

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Забайкальский государственный университет»  
(ФГБОУ ВПО «ЗабГУ»)

**А.В. Маслова, М.А. Босов**

**ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ**

учебное пособие для студентов специальностей технического  
профиля

Чита

ЗабГУ

2013

УДК 532.5(075)

ББК 30.123 я7

М 316

Рецензенты:

1) В.В. Звягинцев, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Забайкальского государственного университета, канд. техн. наук, профессор;

2) Л.И. Шульгина, главный специалист Восточного филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов».

### **М 316 Маслова А.В.**

Практикум по гидравлике: учеб. пособие / А.В. Маслова, М.А. Босов. – Чита: ЗабГУ, 2013. – 138 с.

ISBN

В учебном пособии рассмотрены законы гидравлики и их практическое применение. В каждом разделе пособия даны типовые задачи с решениями и задачи для самостоятельного решения.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей технического профиля.

Утверждено и рекомендовано к изданию решением редакционно-издательского совета ЗабГУ.

Ответственный за выпуск В.Н. Заслоновский, д-р. техн. наук, профессор кафедры ВХИЭ ЗабГУ.

УДК 532.5(075)

ББК 30.123 я7

М 316

ISBN

© Забайкальский государственный университет, 2013

© Маслова А.В., Босов М.А., 2013

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Гидравлика – наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и рассматривающая способы приложения этих законов к решению конкретных практических задач.

Целью изучения гидравлики являются знания ее теоретических основ, навыки в решении типовых практических задач, умение применять законы механики жидкости к решению нестандартных инженерных вопросов. Выработка необходимых навыков достигается только в процессе целеустремленной самостоятельной работы. Самостоятельное решение приведенных задач способствует более глубокому пониманию основных положений механики жидкости. Методика решения подобного рода задач излагается на практических занятиях, на лекциях и на консультациях. По некоторым разделам курса приведены также задачи повышенной трудности.

Практикум по гидравлике составлен в соответствии с учебными требованиями курса гидравлики и предназначен для студентов специальностей технического профиля.

Практикум содержит задачи по основным разделам гидравлики. Практикум состоит из девяти разделов. В начале каждого раздела приводятся основные теоретические определения и необходимые расчетные формулы. Типовые задачи рассмотрены с подробными решениями. Некоторые задачи даны в вариантах.

Практикум содержит справочный материал, необходимый при решении задач.

## ВВЕДЕНИЕ

При решении различного рода технических задач часто приходится встречаться с вопросами движения и покоя различных жидкостей.

Исследование этих вопросов постепенно привело к созданию обширной науки, которую можно назвать «Механикой жидкого тела», «Механикой жидкости» или «Гидромеханикой».

Существенно подчеркнуть, что механика жидкости в силу целого ряда причин развивалась по двум направлениям:

- 1) по направлению, свойственному техническим наукам;
- 2) по направлению чисто теоретическому с использованием обширного и относительно сложного математического аппарата.

Различие между этими двумя направлениями состоит в следующем:

1) в *технической механике жидкости (гидравлике)* при решении различных практических задач широко используются те или иные допущения и предположения, упрощающие рассматриваемый вопрос. Поэтому гидравлические решения сплошь и рядом носят *приближенный характер* с использованием относительно большого числа эмпирических и полуэмпирических формул. При этом стремятся к оценке только *главных характеристик* изучаемого явления и часто оперируют теми или иными *осредненными величинами*.

2) в *теоретической механике жидкости* широко используется относительно *сложный математический аппарат*. Решения, получаемые в теоретической гидромеханике, оказываются более общими и более строгими в математическом отношении, однако сплошь и рядом оказываются столь сложными, что громадное большинство практических задач, следуя этим методам, решить невозможно.

Таким образом, можно сказать, что в технической гидромеханике (гидравлике) решаются сложные задачи при помощи простых методов. В теоретической же гидромеханике относительно точно решаются только некоторые простейшие задачи при помощи сложных методов.

Необходимо учитывать, что само слово «гидравлика» произошло от слияния двух греческих слов, из которых первое значит «вода», а второе – «труба», «канал», «струя». Как видно, ранее считали, что гидравлика занимается изучением движения и покоя только воды. Однако в настоящее время термин «гидравлика» понимается в более широком смысле: мы предполагаем, что объектом изучения в гидравлике является *любая жидкость*.

## 1. Основные физические свойства жидкости

К основным физическим свойствам жидкости относят удельный вес, плотность, сжимаемость, температурное расширение, вязкость, поверхностное натяжение.

Удельный вес жидкости  $\gamma$  (Н/м<sup>3</sup>) представляет собой вес единицы ее объема:

$$\gamma = \frac{G}{W} , \quad (1)$$

где  $G$  – вес жидкости,  $W$  – объем.

Плотность жидкости  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) – масса единицы ее объема:

$$\rho = \frac{m}{W} , \quad (2)$$

где  $m$  – масса жидкости в объеме  $W$ .

Из физики известно, что вес тела равен произведению его массы на ускорение свободного падения:

$$G = m \cdot g , \quad (3)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, принимаемый равным 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Тогда вес тела подставляем в формулу (1) и получаем другое выражение для удельного веса жидкости:

$$\gamma = \rho \cdot g . \quad (4)$$

Сжимаемость жидкости есть ее свойство изменять объем при изменении давления. Это свойство жидкости характеризуется коэффициентом объемного сжатия  $\beta_w$  [Па<sup>-1</sup>], выражающим относительное уменьшение объема жидкости при увеличении давления на единицу:

$$\beta_w = \frac{\Delta W}{W_1 \cdot \Delta p} . \quad (5)$$

Коэффициент объемного сжатия воды при изменении давления

от 0,1 до 50 МПа практически остается тем же. В связи с этим при решении многих практических задач сжимаемостью жидкости обычно пренебрегают.

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, называется модулем упругости жидкости:

$$E_0 = \frac{1}{\beta_w} . \quad (6)$$

Модуль упругости жидкости измеряется в паскалях (Па).

Температурное расширение жидкости при ее нагревании характеризуется коэффициентом температурного расширения  $\beta_t$  [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ], который показывает относительное увеличение объема жидкости при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ :

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W_1 \cdot \Delta t} . \quad (7)$$

В отличие от других тел объем воды при ее нагревании от 0 до  $4^{\circ}\text{C}$  уменьшается. При  $4^{\circ}\text{C}$  вода имеет наибольшую плотность и наибольший удельный вес. При дальнейшем нагревании ее объем увеличивается. Коэффициент температурного расширения воды увеличивается с возрастанием давления при повышении ее температуры от 0 до  $50^{\circ}\text{C}$  и уменьшается с возрастанием давления при дальнейшем повышении ее температуры.

Вязкость жидкости – свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу частиц жидкости. Силы, возникающие в результате скольжения слоев частиц жидкости, называют силами внутреннего трения или силами вязкости  $T$  [Н]. Вязкость возникает только в реальных жидкостях, если же жидкость находится в покое, то вязкость ее может быть принята равной нулю.

$$T = \tau \cdot S , \quad (8)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение,  $S$  – площадь соприкосновения слоев жидкости.

Для решения практических задач используют коэффициент кинематической вязкости жидкости  $\nu$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), представляющий собой отношение динамической вязкости к плотности жидкости.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па с.

С увеличением температуры вязкость жидкости быстро уменьшается, оставаясь почти постоянной с изменением давления.

*Поверхностное натяжение* жидкости обуславливается силами взаимного притяжения молекул поверхностного слоя, стремящихся сократить свободную поверхность жидкости. Особенно сильно поверхностное натяжение проявляется в трубках весьма малого диаметра (капиллярах), для которых давление  $p_{нов}$  [ $\text{Н}/\text{м}^2$ ], создаваемое силами поверхностного натяжения, равно:

$$p_{нов} = 2 \cdot \frac{\sigma}{r}, \quad (10)$$

где  $r$  - радиус трубки, м;  $\sigma$  - поверхностное натяжение ( $\text{Н}/\text{м}$ ), определяемое по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 - \beta \cdot \Delta T, \quad (11)$$

$\sigma_0$  - поверхностное натяжение при соприкосновении с воздухом при  $T=0$  °С.

Высота капиллярного поднятия определяется как

$$h_{нов} = 2 \cdot \frac{\sigma}{\rho \cdot g \cdot r}. \quad (12)$$

*Пример 1:*

Определить удельный вес нефти и подсчитать, какой объём занимает нефть весом 90 кН. Плотность нефти равна  $800 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

*Решение:* Удельный вес жидкости равен

$$\gamma = \rho \cdot g = 800 \cdot 9,81 = 7848 \text{ Н}/\text{м}^3$$

Из формулы (1) найдем объем жидкости занимаемый нефтью

$$W = \frac{G}{\gamma} = \frac{90000}{7848} = 11,5 \text{ м}^3$$

*Пример 2:*

Определить динамическую вязкость жидкости, если удельный вес жидкости равен  $\gamma = 7,36 \text{ кН/ м}^3$ . Кинематическая вязкость жидкости равна  $\nu = 2,9 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ .

*Решение:* Из формулы (4) находим плотность жидкости

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{7360}{9,81} = 750 \text{ кг/м}^3$$

Из формулы (9) находим динамическую вязкость жидкости

$$\mu = \nu \cdot \rho = 2,9 \cdot 10^6 \cdot 750 = 2175 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

*Пример 3:*

Определить плотность жидкости, если известно, что жидкость занимает объем  $W = 150 \text{ л}$ , при этом масса жидкости  $m = 122 \text{ кг}$ .

*Решение:* Из формулы (2) определим плотность жидкости

$$\rho = \frac{m}{W} = \frac{122}{0,15} = 813 \text{ кг/м}^3$$

*Пример 4:*

Определить объем воды, который необходимо дополнительно подать в водовод диаметром  $d = 500 \text{ мм}$  и длиной  $l = 1 \text{ км}$  для повышения давления в нем на  $\Delta p = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Деформацией трубопровода пренебречь.

*Решение:* Объем водовода равен

$$W = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 1000 = 197 \text{ м}^3$$

Изменение объема в водоводе при повышении давления на  $\Delta p = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$  определяем по формуле (5), где  $E_0 = 2 \cdot 10^9 \text{ Па}$ :

$$\Delta W = \frac{W \cdot \Delta p}{E_0} = \frac{197 \cdot 2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^9} = 197 \cdot 10^{-3} = 0,197 \text{ м}^3.$$

### Задачи

1.1. При гидравлическом испытании внутренних систем водоснабжения допускается падение испытательного давления в течение времени  $\Delta t = 10$  мин на величину  $\Delta p = 0,5 \text{ ат} \approx 4,9 \cdot 10^4$  Па. Определить допустимую величину утечки  $\Delta W$  в течение  $\Delta t = 10$  мин при испытании системы вместимостью  $W = 80$  м<sup>3</sup>. Модуль упругости воды принять равным  $E_0 = 2 \cdot 10^6$  Па.

