

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

**В. А. Каныгин,
Е. В. Цветкова**

ГИДРАВЛИКА

**Учебно-практическое
пособие**

Волгоград. ВолгГАСУ. 2014



© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный
архитектурно-строительный университет», 2014

УДК 626.01(075.8)
ББК 30.123я73
К199

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук *С. М. Мусаелян*, профессор кафедры гидротехнических и земляных сооружений Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; кандидат технических наук *А. Ю. Миронов*, старший преподаватель кафедры технических и естественнонаучных дисциплин филиала Московского государственного университета технологий и управления в р. п. Светлый Яр

Каныгин, В. А.

К199 Гидравлика [Электронный ресурс]: учебно-практическое пособие / В. А. Каныгин, Е. В. Цветкова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. — Электронные текстовые и графические данные (4,7 Мбайт). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2014. — Учебное электронное издание сетевого распространения. — Систем. требования: РС 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-98276-645-8

Изложены теоретические сведения, необходимые для самостоятельного изучения курса гидравлики. Приведены алгоритмы решений основных типов задач, контрольные вопросы по темам курса, а также задачи для самостоятельного решения.

Для студентов дистанционной формы обучения профилей ПГС и ПСК.

Для удобства работы с изданием рекомендуется пользоваться функцией Bookmarks (Закладки) в боковом меню программы Adobe Reader.

УДК 626.01(075.8)
ББК 30.123я73

Незаконное использование данного продукта запрещено

ISBN 978-5-98276-645-8



© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Раздел 1. Теоретическая часть	5
1. Основные физические свойства жидкостей	5
2. Гидростатика	7
2.1. Решение задач с использованием основного уравнения гидростатики	7
2.2. Решение задач на определение силы гидростатического давления на произвольные плоские поверхности	10
2.3. Решение задач на определение силы гидростатического давления на криволинейные поверхности	12
3. Гидродинамика	15
3.1. Основы кинематики жидкости	15
3.2. Уравнение Бернулли и правила его применения	16
3.3. Определение потерь напора по длине	18
3.4. Определение потерь напора на местных сопротивлениях	21
3.5. Построение напорной и пьезометрической линий	21
Раздел 2. Выполнение контрольных работ	25
4. Методические указания по выполнению задач и контрольные вопросы	30
5. Задачи	32
Библиографический список	39
Приложение 1. Кинематический коэффициент вязкости воды	40
Приложение 2. Таблицы коэффициентов местных сопротивлений	40

ВВЕДЕНИЕ

Изучение курса гидравлики необходимо для качественного образования инженера в области водоснабжения, водоотведения, гидротехники, малых водопропускных сооружений и т. п.

Курс «Гидравлика» для дистанционной формы обучения состоит из изучения теории, а также выполнения контрольных заданий и лабораторных работ.

Контрольное задание — это шесть задач, а также перечень вопросов, на которые студент должен ответить при защите задания во время сессии. Приступая к самостоятельному решению контрольных задач, студент должен предварительно изучить теоретическую часть курса по теме, обдумать схему решения, записать нужные формулы, аккуратно выполнить рисунок в масштабе. Задачи необходимо решать в Международной системе единиц измерения СИ.

Пособие рекомендуется использовать вместе с учебником и справочными материалами.

Подготовка ответов на контрольные вопросы и самостоятельное решение задач позволит в дальнейшем успешно пройти итоговый контроль в виде зачета или экзамена.

Раздел 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Плотностью однородного жидкого тела называют массу единицы объема или отношение массы тела к его объему, которое вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{m}{W},$$

где m — масса однородного жидкого тела, W — его объем. Размерность плотности кг/м^3 ; г/см^3 .

За счет изменения объема жидкости при изменении температуры ее плотность изменяется.

Объемным весом однородного жидкого тела называется вес единицы объема тела или отношение веса тела к его объему.

$$\gamma = \frac{G}{W},$$

где G — вес однородного тела; W — объем этого тела.

Существует взаимосвязь между объемным весом и плотностью. Согласно второму закону Ньютона, для силы тяжести можно написать следующую зависимость:

$$\gamma = \rho g,$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Капельные жидкости обладают свойством незначительно изменять объем при изменении температуры и давления. В подавляющем большинстве задач практики промышленного и гражданского строительства этими изменениями можно пренебречь.

Изменение объема жидкостей при изменении температуры характеризуется коэффициентом температурного расширения β_t — относительным изменением объема жидкости при увеличении температуры t на 1°C , т. е.

$$\beta_t = \frac{1}{W} \frac{\Delta W}{\Delta t}.$$

β_t имеет размерность $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Сжимаемость капельных жидкостей при изменении давления характеризуется коэффициентом объемного сжатия, т. е. относительным изменением объема W при увеличении давления P на единицу.

$$\beta_w = -\frac{1}{W} \frac{\Delta W}{\Delta P}.$$

β_w имеет размерность Па^{-1} .

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, называется модулем упругости, измеряется в Па.

$$E_0 = \frac{1}{\beta_w}.$$

Вязкостью или внутренним трением жидкости называется способность жидкости оказывать сопротивление скольжению одного слоя относительно другого.

Пусть жидкость течет вдоль плоской стенки параллельными ей слоями. Вследствие тормозящего влияния стенки слои жидкости будут двигаться с разными скоростями, значения которых возрастают по мере отдаления от стенки (рис. 1).

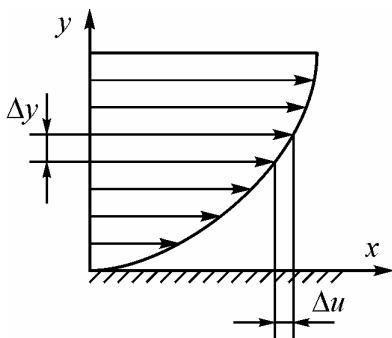


Рис. 1

Рассмотрим два слоя жидкости, движущихся на расстоянии Δy друг от друга. Вследствие разности скоростей верхний слой сдвигается относительно нижнего на величину Δu (за единицу времени). Величина Δu , является абсолютным сдвигом между слоями, а $\Delta u / \Delta y$ есть градиент скорости (относительный сдвиг). Возникающее при этом движении касательное напряжение (сила трения на единицу площади) обозначим буквой τ . Тогда аналогично явлению

сдвига в твердых телах можно предположить зависимость между напряжением и деформацией в виде

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y},$$

а если слои будут находиться бесконечно близко друг к другу, то

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}.$$

Это соотношение называется законом вязкого трения Ньютона.

Величина μ , характеризующая сопротивляемость жидкости сдвигу, называется *динамической вязкостью*. Динамическая вязкость измеряется в Па·с или в Н·с/м².

Сила внутреннего трения в жидкости

$$T = \tau\omega = \omega\mu \frac{du}{dy},$$

т. е. прямо пропорциональна градиенту скорости, площади трущихся слоев ω и динамической вязкости μ .

Наряду с понятием динамической вязкости в гидравлике находит применение понятие *кинематической вязкости* ν , представляющей собой отношение динамической вязкости жидкости к ее плотности.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

Кинематическая вязкость измеряется в м²/с.

2. ГИДРОСТАТИКА

2.1. Решение задач с использованием основного уравнения гидростатики

Гидростатическим давлением называется физическая величина P , равная пределу отношения численного значения ΔN , нормальной силы, действующей на участок поверхности тела площадью $\Delta\omega$, к величине $\Delta\omega$ при $\Delta\omega$ стремящейся к нулю.

$$P = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta\omega}.$$

Гидростатическое давление обладает двумя свойствами. Первое свойство — сила гидростатического давления направлена по внутренней нормали к площадке, которая воспринимает это давление. Второе свойство — величина гидростатического давления в точке не зависит от ориентации (от угла наклона) площадки.

Приступая к решению задачи, студент должен твердо усвоить, что давление может выражаться в трех системах измерения давления:

1. Абсолютное давление ($P_{\text{абс}}$) отсчитывается от состояния отсутствия всякого давления, от полного вакуума (рис. 2). Атмосферное давление в обычных технических расчетах в системе абсолютного давления принимают равным одной технической атмосфере или 98,1 кПа ($P_{\text{атм}} = 98,1$ кПа).

2. Избыточное давление ($P_{\text{изб}}$) отсчитывается от условного нуля, равного атмосферному давлению. В системе избыточного давления $P_{\text{атм}} = 0$.

3. Вакуумметрическое давление ($P_{\text{вак}}$) показывает недостаток давления до атмосферного.

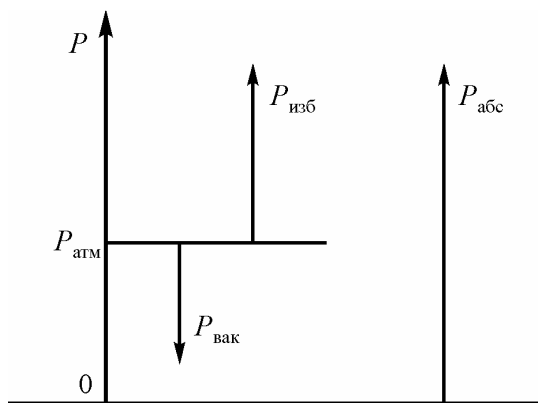


Рис. 2

Связь между значениями давления, записанными в разных системах, выражается формулами:

$$\begin{aligned} P_{\text{абс}} &= P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}; \\ P_{\text{изб}} &= P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}}; \\ P_{\text{вак}} &= -P_{\text{изб}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Как мы видим, в области вакуума $P_{\text{изб}}$ может быть и отрицательным.

Основное уравнение гидростатики имеет формулировку «давление в любой точке покоящейся жидкости (P) равно сумме давления на поверхности жидкости (P_0) и давления столба жидкости над этой точкой (ρgh)» и записывается как

$$P = P_0 + \rho gh, \quad (2)$$

где h — расстояние от свободной поверхности жидкости до точки по вертикали (глубина расположения точки); ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

С помощью этого уравнения можно определить одну из трех величин — P или P_0 , или h , если известны две другие.

Для решения задач также следует вспомнить понятие *поверхности уровня* — это поверхность, принадлежащая одному и тому же объему жидкости, давление во всех точках которой одинаково. В поле сил тяжести поверхности уровня — это горизонтальные плоскости. Свободная поверхность — одна из поверхностей уровня.

Задачи рекомендуется решать в международной системе единиц СИ. Атмосферное давление далее принимается равным 98 100 Па или 98,1 кПа. Плотность воды равна 1000 кг/м³. Плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13\,600$ кг/м³.

При практических расчетах одна техническая атмосфера равна 1 кгс/см² = 10 м вод. ст. = 735 мм рт. ст. = 98 070 Н/м².

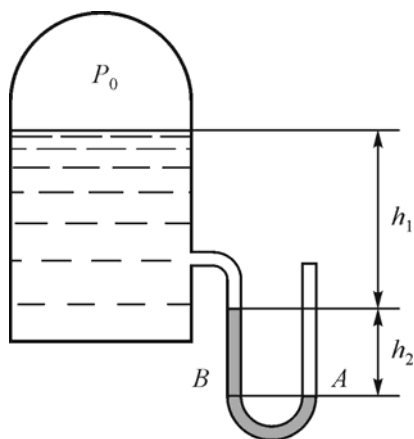


Рис. 3

Пример 1. Ртутный U -образный вакуумметр присоединен к сосуду с водой над поверхностью которой имеется вакуум $P_0 = 19,62$ кПа (рис. 3). Определить показания вакуумметра h_2 , если $h_1 = 368$ мм.

