строить против течения, начиная с точки, соответствующей пьезометрическому напору за концом трубопровода.

Пример 2.2. Из сосуда *M* в сосуд *N* вода, температура которой 18 °С, перетекает по трубопроводу (рис. 4.1), состоящему из двух участков, характеристика которых приведена в таблице.

	<i>d</i> , мм	$\Delta$ , мм
Участок <i>a</i>	75	0,4
Участок <i>б</i>	110	0,4

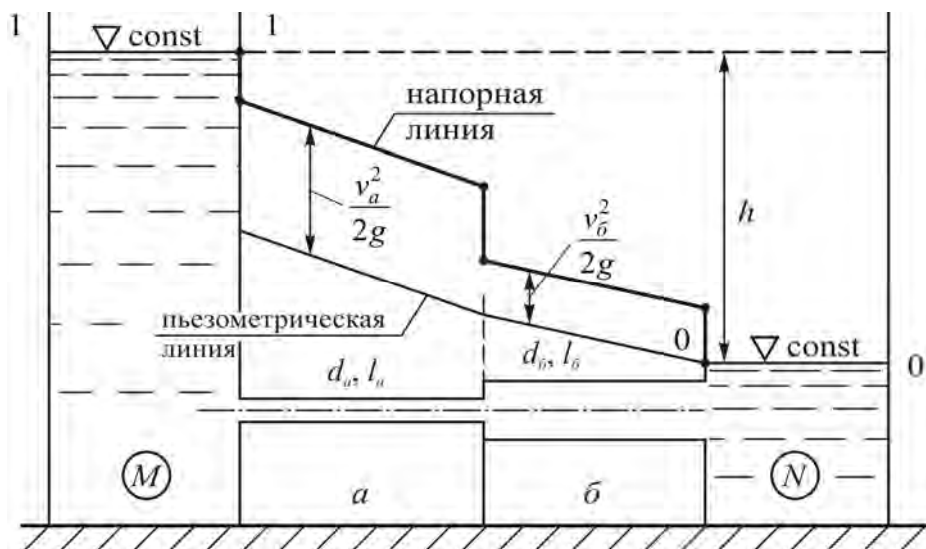


Рис. 4.1

Определить, при какой разнице уровней в сосудах  $h$  расход  $Q = 9$  л/с. Построить напорную и пьезометрические линии. При решении задачи отметки уровней в сосудах считать постоянными.

Решение. Применим уравнение Бернулли. Сечение 1 – 1 проведем по уровню воды в сосуде  $M$ , сечение 2 – 2 по уровню воды в сосуде  $N$ . Плоскость сравнения совместим с сечением 2 – 2. Тогда  $z_1 = h$ ,  $z_2 = 0$ ,  $P_1 = P_2 = P_{ат}$ ,  $V_1 = 0$ ,  $V_2 = 0$  и уравнение Бернулли примет вид

$$h = h_w.$$

Потеря напора складывается из потерь на вход, на внезапное расширение трубопровода, на выход и потерь по длине.

$$h = h_{вх} + h_{вн.р} + h_{вых} + h_{lа} + h_{lб}, \quad 3.1$$

$$\text{где } h_{вх} = \zeta_{вх} \frac{V_a^2}{2g}; \quad h_{вн.р} = \zeta_{вн.р} \frac{V_б^2}{2g}; \quad h_{вых} = \zeta_{вых} \frac{V_б^2}{2g}; \quad h_{lа} = \lambda_a \frac{l_a V_a^2}{d_a 2g};$$

$$h_{lб} = \lambda_б \frac{l_б V_б^2}{d_б 2g}.$$

Найдем скорости течения. Если расход задается в л/с, то для уменьшения объема вычислений рекомендуется диаметр выражать в дм. При этом скорость получается в дм/с и для перехода в м/с нужно результат разделить на 10.

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad \omega = 0,785d^2.$$

$$V_a = \frac{9}{0,785 \cdot 0,75^2} = 20,4 \text{ дм/с} = 2,04 \text{ м/с}.$$

$$V_б = \frac{9}{0,785 \cdot 1^2} = 11,5 \text{ дм/с} = 1,15 \text{ м/с}.$$

Теперь вычислим числа Рейнольдса, причем скорость выразим в см/с, диаметры – в см, а кинематический коэффициент вязкости – в стоксах (см<sup>2</sup>/с). Он определяется по прил. I в зависимости от температуры.

$$Re_a = \frac{204 \cdot 7,5}{0,0106} = 144340,$$

$$Re_б = \frac{115 \cdot 10}{0,0106} = 108490.$$

Полученные числа сравним с граничными значениями  $Re''_{гр}$ :

$$R_{e \text{ гр,а}}'' = \frac{560 \cdot 75}{0,4} = 105000,$$

$$R_{e \text{ гр,б}}'' = \frac{560 \cdot 100}{0,4} = 140000.$$

Наличие зоны гидравлических гладких труб исключается, т.к.  $\bar{\Delta} > 0,001$ .

На участке а  $R_{eа} > R_{e \text{ гр,а}}''$ , имеем квадратичную зону, определяем  $\lambda$  по (2-8):

$$\lambda_a = 0,11 \left( \frac{0,4}{75} \right)^{0,25} = 0,030$$

На участке б  $R_{eб} > R_{e \text{ гр,б}}''$  имеем переходную зону, определяем  $\lambda$  по (2-7):

$$\lambda_b = 0,11 \left( \frac{0,4}{100} + \frac{68}{108490} \right)^{0,25} = 0,026.$$

Коэффициенты местных сопротивлений определяем по прил. II, только коэффициент внезапного расширения – по формуле (3-3).

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,5, \quad \zeta_{\text{вн.р}} = 0,78, \quad \zeta_{\text{вых}} = 1,0.$$

Теперь вычислим потери напора:

$$h_{\text{вх}} = 0,5 \frac{2,04^2}{2 \cdot 9,81} = 0,11 \text{ м}, \quad h_{\text{вн.р}} = 0,78 \frac{1,15^2}{2 \cdot 9,81} = 0,05 \text{ м},$$

$$h_{\text{вых}} = 1,0 \frac{1,15^2}{2 \cdot 9,81} = 0,07 \text{ м},$$

$$h_{\text{ла}} = 0,030 \frac{4,0}{0,075} \frac{2,04^2}{2 \cdot 9,81} = 0,34 \text{ м},$$

$$h_{\text{лб}} = 0,026 \frac{3,5}{0,10} \frac{1,15^2}{2 \cdot 9,81} = 0,06 \text{ м},$$

Искомая потеря напора:

$$H = 0,11 + 0,05 + 0,07 + 0,34 + 0,06 = 0,63 \text{ м}.$$

Построение напорной и пьезометрической линий показано на рис 4.1. Вертикальные участки напорной линии соответствуют потерям на местных сопротивлениях, наклонные участки потерям по длине. На участке а диаметр трубы меньше, потери больше и напорная линия наклонена круче, чем на участке б.

Над внезапным расширением пьезометрическая линия поднимается вверх, что легко объяснимо. При увеличении диаметра трубы скорость уменьшается, а значит, уменьшается удельная кинетическая энергия. В соответствии с уравнением Бернулли, при этом должна возрасти удельная

потенциальная энергия, что и объясняет увеличение пьезометрического напора.

## 5. ЗАДАЧИ НА ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ БЕЗ УЧЕТА ПОТЕРЬ НАПОРА

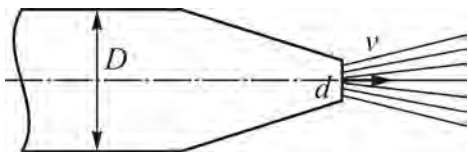


Рис. 5.1

1. Диаметр горизонтальной трубы, подводящей воду к насадке гидромонитора (рис. 5.1),  $D = 150$  мм, диаметр насадки  $d = 50$  мм. Скорость истечения струи из насадки  $V_2 = 30$  м/с. Пренебрегая потерями

напора, определить давление  $P_1$  в подводящей трубе.

Ответ:  $P_1 = 445$  кПа.

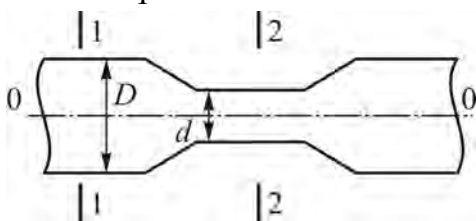


Рис. 5.2

2. Диаметр горизонтальной трубы, подводящей воду к насадке гидромонитора (см. рис. 5.1),  $D = 200$  мм, диаметр насадки  $d = 50$  мм. Пренебрегая потерями напора, определить скорость истечения  $V_2$ , если подводящей трубе избыточное давление

$P_1 = 500$  кПа.

Ответ:  $V_2 = 31,7$  м/с.

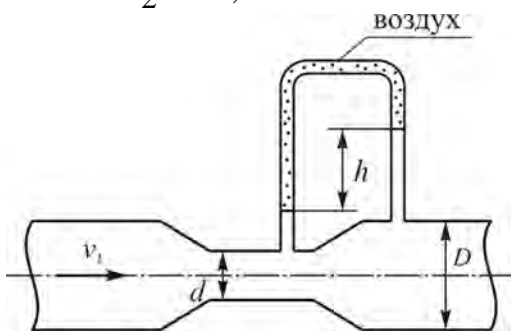


Рис. 5.3

3. Диаметр насадки гидромонитора (см. рис. 5.1)  $d = 50$  мм. Пренебрегая потерями напора, скорость истечения воды из насадки  $V_2 = 40$  м/с, давление подводящей трубе  $P_1 = 765,2$  кПа. Пренебрегая потерями напора, определить диаметр подводящей трубы  $D$ .

Ответ:  $D = 110$  мм.