1.2. В отопительной системе (котел, радиаторы, трубопроводы и расширительный сосуд) небольшого дома содержится объем  $W = 0,5$  м<sup>3</sup> воды. Сколько воды дополнительно войдет в расширительный сосуд при нагревании ее от  $t_1 = 20^\circ \text{ C}$  до  $t_2 = 60^\circ \text{ C}$ ?

1.3. Вычислить плотность жидкости и ее удельный объем, если жидкость находится в емкости массой  $m_{\text{емк}} = 5,5$  кг. Масса заполненной жидкостью емкости  $m_{\text{общ}} = 18,9$  кг, а ее объем  $W = 15$  л.

1.4. Вычислить кинематическую вязкость воды при  $t_1 = 20^\circ \text{ C}$ , если значение динамической вязкости составляет  $\mu = 1,02 \cdot 10^{-3}$  Пас (плотность воды при данной температуре принять равной  $\rho = 998$  кг/м<sup>3</sup>). Чему будет равна кинематическая вязкость воды после повышения ее температуры на  $\Delta t = 2^\circ \text{ C}$ ?

1.5. Вычислить массу керосина плотностью  $\rho = 820$  кг/м<sup>3</sup>, занимающего 90 % объема десятилитровой канистры.

1.6. В отопительный котел поступает объем воды  $W = 60$  м<sup>3</sup> при температуре  $t_1 = 60^\circ \text{ C}$ . Какой объем  $W_1$  будет выходить из котла при нагреве воды до температуры  $t_2 = 90^\circ \text{ C}$ ?

1.7. Определить давление внутри капли воды диаметром  $d = 1$  мм, которое создают силы поверхностного натяжения. Температура воды  $t_1 = 20^\circ \text{ C}$ . Коэффициент поверхностного натяжения

принимаем равным  $\sigma = 0,073$  Н/м. Как изменяется давление внутри капли с увеличением температуры  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ ?

1.8. Определить высоту подъема воды в стеклянном капилляре диаметром  $d = 1$  мм при температуре воды  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 80^\circ\text{C}$ . Как изменяется высота капиллярного поднятия воды с увеличением температуры? Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma_0 = 0,076$  Н/м.

1.9. Определить относительное изменение плотности воды при нагревании ее от  $t_1 = 7^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 97^\circ\text{C}$ .

1.10. Определить среднюю толщину  $\delta$  солевых отложений в герметичном водоводе внутренним диаметром  $d = 300$  мм и длиной  $l = 1$  км. При выпуске воды в количестве  $\Delta W = 0,03$  м<sup>3</sup> давление в водоводе падает на величину  $\Delta p = 1 \cdot 10^6$  Па. Отложения по диаметру и длине водовода распределены равномерно.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое плотность и удельный вес жидкости?
2. Как связаны между собой плотность и удельный вес жидкости?
3. Чем характеризуется сжимаемость жидкости?
4. Чем характеризуется температурное расширение жидкости?
5. Чем обусловлено поверхностное натяжение жидкости? Где оно проявляется?
6. Что такое вязкость жидкости и в чем она проявляется?

### **Рекомендуемая литература**

1. Косарев С.Г. Общий курс гидравлики: метод. указания. Ч.1. / С.Г. Косарев: Читинский гос. техн. ун-т. – Чита: ЧитГТУ, 1999. – 32 с.
2. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.И. Калицун [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1980. – 359 с.

3. Альтшуль А.Д. Примеры расчетов по гидравлике: учеб. пособие для вузов / А.Д. Альтшуль [и др.]; под ред. А.Д. Альтшуля. – Москва: Стройиздат, 1977. – 255 с.

4. Боровков В.С. Сборник задач по гидравлике: учеб. пособие для вузов / В.С. Боровков [и др.]. – Москва, 2011. – 51 с.

## 2. Гидростатика

### 2.1. Гидростатическое давление в точке

Жидкость, находящаяся в покое, подвергается действию внешних сил двух категорий: массовых и поверхностных. К массовым относятся силы, пропорциональные массе жидкости (сила тяжести, сила инерции). К поверхностным относятся силы распределенные по поверхности, ограничивающей любой мысленно выделенный объем жидкости, пропорциональные площади этой поверхности (сила давления, центробежная сила).

Под действием внешних сил в каждой точке жидкости возникают внутренние силы, характеризующие ее напряженное состояние (давление в точке).

Гидростатическое давление в точке является пределом отношения силы давления, действующей на элементарную площадку, к ее площади, если она стремится к нулю. Гидростатическое давление измеряется в единицах силы, деленных на единицу площади (Н/м<sup>2</sup>). В системе СИ за единицу давления принят паскаль (Па).

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \left( \frac{P}{\omega} \right) = p \quad (13)$$

Виды гидростатического давления:

- атмосферное давление создается силой тяжести столба воздуха. В нормальных условиях атмосферное давление равно 101325 Па;
- абсолютное давление определяется суммой внешнего и весового давлений

$$p_A = p_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (14)$$

где  $p_0$  – внешнее давление, Па;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, равен 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота столба жидкости в резервуаре, м;

– манометрическое (избыточное) давление это превышение абсолютного давления над атмосферным

$$P_M = P_A - P_{am} \cdot \quad (15)$$

Если  $p_0 = p_{am}$ , то манометрическое давление определяется весом столба жидкости

$$P_M = \rho \cdot g \cdot h; \quad (16)$$

– вакуумметрическое давление это недостаток абсолютного давления до атмосферного

$$P_{вак} = P_{am} - P_A \cdot \quad (17)$$

Для измерения вакуума используют вакуумметр. В связи с тем, что  $p_0 < p_{am}$ , жидкость поднимается в трубке из сосуда на высоту  $h$ .

$$h = \frac{P_{am} - P_0}{\rho \cdot g} \cdot \quad (18)$$

*Пример 1:*

Определить манометрическое (избыточное) давление в забое скважины глубиной  $h = 85$  м, которая заполнена глинистым раствором плотностью  $\rho = 1250$  кг/м<sup>3</sup>.

*Решение:* Находим манометрическое (избыточное) давление по формуле (16):

$$P_M = \rho \cdot g \cdot h = 1250 \cdot 9,81 \cdot 85 = 1,042 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1 \text{ МПа}$$

*Пример 2:*

Резервуар *A* частично заполнен водой (рис.1). Манометрическое давление воздуха над водой  $p = 25$  кПа. Определить давление в  $\Delta h_1 = 210$  мм;  $\Delta h_2 = 256$  мм резервуаре *B*, который содержит только воздух, если  $\Delta h = 0,5$  м.

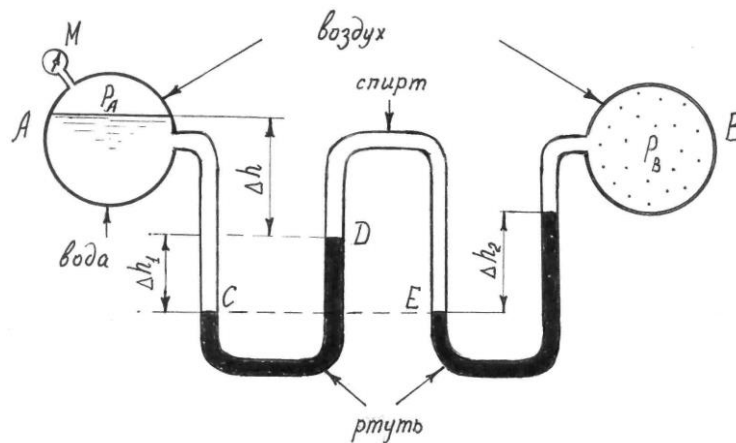


Рис. 1. Схема к примеру 2

*Решение:*

Определяем манометрическое давление в точке С:

$$p_c = p_A + \rho_e \cdot g \cdot (\Delta h + \Delta h_1),$$

где  $\rho_e$  – плотность воды, принимаем равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

Определяем манометрическое давление в точке D:

$$p_D = p_c - \rho_{pm} \cdot g \cdot \Delta h_1 = p_A + \rho_e \cdot g \cdot (\Delta h + \Delta h_1) - \rho_{pm} \cdot g \cdot \Delta h_1$$

где  $\rho_{pm}$  – плотность ртути, принимаем равной  $13600 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_e$  – плотность спирта, принимаем равной  $800 \text{ кг/м}^3$ .

Определяем манометрическое давление  $p_B$  (Па) в резервуаре В:

$$p_B = p_A + g \cdot [(\rho_{pm} + \rho_e) \cdot \Delta h_2 + (\rho_e - \rho_{pm}) \cdot \Delta h_1 + \rho_e \cdot \Delta h]$$

$$p_B = 25000 + 9,81 \cdot [(13600 + 800) \cdot 0,256 + (1000 - 13600) \cdot 0,21 + 1000 \cdot 0,5] = 40 \text{ кПа}$$

*Пример 3:*

Найти давление на свободной поверхности в закрытом сосуде с бензином, если уровень жидкости в открытом пьезометре выше уровня жидкости в сосуде на  $h = 2 \text{ м}$ , а атмосферное давление  $p_{am} = 100 \text{ кПа}$ . Плотность бензина принять равной  $\rho_e = 750 \text{ кг/м}^3$ .

*Решение:*

Давление в точке А находящейся в открытом пьезометре на уровне свободной поверхности бензина в сосуде, равно  $p_0$ . Тогда

давление на свободной поверхности в закрытом сосуде определяем по формуле

$$p_0 = p_{am} + \rho \cdot g \cdot h = 100000 + 750 \cdot 9,81 \cdot 2 = 114700 \text{ Па}$$

### Задачи

2.1. U-образный ртутный манометр подключен к закрытому резервуару, заполненному водой. Определить давление на свободной поверхности воды в резервуаре, если  $h_1 = 150$  мм,  $h_2 = 250$  мм,  $p_{am} = 98,1$  кПа, плотность ртути принять равной  $\rho_{pm} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>.

2.2. Пружинный манометр подключен к сосуду с водой на высоте  $h_1 = 1$  м от дна. Центр манометра находится выше точки его подключения к сосуду на  $h_2 = 1$  м (рис. 2). Определить избыточное и абсолютное давление на дно, если манометрическое давление равно  $p_m = 150$  кПа.