Решение. Для решения задач из этого раздела рекомендуется придерживаться следующего примерного алгоритма:

1. Вначале необходимо выбрать для себя систему измерения давления в которой вы будете решать задачу — абсолютного или избыточного давления.

Если в условии задано давление в другой системе, его следует перевести в ту систему, которую вы выбрали.

Для решения задачи выберем, например, систему избыточного давления, то есть все давления будем выражать в этой системе. Заданное в условии P_0 вакуумметрическое переведем в избыточное.

$$P_0 = -19,62 \text{ кПа.}$$

2. Следует выбрать на схеме точку, давление в которой либо известно, либо легко определяемо, и провести через нее поверхность уровня.

В качестве такой точки выбираем точку A и проводим через нее поверхность уровня — горизонтальную плоскость AB . Обе точки A и B принадлежат одному и тому же объему ртути.

Давление в точке A на открытом конце трубки атмосферное, т. е.

$$P_A = P_{\text{атм}} = 0.$$

3. На поверхности уровня нужно выбрать вторую точку и записать для нее основное уравнение гидростатики, в которое войдет искомая величина.

Второй точкой выберем точку B и запишем

$$P_A = P_B;$$

$$P_B = P_0 + \rho_B g h_1 + \rho_{\text{рт}} g h_2.$$

4. Далее следует приравнять выражения давлений в обеих точках и решить полученное уравнение относительно неизвестной величины.

$$P_A = P_0 + \rho_B g h_1 + \rho_{\text{рт}} g h_2;$$

$$h_2 = \frac{P_A - P_0 - \rho_B g h_1}{\rho_{\text{рт}} g}.$$

Подставив численные значения, получим

$$h_2 = \frac{0 - (-19,62 \cdot 10^3) - 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,368}{13600 \cdot 9,81} = 0,12 \text{ м.}$$

Ответ: $h_2 = 0,12 \text{ м.}$

Пример 2. В закрытом подземном резервуаре (рис. 4) находится жидкость плотностью ρ , уровень которой может изменяться от z_{min} до z_{max} . Для измерения уровня жидкости использована U -образная трубка с гидравлическим ртутным затвором. Свободный участок трубки заполнен на высоту h_0 жидкостью плотностью ρ , по мениску которой отсчитывается контролируемый уровень.

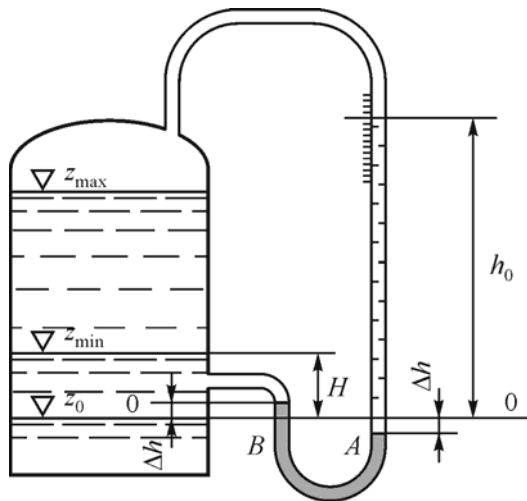


Рис. 4

Изменение (повышение или понижение) уровня жидкости в резервуаре на величину ΔH приводит к соответствующему изменению положения мениска на шкале на величину Δh .

Известно, что $h_0 = 10$ м, превышение H минимального уровня жидкости над нулем гидравлического затвора равно $H = 1$ м. Определить отклонение Δh менисков ртути от нуля гидрозатвора, если $\rho = \rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Решение. Проведем поверхность уровня по нижнему мениску ртути и составим основное уравнение гидростатики в левом и правом колена гидрозатвора для точек A и B .

$$P_0 + \rho g(H - \Delta h) + 2\rho_{\text{рт}} g\Delta h = P_0 + \rho g(h_0 + \Delta h).$$

P_0 для обеих точек будет одинаковым. Выполнив алгебраические преобразования, получим

$$\Delta h = \frac{\rho g(h_0 - H)}{2g(\rho_{\text{рт}} - \rho)}.$$

Подставим численные значения.

$$\Delta h = \frac{1000(10 - 1)}{2(13600 - 1000)} = 0,357 \text{ м.}$$

2.2. Решение задач на определение силы гидростатического давления на произвольные плоские поверхности

Сила гидростатического давления на плоскую наклонную стенку определяется как произведение гидростатического давления в центре тяжести этой стенки на ее площадь (рис. 5).

$$F = (P_0 + \rho gh_c)\omega, \quad (3)$$

где P_0 — избыточное давление на свободной поверхности жидкости; h_c — глубина расположения центра тяжести площади ω ; ω — площадь стенки.

В частном случае, когда давление P_0 является атмосферным и действует также с другой стороны стенки, сила F избыточного давления жидкости на плоскую стенку равна лишь силе давления от веса жидкости $F_{\text{ж}}$.

$$F = F_{\text{ж}} = \rho gh_c\omega. \quad (4)$$

Если давление отличается от атмосферного, полная сила F рассматривается как сумма двух сил: F_0 от внешнего давления P_0 :

$$F_0 = P_0 \omega$$

и силы веса жидкости $F_{\text{ж}}$:

$$F = F_0 + F_{\text{ж}} = P_0 \omega + \rho g h_C \omega.$$

Точки приложения этих сил называются центрами давления.

Так как внешнее давление P_0 по закону Паскаля передается всем точкам площадки одинаково, то его равнодействующая F_0 будет приложена в центре тяжести площади в точке C (рис. 5). Точка приложения D в координатах, принятых на рис. 5, определяется по формуле:

$$y_D = y_C + \frac{J}{y_C \omega}, \quad (5)$$

где y_D — координата центра давления; y_C — координата центра тяжести площадки ω ; J — момент инерции площадки ω относительно горизонтальной оси, проходящей через ее центр тяжести.

Если P_0 равно атмосферному, то точка D и будет центром давления, а если P_0 отличается от $P_{\text{атм}}$, то равнодействующую F_0 и $F_{\text{ж}}$ находят по правилам механики.

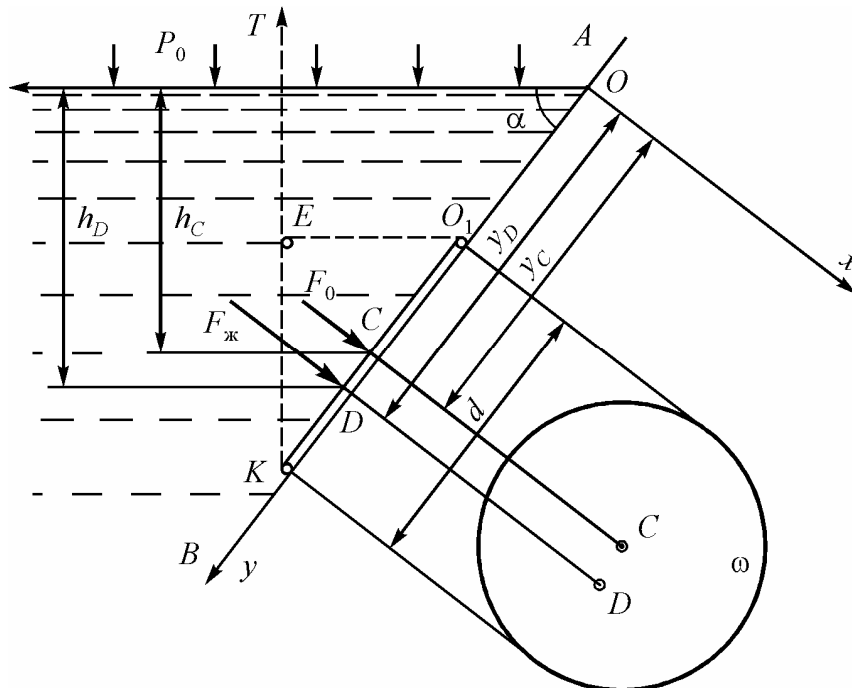


Рис. 5

Пример 3. В стенке резервуара с водой AB (см. рис. 5), наклоненной к горизонту под углом $\alpha = 60^\circ$ имеется заслонка круглой формы диаметром $d = 1$ м. Центр тяжести заслонки находится на глубине $h_C = 1,73$ м.

Заслонка шарнирно закреплена в точке O_1 . Для открытия используется трос, прикрепленный к нижнему краю заслонки K , направленный вертикально вверх. Определить силу T , необходимую для открытия заслонки.

Решение. Как следует из условия, избыточное давление на поверхности отсутствует ($P_0 = P_{\text{атм}}$), следовательно, на заслонку действует только сила весового давления жидкости $F_{\text{ж}}$. Составим уравнение равновесия моментов:

$$\sum M_{O_1} = 0; F_{\text{ж}} \cdot O_1D - T \cdot O_1E = 0.$$

Выразим отсюда искомую силу T :

$$T = \frac{F_{\text{ж}} \cdot O_1D}{O_1E}.$$

Очевидно, что для ответа на вопрос задачи необходимо определить величину $F_{\text{ж}}$ и координату точки приложения точки D . Определим силу давления по формуле (4):

$$F_{\text{ж}} = \rho g h_c \omega = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,73 \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 13\,322 \text{ Н} = 13,3 \text{ кН}.$$

Найдем расстояние OD от уреза воды до точки D по формуле (5):

$$y_c = \frac{h_c}{\sin \alpha}; y_c = \frac{1,73}{0,866} = 2 \text{ м};$$

$$J = \frac{\pi d^4}{64}; J = \frac{3,14 \cdot 1^4}{64} = 0,05 \text{ м}^4;$$

$$y_D = 2 + \frac{0,05}{2,0 \cdot 0,785} = 2,03 \text{ м}.$$

Плечи O_1D и O_1E из геометрических соображений будут равны

$$O_1D = y_D - y_c + \frac{d}{2} = 2,03 - 2 + 0,5 = 0,53 \text{ м};$$

$$O_1E = d \cos \alpha; O_1E = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ м}.$$

Искомая сила T равна

$$T = \frac{13,3 \cdot 0,53}{0,5} = 14,1 \text{ кН}.$$

2.3. Решение задач на определение силы гидростатического давления на криволинейные поверхности

Приступая к решению этого типа задач, следует вспомнить важное свойство давления — действие давления направлено по внутренней нормали к поверхности. Если поверхность представляет, например, тело вращения, то сила давления направлена по радиусу со стороны жидкости.

Сила гидростатического давления на любую криволинейную поверхность в условиях плоской задачи раскладывается на горизонтальную F_x и вертикальную F_z составляющие. Результирующая сила давления находится как векторная сумма горизонтальной и вертикальной составляющих.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}. \quad (6)$$

Направление силы определяет тангенс угла наклона силы к горизонтальной поверхности.