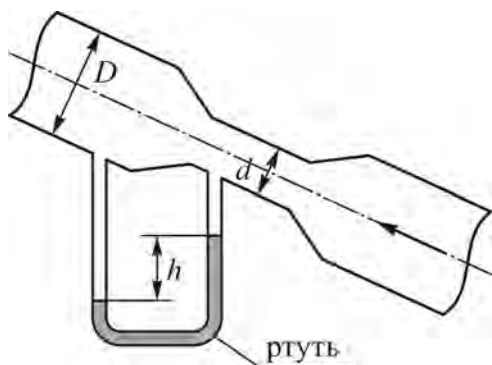


Рис. 5.4

4. По горизонтальному трубопроводу, диаметром  $D = 100$  мм перекачивается вода с расходом  $Q = 12$  л/с. На трубопроводе имеется сужение до  $d = 75$  мм (рис. 5.2). Пренебрегая потерями напора, найти разность давлений в трубе и на суженном участке. Как изменится эта разность, если перекачиваться будет не вода, а нефть, плотность которой  $\rho_H = 800$  кг/м<sup>3</sup>.

Ответ:  $P_1 - P_2 = 2,52$  кПа, для нефти  $P_1 - P_2 = 2,02$  кПа.

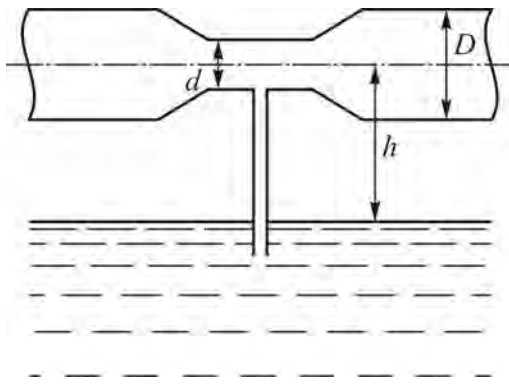


Рис. 5.5

5. По трубопроводу диаметром  $D = 150$  мм перекачивается вода. На трубопроводе имеется сужение до  $d = 75$  мм. Разница давлений в сужении и за ним измеряется пьезометром (рис. 5.3), показание которого  $h = 15$  см. Пренебрегая потерями напора, определить расход воды. Решить эту задачу в предположении, что в верхнем колене пьезометра не воздух, а керосин, плотность которого  $\rho_k = 800 \text{ кг/м}^3$ . В каком случае показания

пьезометра более точны и почему?

Ответ:  $Q_1 = 7,8 \text{ л/с}$ ,  $Q_2 = 3,4 \text{ л/с}$ .

6. По трубопроводу диаметром  $D = 100$  мм перекачивается вода с расходом  $Q = 10 \text{ л/с}$ . На трубопроводе имеется сужение до  $d = 75$  мм (рис. 5.3). Разница давлений в сужении и за ним измеряется пьезометром, Пренебрегая потерями напора, определить показание пьезометра  $h$ . Как изменится это показание, если в верхнем колене пьезометра вместо воздуха будет керосин ( $\rho_k = 800 \text{ кг/м}^3$ )?

Ответ:  $h_1 = 17,8 \text{ см}$ ,  $h_2 = 89,0 \text{ см}$ .

7. По трубопроводу диаметром  $D = 200$  мм перекачивается вода. На трубопроводе имеется сужение до  $d = 100$  мм (рис. 5.4). Разность пьезометрических напоров в трубопроводе и в сужении измеряется ртутным дифференциальным манометром, показание которого  $h = 18$  см. Пренебрегая потерями напора, определить расход воды в трубопроводе.

Ответ:  $Q = 54,1 \text{ л/с}$ .

8. По трубопроводу диаметром  $D = 100$  мм перекачивается вода со скоростью  $V_1 = 0,7 \text{ м/с}$ . На трубопроводе имеется сужение до  $d = 75$  мм (рис. 5.3) мм. Пренебрегая потерями напора, определить показание  $h$  дифференциального ртутного манометра. Как изменится величина  $h$ , если будет перекачиваться не вода, а керосин ( $\rho_k = 700 \text{ кг/м}^3$ ), а в дифференциальном манометре будет не ртуть, а вода?

Ответ:  $h_1 = 4,3 \text{ см}$ ,  $h_2 = 162,3 \text{ см}$ .

9. По горизонтальному трубопроводу диаметром  $D = 150$  мм подается расход воды  $Q = 20 \text{ л/с}$ , избыточное давление в трубопроводе  $P_1 = 30,0 \text{ кПа}$  (рис. 5.5). На трубопроводе имеется местное сужение до диаметра  $d = 50$  мм. Пренебрегая потерями напора, найти с какой высоты  $h$  может подсасываться

вода к сужению. Как изменится высота  $h$ , если подсасываться будет не вода, а жидкость плотность которой  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ ?

Ответ:  $h_1 = 2,16 \text{ см}$ ,  $h_2 = 1,8 \text{ см}$ .

10. По горизонтальному трубопроводу диаметром  $D = 100 \text{ мм}$  (рис. 5.5) подается расход воды  $Q = 6 \text{ л/с}$ , избыточное давление в трубопроводе  $P_1 = 30,0 \text{ кПа}$ . На трубопроводе имеется местное сужение диаметра  $d$ , куда подсасывается вода. Наибольшая высота подсасывания  $h = 3,5 \text{ м}$ . Пренебрегая потерями напора, определить диаметр суженной части  $d$ .

Ответ:  $d = 25 \text{ мм}$ .

11. По горизонтальному трубопроводу диаметром  $D = 100 \text{ мм}$  (рис. 5.5) подается вода. Избыточное давление в трубопроводе  $P_1 = 40,0 \text{ кПа}$ . На трубопроводе имеется местное сужение диаметра  $d = 50 \text{ мм}$ , куда подсасывается вода на высоту  $h = 2,5 \text{ м}$ . Пренебрегая потерями напора, определить минимальный расход  $Q$ , при котором возможно подсасывание.

Ответ:  $Q = 22,4 \text{ л/с}$ .

12. По горизонтальному трубопроводу диаметром  $D = 100 \text{ мм}$  (рис. 5.5) подается расход воды  $Q = 40 \text{ л/с}$ . На трубопроводе имеется местное сужение диаметра  $d = 50 \text{ мм}$ , куда подсасывается вода на высоту  $h = 2,5 \text{ м}$ . Пренебрегая потерями напора, определить максимальное давление в трубопроводе  $P_1$ , при котором подсасывание возможно.

Ответ:  $P_1 = 182,9 \text{ кПа}$ .

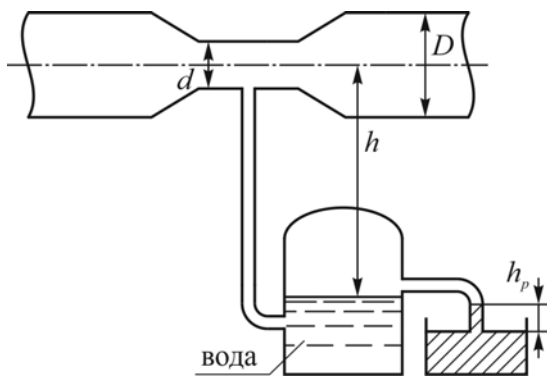


Рис. 5.6

м ниже трубы.

Ответ:  $Q = 10,8 \text{ л/с}$ .

13. В герметическом сосуде (рис. 5.6) создается вакуум путем присоединения сосуда к местному сужению на трубопроводе. Диаметр трубопровода  $D = 100 \text{ мм}$ , диаметр сужения  $d = 40 \text{ мм}$ , избыточное давление в трубопроводе  $P_1 = 20,0 \text{ кПа}$ . Пренебрегая потерями напора, определить расход воды в нем, если ртутный вакуумметр показывает  $h_p = 45 \text{ мм}$ , а уровень в сосуде на  $h = 1,0$

14. Струя воды бьет вертикально вверх из насадка, присоединенного к герметическому сосуду (рис. 5.7). Избыточное давление в сосуде над уровнем воды  $P_0 = 300 \text{ кПа}$ , конец насадка ниже уровня воды на  $h = 2,0 \text{ м}$ .

Определить высоту подъема струи  $H$ , если потеря напора в насадке и на трение струи о воздух достигает 40% от полного напора.

Указание: высота подъема струи над насадком без учета потерь равна скоростному напору.

Ответ:  $H = 19,6$  м.

15. Труба длиной  $l = 8$  м и диаметром  $d = 100$  мм опущена вертикально вниз из резервуара (рис. 5.8). Глубину воды в резервуаре  $h = 2$  м можно считать постоянной. Пренебрегая потерями напора, определить расход воды  $Q$  вытекающей из резервуара по трубе. Найти давление в точке  $O$ , расположенной на расстоянии  $0,5l$  от конца трубы.

Ответ:  $Q = 110$  л/с,  $P_{\text{вак}} = 39,2$  кПа.