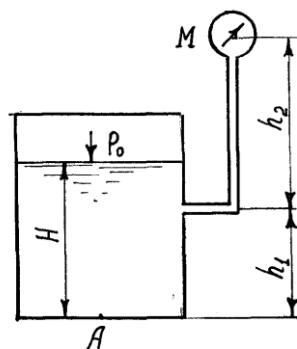


Рис. 2. К задаче 2.2

2.3. Определить абсолютное и избыточное давление в точке, расположенной на дне отстойника (рис. 3). В отстойнике находятся две жидкости: внизу – глицерин, высота которого  $h_2 = 0,4$  м, плотность глицерина  $\rho_2 = 1250$  кг/м<sup>3</sup>; сверху – масло, высота которого  $h_1 = 1,3$  м, плотность масла составляет  $\rho_m = 750$  кг/м<sup>3</sup>.

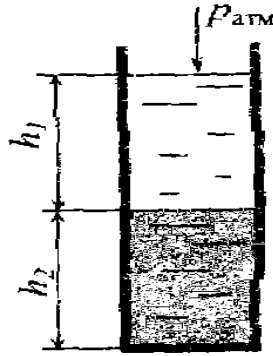


Рис. 3. К задаче 2.3

2.4. Определить избыточное давление  $p_m$  в закрытом резервуаре при условии:  $h_1 = 0,6$  м, плотность жидкости  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>, атмосферное давление  $p_{atm} = 0,1$  МПа (рис. 4). Чему равно абсолютное давление на дно резервуара при  $h_2 = 1,0$  м.

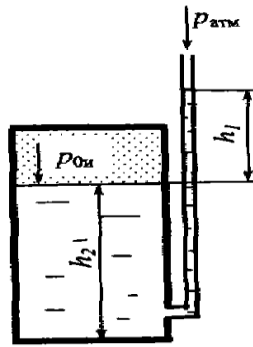


Рис. 4. К задаче 2.4

2.5. В U-образной трубке налиты ртуть и вода (рис. 5). Определить высоту столба жидкости  $h$  при условии:  $h_{рт} = 0,08$  м, плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>, плотность воды  $\rho_e = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Атмосферное давление принять равным  $p_{atm} = 0,099$  МПа.

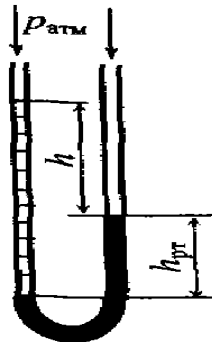


Рис. 5. К задаче 2.5

2.6. Определить давление  $p_0$  на поверхности воды в трубке (рис.6), если высота подъема ртути в трубке  $h_2 = 0,28$  м, плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>, а высота до поверхности воды в трубке  $h_1 = 0,15$  м, плотность воды  $\rho_в = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Атмосферное давление принять равным  $p_{атм} = 0,105$  МПа.

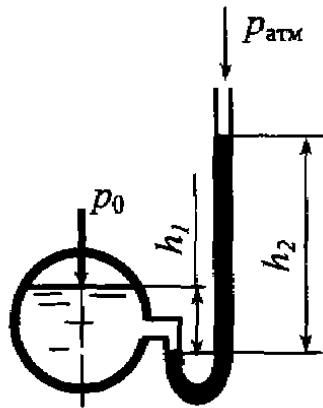


Рис. 6. К задаче 2.6

2.7. Определить давление  $p_0$  в закрытом резервуаре, если в трубке, присоединенной к резервуару, ртуть поднялась на  $h = 0,2$  м (рис. 7). Атмосферное давление  $p_{атм} = 0,1$  МПа, плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>.

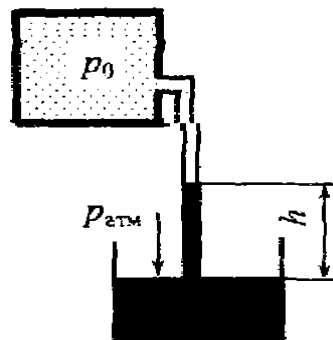


Рис. 7. К задаче 2.7

2.8. К резервуару А, который заполнен газом при абсолютном давлении  $p_A$  подсоединена трубка. Трубка опущена в закрытый сосуд с тяжелой жидкостью и манометрическим давлением на поверхности  $p_0 = 20$  кПа (рис. 8). Определить абсолютное давление  $p_A$ , если

жидкость – ртуть, которая поднялась в трубке на высоту  $h = 37,5$  см. Плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>.

2.9. Определить абсолютное давление на поверхности воды  $p_0$  (рис. 9), если высота воды в резервуаре над уровнем ртути в левой трубке  $h_1 = 150$  мм, высота ртутного столба  $h_2 = 250$  мм. Плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>, плотность воды  $\rho_в = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Атмосферное давление принять равным  $p_{ат} = 100$  кПа.

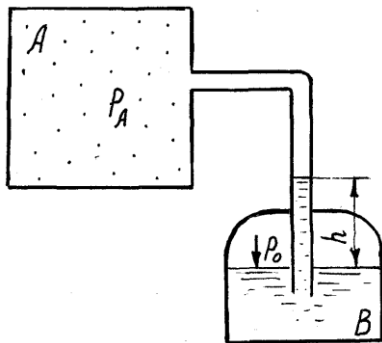


Рис. 8. К задаче 2.8

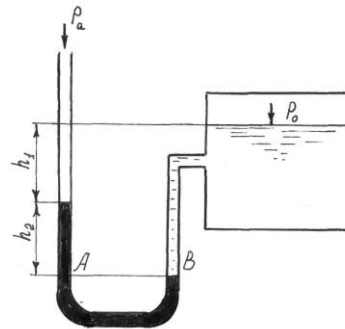


Рис. 9. К задаче 2.9

2.10. Сосуд содержит две несмешивающиеся жидкости с плотностями  $\rho_1$  и  $\rho_2$  (рис.10). Давление над свободной поверхностью измеряется манометром. Определить избыточное давление на основание сосуда, если  $p_m = 102$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_1 = 890$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 1280$  кг/м<sup>3</sup>,  $h_1 = 2,1$  м,  $h_2 = 2,9$  м,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

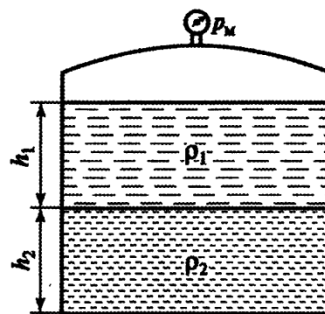


Рис. 10. К задаче 2.10

## 2.2. Гидравлические машины гидростатического действия

В основу принципа действия многих гидравлических машин положены законы гидравлики. Одним из наиболее широко применяемых в технике законов является закон Паскаля.

Давление, приложенное к свободной поверхности жидкости, передается во все точки жидкости без изменения.

Гидравлический пресс состоит из двух сообщающихся камер, в которых установлены поршни  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  площадью  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . После заполнения камер жидкостью к поршню  $\Pi_1$  прикладывают силу  $P_1$ . Тогда под поршнем  $\Pi_1$  в меньшей камере возникает гидростатическое давление  $p_1 = \frac{P_1}{\omega_1}$ , которое по закону Паскаля передается на площадь основания большого поршня  $\Pi_2$ . Гидростатическое давление, будучи направлено нормально к поверхности основания поршня, создает силу

$$P_2 = \omega_2 \cdot p_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot P_1, \quad (19)$$

которая будет сжимать тело, помещенное между поршнем  $\Pi_2$  и неподвижным горизонтальным упором. Таким образом, сила давления  $P_1$ , приложенная к малому поршню  $\Pi_1$ , создает сжимающую силу  $P_2$ , превышающую силу  $P_1$  во столько раз, во сколько площадь  $\omega_2$  больше площади  $\omega_1$ .

Гидравлический домкрат. Подъемы больших грузов на малую высоту можно легко осуществлять с применением гидравлических домкратов. Гидравлический домкрат состоит из цилиндра с большим поршнем и насоса с малым поршнем, который нагнетает в сосуд жидкость. Поршневой насос приводится в действие рычажным устройством. Давление поршня насоса передается жидкостью на большой поршень с грузом, вес которого во много раз превышает силу давления поршня насоса. В этом и состоит принцип работы гидравлического домкрата.

*Пример 1:*

На рис. 11 представлен преобразователь давления (мультипликатор) возвратно-поступательного действия. Определить

давление  $p_2$ , получаемое на выходе, если в рабочую полость большего цилиндра подается жидкость под давлением  $p_1 = 5$  МПа, противодействие сливной линии  $p_c = 0,05$  МПа, диаметры поршня  $D = 80$  мм и плунжера  $d = 40$  мм. Силами трения в уплотнителях пренебречь. Все указанные давления – манометрические.

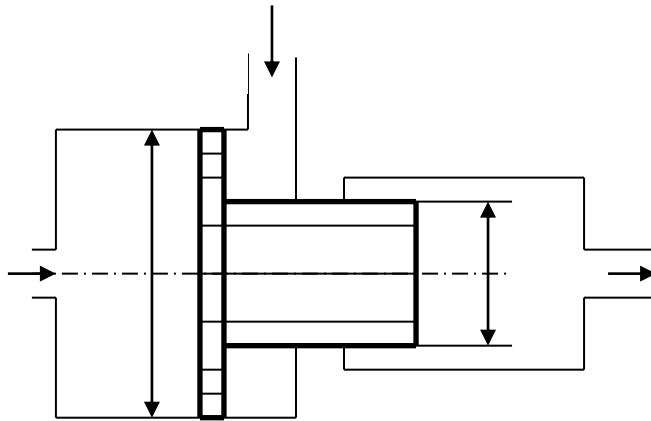


Рис. 11. Схема к примеру

*Решение.* Составляем уравнение равновесия сил избыточного давления вдоль горизонтальной оси:

$$p_1 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = p_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + p_c \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}, \text{ откуда, сократив на } \frac{\pi}{4}, \text{ найдем } p_2:$$

$$p_2 = \frac{5 \cdot 8^2 - 0,05 \cdot (8^2 - 4^2)}{4^2} = 19,85 \text{ МПа.}$$

### Задачи

2.11. На поршень одного из сообщающихся сосудов (сосуд А), наполненных водой, действует сила  $F_1 = 1,6$  кН (рис. 12). Какую силу  $F_2$  следует приложить ко второму поршню, чтобы уровень воды  $h = 40$  см под ним был выше уровня воды под первым поршнем, если диаметры первого поршня  $d_1 = 20$  см, а второго  $d_2 = 25$  см.