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{F_z}{F_x}. \quad (7)$$

Горизонтальная составляющая силы давления на криволинейную поверхность равна силе давления на проекцию этой поверхности на вертикальную плоскость, нормальную оси Ox .

$$F_x = (P_0 + \rho gh_c)\omega_x, \quad (8)$$

где P_0 — избыточное давление на свободной поверхности жидкости; h_c — глубина расположения центра тяжести площади вертикальной проекции ω_x ; ω_x — площадь проекции поверхности на вертикальную плоскость.

Вертикальная составляющая силы давления на криволинейную поверхность равна весу жидкости в объеме, заключенном между криволинейной поверхностью и ее проекцией на свободную поверхность.

Под *весом* понимается сила тяжести этого объема которая проходит через его центр тяжести.

$$F_z = \rho gW. \quad (9)$$

Объем W , определенный таким образом называется *телом давления*.

Различают *действительные*, *фиктивные* и *смешанные тела давления*. Если тело давления ABC (рис. 6, а) заполнено жидкостью, то оно называется действительным, если не заполнено жидкостью (тело ABC рис. 6, б) — фиктивным, если есть те и другие участки (рис. 6, в) — смешанным.

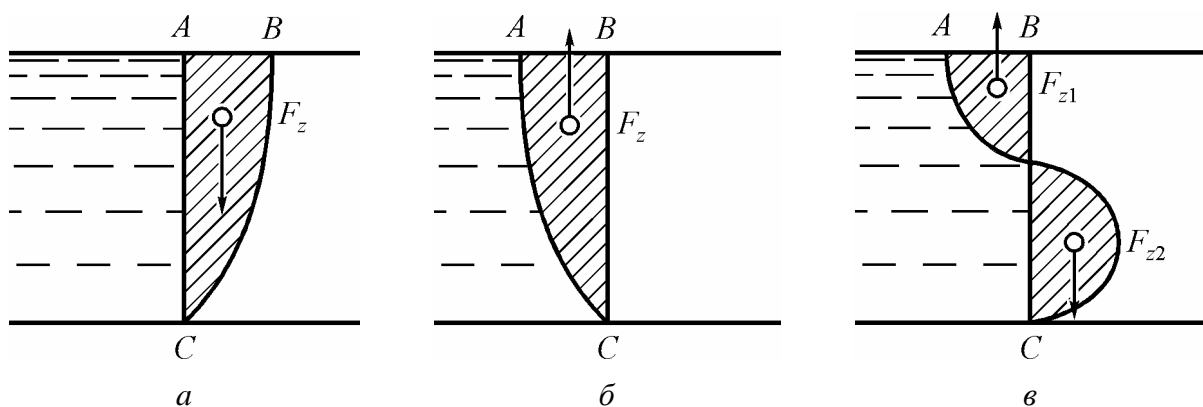


Рис. 6

Если давление на свободной поверхности жидкости $P_0 \neq P_{\text{атм}}$, то тело давления ограничивается пьезометрической плоскостью, удаленной от свободной поверхности на расстояние

$$h = \frac{P_0}{\rho g}.$$

Пример 4. Определить силу давления воды на 1 м ширины нижней криволинейной части сооружения (рис. 7), если $H = 1,5$ м, $r = 0,5$ м.

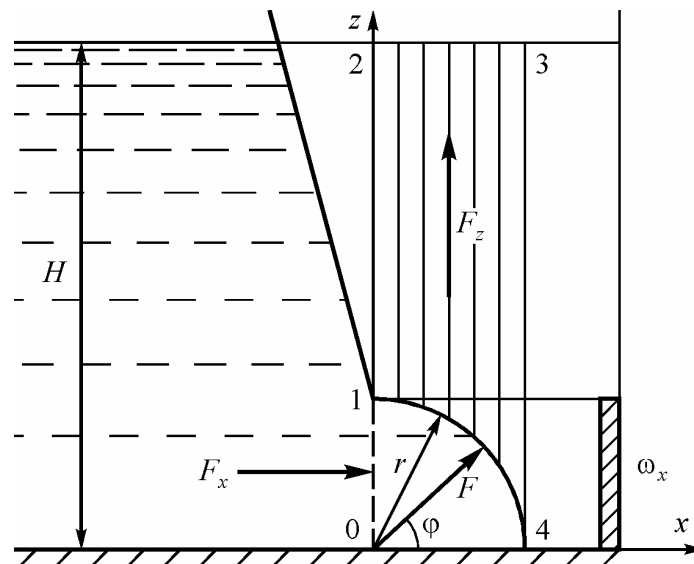


Рис. 7

Решение. Выберем систему координат Oxz и спроецируем криволинейную фигуру на плоскость, нормальную оси Ox . Горизонтальная составляющая силы давления воды на криволинейную часть сооружения равна силе давления на вертикальную проекцию этой поверхности ω_x .

$$F_x = \rho g h_c \omega_x = \rho g (H - r/2) rb,$$

$$F_x = 1000 \cdot 9,81 (1,5 - 0,5/2) 0,5 \cdot 1 = 6130 \text{ Н} = 6,13 \text{ кН}.$$

Вертикальная составляющая F_z равна весу жидкости в объеме тела давления. Спроецируем криволинейную поверхность 1—4 на продолжение свободной поверхности и отметим, что тело давления будет фиктивным и ограничено сверху поверхностью 2—3. Его объем будет равен площади фигуры 1—2—3—4, умноженной на $b = 1$ м.

$$F_z = \rho g \left(Hr - \frac{\pi r^2}{4} \right) b;$$

$$F_z = 1000 \cdot 9,81 \left(1,5 \cdot 0,5 - \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \right) 1 = 5430 \text{ Н} = 5,43 \text{ кН}.$$

Суммарная сила давления на криволинейную часть сооружения рассчитывается по формуле:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} = \sqrt{6,13^2 + 5,43^2} = 8,19 \text{ кН.}$$

Направление силы определяется углом наклона φ к горизонту, причем линия действия силы проходит через центр круга.

$$\varphi = \arctg \frac{F_z}{F_x} = \arctg \frac{5,43}{6,13} = 41^\circ 31'.$$

3. ГИДРОДИНАМИКА

3.1. Основы кинематики жидкости

Линия тока при установившемся движении представляет собой неизменную во времени траекторию, вдоль которой одна за другой движутся частицы жидкости (рис. 8).

Поверхность AB , нормальная к линиям тока и лежащая внутри потока, называется *живым сечением*. Площадь AB принято обозначать через ω (ω — площадь живого сечения).

Расходом жидкости называется объем ее, проходящий в единицу времени через живое сечение. Расход обозначают буквой Q . Размерность Q — $\text{м}^3/\text{с}$; $\text{дм}^3/\text{с}$; л/с.

Если через $d\omega$ обозначить элементарную часть площади живого сечения, то элементарный расход, проходящий через площадку $d\omega$, рассчитывается по формуле:

$$dQ = u d\omega.$$

Поскольку скорости u в разных точках живого сечения в общем случае различны, то величину Q можно представить в виде

$$Q = \int_{\omega} u d\omega,$$

где интеграл берется по всей площади живого сечения.

Средняя скорость. Было отмечено, что скорости течения u в разных точках живого сечения, как правило, различны: $u_1 \neq u_2 \neq u_3 \neq \dots u_n$ (рис. 9).

Для упрощения расчетов в случаях параллельноструйного и плавноизменяющегося движений, вводят понятие *средней для данного живого сечения скорости течения*. Эту скорость (фиктивную, в действительности не существующую) принято обозначать через V . Скорость V определяется соотношением

$$V = \frac{Q}{\omega}, \text{ или } V = \frac{\int_{\omega} u d\omega}{\omega},$$

откуда и ясен ее смысл. Как видно, V есть гидравлическая характеристика данного живого сечения потока.

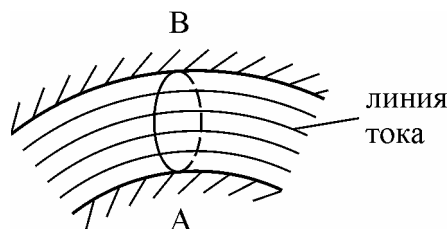


Рис. 8

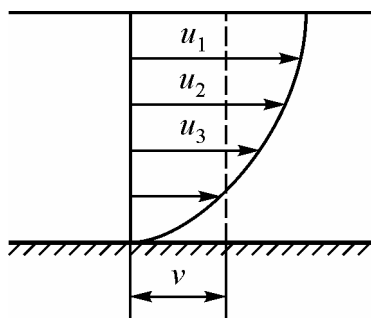


Рис. 9

Расход Q для данного живого сечения выражается формулой:

$$Q = V\omega.$$

Для живого сечения круглой трубы диаметром d расход определяется по формуле:

$$Q = V \frac{\pi d^2}{4},$$

а средняя скорость определяется как

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2}.$$

Если жидкость движется без образования разрывов, то при установившемся движении расход Q для всех живых сечений потока (ограниченного с боков линиями тока, т. е. при условии отсутствия бокового притока или оттока жидкости) одинаков.

$$Q_1 = Q_2 = \dots Q_n.$$

Это уравнение называется *уравнением неразрывности*. Для плавноизменяющегося движения жидкости его уравнение можно представить в виде $V\omega = \text{const}$ (вдоль потока), откуда получаем для двух сечений $V_1\omega_1 = V_2\omega_2$ или

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Как видно, средние скорости обратно пропорциональны площадям живых сечений потока. Для живых сечений круглой трубы (рис. 10) имеем

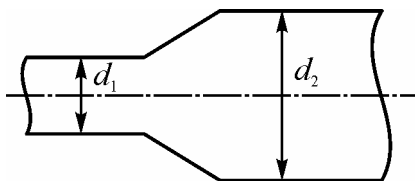


Рис. 10

$$V_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = V_2 \frac{\pi d_2^2}{4}, \text{ или } V_1 = V_2 \frac{d_2^2}{d_1^2}.$$

То есть среднюю скорость в одном сечении трубопровода можно выразить через скорость в любом другом сечении.

3.2. Уравнение Бернулли и правила его применения

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

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_w,$$

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;

α — 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 плавно-изменяющимся, 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

$$V_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = V_2 \frac{\pi d_2^2}{4},$$

или

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}.$$

Пример 5. Определить давление P_1 в сечении 1—1 горизонтально расположенного сопла гидромонитора (рис. 11), необходимое для придания скорости воде в выходном сечении 2—2 $V_2 = 40$ м/с, если скорость движения воды в сечении 1—1 равна $V_1 = 3,6$ м/с. Определить диаметр сопла монитора d_2 , если $d_1 = 100$ мм.

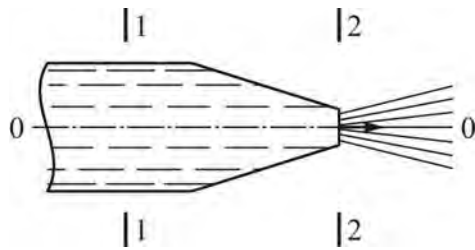


Рис. 11

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 равны $z_1 = z_2 = 0$. 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, т. е. избыточное ($P_2 = 0$). Коэффициент Кориолиса примем равным $\alpha = 1$. Выразим искомое давление P_1 как

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

$$P_1 = 0 + 1000 \cdot 9,81 \left(\frac{40^2}{2 \cdot 9,81} - \frac{3,6^2}{2 \cdot 9,81} \right) = 793\,520 \text{ Па} = 793,5 \text{ кПа}.$$

Диаметр сопла монитора выразим из уравнения непрерывности по формуле:

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

3.3. Определение потерь напора по длине

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

$$h_w = h_e + \sum h_m. \quad (10)$$

Потери напора по длине определяются по формуле Дарси — Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (11)$$

где h_l — потеря напора в метрах столба той жидкости, движение которой рассматривается; λ — коэффициент Дарси или коэффициент гидравлического трения.