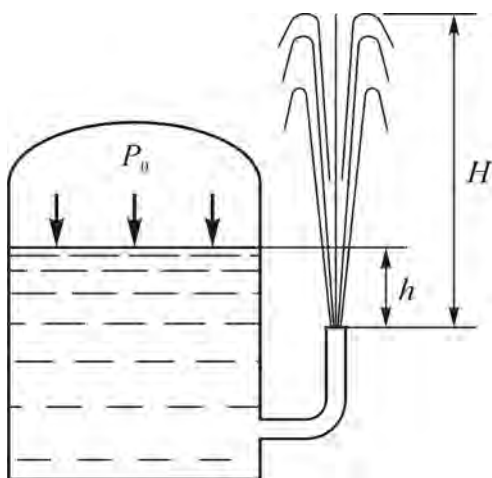


Рис. 5.7

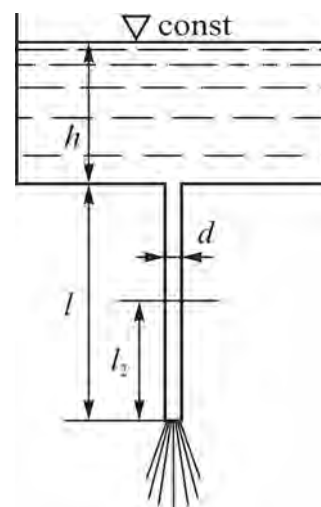


Рис. 5.8

16. По трубопроводу диаметром  $d = 100$  мм (рис. 5.9) подается расход воды  $Q = 8$  л/с. Считая, что скорость по оси трубы больше средней скорости в 1,2 раза, определить разницу показаний гидродинамической трубки и пьезометра. Изменится ли величина  $h$ , если по трубопроводу с прежним расходом пропускать жидкость с удельным весом, отличным от веса воды? Почему?

Ответ:  $h = 76$  мм.

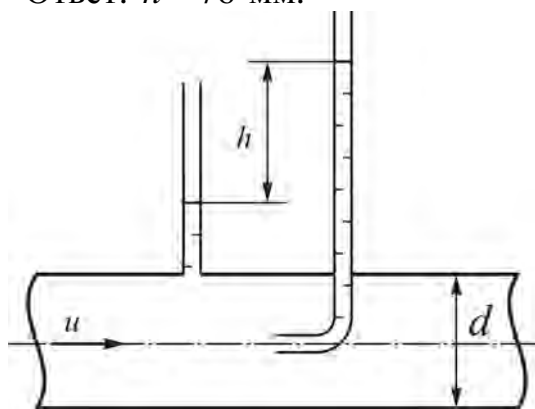


Рис. 5.9

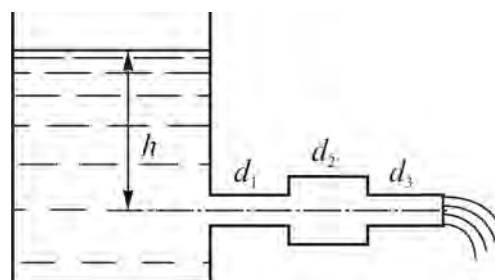


Рис. 5.10

17. Вода вытекает из открытого резервуара по горизонтальной трубе, состоящей из участков разных диаметров:  $d_1 = 75$  мм,  $d_2 = 100$  мм,  $d_3 = 50$  мм (рис. 5.10). Уровень воды в резервуаре на  $h = 3,0$  м выше входа в трубу. Пренебрегая потерями напора, найти расход воды, протекающий по трубе, и построить пьезометрическую линию. Чему равно избыточное давление на первом участке?

Ответ:  $Q = 15,04$  л/с,  $P_1 = 23,64$  кПа.

18. Вода вытекает из резервуара по горизонтальной трубе, состоящей из двух участков разных диаметров:  $d_1 = 75$  мм и  $d_2 = 50$  мм (рис. 5.11). Вход в трубу ниже уровня воды в резервуаре на  $h = 1,5$  м, над уровнем избыточное давление  $P_0 = 40$  кПа. Пренебрегая потерями напора, найти расход воды, протекающий по трубе, построить напорную и пьезометрическую линии. Чему равно избыточное давление на первом участке?

Ответ:  $Q = 17,53$  л/с,  $P_1 = 46,85$  кПа.

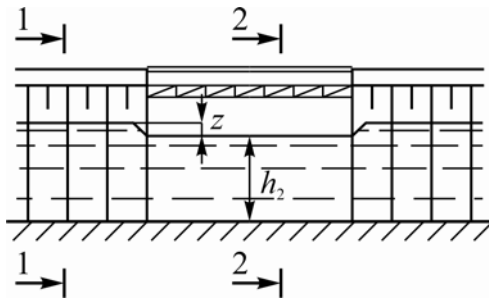


Рис. 5.11

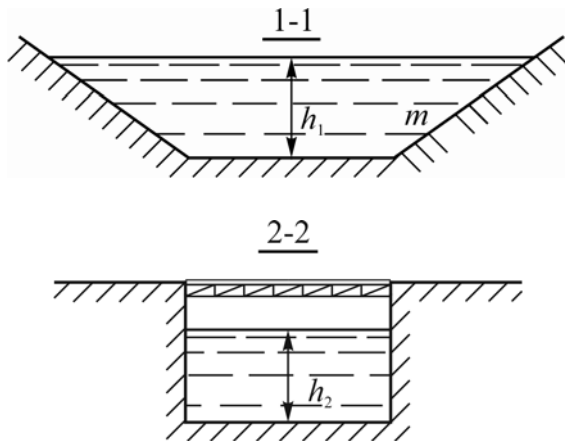


Рис. 5.12

19. Канал трапецеидального сечения (рис. 5.12) пересекается мостом, причем устои моста вызывают местное сужение канала. Размеры канала  $b = 4,0$  м,  $m = 1,5$ , глубина воды  $h = 3,0$  м. Пренебрегая потерями, определить расход воды в канале  $Q$ , если глубина между устоями  $h_2 = 2,95$  м ( $\Delta z = 0,05$  м).

Ответ:  $Q = 13,2$  м<sup>3</sup>/с,

20. Оросительный канал берет начало из водохранилища. Скорость течения воды в канале  $V = 1,6$  м/с (рис. 5.13). Определить разницу уровней в водохранилище и в начале канала.

Ответ:  $z = 13$  см.

21. По трубопроводам I и II (рис. 5.14) течет вода. Известно, что скорость течения в трубопроводе I  $V_1 = 1,0$  м/с, давление в трубопроводе II  $P_2 = 58,86$  кПа, показание ртутного дифференциального манометра  $h = 500$  мм. Известно также, что полный напор, вычисленный относительно горизонтальной плоскости сравнения, проходящей через центр трубопровода



II, в трубопроводе I вдвое больше, чем в трубопроводе II ( $H_1 = 2H_2$ ). Найти скорость течения в трубопроводе II  $V_2$ .

Ответ:  $V_2 = 2,62$  м/с.

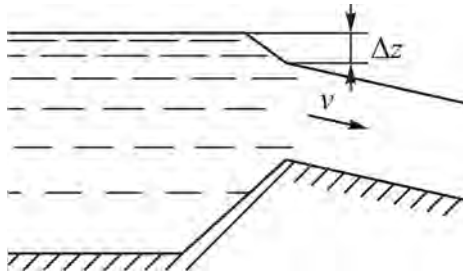


Рис. 5.13

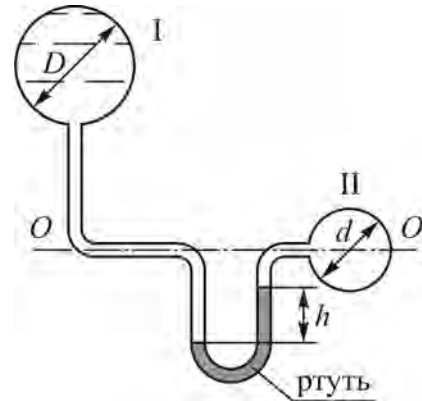


Рис. 5.14

22. По трубопроводам I и II (рис. 5.14) диаметры которых  $D = 100$  мм и  $d = 50$  мм течет вода. Расход воды в трубопроводе II  $Q_2 = 4$  л/с, показание ртутного дифференциального манометра  $h = 10$  мм, полные напоры в обоих трубопроводах равны ( $H_1 = H_2$ ). Найти расход воды в трубопроводе I.

Ответ:  $Q_1 = 13$  л/с.

## 6. ЗАДАЧИ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ

23. Определить режим течения в трубе диаметром 100 мм, по которой перекачивается нефть с расходом  $Q = 7,85$  л/с. Коэффициент кинематической вязкости нефти принять равным  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Каким будет режим течения, если вместо нефти по трубе перекачивать с тем же расходом воду при температуре 20 °С?

Ответ: для нефти режим ламинарный, для воды – турбулентный.

24. Расход воды, перекачиваемой по трубе  $d = 25$  мм, постепенно уменьшается. При какой скорости течения турбулентный режим течения перейдет в ламинарный? Температура воды 12 °С.

Ответ:  $V_k = 11,3$  см/с.

25. По двум трубам, диаметры которых  $d_1$  и  $d_2$ , течет одна и та же жидкость. Найти отношение критических скоростей в этих трубах. Каково будет при этом отношение расходов?

Ответ:  $V_2 = d_2 : d_1$ ,  $Q_1 : Q_2 = d_1 : d_2$ .

26. По трубе, составленной из двух последовательно соединенных участков, диаметры которых  $d_1$  и  $d_2$ , перекачивается жидкость, причем

расход  $Q$  постепенно возрастает. Считая, что  $d_1 > d_2$ , указать на каком участке режим течения раньше перейдет из ламинарного в турбулентный.

Ответ: на втором участке.

## 7. ЗАДАЧИ НА ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ НАПОРА

27. По трубе, диаметром  $d = 25$  мм с шероховатостью  $\Delta = 0,015$  мм перекачивается вода температурой  $t = 10$  °С. Построить график изменения коэффициента Дарси  $\lambda$  при изменении расхода с 0,04 до 4,0 л/с. Определить на графике границы переходной зоны и зоны гидравлических гладких труб.