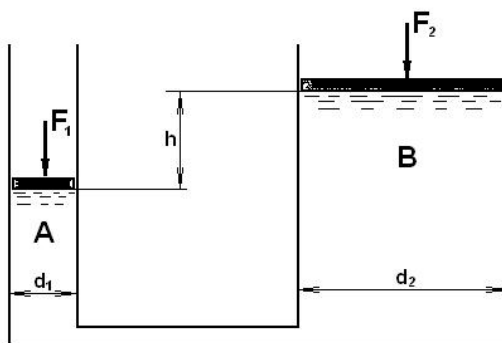


Рис. 12. К задаче 2.11

2.12. Гидравлический пресс (рис. 13) имеет диаметр большого поршня  $D = 250$  мм, меньшего  $d = 25$  мм. Плечи рычага  $a = 1$  м,  $b = 0,2$  м. Какое усилие надо приложить к концу рычага, чтобы сжать изделие  $N$  силой  $P_2 = 100$  кН. Трением пренебречь.

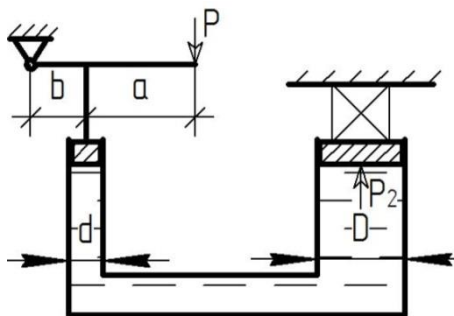


Рис. 13. К задаче 2.12

2.13. Какую силу  $F_2$  следует приложить к поршню большего диаметра  $d_2 = 0,4$  м с тем, чтобы система находилась в равновесии, если к поршню меньшего диаметра  $d_1 = 0,1$  м приложена сила  $F_1 = m \cdot g$  ( $m = 10$  кг). Жидкость – вода, плотностью  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Высота  $h = 1,5$  м (рис. 14).

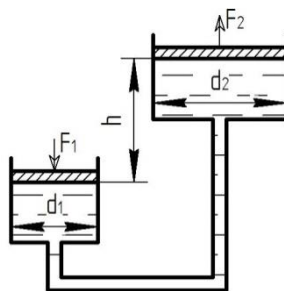


Рис. 14. К задаче 2.13

2.14. Определить силу  $F$ , необходимую для удержания поршня

на высоте  $h_2 = 2$  м над поверхностью воды в колодце. Над поршнем поднимается столб воды высотой  $h_1 = 3$  м. Диаметры: поршня  $D = 100$  мм, штока  $d = 30$  мм. Вес поршня и штока не учитывать (рис. 15).

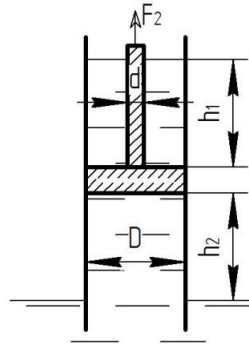


Рис. 15. К задаче 2.14

2.15. Определить показание мановакуумметра  $p_{мв}$ , если к штоку поршня приложена сила  $F = 0,95$  кН, его диаметр  $D = 85$  мм, высота  $H = 0,98$  м, плотность жидкости  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup> (рис. 16).

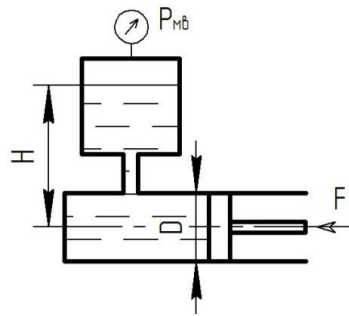


Рис. 16. К задаче 2.15

2.16. Определить силу  $F$  на штоке золотника (рис. 17), если показание вакуумметра  $p_{вак} = 43$  кПа, избыточное давление  $p_1 = 0,68$  МПа, высота  $H = 2,65$  м, диаметры поршней  $D = 60$  мм и  $d = 17$  мм,  $\rho = 990$  кг/м<sup>3</sup>.

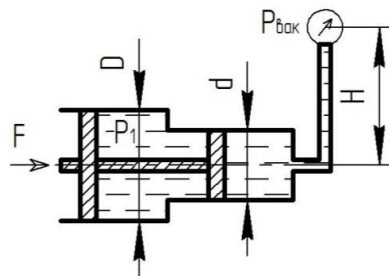


Рис. 17. К задаче 2.16

2.17. В два сообщающихся цилиндра налита вода (рис. 18). В меньший диаметр  $d = 40$  мм установлен поршень весом  $G = 100$  Н. На какой высоте  $H$  относительно поршня установится уровень воды в большом цилиндре, когда система придет в равновесия? Силой трения считать равной 10 % веса поршня.

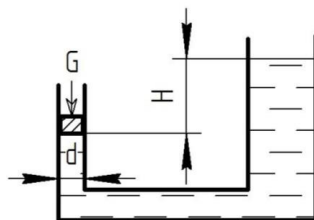


Рис. 18. К задаче 2.17

2.18. Определить давление в гидросистеме (рис. 19) и вес груза  $G$ , лежащего на поршне 2, если для его подъема к поршню 1 приложена сила  $F = 1,8$  кН. Диаметры поршней:  $D = 255$  мм,  $d = 68$  мм. Разностью высот пренебречь.

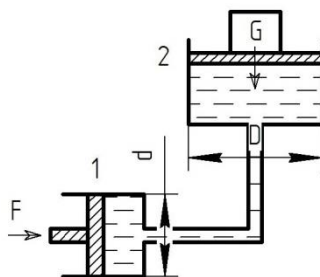


Рис. 19. К задаче 2.18

2.19. Определить давление  $p_1$  жидкости, которую необходимо подвести к гидроцилиндру (рис. 20), чтобы преодолеть усилие, направленное вдоль штока  $F = 1$  кН. Диаметры: цилиндра  $D = 50$  мм, штока  $d = 25$  мм. Давление в бачке  $p_0 = 50$  кПа, высота  $H = 5$  м. Силу трения не учитывать. Плотность жидкости  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

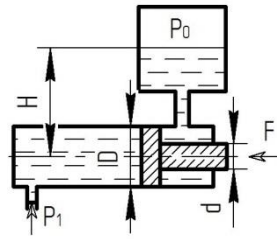


Рис. 20. К задаче 2.19

2.20. Определить давление  $p$  в верхнем цилиндре гидропреобразователя (мультипликатора) (рис. 21), если показание манометра присоединенного к нижнему цилиндру  $p_m = 0,48$  МПа. Поршни перемешаются вверх, причем сила трения составляет 10 % от силы давления жидкости на нижний поршень. Вес поршней  $G = 4$  кН. Диаметры поршней:  $D = 400$  мм,  $d = 100$  мм; высота  $H = 2,5$  м; плотность масла  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>.

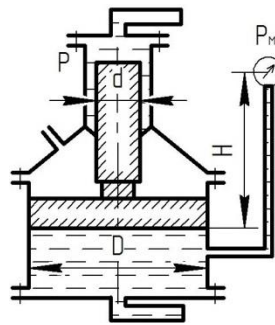


Рис. 21. К задаче 2.20

### 2.3. Давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности

#### 2.3.1. Давление жидкости на плоские поверхности. Центр давления. Эпюра давления

Сила полного гидростатического давления на плоскую фигуру равна абсолютному гидростатическому давлению в центре тяжести этой фигуры, умноженному на площадь фигуры  $\omega$ .

$$P = (p_0 + \rho \cdot g \cdot h_c) \cdot \omega \quad (20)$$

В открытом резервуаре, где  $p_0 = p_{atm}$ , сила полного гидростатического давления, действующего на плоскую фигуру, равна

произведению площади фигуры на избыточное гидростатическое давление в ее центре тяжести.

$$P = \rho \cdot g \cdot h_c \cdot \omega \quad (21)$$

Центром давления называется точка приложения силы избыточного гидростатического давления

$$P = \rho \cdot g \cdot h_{ц.м.} \cdot \omega \quad (22)$$

Для нахождения центра давления используют свойство момента равнодействующей, который относительно любой оси должен быть равен сумме элементарных моментов составляющих ее сил относительно той же оси

$$h_o. = h_{ц.м.} + \frac{J_0}{h_{ц.м.} \cdot \omega} \quad (23)$$

где  $h_o.$  - расстояние от свободной поверхности до центра давления;  $h_{ц.м.}$  - расстояние от свободной поверхности до центра тяжести рассматриваемой поверхности;  $J_0$  - момент инерции поверхности (фигуры) относительно оси, проходящей параллельно линии уреза жидкости через центр тяжести этой фигуры.

Из уравнения (23) следует, что центр давления лежит ниже центра тяжести фигуры на расстоянии эксцентриситета  $\frac{J_0}{h_{ц.м.} \cdot \omega}$ .

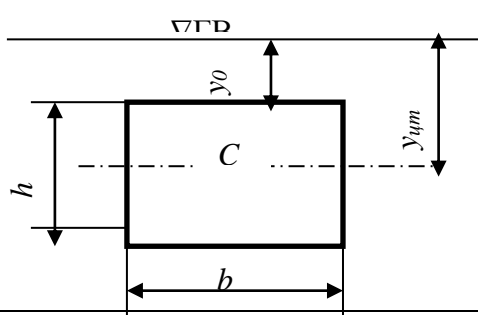
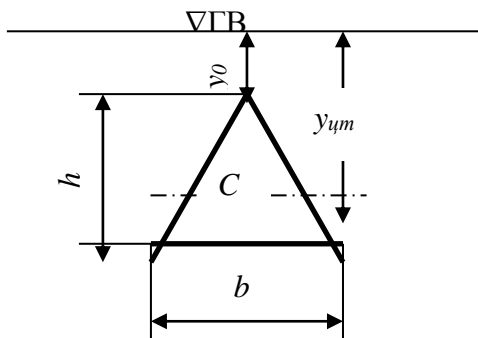
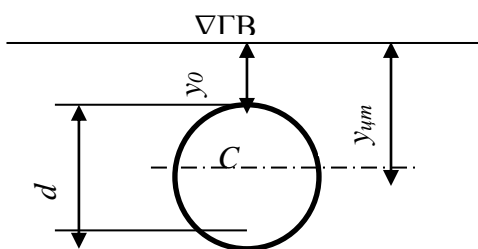
Для графического изображения закона изменения гидростатического давления по глубине служат эпюры давления. Площадь эпюры выражает силу давления, а центр тяжести эпюры – это точка, через которую проходит равнодействующая сила давления. При построении эпюр учитывают, что давление направлено нормально к стенке.