Коэффициент λ зависит от многих факторов. В общем виде

$$\lambda = f(\text{Re}, \bar{\Delta}), \quad (12)$$

где Re — число Рейнольдса, которое определяется по формуле:

$$\text{Re} = \frac{Vd}{\nu}, \quad (13)$$

где $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d}$ — относительная шероховатость стенок трубы; ν — кинематическая вязкость жидкости; Δ — эквивалентная шероховатость, то есть высота воображаемых выступов на внутренней поверхности трубы, при которой потери напора получаются такими же как в реальных условиях.

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

Зависимость $\lambda = f(\text{Re}, \bar{\Delta})$ изображают в виде графика сопротивлений (рис. 12), на котором можно выделить четыре зоны:

1. Зона ламинарного течения ($\text{Re} < 2320$).

В этой зоне λ зависит только от числа Re и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (14)$$

Область турбулентного течения разбивается на три зоны:

2. Зона гидравлически гладких труб. Здесь также $\lambda = f(\text{Re})$. Определить λ можно по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (15)$$

3. Доквадратичная зона сопротивления. Здесь $\lambda = f(\text{Re}, \bar{\Delta})$, для этой зоны рекомендуется формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\bar{\Delta} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}; \quad (16)$$

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

Для определения λ используется формула Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left(\bar{\Delta} \right)^{0,25}. \quad (17)$$

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, т. е. 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 докватратичную 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.

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

Необходимо рассчитывать число Рейнольдса для выбора формулы для определения λ .

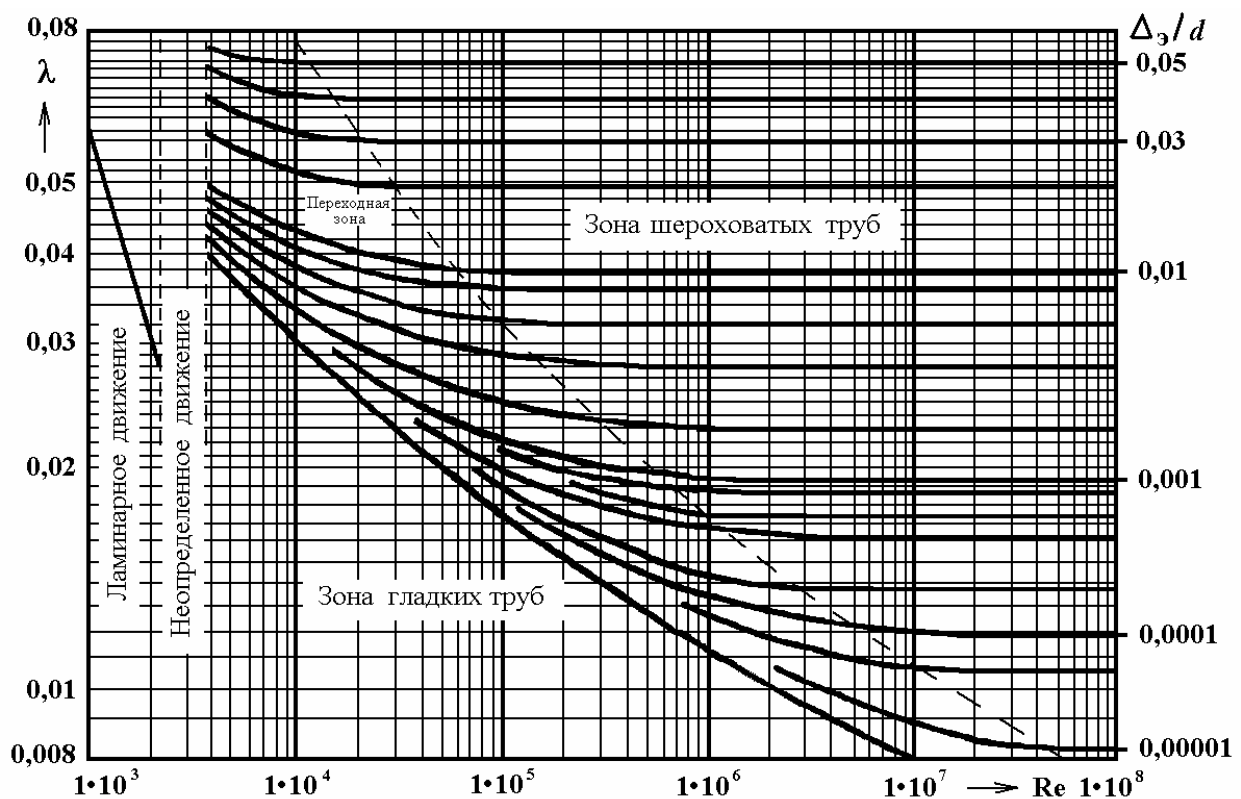


Рис. 12

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

3.4. 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:

$$h_m = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (18)$$

где ζ — коэффициент местного сопротивления.

Значение ζ не поддается теоретическому определению, поэтому его находят по справочным данным, составленным по результатам экспериментов. Исключением является коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении потока. Он определяется по формуле Борда:

$$\zeta_{\text{вн.р}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2, \quad (19)$$

или для труб

$$\zeta_{\text{вн.р}} = \left(\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 1 \right)^2, \quad (20)$$

где ω_1, ω_2 — площади живых сечений соответственно до и после расширения.

Если скорости до и после местного сопротивления неодинаковы, 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 $\zeta_{\text{вых}} = 1$, а также берется скорость течения в трубе до выхода.

3.5. 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 6. Из сосуда M в сосуд N вода, температура которой 18°C , перетекает по трубопроводу, состоящему из двух участков, характеристика которых приведена в таблице (рис. 13):

Участки	d , мм	Δ , мм
a	75	0,4
b	100	0,4

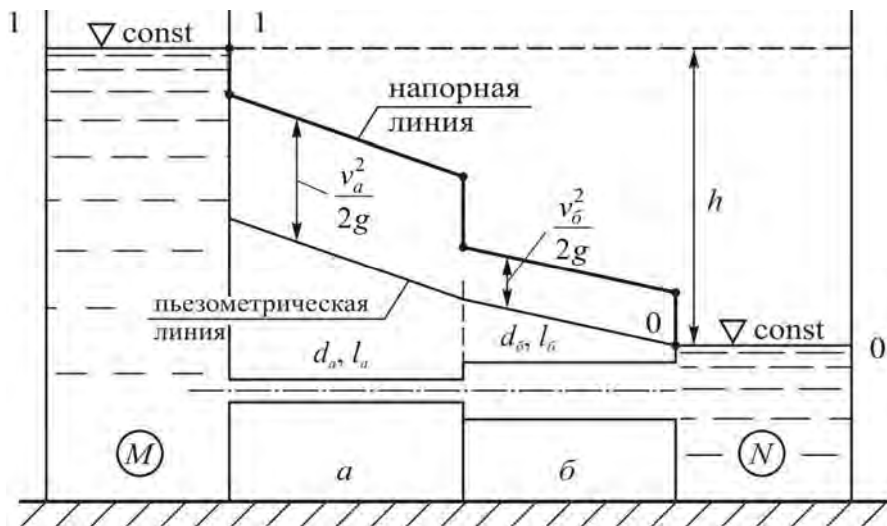


Рис. 13

Определить, при какой разнице уровней в сосудах h расход составит $Q = 9$ 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.

$$h = h_{вх} + h_{вн.р} + h_{вых} + h_{l_a} + h_{l_b},$$

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

Найдем скорости течения. Если расход задается в л/с, его необходимо перевести в единицы измерения системы СИ, т. е. в м³/с.

$$9 \text{ л/с} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определим средние скорости течения на участках *a* и *б* по формуле расхода:

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

$$V_a = \frac{4 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,075^2} = 2,04 \text{ м/с};$$

$$V_b = \frac{4 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,10^2} = 1,15 \text{ м/с}.$$

Теперь вычислим числа Рейнольдса, пусть единицей измерения скорости будет м/с, диаметров — м, а кинематического коэффициента вязкости — м²/с. Он определяется по прил. 1 в зависимости от температуры.

$$\text{Re}_a = \frac{2,04 \cdot 0,075}{1,06 \cdot 10^{-6}} = 144\,340;$$

$$\text{Re}_b = \frac{1,15 \cdot 0,1}{1,06 \cdot 10^{-6}} = 108\,490.$$

Полученные числа сравним с граничными значениями $\text{Re}_{\text{гр}}''$.

$$\text{Re}_{\text{гр. } a}'' = \frac{500 \cdot 75}{0,4} = 93\,750;$$

$$\text{Re}_{\text{гр. } b}'' = \frac{500 \cdot 100}{0,4} = 125\,000.$$

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

На участке *a* $\text{Re}_a > \text{Re}_{\text{гр. } a}''$, т. е. имеем квадратичную зону, определяем λ по (17):

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

На участке *б* $\text{Re}_b < \text{Re}_{\text{гр. } b}''$ имеем переходную зону, т. е. определяем λ по (16):

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

Коэффициенты местных сопротивлений определяем по прил. 2, только коэффициент внезапного расширения — по (20).

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

Теперь вычислим потери напора:

$$h_{\text{вх}} = 0,5 \frac{2,04^2}{2 \cdot 9,81} = 0,11 \text{ м};$$

$$h_{\text{вн. п}} = 0,78 \frac{1,15^2}{2 \cdot 9,81} = 0,05 \text{ м};$$

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

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

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

Искомая потеря напора будет равна

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

Построение напорной и пьезометрической линий см. рис. 13. 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.

РАЗДЕЛ 2. ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Задание к контрольным работам составлено на основе программы курса «Гидравлика» для профилей ПГС, ПСК, составленной в соответствии с образовательным стандартом.

Студенты выполняют контрольную работу, состоящую из шести задач. Номера задач выбираются согласно последней цифре номера зачетки студента (табл. 1), числовые значения указанных в задаче величин — по предпоследней цифре номера зачетки (табл. 2).

Таблица 1

Номера задач к контрольным работам

Последняя цифра номера зачетки	Номера задач
1	1, 6, 11, 15, 20, 21
2	2, 7, 12, 16, 20, 22
3	3, 8, 13, 17, 20, 23
4	4, 9, 14, 18, 20, 24
5	5, 10, 11, 19, 20, 25
6	1, 10, 12, 15, 20, 25
7	2, 6, 14, 16, 20, 24
8	3, 7, 14, 17, 20, 28
9	4, 8, 11, 18, 20, 22
0	5, 9, 12, 19, 20, 21

Задачи необходимо решать самостоятельно, поскольку только таким путем можно выявить возможные недоработки и недопонимание теоретической части курса. В условиях задач не всегда указаны все цифровые значения параметров, необходимых для решения (например, плотность, коэффициент вязкости и др.), поэтому следует использовать рекомендуемую литературу и по ходу решения задач давать ссылки на соответствующий источник с указанием номеров страниц или таблиц. Решение задач должно выполняться с соблюдением размерностей всех входящих величин в системе СИ. Несоблюдение размерности — наиболее частая причина ошибок. Текст условия задач следует приводить полностью.