28. Из сосуда  $A$  в сосуд  $B$  вода перетекает по трубе диаметром  $d = 50$  мм (рис. 7.1). Расход при этом равен  $Q = 1,5$  л/с. На трубе имеется вентиль, расположенный на расстоянии  $l_1 = 8$  м от сосуда  $A$  и  $l_2 = 5$  м от сосуда  $B$ . Коэффициент местного сопротивления вентиля  $\zeta_v = 4,6$ , шероховатость трубы  $\Delta = 0,1$  мм, температура воды 8 °С. Определить разницу уровней в сосудах  $H$ . Построить напорную и пьезометрическую линии. Уровни в сосудах считать постоянными.

Ответ:  $H = 0,405$  м.

29. Из сосуда  $A$  в сосуд  $B$  вода перетекает по трубе диаметром  $d = 75$  мм (рис. 7.2). Температура воды  $t = 20$  °С. Расход равен  $Q = 7$  л/с. Труба состоит из трех участков длиной  $l = 1,2$  м каждый, радиус поворотов  $R_{\Pi} = 100$  мм, шероховатость  $\Delta = 0,15$  мм. Глубина в сосуде  $B$   $h_2 = 1,7$  м. Считая уровни в сосудах постоянными, определить глубину в сосуде  $A$   $h_1$ . Рассчитать пьезометрический напор в точках  $M$  и  $N$  (за поворотами).

Ответ:  $h_1 = 2,1$  м,  $H_{pM} = 1,96$  м,  $H_{pN} = 1,88$  м.

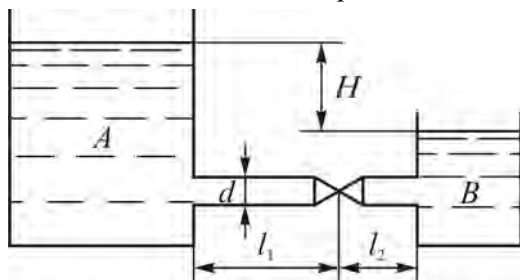


Рис. 7.1

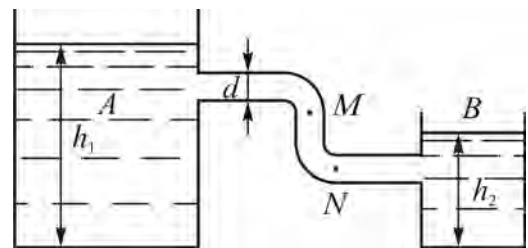


Рис. 7.2

30. Из сосуда по горизонтальному трубопроводу вытекает вода с расходом  $Q = 7$  л/с (рис. 7.3). Диаметры участков труб  $d_1 = 100$  мм,  $d_2 = 50$  мм, длины  $l_1 = 5,0$  м,  $l_2 = 6,0$  м, коэффициенты Дарси  $\lambda_1 = 0,027$ ,  $\lambda_2 = 0,026$ . Глубина воды в сосуде  $h = 0,57$  м. Определить избыточное

давление над поверхностью воды в сосуде  $P_0$ . Построить напорную и пьезометрическую линии. Уровень воды в сосуде считать постоянными.

Ответ:  $P_0 = 24,5$  кПа.

31. В сосуд  $A$  поступает вода с расходом  $Q = 8$  л/с (рис. 7.4). Такое же количество воды вытекает из сосуда по трубе  $d = 50$  мм,  $l_1 = 4,0$  м,  $l_2 = 3,0$  м,  $\Delta = 0,3$  мм. Температура воды  $t = 14$  °С. Вход в трубу находится на глубине  $h = 1,57$  м от уровня воды. На трубе находится кран, с помощью которого регулируют давление  $P_0$ . Определить угол поворота крана  $\alpha$ , при котором избыточное давление  $P_0 = 78,5$  кПа. Построить напорную и пьезометрическую линии.

Ответ:  $\alpha = 30^\circ$ .

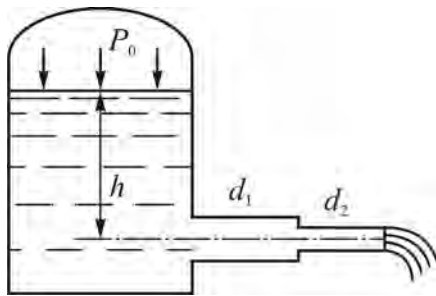


Рис. 7.3

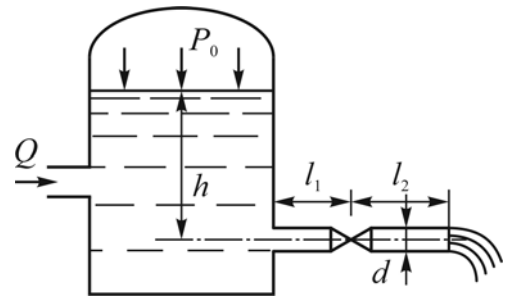


Рис. 7.4

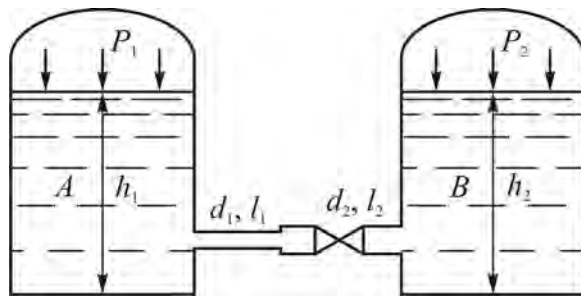


Рис. 7.5

32. Сосуды  $A$  и  $B$  (рис. 7.5) соединены трубопроводом, состоящим из двух участков, имеющих следующие характеристики:  $d_1 = 100$  мм,  $d_2 = 150$  мм,  $l_1 = 8,0$  м,  $l_2 = 12,0$  м,  $\lambda_1 = 0,024$   $\lambda_2 = 0,022$ . В середине второго участка имеется задвижка, закрытая на  $0,4d$ . Глубина воды в сосудах  $h_1 = 1,2$  м,  $h_2 = 0,8$  м. Избыточное давление над уровнем воды в сосуде  $A$   $P_1 = 40$  кПа. Найти давление  $P_2$ , если вода перетекает из сосуда  $A$  в сосуд  $B$  с расходом  $Q = 25$  л/с. Каким должно быть давление  $P_2$ , чтобы вода с тем же расходом перетекала из сосуда  $B$  в сосуд  $A$ ? При решении уровни воды считать постоянными. Для обоих случаев построить напорные и пьезометрические линии.

закрытая на  $0,4d$ . Глубина воды в сосудах  $h_1 = 1,2$  м,  $h_2 = 0,8$  м. Избыточное давление над уровнем воды в сосуде  $A$   $P_1 = 40$  кПа. Найти давление  $P_2$ , если вода перетекает из сосуда  $A$  в сосуд  $B$  с расходом  $Q = 25$  л/с. Каким должно быть давление  $P_2$ , чтобы вода с тем же расходом перетекала из сосуда  $B$  в сосуд  $A$ ? При решении уровни воды считать постоянными. Для обоих случаев построить напорные и пьезометрические линии.

Ответ:  $P_2 = 26,28$  кПа. При течении из  $B$  в  $A$   $P_2 = 64,43$  кПа.

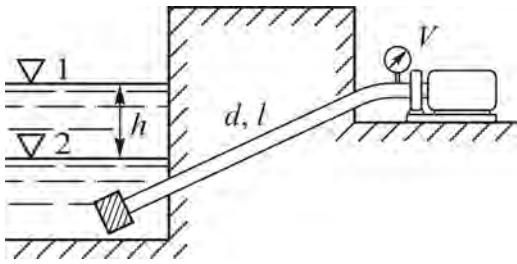


Рис. 7.6

33. Всасывающая труба насоса (рис. 7.6) имеет диаметр  $d = 150$  мм, длину  $l = 16,0$  м, коэффициент Дарси  $\lambda = 0,030$ . Храпок насоса создает местное сопротивление  $\zeta_{\text{хр}} = 8,0$ . Производительность насоса  $Q = 14$  л/с. Определить показание вакуумметра  $V$  при расположении уровня в водоеме 1 на одной отметке с насосом. Имея в виду, что максимальный вакуум, развиваемый насосом, равен 60 кПа, найти на какую глубину допустимо снижение уровня в водоеме 2. Изменением подачи насоса можно пренебречь. Для обоих случаев построить напорные и пьезометрические линии.

Ответ:  $P_{\text{вак}} = 3,83$  кПа,  $h = 57,2$  м.

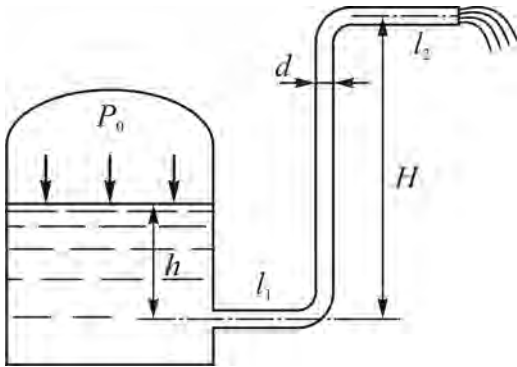


Рис. 7.7

34. На какую высоту  $H$  можно подать воду с расходом  $Q = 3$  л/с по вертикальной трубе с помощью бака, в котором поддерживается давление  $P_0 = 150$  кПа (рис. 7.7). Вход в трубу на глубине  $h = 1,0$  м под уровнем воды в баке. Диаметр трубы  $d = 50$  мм, коэффициент Дарси  $\lambda = 0,035$ , оба поворота на  $90^\circ$  имеют радиус

$R_{\text{п}} = 100$  мм, горизонтальные участки имеют длины  $l_1 = 1,5$  м,  $l_2 = 3,0$  м.

Ответ:  $H = 13,13$  м.