Эпюра абсолютного гидростатического давления представляет собой трапецию, а манометрического давления – треугольник. Если плоская стенка, на которую действует жидкость, наклонена под углом

$\alpha$  к горизонту, то основное уравнение гидростатики примет следующий вид:

$$p_A = p_0 + \rho \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (24)$$

Таблица 1 – Значения момента инерции, площади сечения и центра тяжести фигуры

Вид фигуры	$J_0$	$y_{cm}$	$\omega$
	$\frac{bh^3}{12}$	$y_0 + \frac{h}{2}$	$b \cdot h$
	$\frac{bh^3}{36}$	$y_0 + \frac{2h}{3}$	$\frac{bh}{2}$
	$\frac{\pi d^4}{64}$	$y_0 + \frac{d}{2}$	$\frac{\pi d^2}{4}$

Таким образом, при наклонной стенке эпюры абсолютного и манометрического давления представляют собой наклонную трапецию и наклонный треугольник.

Эпюра гидростатического давления на горизонтальное дно резервуара представляет собой прямоугольник, так как при постоянной глубине  $h$  манометрическое давление на дно является постоянным

$$p_M = \rho \cdot g \cdot h \quad (25)$$

*Пример 1:*

Прямоугольный щит длиной  $l = 5$  м и шириной  $b = 5$  м, закреплен с помощью шарнира в точке  $O$  (рис. 22). Глубина воды слева от щита  $H_1 = 4$  м, справа  $H_2 = 2$  м. Определить усилие  $T$ , которое необходимо для поднятия щита.

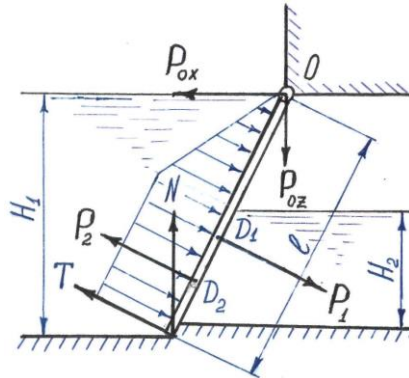


Рис. 22. Схема к примеру 1

*Решение:*

Сила манометрического давления воды слева на щит:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_{c_1} \cdot l \cdot b = \rho \cdot g \cdot \frac{H_1}{2} \cdot l \cdot b = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{4}{2} \cdot 5 \cdot 5 = 490500 \text{ Н.}$$

Сила манометрического давления воды справа на щит:

$$P_2 = \rho \cdot g \cdot h_{c_2} \cdot \frac{l}{2} \cdot b = \rho \cdot g \cdot \frac{H_2}{2} \cdot \frac{l}{2} \cdot b = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{2}{2} \cdot \frac{5}{2} \cdot 5 = 122625 \text{ Н.}$$

Точка  $D_1$  приложения силы  $P_1$  находится на расстоянии  $\frac{2}{3} \cdot l$  от шарнира  $O$ , точка приложения силы  $P_2$  отдалена от шарнира  $O$  на  $\frac{l}{2} + \frac{l}{3} = \frac{5}{6} \cdot l$ . Применим теорему моментов для оси вращения, проходящей через точку  $O$ :

$$P_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot l = T \cdot l + P_2 \cdot \frac{5}{6} \cdot l \text{ Н.}$$

Откуда

$$T = \frac{2}{3} \cdot P_1 - \frac{5}{6} \cdot P_2 = \frac{2}{3} \cdot 490500 - \frac{5}{6} \cdot 122625 = 224813 \text{ Н}$$

*Пример 2:*

Определить силу манометрического давления на дно сосуда, если сила  $P_1$ , действующая на поршень, равна 44 Н. Диаметр  $d = 12$  см.

Глубина воды в сосуде  $h = 40$  см, диаметр дна сосуда  $D = 35$  см.

*Решение:*

Манометрическое гидростатическое давление на дно сосуда определяется из зависимости

$$p = \frac{P_1}{\omega_1} + \rho \cdot g \cdot h ,$$

где  $\omega_1$  – площадь поршня,  $\text{м}^2$ . Определяется по формуле:

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,12^2}{4} = 0,012 \text{ м}^2 .$$

Тогда

$$p = \frac{44}{0,012} + 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,4 = 7591 \text{ Н/м}^2 .$$

Площадь дна сосуда равна:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,35^2}{4} = 0,097 \text{ м}^2 .$$

Сила манометрического давления на дно сосуда будет равна:

$$P = p \cdot \Omega = 7591 \cdot 0,097 = 736 \text{ Н}$$

*Пример 3:*

Найти силу  $T$ , с которой нужно тянуть трос, прикрепленный к нижней кромке плоского круглого затвора диаметром  $d = 2$  м, закрывающего отверстие трубы. Затвор может вращаться вокруг шарнира А. Глубина воды над верхней кромкой затвора  $h = 3$  м. Трос направлен под углом  $\alpha = 45^\circ$  к горизонту.

*Решение:*

Определяем центр тяжести поверхности на которую действует сила давления:

$$h_{ц.т.} = h + \frac{d}{2} = 3 + \frac{2}{2} = 4 \text{ м},$$

Определяем площадь затвора:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ м}^2,$$

Силу давления определяем по формуле (22)

$$P = \rho \cdot g \cdot h_{u.m.} \cdot \omega = 1000 \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 3,14 = 123214 \text{ Н.}$$

Определяем момент инерции для круглого сечения:

$$J_0 = \frac{3,14 \cdot 2^4}{64} = 0,785 \text{ м}^4 .$$

Находим центр давления по формуле (23)

$$h_0 = 4 + \frac{0,785}{4 \cdot 3,14} = 4,063 \text{ м.}$$

Составляем уравнение моментов относительно шарнира А:

$$T \cdot (d \cdot \sin \alpha) - P \cdot (h_0 - h) = 0 ,$$

откуда

$$T = \frac{P \cdot (h_0 - h)}{d \cdot \sin \alpha} = \frac{123214 \cdot (4,063 - 3) \cdot 2}{2 \cdot \sqrt{2}} = 92498 \text{ Н} = 92,5 \text{ кН.}$$

Следовательно, сила, с которой нужно тянуть трос,  $T = 92,5 \text{ кН}$ .

### Задачи

2.21. Определить величину и точку приложения силы гидростатического давления на плоскую боковую стенку, если глубина воды  $H = 2 \text{ м}$ , а ширина стенки  $b = 3 \text{ м}$ . Построить эпюру избыточного гидростатического давления (рис. 23).

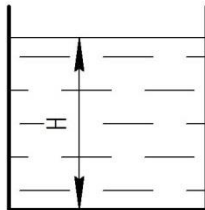


Рис. 23. К задаче 2.21

2.22. В резервуар прямоугольного сечения с размерами  $a = 1 \text{ м}$ ,  $b = 3 \text{ м}$  налита жидкость – вода, плотностью  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , высота жидкости  $h = 4,4 \text{ м}$ . Построить эпюру гидростатического избыточного давления на дно и одну из стенок резервуара. Определить силы давления на дно и стенку и точки приложения сил (рис. 24).

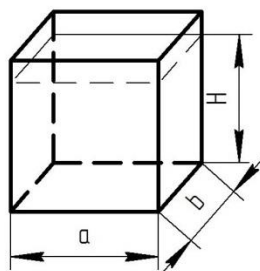


Рис. 24. К задаче 2.22

2.23. Для регулирования уровня воды в напорном баке установлен щиток (рис. 25), который вращается вокруг шарнира  $O$  и должен открывать квадратное отверстие со стороной  $b = 0,4$  м в вертикальной стенке при заданном уровне над отверстием  $H = 2$  м. Определить глубину погружения шарнира и силу гидростатического давления на щиток. Плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

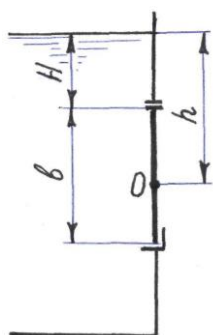


Рис. 25. К Задаче 2.23

2.24. Прямоугольный поворотный затвор (рис. 26) размером  $L \times B = 2 \times 3$  м перекрывает выход воды в атмосферу из резервуара, уровень в котором  $H = 4$  м. Определить, на каком расстоянии  $x$  от нижней кромки затвора следует расположить его ось поворота, чтобы для открытия затвора нужно было преодолевать только момент трения в цапфах  $O$ .

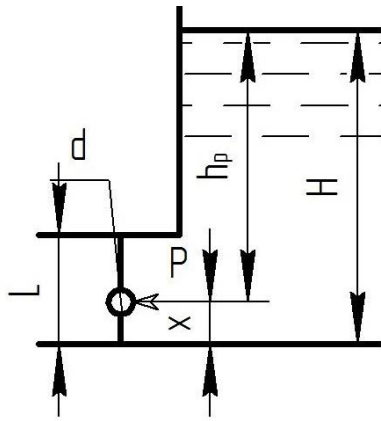


Рис. 26. К задаче 2.24

2.25. Затвор донного водовыпуска треугольной формы (рис. 27) имеет ширину  $a = 1,2$  м и высоту  $b = 1,5$  м. Угол наклона затвора  $\alpha = 45^\circ$ , нижняя кромка затвора находится в воде на глубине  $h_1 = 9,5$  м, плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Определить силу абсолютного гидростатического давления жидкости и положение центра давления на затвор.

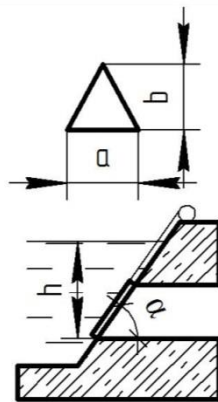


Рис. 27. К задаче 2.25

2.26. Круглое отверстие  $d = 40$  см в вертикальной стенке резервуара с водой перекрыто плоским клапаном. Найти силу и точку приложения силы, прижимающей клапан к стенке, если центр отверстия находится, ниже свободной поверхности жидкости на  $h = 3$  м.

2.27. Определить величину и точку приложения силы гидростатического давления на плоскую боковую стенку

(рис.28), если глубина воды  $H = 2$  м, а ширина стенки  $B = 3$  м. Построить эпюру избыточного гидростатического давления.

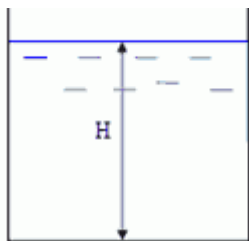


Рис. 28. К задаче 2.27

2.28. Определить силу  $P$ , на которую должно быть рассчитано запорное устройство (рис. 29) квадратной крышки размерами  $a = 0,5$  м, вращающего вокруг оси  $O$ , если показания манометра  $p_m = 7,848$  кПа, глубина погружения уровня оси  $b = 0,8$  м, жидкость – вода ( $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>). Построить эпюру давления.