Таблица 2

Числовые данные к задачам

Номер задачи	Наименование величины и единицы измерения	Последняя цифра номера зачетки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$V, \text{ м}^3$	5	3	3	4	8	5	8	6	10	6
	$\Delta V, \text{ л}$	7,5	9	6,7	6	30	15	12	18	15	18
	$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	10	20	15	10	25	20	10	20	10	20
2	$\rho, \text{ кг/м}^3$	880	850	892	883	891	901	910	900	898	910
	$\nu, \text{ см}^2/\text{с}$	0,13	0,11	0,18	0,18	0,33	0,56	1,10	0,38	1,15	0,32
	$D, \text{ мм}$	60	80	100	70	120	40	90	50	80	100
	$l, \text{ м}$	20	10	12	14	8	16	15	18	14	16
3	Ж	Керосин	Вода	Бензин	Нефть	Глицерин	Вода	Ртуть	Нефть	Керосин	Вода
	$h, \text{ м}$	8	6	2	5	3	2	0,4	4	5	7
4	$h_2, \text{ мм}$	300	255	200	350	280	320	220	180	230	370
5	Ж	Вода	Керосин	Бензин	Вода	Нефть	Керосин	Вода	Глицерин	Бензин	Нефть
	$P_m, \text{ атм}$	0,5 изб.	1,2 изб.	0,2 вак.	0,4 изб.	0,3 вак.	2,0 изб.	0,5 вак.	1,5 изб.	2,2 изб.	0,6 вак.
	$h, \text{ м}$	1,0	2,5	1,8	2,3	2,5	2,5	3,2	1,5	2,2	3,0
	$a, \text{ м}$	0,2	0,3	0,5	0,1	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,5
6	$d, \text{ м}$	0,6	0,5	1,0	0,4	0,8	1,0	0,8	1,2	1,4	0,5
	$b, \text{ м}$	2,0	2,5	3,0	1,5	3,5	2,0	2,3	3,0	2,0	3,2
	$h_1, \text{ м}$	1,6	2,0	2,5	3,0	2,2	2,4	2,8	3,5	4,0	4,6
7	$h_2, \text{ м}$	0,5	0,4	1,0	0,3	0,6	0,5	0,7	1,5	2,5	1,8
	$h_1, \text{ м}$	4,0	5,0	3,0	6,0	4,5	3,5	3,5	3,0	5,0	6,0
	$h_2, \text{ м}$	1,5	2	1,0	3,0	2	1,0	2,0	1,5	3,0	3,5
8	$a, \text{ м}$	0,8	1,0	0,6	0,9	0,7	0,5	0,8	1,4	1,5	0,5
	$G, \text{ кН}$	20	30	15	35	25	15	30	20	25	30
	$b, \text{ м}$	2	4	3	3	2,5	3,5	2	3	3,5	4
8	$D, \text{ м}$	1	2	1,5	0,8	2,2	1,6	1	1,8	0,8	2,6
	$b, \text{ м}$	3	4	2	3	2,4	3	2	2,6	1,4	2,2
	$h, \text{ м}$	2,5	3	3,5	2	3,2	2,8	3,5	2,4	1,7	3,1

Номер задачи	Наименование величины и единицы измерения	Последняя цифра номера зачетки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9	Ж	Вода	Керосин	Бензин	Нефть	Глицерин	Вода	Нефть	Бензин	Керосин	Нефть
	R , м	1,5	2	2,5	3	1	2	1,5	3	2	2,5
	h , м	5	6	5	6	4	6	3,5	5	4	4,5
	b , м	2,5	3	3	2	3	3	2,6	2,2	1,5	3
10	b , м	4,8	3,6	5	2,8	4,6	3,8	4,4	4	3,2	2
	R , м	8	6	10	5	9	7,2	7	5,8	6	3
	h , м	7,2	5,8	8	6,2	9	8,5	8	9	7	6,5
	α , град.	40	60	35	70	45	40	50	60	75	50
11	Q , л/с	15	18,5	20	16,5	19	13,5	18	16	17,5	19,5
12	d_1 , мм	110	90	100	80	60	100	120	70	80	100
	d_2 , мм	60	50	130	100	90	120	140	90	100	130
	d_3 , мм	80	70	80	60	45	80	160	60	35	180
	d_4 , мм	35	30	50	40	30	50	60	30	40	70
	Q , л/с	29	20	95	45	22	40	80	25	32	160
	h , м	5	7	8	5	6	8	7	5	8	11
13	V_1 , м/с	4,5	2	4	3,5	5	2,5	6	3	5,5	6,5
14	h , мм. рт. ст	700	450	600	800	500	650	550	750	400	650
	d_1 , мм	150	180	200	140	250	160	200	240	140	200
	d_2 , мм	70	60	75	60	140	60	70	100	60	100
	l , мм	400	600	350	450	600	400	500	600	350	500
15	Q , м ³ /ч	70	150	60	100	85	130	65	95	100	110
	d_1 , мм	80	140	60	110	100	130	70	120	90	120
	d_2 , мм	250	300	200	240	250	320	200	250	200	300
16	Q , л/с	15	60	25	50	90	30	100	250	10	140
	d , мм	100	200	150	180	250	160	240	400	70	300
	d_1 , мм	80	180	120	150	200	150	180	350	60	250
	d_2 , мм	120	160	140	120	220	120	200	450	80	280
	l , м	800	750	600	450	700	500	600	1000	900	850

Номер задачи	Наименование величины и единицы измерения	Последняя цифра номера зачетки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	Q , м ³ /ч	3,0	14,0	2,5	4,5	7,0	10,0	2,5	8,5	5,5	12,0
	l_1 , м	15	20	25	20	20	18	16	18	16	20
	l_2 , м	10	15	10	15	12	12	12	14	10	16
	d_1 , мм	40	70	30	40	50	60	20	60	36	70
	d_2 , мм	20	30	16	20	20	30	16	20	16	30
18	Q , л/с	3,2	6,0	14,5	18	4,0	9,8	12	29,5	7,5	35
	d_1 , мм	40	50	70	80	50	80	80	100	60	125
	d_2 , мм	70	100	125	100	60	150	120	175	100	200
	l_1 , м	50	60	80	90	70	100	120	120	90	150
	l_2 , м	80	70	60	70	80	100	90	100	120	130
	h , м	4,5	3,8	3,5	5,0	4,0	2,5	3,6	1,8	4,3	3,2
19	h , м	8,2	4,7	6,3	5,1	5,5	5,2	6,1	6,4	5,0	5,7
	d , мм	20	30	30	40	70	60	80	100	120	90
	l , м	14	25	25	22	20	30	26	36	45	32
20	d_1 , мм	50	65	75	90	100	110	125	14	150	180
	Q , л/с	7,85	11,6	13,3	15,9	15,7	17,1	19,6	23,1	24,7	30,5
	ξ_1	18	20	15	14	10	22	24	16	23	12
	ξ_2	12	13	10	9	6	15	16	11	15	8
	P_0 , МПа	0,9	0,85	0,8	0,62	0,5	0,27	0,22	0,16	0,12	0,08
21	Q , л/с	100	15	30	25	50	28	150	36	60	80
	l_1 , м	350	200	250	300	200	150	350	150	250	300
	l_2 , м	200	150	200	150	250	300	200	250	150	200
	l_3 , м	250	350	300	400	350	400	300	350	300	400
	d_1 , мм	200	100	150	100	200	150	300	150	150	200
	d_2 , мм	400	200	250	150	300	200	500	250	300	400
	d_3 , мм	340	150	200	250	100	100	100	200	200	200

Окончание табл. 2

Номер задачи	Наименование величины и единицы измерения	Последняя цифра номера зачетки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
22	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	30	15	10	40	25	5	35	6,5	25	8
	$h_1, \text{ м}$	12	10	8	15	13	9	12	3	8	11
	$h_2, \text{ м}$	3	5	2,5	6	5	6	5	4	4	6
	$l, \text{ м}$	6	4	8	3	4	3	7	6	3	4
23	$d, \text{ мм}$	20	15	25	30	15	25	30	30	10	15
	$h, \text{ м}$	8	3	4	7	2	6	8	5	3	9
24	$Q, \text{ м}^3/\text{мин}$	0,352	1,41	3,13	5,66	8,85	12,7	9,5	5,95	3,6	1,56
	$d, \text{ мм}$	50	100	150	200	250	300	250	200	140	100
	$l, \text{ м}$	1200	1400	1600	2000	1500	1100	1300	1500	1800	1300
	$\delta, \text{ мм}$	7	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	11,5	10,5	9,5	8,5
25	$b, \text{ м}$	5	3	6	8	4	6	5	10	4	8
	$h, \text{ м}$	2	1,5	2,5	3	1,5	2	2,5	3	1	2,5
	m	1,5	1	2	1,25	1,5	1	1,5	1,75	2	1,5
	i	0,0003	0,0008	0,0005	0,0009	0,001	0,0004	0,0008	0,0005	0,0006	0,001

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧ И КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Задачи 1, 2. Решение задач базируется на изучении основных физических характеристик жидкости: плотности, удельного веса, вязкости, коэффициентов объемного сжатия и температурного расширения, а также зависимости указанных характеристик от температуры и давления. При решении задачи № 2 следует использовать закон Ньютона для внутреннего трения жидкости.

Контрольные вопросы к задачам 1, 2

1. Дать определение плотности, удельного веса, вязкости жидкости, привести их размерность.
2. Какова связь между плотностью и удельным весом жидкости?
3. Какие свойства жидкости выражают коэффициент объемного сжатия и коэффициент температурного расширения жидкости, привести их буквенные обозначения и дать определения.
4. Что такое вязкость жидкости?
5. Какая связь существует между динамической и кинематической вязкостью, и какова их размерность в системе СИ?
6. В чем состоит сущность закона вязкого трения Ньютона?
7. Как изменится кинематическая вязкость жидкости при изменении температуры?

Задачи 3—5. Необходимо, предварительно изучив основное уравнение гидростатики и усвоив понятие поверхности уровня, научиться правильно применять их при решении конкретных практических задач.

Контрольные вопросы к задачам 3—5

1. Что называется гидростатическим давлением и каковы его основные свойства?
2. В каких единицах и какими приборами измеряется гидростатическое давление?
3. Запишите основное уравнение гидростатики.
4. В чем состоит сущность законов Паскаля, Архимеда?

Задачи 6—10. Следует определить силу гидростатического давления на плоские стенки и криволинейные поверхности. С учетом того, что результирующая сила, действующая на криволинейную поверхность, находится как векторная сумма горизонтальной F_x и вертикальной F_z составляющих, т. е.

$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}$, эти составляющие находят сперва по отдельности. Для определения вертикальной составляющей необходимо обозначить и заштриховать на рисунке тело давления согласно его определению.