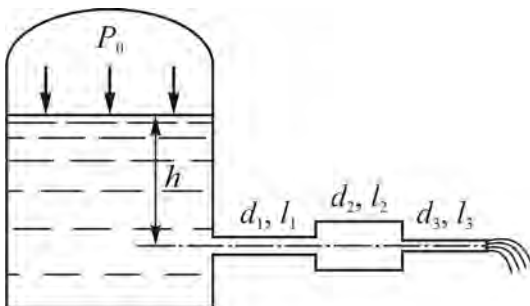


Рис. 7.8

35. Вода вытекает из сосуда, где она находится под давлением  $P_0 = 100$  кПа по горизонтальному трубопроводу, состоящему из трех участков  $d_1 = 75$  мм,  $d_2 = 100$  мм,  $d_3 = 50$  мм,  $l_1 = 5,0$  м,  $l_2 = 6,0$  м,  $l_3 = 4,0$  м,  $\lambda_1 = 0,030$ ,  $\lambda_2 = 0,028$ ,  $\lambda_3 = 0,035$  (рис. 7.8). Вход в трубу на глубине  $h = 1,2$  м под уровнем

воды. Определить расход воды  $Q$ , вытекающей из сосуда. Построить напорную и пьезометрическую линии.

Ответ:  $Q = 13,3$  л/с.

36. Вода поступает из сосуда  $A$  в сосуд  $B$  по трубе диаметром  $d = 100$  мм и длиной  $l = 20$  м (рис. 7.9). На трубе имеется задвижка ( $\zeta_3 = 8,0$ ) и три

поворота: на  $30^\circ$ , на  $60^\circ$  и на  $90^\circ$ . Радиус закруглений во всех случаях  $R_{\text{п}} = 150$  мм. Коэффициент Дарси  $\lambda = 0,024$ . Резервуар  $B$  стоит выше резервуара  $A$  на  $T = 6,0$  м. Глубины воды в резервуарах  $h_1 = 20$  м и  $h_2 = 1,3$  м. Манометр  $M$  показывает давление  $P_0 = 58,8$  кПа, вакуумметр  $V$  показывает наличие вакуума  $147$  мм рт.ст. Определить расход воды в трубе.

Ответ:  $Q = 15$  л/с.

37. Вода поступает из бака  $A$  в бак  $B$  по вертикальной трубе диаметром  $d = 150$  мм и длиной  $l = 90$  м (рис. 7.10). Коэффициент Дарси  $\lambda = 0,030$ . Разница уровней воды в баках  $H = 9,5$  м, глубина воды в баке  $B$   $h_2 = 1,0$  м. Манометр  $M$  показывает давление  $P_0 = 130$  кПа. Определить расход воды в трубе. Построить напорную и пьезометрическую линии.

Ответ:  $Q = 77,8$  л/с.

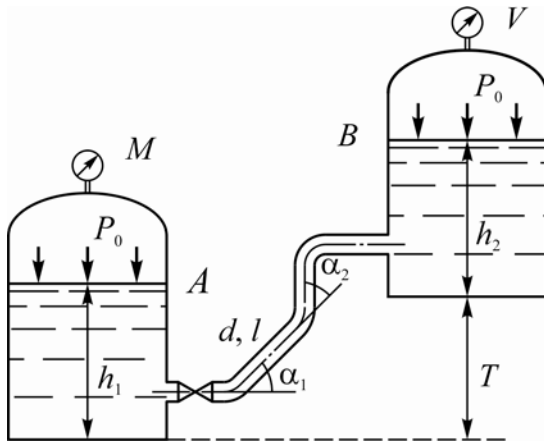


Рис. 7.9

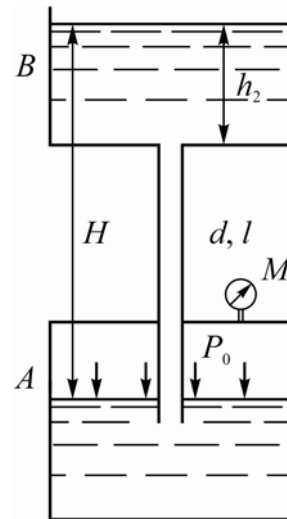


Рис. 7.10

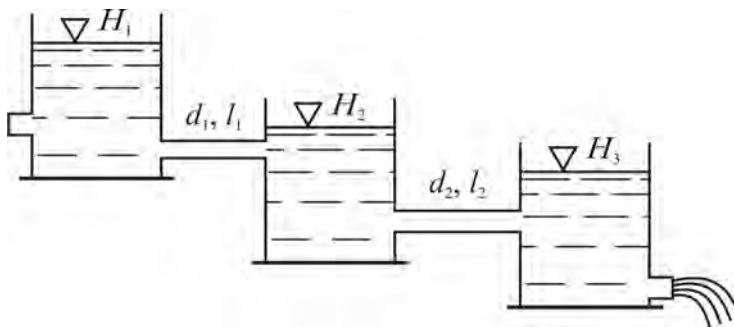


Рис. 7.11

38. Три открытых сосуда соединены между собой трубами, как показано на рис. 7.11. Отметка уровня воды в верхнем сосуде  $H_1 = 20,0$  м, в нижнем –  $H_3 = 10,0$  м. Трубы имеют следующие характеристики:  $d_1 = 125$  мм,  $d_2 = 100$  мм,

$l_1 = 10,0$  м,  $l_2 = 8,0$  м,  $\lambda_1 = 0,032$   $\lambda_2 = 0,036$ . Считая уровни воды в сосудах постоянными, найти расход воды и отметку уровня в среднем сосуде.

Ответ:  $Q = 44,5$  л/с,  $H_2 = 17,24$  м.

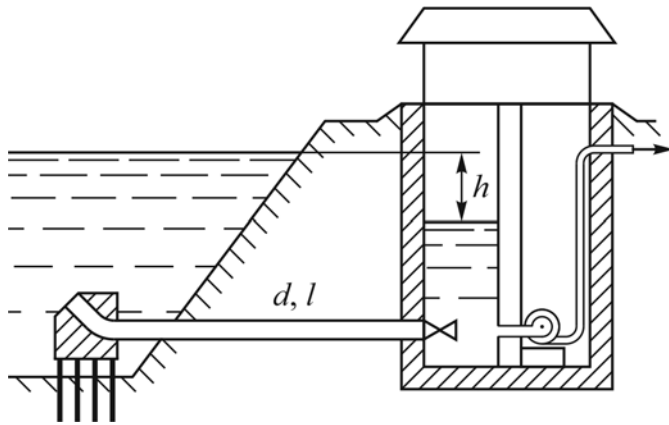


Рис. 7.12

39. Вода поступает в насосную станцию (рис. 7.12) по самотечному трубопроводу диаметром  $d = 600$  мм и длиной  $l = 150$  м. Шероховатость трубопровода  $\Delta = 1,2$  мм, температура воды  $t = 4$  °С. На трубопроводе имеется задвижка Лудло, обычно открытая. Коэффициент местного сопротивления оголовка с решеткой  $\zeta_0 = 4,2$ . Определить расход  $Q$ , который идет по трубопроводу, если уровень воды в насосной станции на  $h = 2,1$  м ниже, чем в реке.

Ответ:  $Q = 146,7$  л/с.

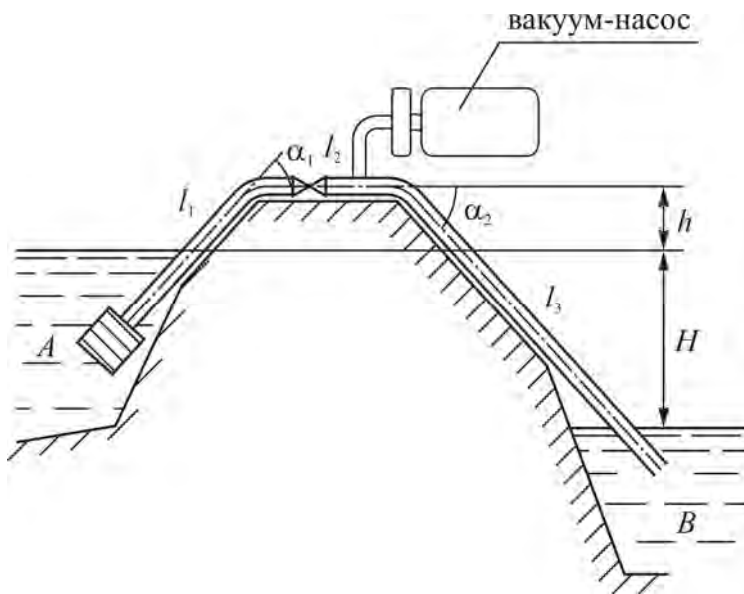


Рис. 7.13

40. Из водоема А в водоем В (рис. 7.13) вода подается с помощью сифона. Труба сифона имеет диаметр  $d = 250$  мм и состоит из трех участков:  $l_1 = 15,0$  м,  $l_2 = 8,0$  м,  $l_3 = 25,0$  м. На трубе имеются повороты на углы  $\alpha_1 = 15^\circ$  и  $\alpha_2 = 30^\circ$  с радиусом поворота  $R_{\Pi} = 250$  мм, задвижка  $\zeta_3 = 2,0$  и решетка на входе  $\zeta_p = 6,0$ . Коэффициент Дарси  $\lambda = 0,0225$ . Разница уровней в водоемах  $H = 4,0$  м, горизонтальный участок сифона проложен на высоте  $h = 2,0$  м над уровнем воды в водоеме А. Определить расход воды через сифон. Построить напорную и пьезометрическую линии. Какой вакуум должен создать вакуум – насос для зарядки сифона? Как изменится вакуум в точке присоединения вакуум – насоса, когда сифон начнет работать?

Ответ:  $Q = 118,8$  л/с, при зарядке  $P_{\text{вак}} = 19,6$  кПа, при работе  $P_{\text{вак}} = 77,3$  кПа.