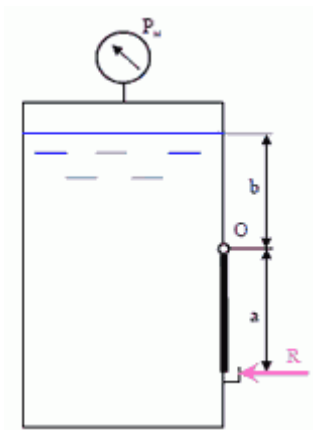


Рис. 29. К задаче 2.28

2.29. В резервуар (рис. 30) прямоугольного сечения с размерами  $a = 1$  м,  $b = 3$  м налита жидкость – вода, плотностью  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, высота жидкости  $h = 4,4$  м. Построить эпюру гидростатического избыточного давления на дно и одну из стенок резервуара. Определить силы давления на дно и стенку и точки приложения сил.

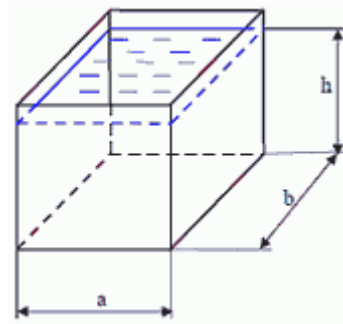


Рис. 30. К задаче 2.29

2.30. Определить равнодействующую силу избыточного давления воды на плоский вертикальный затвор, перекрывающий отверстие круглой трубы (рис. 31). Найти координату точки приложения равнодействующей силы гидростатического давления  $P$  на затвор и построить эпюру давления на него при следующих значениях параметров:  $H_1 = 3,6 \text{ м}$ ;  $H_2 = 0,6 \text{ м}$ ;  $d = 150 \text{ см}$ .

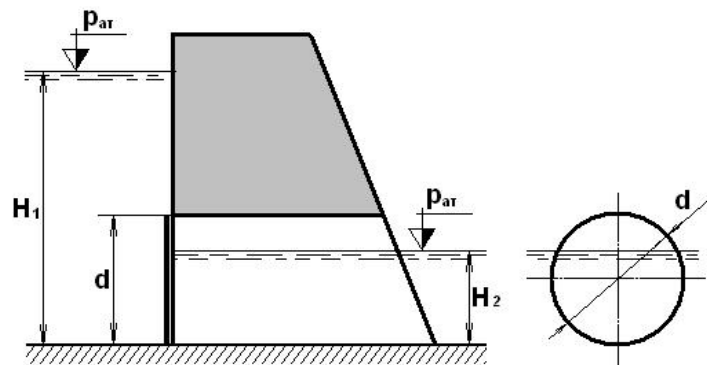


Рис. 31. К задаче 2.30

### 2.3.2. Давление жидкости на криволинейные поверхности

Равнодействующая сил давления на криволинейную поверхность определяется по формуле:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} \quad , \quad (26)$$

где  $P_x$  – горизонтальная составляющая силы давления;  $P_z$  – вертикальная составляющая силы давления.

Горизонтальная составляющая силы давления определяется по формуле:

$$P_x = \rho \cdot g \cdot h'_{ц.м.} \cdot \omega_x , \quad (27)$$

где  $h'_{ц.м.}$  – расстояние от свободной поверхности жидкости до центра тяжести рассматриваемой криволинейной поверхности;  $\omega_x$  – площадь проекции криволинейной поверхности на плоскость, нормальную оси X.

Вертикальная составляющая силы давления определяется по формуле:

$$P_z = \rho \cdot g \cdot W_\delta , \quad (28)$$

где  $W_\delta$  – объем тела давления, заключенного между самой криволинейной поверхностью и ее проекцией на свободную поверхность.

*Пример 1:*

Определить силу суммарного давления на секторный затвор и ее направление. Глубина воды перед затвором  $H = 4$  м, длина затвора  $L = 8$  м,  $\alpha = 60^\circ$ .

*Решение:*

Горизонтальная составляющая силы давления равна силе давления на вертикальную проекцию затвора

$$P_x = \rho \cdot g \cdot h_{ц.м.} \cdot \omega_x = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{8}{2} \cdot 4^2 = 627840 \text{ Н} = 628 \text{ кН} .$$

Вертикальную составляющую силы давления определяем по формуле (28):

$$P_z = \rho \cdot g \cdot W = \rho \cdot g \cdot \omega_{abc} \cdot L ,$$

где  $W$  – объем тела  $abc$  длиной  $L$ ;  $\omega_{abc}$  – площадь фигуры  $abc$ .

$$R = \frac{H}{\sin \alpha} = \frac{4}{\sin 60^\circ} = 4,62 \text{ м};$$

$$Oe = R \cdot \cos \alpha = 4,62 \cdot 0,5 = 2,31 \text{ м};$$

$$\omega_{oac} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\alpha}{360} = \frac{3,14(2 \cdot 4,62)^2}{4} \cdot \frac{60}{360} = 11,2 \text{ м}^2 ;$$

$$\omega_{oec} = \frac{ce \cdot Oe}{2} = \frac{4 \cdot 2,31}{2} = 4,62 \text{ м}^2 ;$$

$$\omega_{ace} = \omega_{oac} - \omega_{oec} = 11,2 - 4,62 = 6,58 \text{ м}^2 ;$$

$$\omega_{abce} = ab - ae = 4(4,62 - 2,31) = 9,24 \text{ м}^2 ;$$

$$\omega_{abc} = \omega_{abce} - \omega_{ace} = 9,24 - 6,58 = 2,66 \text{ м}^2 .$$

Определяем вертикальную составляющую:

$$P_z = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,66 \cdot 8 = 209500 \text{ Н} = 209,5 \text{ кН} .$$

Равнодействующую сил давлений определяем по формуле (26):

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{628^2 + 209,5^2} = 662 \text{ кН} .$$

*Пример 2:*

Определить силу гидростатического давления воды на 1 м ширины нижней криволинейной части сооружения, если глубина  $H = 1,5$  м, радиус поверхности  $R = 0,5$  м.

*Решение:*

Определяем центр тяжести поверхности

$$h_{ц.м.} = H - \frac{R}{2} = 1,5 - \frac{0,5}{2} = 1,25 \text{ м} .$$

Определяем площадь поверхности

$$\omega_x = R \cdot b = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ м}^2 .$$

Определяем горизонтальную составляющую силы давления воды на криволинейную часть сооружения по формуле (27):

$$P_x = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 0,5 = 6130 \text{ Н}$$

Определяем объем поверхности

$$W_o = \left( H \cdot R - \frac{\pi \cdot R^2}{4} \right) \cdot b = \left( 1,5 \cdot 0,5 - \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \right) \cdot 1 = 0,55 \text{ м}^3 .$$

Определяем вертикальную составляющую силы давления по формуле (28):

$$P_z = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,55 = 5396 \text{ Н} .$$

Определяем суммарную силу давления воды на криволинейную часть сооружения по формуле (29):

$$P = \sqrt{6,13^2 + 5,396^2} = 8,17 \text{ кН} .$$

*Пример 3:*

Определить величину и направление силы гидростатического давления воды на 1 м ширины вальцового затвора диаметром  $D = 1,5$  м.

*Решение:*

Центр тяжести определяем по формуле:

$$h_{ц.т.} = \frac{D}{2} = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ м} .$$

Площадь вальцового затвора определяем по формуле:

$$\omega_x = D \cdot b = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ м}^2 .$$

Определяем горизонтальную составляющую силы давления по формуле (27):

$$P_x = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,75 \cdot 1,5 = 11036 \text{ Н} .$$

Определяем объем вальцового затвора

$$W_o = \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot b = \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{8} \cdot 1 = 0,88 \text{ м}^3 .$$

Определяем вертикальную составляющую силы давления по формуле (28):

$$P_z = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,88 = 8633 \text{ Н} .$$

Определяем суммарную силу давления на вальцовый затвор:

$$P = \sqrt{11,036^2 + 8,633^2} = 14,012 \text{ кН} .$$

## Задачи

2.31. Для приведенных на рисунке 32 схем построить тела давления (эпюры, выражающие вертикальную составляющую силы давления) и указать направления силы давления.

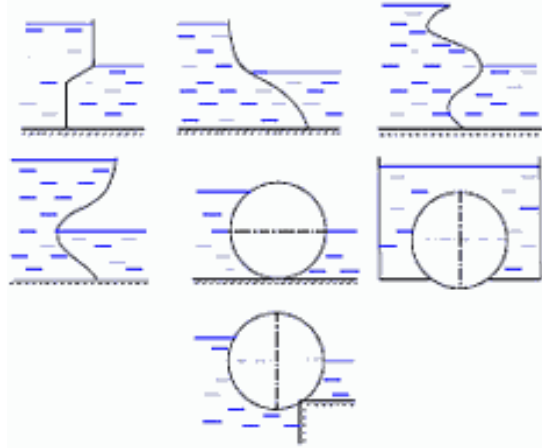


Рис. 32. К задаче 2.31

2.32. Вертикальная цилиндрическая цистерна (рис.33) с полусферической крышкой до самого верха заполнена жидкостью, плотность которой  $\rho = 930 \text{ кг/м}^3$ . Диаметр цистерны  $D = 1,7 \text{ м}$ , высота ее цилиндрической части  $H = 3 \text{ м}$ . Манометр показывает избыточное давление  $p_m = 18,6 \text{ кПа}$ . Определить силу, растягивающую болты А, и горизонтальную силу, разрывающую цистерну по сечению В-В. Силой тяжести крышки пренебречь. Векторы сил показать на схеме.

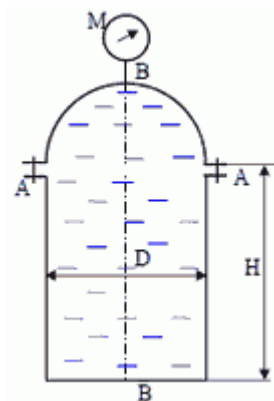


Рис. 33. К задаче 2.32

2.33. Определить величину и направление силы давления на цилиндрическую поверхность (рис. 34), удерживающую жидкость с

плотностью  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  и глубиной  $H = 1 \text{ м}$ , радиусом  $R = 1 \text{ м}$  и шириной  $b = 2 \text{ м}$ .

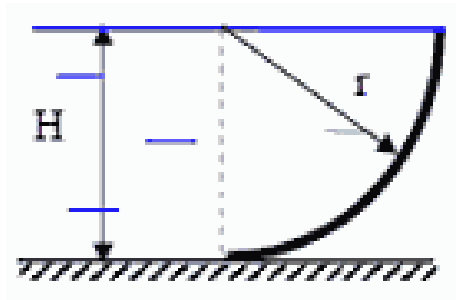


Рис. 34. К задаче 2.33

2.34. Определить отрывающее и сдвигающее усилия, а также полную силу давления жидкости на полусферическую крышку (рис. 35) радиуса  $R = 1 \text{ м}$ , если заданы пьезометрический напор воды  $H = 3 \text{ м}$  над центром крышки и угол  $\alpha = 60^\circ$  наклона стенки бака к горизонту.