Контрольные вопросы к задачам 6—10

1. Как определяется сила давления на плоские стенки?
2. Что такое центр давления?
3. Почему центр давления всегда находится ниже центра тяжести смоченной поверхности?
4. Как определяются горизонтальная F_x и вертикальная F_z составляющие силы давления на криволинейные поверхности?
5. Как находится результирующая сила давления на криволинейную поверхность F и угол наклона ее к горизонту φ ?

Задачи 11—14. Для решения задач следует использовать уравнение Бернулли для идеальной жидкости (без учета потерь напора). В начале решения задачи необходимо правильно выбрать плоскость сравнения 0—0 и два поперечных сечения в потоке 1—1 и 2—2, затем упростить уравнение Бернулли согласно условиям задачи и найти искомую величину.

Контрольные вопросы к задачам 11—14

1. Что понимается в гидравлике под идеальной жидкостью?
2. Что называется живым сечением потока?
3. В чем отличие между местной и средней скоростью?
4. Какой закон физики лежит в основе уравнения непрерывности потока?
5. Как связаны объемный расход жидкости и живое сечение потока?
6. В чем состоит геометрический и энергетический смысл уравнения Бернулли для идеальной жидкости?

Задачи 15—19. При решении используется уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости (с учетом потерь напора). Необходимо обратить внимание на различие в подходе к решению задач в зависимости от того, что является искомой величиной — напор или расход жидкости. В случае если необходимо определить расход, целесообразно предварительно найти коэффициент гидравлического трения λ по формуле Шифринсона, а затем, определив скорость и область сопротивления трубопровода, уточнить значение коэффициента λ , если область сопротивления трубопровода отличается от квадратичной.

Задача 20. В задаче требуется определить диаметр трубопровода d по заданным значениям H и Q . Задача решается либо методом последовательных приближений, либо графоаналитическим методом с построением графика $Q = f(d)$ при заданном H . Из графика по заданному Q выбирается искомый диаметр d .

Контрольные вопросы к задачам 15—20

1. Чем отличается уравнение Бернулли для реальной (вязкой) жидкости от этого же уравнения для идеальной жидкости?
2. Какие виды потерь энергии в трубопроводе существуют и как они находятся?
3. От каких факторов зависит коэффициент гидравлического трения λ при турбулентном движении, и по каким формулам его можно определить?
4. Опишите характер зависимости коэффициента гидравлического трения технических трубопроводов от числа Рейнольдса и относительной шероховатости (диаграмма Мурина).
5. В каких случаях коэффициенты местных сопротивлений можно находить теоретическим путем?
6. Назовите три типа задач по расчету трубопроводов. Поясните способы их решения.

Задача № 21. При решении используется методика расчета длинных трубопроводов. Рекомендуются использовать обобщенные параметры — удельное сопротивление $S_0 (h_l = S_0 Q^2 l)$ или расходную характеристику K , которые принимаются по справочным данным.

Контрольные вопросы к задаче 21

1. Чем отличается расчет короткого трубопровода от расчета длинного?
2. От каких факторов зависит расчетная характеристика S_0 .

Задачи 22—23. При решении задачи 22 вначале нужно определить, к какому типу относится истечение — это истечение из отверстия в тонкой стенке $l/d < (3 \div 4)$ или истечение из насадки $(3 \div 4) < l/d < (6 \div 7)$, а затем выбрать соответствующее значение коэффициента расхода μ .

В задаче 23 значение коэффициента расхода μ и коэффициента скорости определяются по графикам $\mu = f_2(\text{Re})$ и $\varphi = f_2(\text{Re})$ [1].

Контрольные вопросы к задачам 22—23

1. Какова физическая картина истечения из отверстия в тонкой стенке?
2. В чем состоит физический смысл коэффициента сжатия и коэффициента скорости?
3. Как связаны коэффициент скорости и коэффициент сопротивления при истечении?
4. Как соотносятся расход и скорость при истечении жидкости через наружный цилиндрический насадок в сравнении с истечением ее из малого круглого отверстия того же сечения в тонкой стенке сосуда?

Задача 24. Приращение давления при мгновенном закрытии задвижки может быть найдено по формуле Н. Е. Жуковского, а время закрытия — из формулы $\Delta P' = 2\rho l V_0 / t_3$, принимая, что скорость течения жидкости в трубопроводе во время закрытия задвижки изменяется по линейному закону.

Контрольные вопросы к задаче 24

1. В чем состоит явление гидравлического удара?
2. Какие величины связывает формула Н. Е. Жуковского для гидравлического удара?
3. Как связано время закрытия задвижки с повышением давления в трубе при прямом гидравлическом ударе?

Задача 25. Для решения следует использовать формулу Шези для открытых русел.

Контрольные вопросы к задаче 25

1. Какое течение называется безнапорным?
2. Как связаны коэффициент гидравлического трения λ и коэффициент Шези? Какова размерность коэффициента Шези?
3. Каков физический смысл модуля расхода K и модуля скорости W ?
4. Какое сечение канала называется гидравлически наивыгоднейшим?

5. ЗАДАЧИ

Задача 1. Определить коэффициент температурного расширения воды, если при увеличении температуры на Δt °С объем воды, равный W , увеличился на ΔW . Какой исходной температуре соответствует полученное значение коэффициента температурного расширения β_t при давлении $P = 1,0$ ат.

Задача 2. Какова сила поверхностного трения жидкости x на внутренней стенке трубопровода (рис. 14) диаметром d и длиной l , если профиль скорости в сечении трубопровода описывается законом $V = 25r - 312r^2$, где r — расстояние от поверхности трубопровода, которое изменяется от 0 до $d/2$?

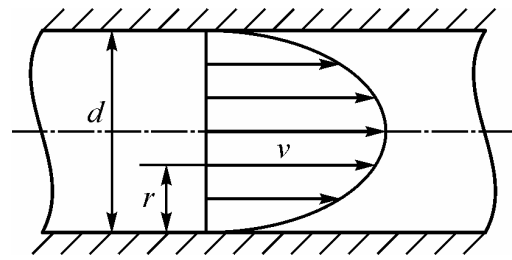


Рис. 14

Задача 3. Определить давление P_0 на свободной поверхности в закрытом сосуде (рис. 15), если в трубе, присоединенной к сосуду, жидкость x поднялась на высоту h .

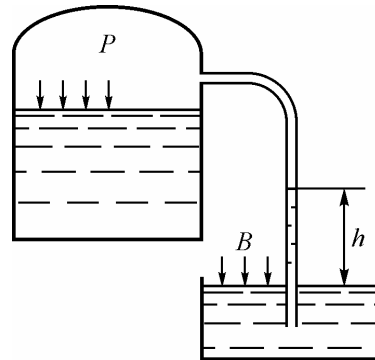


Рис. 15

Задача 4. К герметично закрытому сосуду (рис. 16) присоединен ртутный и водяной вакуумметры. Чему равна вакуумметрическая высота h_1 при заданном h_2 ? Определить величину вакуума в сосуде $P_{\text{овак}}$.

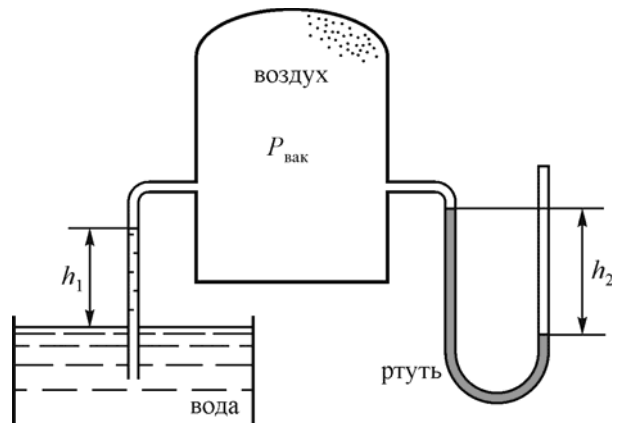


Рис. 16

Задача 5. Механический мановакуумметр, соединенный трубкой с трубопроводом на расстоянии a от его оси, поднят на высоту h . Трубопровод и трубка заполнены жидкостью $ж$ ($t = 20$ °C). Показания мановакуумметра P_m . Определить давление на оси трубопровода (рис. 17).

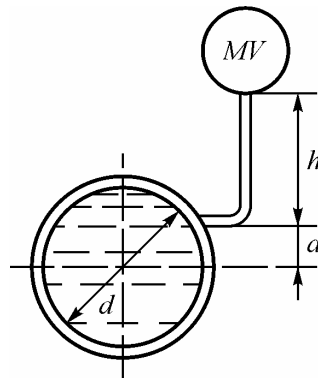


Рис. 17

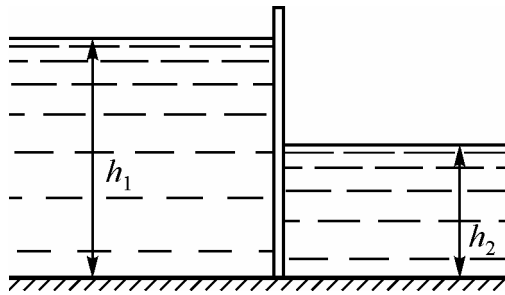


Рис. 18

Задача 6. Плоский затвор перегораживает прямоугольный канал шириной b . Глубина воды перед затвором h_1 , после затвора — h_2 . Определить силу гидростатического давления на затвор и найти точку ее приложения. Построить эпюры гидростатического давления (рис. 18).

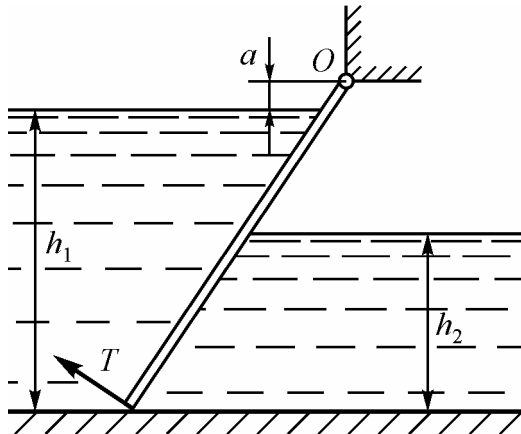


Рис. 19

Задача 7. Найти начальное подъемное усилие T , если сила тяги действует нормально к плоскости прямоугольного затвора шириной b (рис. 19) глубина воды слева от затвора h_1 , справа — h_2 . Расстояние по вертикали от свободной поверхности жидкости до оси шарнира равно a . Угол наклона к горизонту $\alpha = 60^\circ$, вес затвора G . Трением в шарнире пренебречь.

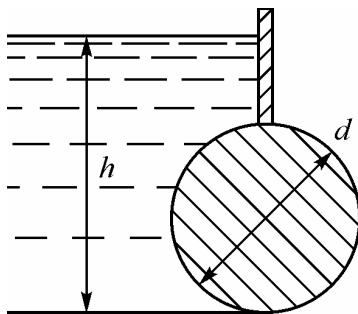


Рис. 20

Задача 8. Цилиндрический затвор диаметром d перекрывает прямоугольный канал шириной b . Глубина воды перед затвором h . Определить силу гидростатического давления, действующую на затвор (рис. 20).