41. Определить расход воды, проходящей по трубе переменного сечения, и давление в сечении  $x-x$ , используя данные табл. 1. Построить пьезометрическую линию и линию энергии (напорную). В расчетах принять эквивалентную шероховатость трубы  $\Delta = 0,3$  мм;  $d_1 = d_4 = 5$  м.

Сопротивлением колена без закругления можно пренебречь, у колена с закруглениями принять радиусы закругления  $R = d_2$

Таблица 1  
Варианты 1 – 20

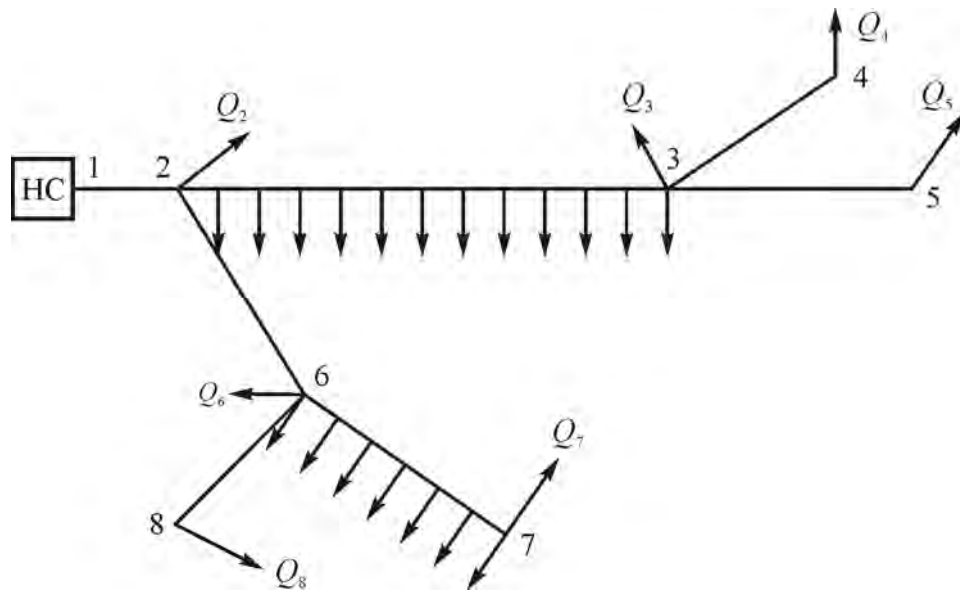
№	Схема	$P_1$	$P_2$	$H_1$	$H_2$	$d_1$	$d_2$	$l_2$	$z$	$l_3$	$l_4$	$\alpha$ , град
		МПа		м		мм		м				
1.		$P_{абс} = 0,20$	$P_{вак} = 0,02$	5	12	75	100	200	1	200	–	–
2.		$P_{изб} = 0,10$	$P_{абс} = 0,20$	4	0	65	75	50	2	300	–	–
3.		$P_{абс} = 0,02$	$P_{изб} = 0,11$	10	3	75	100	200	1	200	–	–
4.		$P_{изб} = 0,12$	$P_a$	0	16	75	65	300	1	50	–	–
5.		$P_{вак} = 0,03$	$P_{абс} = 0,14$	20	0	75	50	100	2	50	–	–
6.		$P_{абс} = 0,15$	$P_{вак} = 0,02$	12	12	50	75	50	2	100	–	–
7.		$P_{абс} = 0,30$	$P_{изб} = 0,02$	14	–	125	–	200	1	100	20	20
8.		$P_{изб} = 0,20$	$P_a$	7	–	75	–	100	2	50	20	20
9.		$P_{вак} = 0,02$	$P_a$	25	–	100	–	200	3	50	15	30
10.		$P_{абс} = 0,07$	$P_{вак} = 0,02$	24	–	75	–	50	1	20	15	15
11.		$P_{изб} = 0,06$	$P_{абс} = 0,12$	18	–	75	100	50	5	200	15	20
12.		$P_{абс} = 0,18$	$P_a$	4	–	100	75	200	8	50	10	20
13.		$P_{вак} = 0,01$	$P_a$	10	–	65	75	100	5	100	20	30
14.		$P_{изб} = 0,02$	$P_{вак} = 0,01$	5	–	75	65	100	7	100	30	15
15.		$P_{вак} = 0,03$	$P_a$	30	6	75	100	100	–	200	–	–
16.		$P_{изб} = 0,08$	$P_{изб} = 0,02$	28	4	75	100	75	–	100	–	–
17.		$P_{изб} = 0,20$	$P_{вак} = 0,04$	5	6	75	65	100	–	50	–	–
18.		$P_{абс} = 0,12$	$P_a$	0	20	100	75	200	–	50	–	–
19.		$P_2$	$P_{абс} = 0,16$	22	0	75	50	100	–	50	–	–
20.		$P_{изб} = 0,15$	$P_a$	12	0	50	100	50	–	100	–	–

## 8. РАСЧЕТ ТУПИКОВЫХ (РАЗВЕТВЛЕННЫХ) ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

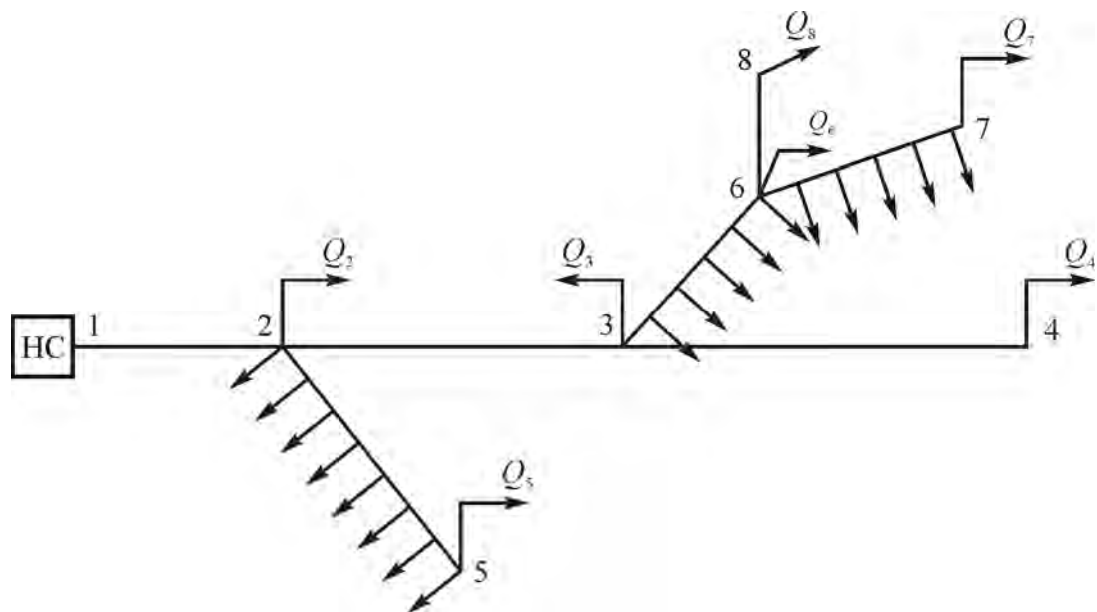
Тупиковая водопроводная сеть (рис. 8.1) состоит из основной магистрали и ответвлений. При расчете заданы  $l_i$  – длины участков сети;  $z$  – геодезические отметки узлов и конечных точек,  $H_{св}$  – свободный напор в конечных точках,  $Q_i$  – отдача на концах сети;  $q_0$  – непрерывная раздача по пути (табл. 2).

В результате расчета следует определить

- диаметры труб на всех участках
- напоры в узловых точках
- потребный напор в первой точке  $H_1$