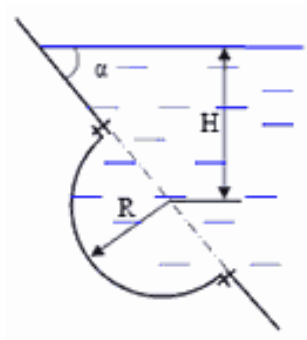


Рис. 35. К задаче 2.34

2.35. Герметично закрытый вертикальный цилиндрический резервуар (рис. 36) диаметром  $d = 2 \text{ м}$ , крышка и дно которого представляют собой полусферические поверхности, полностью заполнен водой. Высота цилиндрической части резервуара  $h = 2,5 \text{ м}$ . К верхней точке крышки подключен пружинный манометр, показывающий давление  $p_m = 98,1 \text{ кПа}$ . Определить: а) силы, которые стремятся оторвать крышку и дно от цилиндра; б) силу, стремящуюся разорвать цилиндрическую часть резервуара по образующим.

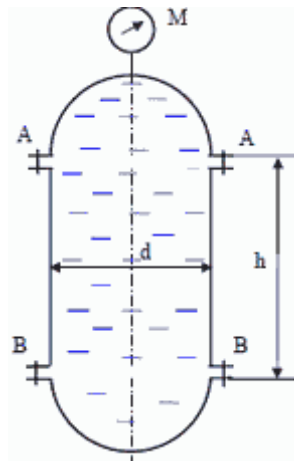


Рис. 36. К задаче 2.35

2.36. Определить вертикальную силу давления воды на полусферическую крышку радиусом  $R=1$  м, закрывающую круглое отверстие резервуара (рис. 37). Глубина заполнения резервуара водой равна  $H=2$  м. Избыточное давление на поверхности воды в резервуаре соответствует показанию манометра  $p_m = 0,1$  бар.

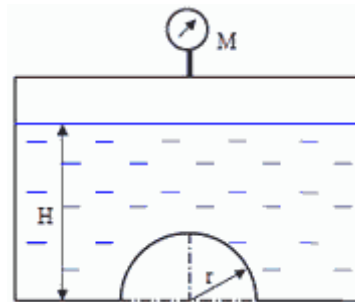


Рис. 37. К задаче 2.36

2.37. Определить силу давления бензина  $\rho = 765$  кг/м<sup>3</sup> на полусферическую крышку, закрывающую круглое отверстие диаметром  $d=1$  м, выполненное в вертикальной плоской стенке герметично закрытого резервуара (рис. 38). Заглубление центра отверстия под уровень бензина  $h=1$  м. Манометр, подключенный над свободной поверхностью бензина, показывает  $p_m = p_0 = 15$  кПа.

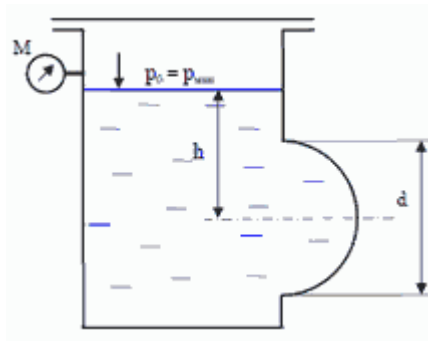


Рис. 38. К задаче 2.37

2.38. Определить силу давления на коническую крышку горизонтального цилиндрического сосуда (рис. 39) диаметром  $D=1000$  мм, заполненного нефтью, плотностью  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>. Показание манометра в точке его присоединения –  $p_m = 5$  ат. Показать на чертеже вертикальную и горизонтальную составляющие, а также полную силу давления. Размер  $a = 700$  мм.

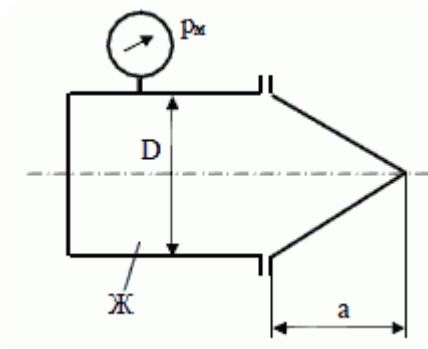


Рис. 39. К задаче 2.38

2.39. Сосуд, имеющий форму цилиндра с полусферой (рис. 40), заполнен водой. Определить силу  $P_z$ , отрывающую полусферу от цилиндра, и силу  $P_x$ , растягивающую резервуар по образующей, если  $h = 4$  м и  $D = 2$  м.

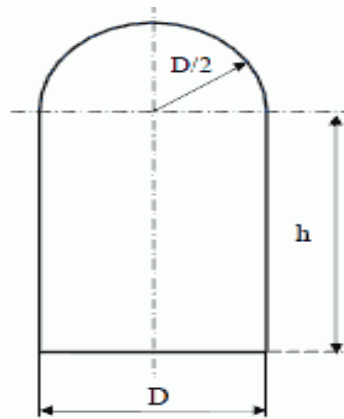


Рис. 40. К задаче 2.39

2.40. Круглое отверстие в вертикальной стенке закрытого резервуара с водой перекрыто сферической крышкой (рис. 41). Радиус сферы  $R = 0,5$  м; угол  $\alpha = 120^\circ$  глубина погружения центра тяжести отверстия  $H = 1$  м. Определить силу давления жидкости на крышку при манометрическом давлении на ее свободной поверхности  $p_m = 147$  кПа.

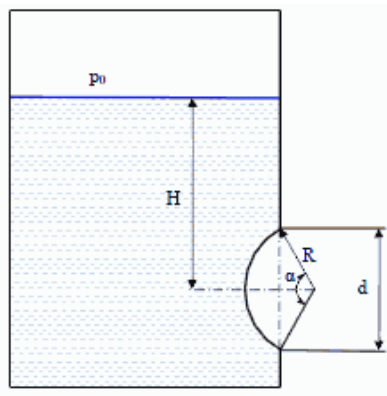


Рис. 41. К задаче 2.40

### 2.3.3. Плавание тел в жидкости. Закон Архимеда

Рассмотрим тело АВ, погруженное в жидкость (рис. 42). Предположим, что это тело состоит из элементарных вертикальных цилиндров, имеющих бесконечно малую площадь поперечного сечения  $d\omega$ . На каждый из таких цилиндров будут действовать элементарные силы гидростатического давления: сверху  $dP_1 = \gamma \cdot h_1 \cdot d\omega$ ,

а снизу  $dP_2 = \gamma \cdot h_2 \cdot d\omega$ . Поскольку  $h_2 > h_1$ , то элементарные цилиндры будут находиться под действием подъемной элементарной силы

$$dP_n = \gamma \cdot (h_2 - h_1) \cdot d\omega. \quad (29)$$

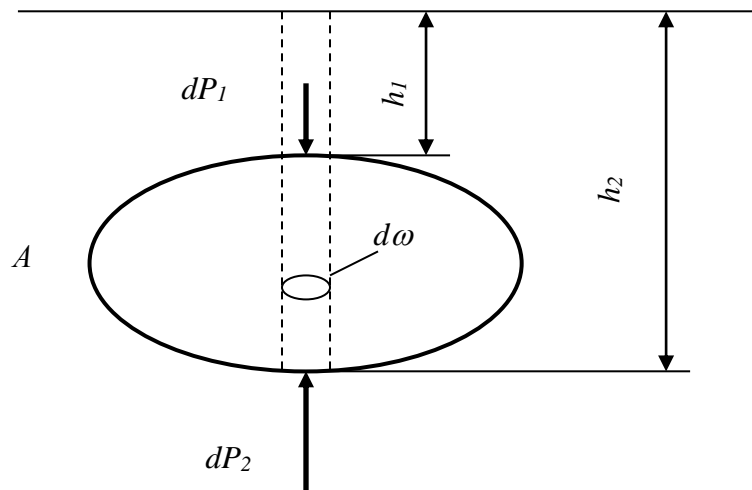


Рис. 42. Схема действия сил на тело, погруженное в жидкость

Суммируя элементарные подъемные силы, получим полную подъемную силу  $P_n$ . Из зависимости (29) следует, что подъемная сила  $P_n$  равна весу жидкости, вытесненной погруженным в нее телом, и направлена по вертикали снизу вверх – закон *Архимеда*. На законе Архимеда основана теория плавания тел. Подъемная сила приложена в центре погруженной части тела, который называется *центром водоизмещения*.

В теории плавания тел используют два понятия:

- плавучесть – это способность тела плавать;
- остойчивость – способность плавающего тела восстанавливать нарушенное при крене равновесие после устранения сил, вызвавших крен.

Три условия плавания тел:

- 1)  $G > P_n$  – тело тонет, так как равнодействующая сила направлена вниз;

2)  $G < P_n$  – тело плавает в полупогруженном состоянии, так как равнодействующая сила направлена вверх и тело всплывает;

3)  $G = P_n$  – тело плавает в погруженном состоянии.

*Пример 1:*

Определить вес груза, установленного на круглом в плане металлическом понтоне диаметром  $d = 4$  м, если после установки груза осадка понтона увеличилась на  $h = 0,6$  м.

*Решение:*

Вес груза равен дополнительной силе вытеснения воды.

Дополнительная сила вытеснения определяется по формуле:

$$P = \rho \cdot g \cdot W_{\text{ногр}} = \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h .$$

Следовательно, вес груза равен

$$G = \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 4^2}{4} \cdot 0,6 = 73928 \text{ Н.}$$

*Пример 2:*

Простейший ареометр (рис. 43), выполненный из круглого карандаша диаметром  $d = 8$  мм и прикрепленного к его основанию металлического шарика  $d_{\text{ш}} = 5$  мм, имеет вес  $G = 0,006$  Н. определить плотность жидкости  $\rho$ , если ареометр цилиндрической частью погружается в нее на глубину  $h = 1,5$  м.

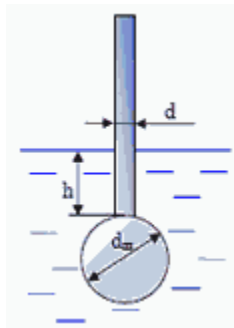


Рис. 43. Схема к примеру 2

*Решение:*

Вес ареометра уравновешивается силой вытеснения.