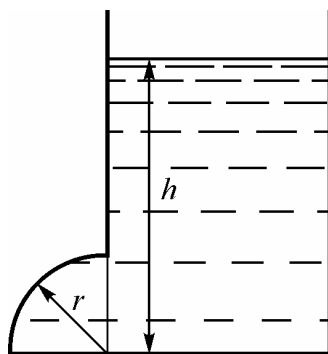


Рис. 21

Задача 9. Определить полную силу гидростатического давления жидкости на деталь, имеющую форму четверти круглого цилиндра радиусом R и укрепленную на болтах (рис. 21). Под каким углом к горизонту направлена сила давления, если напор жидкости равен h , а длина детали вдоль образующей равна b ?

Задача 10. Для регулирования сброса воды на плотине установлен сегментный затвор шириной b , радиусом R и углом α . Глубина воды перед затвором h . Определить силу гидростатического давления на цилиндрическую часть затвора и ее направление (рис. 22).

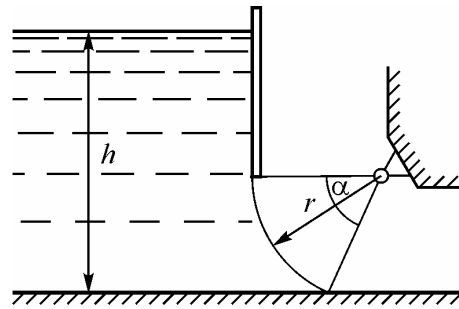


Рис. 22

Задача 11. Определить на какую высоту поднимется вода в трубке, один конец которой присоединен к суженному сечению трубопровода с $d_2 = 40$ мм, а другой опущен в воду. Расход воды в трубе Q , избыточное давление в расширенной части трубопровода с диаметром $d_1 = 100$ мм составляет $P_1 = 4,9 \cdot 10^4$ Па (рис. 23). Гидравлическими потерями пренебречь.

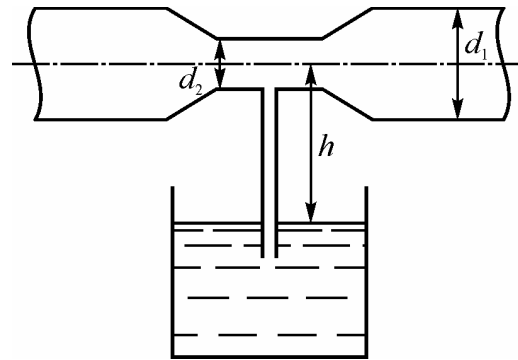


Рис. 23

Задача 12. Из напорного резервуара вода в количестве Q при температуре $t = 20$ °С по трубопроводу переменного сечения (d_1, d_2, d_3) с конической насадкой на конце d_4 вытекает в атмосферу. Расстояние от уровня воды в резервуаре до оси трубопровода h . Определить избыточное давление в резервуаре, которое необходимо создать для обеспечения расхода Q , построить пьезометрическую линию. Гидравлическими потерями пренебречь (рис. 24).

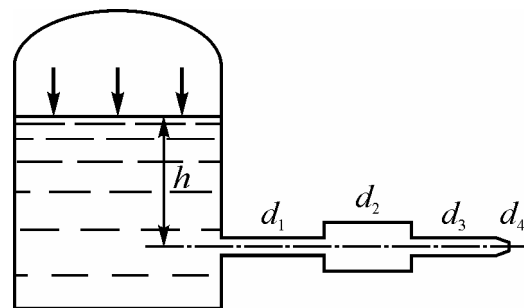


Рис. 24

Задача 13. В трубопроводе с внезапным расширением скорость жидкости в трубе меньшего диаметра равна V_1 (рис. 25). Определить разность показаний пьезометров h , если отношение диаметров труб $d / d_2 = 2$. Потерями напора пренебречь.

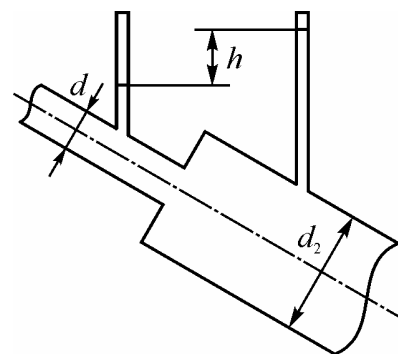


Рис. 25

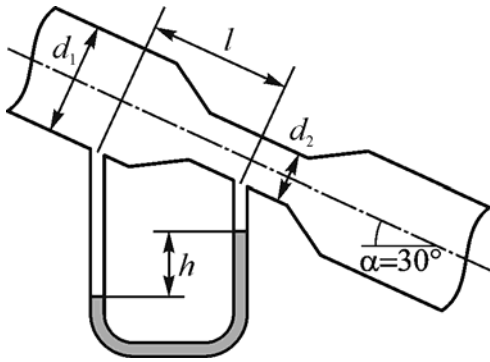


Рис. 26

Задача 14. Определить теоретический расход воды, проходящий через водомер Вентури, установленный под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту (рис. 26), если разность уровней, показываемая дифференциальным ртутным манометром равна h . Большой и меньший диаметры равны соответственно d_1 и d_2 , расстояние между ними l .

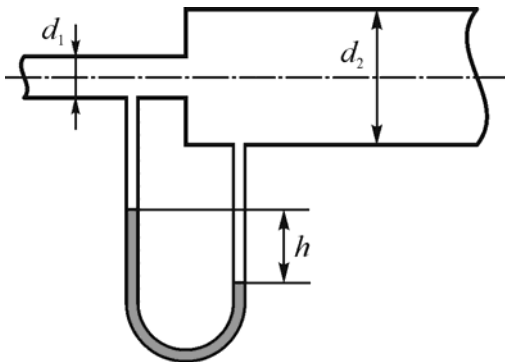


Рис. 27

Задача 15. По трубопроводу с внезапным расширением от диаметра d_1 до диаметра d_2 протекает вода с расходом Q (рис. 27). Определить какую разность уровней ртути показывает дифференциальный манометр при прямом и обратном направлении движения воды. Потери напора на трение по длине пренебречь.

Задача 16. По стальному трубопроводу диаметром d подается вода на расстояние l с расходом Q . Определить, как изменится пропускная способность трубопровода Q , если вместо запроектированных труб будут уложены последовательно чугунные трубы с диаметром d_1 (длиной $l/2$) и стальные с диаметром d_2 (длиной $l/2$). Коэффициенты гидравлического трения $\lambda_{ст} = 0,03$, $\lambda_{ч} = 0,04$.

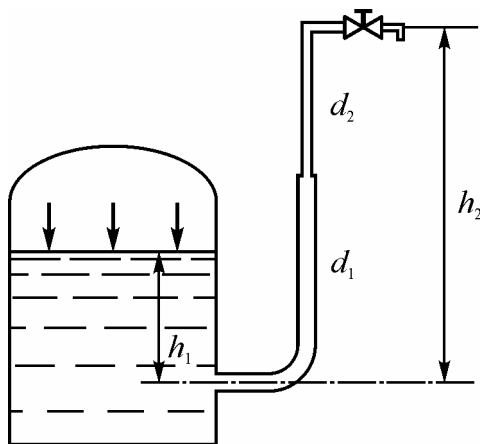


Рис. 28

Задача 17. Какое давление P_0 необходимо поддерживать в резервуаре (рис. 28) $h_1 = 2$ м, чтобы через кран, расположенный на пятом этаже здания $h_2 = 20$ м и имеющий коэффициент местного сопротивления $\zeta = 3$, проходил расход воды Q ? На участке трубопровода длиной l_1 труба имеет диаметр d_1 , на участке l_2 — диаметр d_2 . Температура воды $t = 20$ °С, абсолютная шероховатость стенок трубопровода $\Delta = 0,2$ мм.

Задача 18. Вода при температуре $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ из закрытого резервуара подается в приемный резервуар по трубопроводу, состоящему из двух последовательно соединенных труб диаметром d_1 и d_2 длиной l_1 и l_2 (рис. 29). Разность уровней воды в резервуарах постоянна и равна h . Определить давление P_0 , которое необходимо создать, чтобы обеспечить заданный расход воды. Абсолютная шероховатость стенок трубопровода $\Delta = 0,15\text{ мм}$.

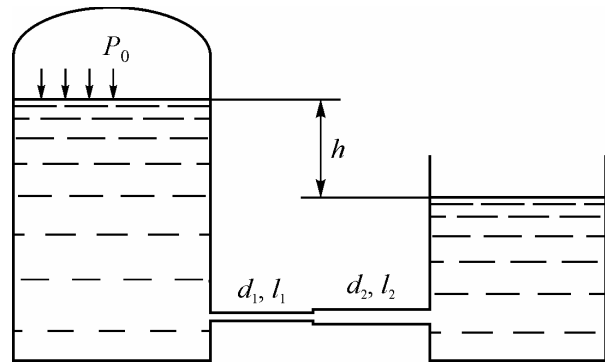


Рис. 29

Задача 19. На трубопроводе установлен пьезометр (рис. 30). После полного открытия вентиля в конце трубопровода разница уровней воды в резервуаре и пьезометре составила h . Определить расход воды, проходящей через трубопровод диаметром d и длиной l . Колена стандартные, трубы стальные, новые, температура воды $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

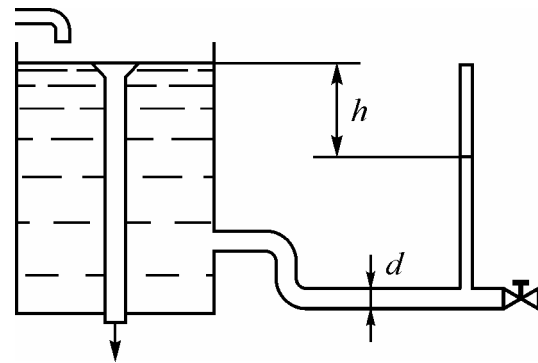


Рис. 30

Задача 20. Трубопровод, пропускающий расход Q , разветвляется в точке A на два, которые соединяются в точке B (рис. 31). Перепад давлений в точках A и B составляет ΔP . Диаметр первого трубопровода d_1 . Определить диаметр трубопровода d_2 , если $l_1 = l_2$, абсолютная шероховатость труб $\Delta = 0,1\text{ мм}$, исходя из того, чтобы расход на втором участке был в два раза больше, чем на первом. Коэффициенты местных гидравлических сопротивлений участков ζ_1 и ζ_2 , Область сопротивления в трубопроводах в первом приближении считать квадратичной.

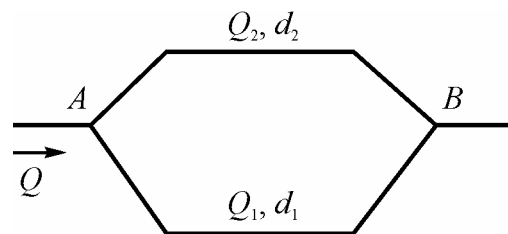


Рис. 31

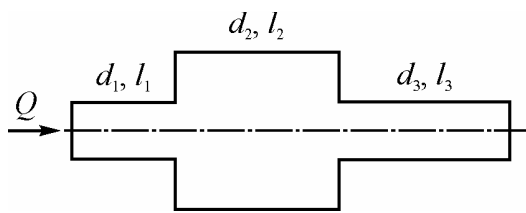


Рис. 32

Задача 21. Участок водопровода состоит из трех последовательно соединенных трубопроводов различного диаметра (рис. 32). Расход водопровода Q , длины участков равны l_1, l_2, l_3 , а диаметры d_1, d_2, d_3 , абсолютная шероховатость $\Delta = 0,1$ мм. Найти потери напора по длине на всем участке водопровода.