Вариант А



Вариант Б



Таблица 2

№ вар.	Узловые расходы, л/с								Геодезические отметки точек								Длины участков, м							Материал труб	Своб. напор $H_{св}$ , м
	$Q_2$ л/с	$Q_3$ л/с	$Q_4$ л/с	$Q_5$ л/с	$Q_6$ л/с	$Q_7$ л/с	$Q_8$ л/с	$q_0$ л/с·м	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	$z_8$	$l_{12}$	$l_{23}$	$l_{34}$	$l_{26}$	$l_{35}$	$l_{68}$	$l_{67}$		
1.	6	9,3	8,6	7,5	11	5,4	8	0,03	42,4	44	47,5	47,1	48,4	43,2	45,8	43,8	300	250	180	430	260	150	280	Ч	8
2.	5,8	7,3	6,8	8,2	6	12	9,5	0,02	64,5	69,8	72	71,2	68,9	72,8	74,3	73,5	180	200	190	385	198	202	305	С	10
3.	8,4	6,1	5,6	6,7	10,2	2,5	4,3	0,04	91,5	93,4	98	104	101,4	96,5	97	99,6	120	180	240	315	175	190	230	П	12
4.	7,5	8,2	4,3	7,6	8,3	11	6,1	0,05	26,5	32	31,8	32,6	32,9	33,1	34,8	35,6	250	160	200	290	180	250	180	АЦ	8
5.	3,4	5,4	7,4	5,8	9,6	7,3	5,4	0,06	42,4	51,6	53,8	55	54,2	49,9	51,2	50,4	150	240	145	340	120	90	130	АЦ	10
6.	4,6	3,9	7,4	8,5	12,1	9,6	9,8	0,07	65	71,4	73,2	75	76	71,7	72,3	71,9	130	170	230	250	167	147	178	Ч	12
7.	3,2	5,9	4,6	6,1	4,3	3,9	4,6	0,08	69,2	76,4	78	78,9	79,4	81,3	84,3	82,1	120	140	210	240	150	110	220	С	8
8.	8,5	3,7	8,6	2,8	9	2,1	5,9	0,09	51,3	60,8	61,2	63,9	64,3	65	66,2	69	120	190	200	310	144	148	205	Ч	10
9.	8,6	6,9	4,1	8,6	7,2	5,2	7,6	0,1	74,1	83,8	85,9	86,5	85,4	84,5	83,8	84	215	183	286	222	187	152	273	П	12
10.	5,1	1,9	6,9	5,2	5,9	4,5	7,7	0,15	39	45,9	46,4	48,3	49,9	47,4	46,2	46,9	155	392	181	159	188	246	256	С	8
11.	5,5	8,1	5,9	8,8	4,6	5,6	1,7	0,2	40,8	52	51,9	54,8	56,2	55,1	57,8	54,2	177	141	207	211	180	120	187	С	10
12.	8,6	6,9	4,1	8,6	7,2	5,2	7,6	0,14	161,4	171,8	170,1	172,4	173,8	174,2	179,4	183	158	155	181	248	189	130	231	АЦ	12
13.	5,4	8,7	8,4	9	3,3	4,2	4,7	0,13	56,8	63,8	64,3	66,4	65	64,3	64,9	65,1	232	158	204	182	128	110	125	П	8
14.	9,3	4,2	9,7	8,2	8,4	5,7	6,6	0,12	79,5	93,3	95,4	97,8	99,2	99,6	97,4	96,9	177	141	207	111	180	220	187	Ч	10
15.	4,2	8,5	8,8	8,9	3,3	2,7	8	0,16	19,3	24,0	24,9	26	25,5	27	28,6	27,5	192	224	171	202	167	107	216	Ч	12
16.	4,5	3,8	6,6	9,9	3,8	8,9	7,8	0,17	66,4	72,1	72,5	74	73,8	73,2	75	75,7	164	157	181	174	144	203	165	С	8
17.	8,3	6,6	7,5	2,4	6,4	5,6	8,8	0,18	117,8	118	128,6	13,24	130,1	128	124,3	123,4	191	116	165	225	124	167	148	С	10
18.	3,3	6,7	2,7	7,9	2,5	4,5	1,9	0,19	83	87	85,6	90,4	92,3	89,4	91,2	90,9	171	147	207	133	221	171	130	П	12
19.	1,5	1,2	5,3	7,2	9	9,9	9	0,03	41,8	45,3	50,5	46	45,2	47,4	50,9	48,2	124	175	121	147	176	161	125	П	8
20.	3,7	7,5	4	4,9	9,4	9,1	5,3	0,04	60,4	68	68,5	69,8	72	73,5	72,2	73,1	151	180	196	133	172	203	158	С	10
21.	1,2	1,4	4,5	1,6	7	2,7	8,9	0,07	49,8	54,7	53,6	55,8	52,4	51,6	52,9	51,1	181	164	192	189	193	184	139	С	12
22.	3,3	4,4	7,4	8,1	5,7	6,1	1,6	0,1	23,3	29,1	28,4	29,4	31,8	31,0	30,1	29,5	164	151	145	142	165	189	231	Ц	8
23.	1,7	6,7	2,2	7,1	2,4	9,2	8,7	0,07	18,6	21,2	22,1	24,2	24,3	25,1	27,8	27	172	175	191	157	159	199	152	Ц	10
24.	2	8	1,1	2,7	4,1	7,7	8,6	0,1	22,2	34,2	36,2	37,6	38,1	38,5	40,3	41,6	123	137	126	190	195	104	175	Ч	12
25.	2,5	6,1	2,5	10	2,8	8,2	6,4	0,06	69,8	77,2	75,9	77,8	77,1	77,2	76,8	76,6	156	149	192	143	116	138	223	П	8
26.	5,8	3,2	1,8	7,6	9,4	3,1	3	0,02	–	–	–	–	–	–	–	27,4	144	154	162	204	178	195	178	С	10
27.	8,9	4,8	8,1	5,5	5,8	9,4	2	0,04	–	–	–	–	–	–	82,4	–	188	206	203	109	177	161	202	П	12
28.	4,7	5,5	1,6	4,2	6,7	2,4	3,4	0,05	38,6	45,7	47,5	47,3	46,2	–	47,1	48,4	160	129	103	144	174	181	157	Ч	8

## 9. ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ I

Кинематический коэффициент вязкости воды  $10^6 \nu$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$

$t^\circ$	$10^6 \nu$	$t^\circ$	$10^6 \nu$	$t^\circ$	$10^6 \nu$
2	1,67	16	1,12	30	0,80
4	1,57	18	1,06	35	0,72
6	1,47	20	1,01	40	0,66
8	1,39	22	0,96	45	0,60
10	1,31	24	0,92	50	0,56
12	1,24	26	0,88	55	0,52
14	1,18	28	0,84	60	0,48

### ПРИЛОЖЕНИЕ II

#### ТАБЛИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

1. Вход в трубу рассматривается в четырех вариантах. На рис. II - I, а изображен вход в трубу, выступающую в водоем; на рис. II - I, б – прямой вход с острыми кромками, для которого  $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$ , а на рис. II - I, в – прямой вход с плавным закруглением, для него  $\zeta_{\text{вх}} = 0,03$ . Для прямого входа со скосом (рис. II - I, г) значения  $\zeta_{\text{вх}}$  приведены в табл. II - I в зависимости от угла  $\alpha$ , под которым выполнен скос, и отношения длины скоса к диаметру  $\frac{l}{d}$ .

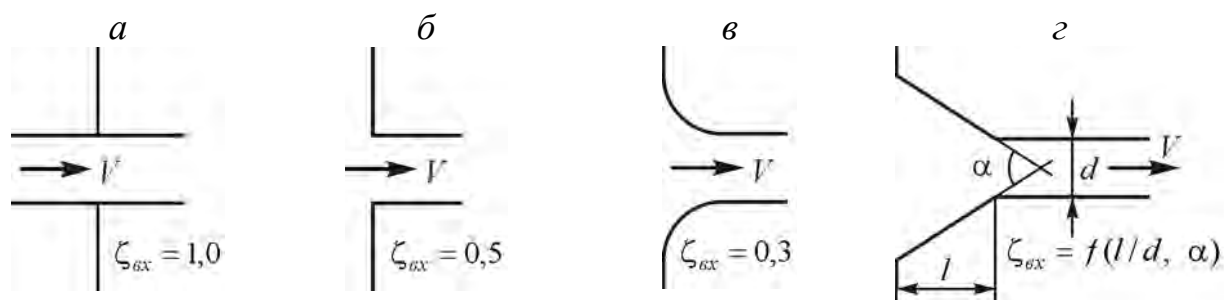


Рис. II - I

Таблица II - I

$\frac{l}{d}$	$\alpha^\circ$						
	10	20	30	40	60	100	140
0.10	0.39	0.32	0.25	0.22	0.18	0.27	0.38
0.15	0.37	0.27	0.20	0.16	0.15	0.25	0.37
0.60	0.27	0.18	0.13	0.11	0.12	0.23	0.36

2. Выход из трубы в резервуар (рис. II - II).

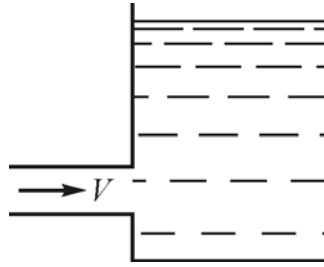


Рис. II - II

3. Внезапное расширение (рис. II - III).

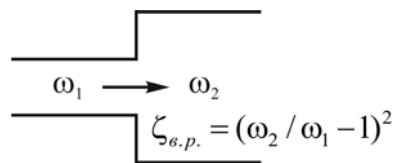


Рис. II - III

4. Внезапное сужение (рис. II - IV).

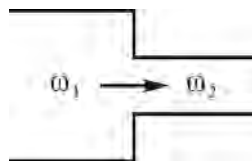


Рис. II - IV

Таблица II - II

$\omega_2 / \omega_1$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
$\zeta_{вс}$	0,5	0,42	0,34	0,25	0,15	0,09	0

5. Диффузор (плавное расширение) в трубе круглого сечения (рис. II - V).

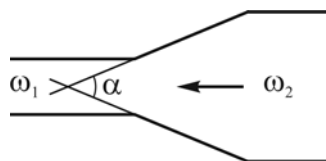


Рис. II - V

Таблица II - III

$\alpha^\circ$	$\omega_2 / \omega_1$				
	2	4	6	10	$\geq 16$
1	2	3	4	5	6
6	0,224	1,36	2,88	8,40	21,5
10	0,192	1,28	2,88	8,60	24,1
16	0,204	2,70	5,77	21,2	54,3
30	0,480	6,12	16,4	52,0	143
60	0,09	8,97	24,9	76,0	202
120	1,07	9,24	25,2	84,0	214

6. Конфузор (плавное сужение) в трубе круглого сечения (рис. II - VI).

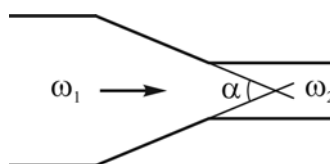


Рис. II - VI

Таблица. II - IV

$\alpha^\circ$	$\omega_2 / \omega_1$				
	0,64	0,45	0,39	0,16	0,10
5	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09
10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
15 – 40	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
50 – 60	0,03	0,08	0,07	0,08	0,08
90	0,10	0,14	0,16	0,19	0,19
120	0,13	0,20	0,25	0,28	0,28

7. Диафрагма в трубе (рис. II - VII).

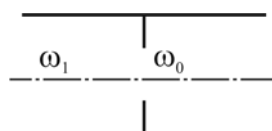


Рис. II - VII

Таблица. II - V

$\omega_0 / \omega_1$	0,05	0,1	0,2	0,35	0,5	0,7	0,8	0,95
$\zeta_d$	1050	245	51	12,3	4,0	1,0	0,42	0,05

8. Резкий поворот трубы (колено) (рис. II - VIII).