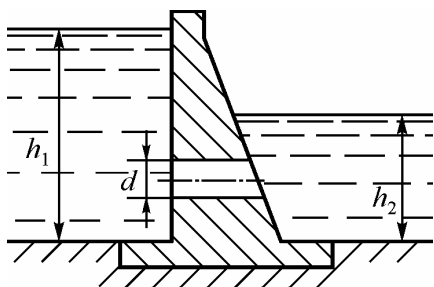


Рис. 33

Задача 22. В теле плотины уложены две водовыпускные трубы. Глубина воды в верхнем бьефе h_1 , в нижнем — h_2 . Определить диаметр труб, длина которых равна l , а расход воды, пропускаемый двумя трубами равен Q (рис. 33).

Задача 23. Определить расход Q и скорость V истечения нефти из бака через отверстие диаметром d , если напор в баке поддерживается постоянным и равен h . Значение кинематической вязкости $\nu = 0,087$ см²/с.

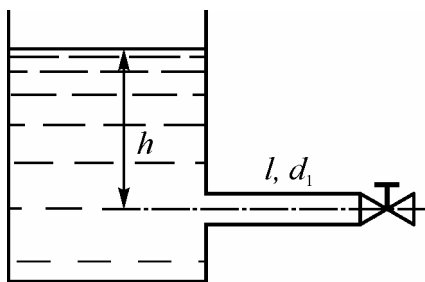


Рис. 34

Задача 24. Вода с расходом Q перекачивается по стальному трубопроводу диаметром d , длиной l , с толщиной стенки δ . Свободный конец трубы снабжен задвижкой. Определить время закрытия задвижки при условии, чтобы повышение давления в трубе вследствие гидравлического удара не превышало $\Delta P = 10$ атм. Как повысится давление при мгновенном закрытии задвижки (рис. 34)?

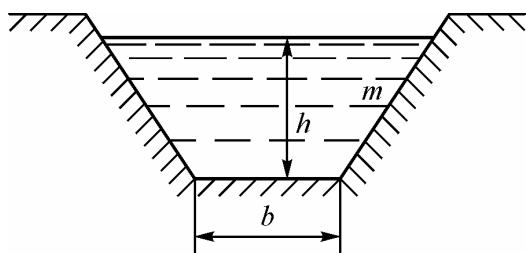


Рис. 35

Задача 25. Определить расход воды Q и среднюю скорость ее течения V в трапециевидальном канале, если ширина его по дну b , глубина воды в нем h , продольный уклон канала i , коэффициент заложения откосов m . Значение шероховатости дна и откосов $n = 0,015$ (рис. 35).

Библиографический список

1. *Чугаев, Р. Р.* Гидравлика / Р. Р. Чугаев. — Л. : Бастет, 2008. — 673 с.
2. *Альтшуль, А. Д.* Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» инженерно-строительных вузов / А. Д. Альтшуль. — М. : Высшая школа, 1980. — 56 с.
3. Примеры расчетов по гидравлике : учебное пособие для вузов / А. Д. Альтшуль, В. И. Калицун, Ф. Г. Майрановский, П. П. Пальгунов. — М. : Стройиздат, 1976. — 255 с.
4. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. — 2-е изд. перераб. и доп. — Киев : Вища школа, 1984. — 343 с.

Приложение 1

Кинематический коэффициент вязкости воды

$t, ^\circ\text{C}$	$10^6 \nu, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^6 \nu, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^6 \nu, \text{м}^2/\text{с}$
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 2

Таблицы коэффициентов местных сопротивлений

1. Вход в трубу рассматривается в четырех вариантах. На рис. П.2.1, *а* изображен вход в трубу, выступающую в водоем; на рис. П.2.1, *б* — прямой вход с острыми кромками, для которого $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$, а на рис. П.2.1, *в* — прямой вход с плавным закруглением, для него $\zeta_{\text{вх}} = 0,03$. Для прямого входа со скосом (рис. П.2.1, *г*) значения $\zeta_{\text{вх}}$ приведены в табл. П.2.1 в зависимости от угла α , под которым выполнен скос, и отношения длины скоса к диаметру $\frac{l}{d}$.

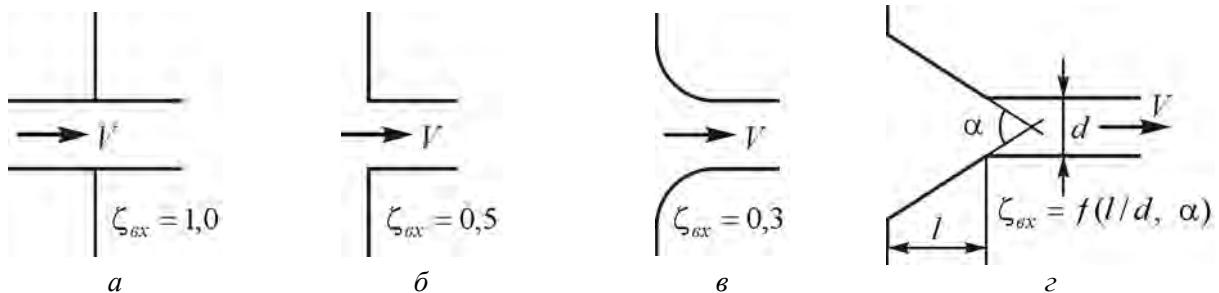


Рис. П.2.1

Таблица П.2.1

$\frac{l}{d}$	$\alpha ^\circ$						
	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

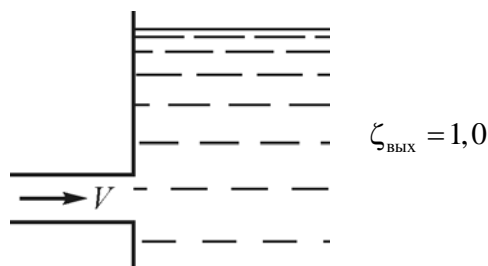


Рис. П.2.2

2. Выход из трубы в резервуар (рис. П.2.2).

Продолжение прил. 2

3. Внезапное расширение (рис. П.2.3).

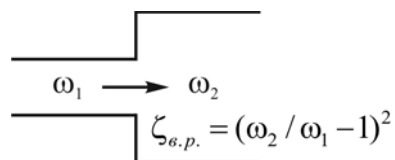


Рис. П.2.3

4. Внезапное сужение (рис. П.2.4).

Значения ω_2 / ω_1 и $\zeta_{в.с}$ приведены в табл. П.2.2.

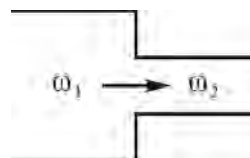


Рис. П.2.4

Таблица П.2.2

ω_2 / ω_1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
$\zeta_{в.с}$	0,5	0,42	0,34	0,25	0,15	0,09	0

5. Диффузор (плавное расширение) в трубе круглого сечения (рис. П.2.5).

Значения ω_2 / ω_1 и α приведены в табл. П.2.3.

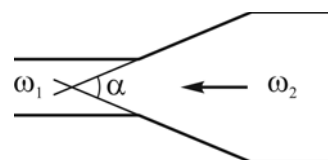


Рис. П.2.5

Таблица П.2.3

α°	ω_2 / ω_1				
	2	4	6	10	≥ 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. П.2.6).

Значения ω_2 / ω_1 и α приведены в табл. П.2.4.

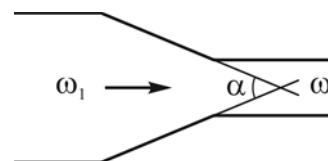


Рис. П.2.6

Таблица П.2.4

α°	ω_2 / ω_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

Продолжение прил. 2

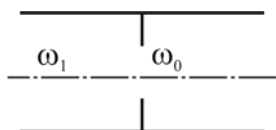


Рис. П.2.7

7. Диафрагма в трубе (рис. П.2.7).
Значения ω_0 / ω_1 и ζ_d приведены в табл. П.2.5.

Таблица. П.2.5

ω_0 / ω_1	0,05	0,1	0,2	0,35	0,5	0,7	0,8	0,95
ζ_d	1050	245	51	12,3	4,0	1,0	0,42	0,05

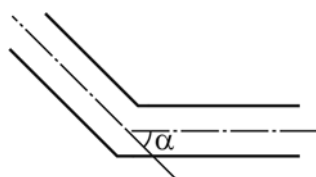


Рис. П.2.8

8. Резкий поворот трубы (колени) (рис. П.2.8):

а) для трубы круглого сечения

α°	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

α°	15	30	45	60	90
$\zeta_{\text{кол}}$	0,025	0,11	0,26	0,49	1,20

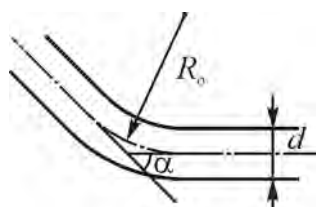


Рис. П.2.9

9. Плавный поворот трубы (отвод) (рис. П.2.9).
При повороте на угол α коэффициент сопротивления определяется по формуле:

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

где ζ_{90} — коэффициент сопротивления при $\alpha = 90^\circ$, определяется по табл. П.2.6.

Таблица. П.2.6

$d / 2R_n$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ζ_{90}	0,13	0,14	0,16	0,21	0,29	0,44	0,66	0,98	1,41	1,98

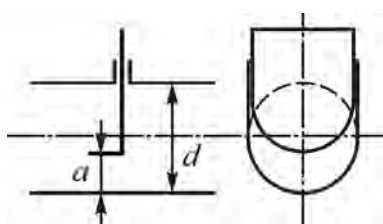


Рис. П.2.10

10. Задвижки, перекрывающая трубу:
а) для труб круглого сечения (рис. П.2.10)

Окончание прил. 2

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. П.2.11)

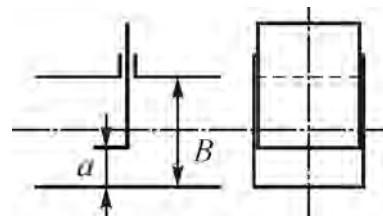


Рис. П.2.11

a/b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ζ_3	193	44,5	17,8	8,12	4,02	2,08	0,95	0,39	0,09	0,0

в) кран пробковый (рис. П.2.12)

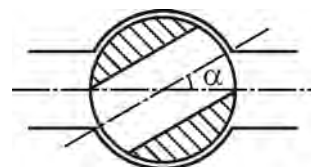


Рис. П.2.12

α°	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

Учебное электронное издание

Каныгин Владимир Алексеевич
Цветкова Елена Владимировна

ГИДРАВЛИКА

Учебно-практическое пособие

Публикуется в авторской редакции

Минимальные систем. требования:

PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0.

Подписано в свет 03.06.2014.

Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 1,8. Объем данных 4,7 Мбайт.

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