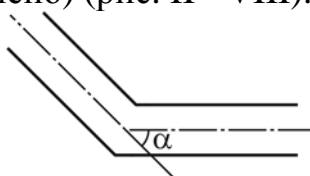


Рис. II - VIII

а) Для трубы круглого сечения

Таблица. II - VI

$\alpha^\circ$	30	40	50	60	70	80	90
$\zeta_{\text{КОЛ}}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10

б) Для трубы прямоугольного сечения

Таблица. II - VII

$\alpha^\circ$	15	30	45	60	90
$\zeta_{\text{КОЛ}}$	0,025	0,11	0,26	0,49	1,20

9. Плавный поворот трубы (отвод) (рис. II - IX).

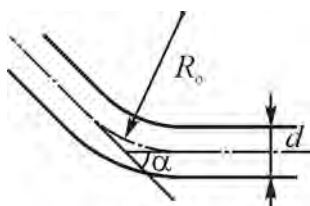


Рис. II - IX

При повороте на угол  $\alpha$  коэффициент сопротивления определяется по

формуле  $\zeta_{\text{отв}} = \zeta_{90} \frac{\alpha^\circ}{90}$ ,

Где  $\zeta_{90}$  – коэффициент сопротивления при  $\alpha = 90^\circ$ , определяется по нижеследующей таблице:

Таблица. II - VIII

$d/2R_{\text{II}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\zeta_{90}$	0,13	0,14	0,16	0,21	0,29	0,44	0,66	0,98	1,41	1,98

10. Задвижка, перекрывающая трубу.

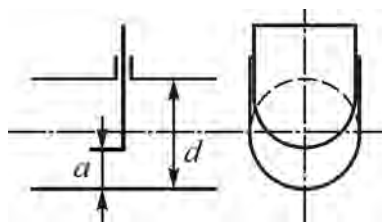


Рис. II - X

а) Для труб круглого сечения (рис. II - X).

Таблица. II - IX

Вид задвижки	$a/d$									
	0,125	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Простая	97,8	35,0	10,0	4,60	2,06	0,98	0,44	0,17	0,06	0
Лудло		43,0	22,0	12,0	5,3	2,8	1,5	0,8	0,3	0,15

б) Простая задвижка для труб прямоугольного сечения (рис. II - XI).

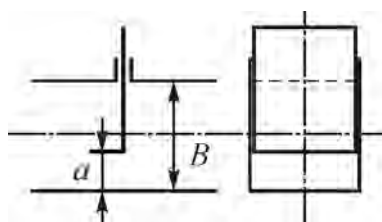


Рис. II - XI

Таблица II - X

$a/b$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\zeta_3$	193	44,5	17,8	8,12	4,02	2,08	0,95	0,39	0,09	0,0

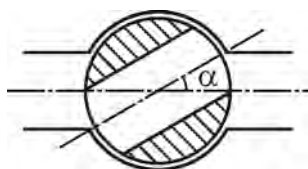


Рис. II - XII

Таблица II - XI

$\alpha^\circ$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$\zeta_{кр}$	0,05	0,29	0,75	1,56	3,10	5,47	9,68	17,3	31,2	52,6	106

### ПРИЛОЖЕНИЕ III

Таблица III - I Предельные расходы  $q_{\text{пред}}$ , л/с, для металлических труб

Условный расход $D_y$ , мм	Экономический фактор Э					
	0,5		0,75		1	
50	≤ 3,5	–	≤ 3,1	–	≤ 2,8	–
65	3,5...4,7	≤ 3,3	3,1...4,1	≤ 2,9	2,8...3,8	≤ 2,6
75	4,7...5,5	–	4,1...4,8	–	3,8...4,4	–
80	5,5...7,7	3,3...5,1	4,8...6,7	2,9...4,4	4,4...6,1	2,6...4
100	7,7...13,4	5,1...8,4	6,7...11,7	4,4...7,3	6,1...10,6	4...6,6
125	13,4...19	8,4...13,3	11,7...16,6	7,3...11,6	10,6...15,1	6,6...10,6
150	19...25	13,3...22,5	16,6...21,8	11,6...19,6	15,1...19,8	10,6...17,8
275	25...33,4	–	21,8...29,2	–	19,8...26,5	–
200	33,4...53	22,5...40,7	29,2...46	19,6...35,5	26,5...42	17,8...32,3
250	53...82	40,7...65,3	46...71	35,5...57	42...65	32,3...51,8
300	82...118	65,3...95,9	71...103	57...83,8	65...93	51,8...76
350	118...161	95,9...132	103...140	83,8...116	93...128	76...105
400	161...211	132...200	140...184	116...174	128...167	105...158
450	211...257	–	184...226	–	167...205	–
500	257...343	200...312	226...301	174...273	205...273	158...248
600	343...484	312...460	301...424	273...402	273...384	248...365
700	484...651	460...641	424...571	402...560	384...518	365...509
800	651...856	641...852	571...751	560...749	518...680	509...681
900	856...1094	858...1100	751...959	749...970	680...870	681...880
1000	1094...1367	≥ 1100	959...1199	≥ 970	870...1087	≥ 880
1100	1367...1679	–	1199...1472	–	1087...1335	–
1200	1679...2018	–	1472...1770	–	1335...1604	–
1300	2018...2404	–	1770...2108	–	1604...1911	–
1400	2404...2814	–	2108...2468	–	1911...2237	–
1500	2814...3264	–	2468...2863	–	2237...2595	–
1600	≥ 3264	–	≥ 3264	–	≥ 3264	–

Таблица III - II Удельные сопротивления  $S_{o_{1,0}}$ ,  $c^2/m^6$ , при скорости  $V = 1$  м/с для новых стальных водогазопроводных и чугунных труб

$D_y$ , мм	Стальные водогазопроводные ГОСТ 3262 – 75		Чугунные трубы, ГОСТ 9583 – 75			
	$D_p$ , мм	$S_{o_{1,0}}$	Класс ЛА		Класс А	
			$D_p$ , мм	$S_{o_{1,0}}$	$D_p$ , мм	$S_{o_{1,0}}$
15	15,7	3962000	–	–	–	–
20	21,2	824600	–	–	–	–
25	27,1	228500	–	–	–	–
32	35,9	52570	–	–	–	–
40	41	26260	–	–	–	–
50	53	6864	–	–	–	–
65	67,5	1940	67,6	2556	66,2	2855
80	80,5	772,7	83,6	832	82,2	910
90	93,3	360,1	–	–	–	–
100	105	192,7	103	276,1	101,4	300
125	131	60,65	128,2	83,6	126,6	92,9
150	156	24,35	153,4	34,09	151,6	35,83
200	–	–	203,6	7,4	201,8	7,9
250	–	–	254	2,3	252	2,44
300	–	–	304,4	0,83	302,2	0,94
350	–	–	354,6	0,402	352,4	0,415
400	–	–	404	0,202	401,4	0,209
500	–	–	503,6	0,063	500,8	0,065
600	–	–	603,4	0,0242	600,2	0,0249
700	–	–	703	0,0108	699,4	0,0111
800	–	–	803,6	0,00533	799,8	0,00547
900	–	–	903,8	0,00287	899,2	0,00294
1000	–	–	1003	0,00165	998,4	0,00170

Таблица III - III Удельные сопротивления  $S_{o_{1,0}}$ ,  $c^2/m^6$ , при скорости  $V = 1$  м/с для новых стальных электросварных прямошовных труб (ГОСТ 10704 – 76; СТ СЭВ 490 – 77)

$D_y$ , мм	$D_p$ , мм	$S_{o_{1,0}}$	$D_y$ , мм	$D_p$ , мм	$S_{o_{1,0}}$	$D_y$ , мм	$D_p$ , мм	$S_{o_{1,0}}$	$D_y$ , мм	$D_p$ , мм	$S_{o_{1,0}}$
50	65	2362	115	127	71,32	250	261	1,653	700	696	0,009822
55	68	1866,3	125	134	53,88	275	286	1,025	800	796	0,00487
60	71	1494	135	146	34,42	300	311	0,6619	900	892	0,002686
65	78	911,1	140	150	29,88	325	337	0,4348	1000	992	0,001541
75	84	621,8	150	159	22,04	350	363	0,2948	1100	1092	0,0009331
80	90	431,3	175	171	15,09	375	386	0,2139	1200	1192	0,0005903
85	96	307,8	180	185	9,987	400	414	0,1483	1300	1292	0,0003875
90	102	224,2	190	194	7,792	450	466	0,08001	1400	1392	0,0002624
95	108	166,3	200	210	5,149	500	512	0,04887	1500	1492	0,0001826
100	115	119,8	225	234	2,925	600	610	0,01957	1600	1592	0,0001301
110	121	91,84	–	–	–	–	–	–	–	–	–



### Библиографический список

1. Методические указания для решения задач по гидравлике. Часть II: Динамика жидкости / сост. А.О. Шестопап. – Волгоград: ВолГИСИ, 191. – 27 с.
2. Шестопап А.О. Гидравлика: сборник задач с примерами решения / Волгогр. гос. архит. – строит. ун – т. Волгоград: ВолГАСУ, 2009. – 108 с.
3. Справочник по гидравлике / под ред. В.А. Большакова. – 2-е изд. перераб. и доп. – Киев: Вища шк. Головное изд-во. 1984. – 343 с.

Публикуется в авторской редакции  
Подписано в свет 26.06.2013.  
Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 0,8. Объем данных 124 Мбайт

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»  
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1  
<http://www.vgasu.ru>, [info@vgasu.ru](mailto:info@vgasu.ru)