Следовательно,

$$G = \rho \cdot g \cdot W_a = \rho \cdot g \cdot (W_u + W) = \rho \cdot g \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_u^3}{6} + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \right),$$

откуда

$$\rho = \frac{G}{g \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_u^3}{6} + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \right)} = \frac{0,006}{9,81 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,005^3}{6} + \frac{3,14 \cdot 0,008^2}{4} \cdot 0,015 \right)} = 730 \text{ кг/м}^3$$

### Задачи

2.41. Кусок железа весит в воде  $G = 1 \text{ Н}$ , а его плотность  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ . Определите его объем.

2.42. Определить величину подъемной силы, действующей на деревянный брусок (рис. 44), находящийся в воде, а также значение высоты бруска, находящейся под поверхностью воды. Размеры бруска: длина  $a = 0,6 \text{ м}$ , ширина  $b = 0,3 \text{ м}$  и высота  $h = 0,1 \text{ м}$ ; плотность дерева принять  $\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$ .

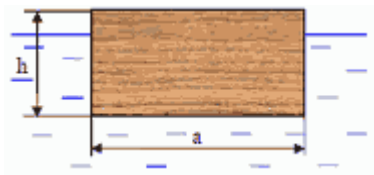


Рис. 44. К задаче 2.42

2.43. Объем части ледяной горы (рис. 45), возвышающейся над поверхностью моря, равен  $W_1 = 12,5 \text{ м}^3$ . Определить общий объем ледяной горы и глубину ее погруженной части, если в плане она имеет форму прямоугольника размером  $a \times b = 3 \times 2$ .

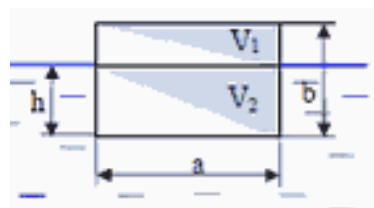


Рис. 45. К задаче 2.43

2.44. Объемное водоизмещение подводной лодки  $W = 600 \text{ м}^3$ . С

целью погружения лодки отсеки были заполнены морской водой в количестве  $W_1 = 80 \text{ м}^3$ . Плотность морской воды  $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$ . Определить чему равен вес подводной лодки без воды.

2.45. Определить остойчивость деревянного цилиндра высотой  $h$ , плавающего в воде, если его диаметр  $d = 0,6 \text{ м}$ , плотность  $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$ . Задачу решить для двух случаев: 1)  $h = 0,5 \text{ м}$ ; 2)  $h = 0,4 \text{ м}$ .

2.46. Определить остойчивость треугольной равнобедренной призмы (рис. 46), имеющей следующие размеры: ширина поверху  $b = 1,4 \text{ м}$ . Длина  $l = 5 \text{ м}$ . Угол при вершине  $\alpha = 60^\circ$ . Относительный удельный вес призмы  $0,75$ .

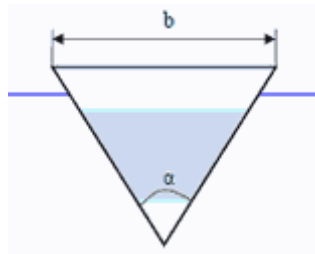


Рис. 46. К задаче 2.46

2.47. Прямоугольный понтон площадью  $\Omega = 2040 \text{ м}^2$  плавает в воде, определить осадку и собственный вес понтона, если собственный вес с грузом на нем  $G = 40 \text{ кН}$ , удельный вес понтона  $\gamma = 10 \text{ кН/м}^3$ .

2.48. В воде плавает бревно. Определить погруженную часть его объема, если  $\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$ .

2.49. Найти объем воды, вытесняемый баржей емкостью  $W = 10000 \text{ м}^3$ , груженный нефтью плотностью  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ .

2.50. Ареометр (рис. 47), изготовленный из полый стеклянной трубки, снабжен внизу шариком с дробью. Внешний диаметр трубки  $d = 30 \text{ мм}$ ; объем шарика  $W = 15 \text{ см}^3$ ; вес ареометра  $G = 0,35 \text{ Н}$ . Определить глубину  $h$ , на которую погрузится ареометр в спирт плотностью  $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$ .

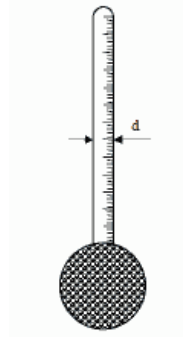


Рис. 47. К задаче 2.50

### Контрольные вопросы

1. Закон Паскаля.
2. Что такое избыточное и вакуумметрическое давление?
3. В каких единицах можно измерять гидростатическое давление?
4. Что такое эпюра давления?
5. Что такое центр давления?
6. Закон Архимеда.
7. Что такое центр водоизмещения?

### Рекомендуемая литература

1. Косарев С.Г. Общий курс гидравлики: метод. указания. Ч.1. / С.Г. Косарев: Читинский гос. техн. ун-т. – Чита: ЧитГТУ, 1999. – 32 с.
2. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.И. Калицун [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1980. – 359 с.
3. Альтшуль А.Д. Примеры расчетов по гидравлике: учеб. пособие для вузов / А.Д. Альтшуль [и др.]; под ред. А.Д. Альтшуля. – Москва: Стройиздат, 1977. – 255 с.
4. Боровков В.С. Сборник задач по гидравлике: учеб. пособие для вузов / В.С. Боровков [и др.]. – Москва, 2011. – 51 с.

### 3. Гидродинамика

#### 3.1. Виды движения жидкости. Гидравлические элементы потока

Гидродинамика рассматривает законы движения жидкостей. Параметры, характеризующие движение – скорость и давление, изменяются в потоке жидкости в пространстве и во времени. Основная задача гидродинамики состоит в исследовании изменения этих параметров в потоке жидкости, т.е. в нахождении вида функций

$$u = f_1(x, y, z, t) \quad (30)$$

$$p = f_2(x, y, z, t) \quad (31)$$

где  $u$  и  $p$  – скорость и давление в рассматриваемой точке;  $x, y, z$  – координаты этой точки;  $t$  – время.

Виды движения:

– установившееся – такое движение жидкости, при котором скорость и давление в любой точке потока не изменяются с течением времени;

– неустановившееся – такое движение, при котором скорость и давление в каждой точке потока изменяются с течением времени.

Примером установившегося движения служит истечение жидкости из отверстия резервуара при постоянном напоре. Примером неустановившегося движения служит истечение жидкости из отверстия в резервуаре при переменном напоре.

Гидравлические элементы потока:

– живое сечение потока  $\omega$  ( $\text{м}^2$ ) – это поперечное сечение потока, перпендикулярное его направлению;

– расход потока  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) – это количество жидкости, проходящее в единицу времени через живое сечение потока. Расход жидкости измеряют в  $\text{м}^3/\text{с}$  или л/с. Иногда пользуются понятием весового расхода  $G$ , под которым подразумевают вес жидкости,

проходящей в единицу времени через сечение потока. Между весовым и объёмным расходами существует такая зависимость:

$$G = \gamma \cdot Q, \quad (32)$$

где  $\gamma$  – удельный вес жидкости.

– смоченный периметр  $\chi$  (м) – это часть периметра живого сечения ограниченного твердыми стенками;

– гидравлический радиус  $R$  (м) – отношение площади живого сечения потока к смоченному периметру:

$$R = \frac{\omega}{\chi}; \quad (33)$$

– средняя скорость потока  $v$  – отношение расхода потока к площади его живого сечения:

$$v = \frac{Q}{\omega}. \quad (34)$$

Равномерным движением называют такое установившееся движение жидкости, при котором живые сечения и средняя скорость потока не меняются по его длине. Неравномерным называют такое установившееся движение жидкости, при котором живые сечения и средние скорости потока изменяются по его длине.

Напорным называется поток, у которого по всему периметру живого сечения жидкость соприкасается с твердыми стенками.

Безнапорным называется поток со свободной поверхностью.

## 3.2. Уравнения движения жидкости

### 3.2.1. Уравнение неразрывности потока

Рассмотрим установившееся движение жидкости в жестком русле переменного сечения (рис. 48). Выберем два произвольных сечения  $I-I$  и  $II-II$ , нормальных к оси потока, с площадью  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

Через сечение  $I-I$  за время  $\Delta t$  на этот участок поступит масса жидкости  $m_1$ , а через сечение  $II-II$  за это же время выйдет масса

жидкости  $m_2$ .

$$m_1 = \rho_1 \cdot Q_1 \cdot \Delta t. \quad (35)$$

$$m_2 = \rho_2 \cdot Q_2 \cdot \Delta t, \quad (36)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность жидкости в сечениях  $I-I$  и  $II-II$ .

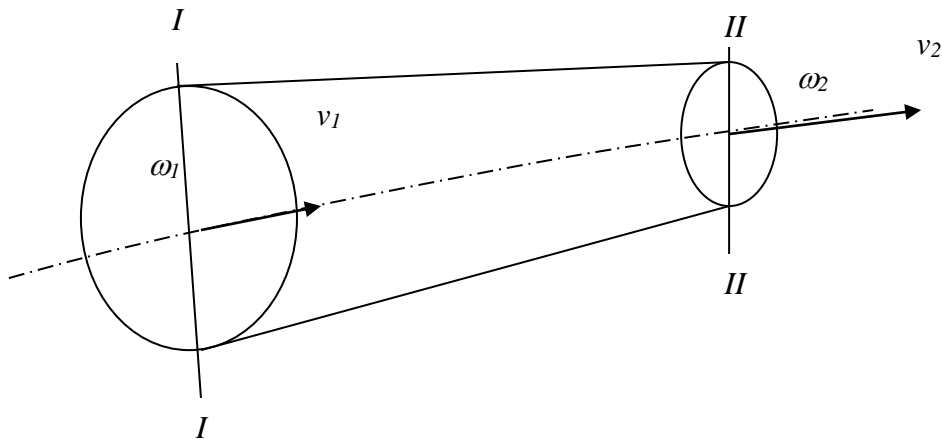


Рис. 48. Схема к выводу уравнения неразрывности

Поскольку стенки русла жесткие, а жидкость несжимаема, то выполняется условие:

$$m_1 = m_2 = const. \quad (37)$$

На основании данного выражения (37) можно записать

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2 = const. \quad (38)$$

Для несжимаемой жидкости

$$Q_1 = Q_2 = Q = const. \quad (39)$$

Уравнение (39) называют уравнением постоянства расхода. Из уравнения следует, что при установившемся движении несжимаемой жидкости расход в любом сечении постоянен. Так как  $Q = \omega \cdot v$ , то уравнение (39) может быть записано следующим образом:

$$\omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2 = \omega \cdot v = const. \quad (40)$$

Уравнение (40) называют уравнением неразрывности потока. Оно показывает, что при установившемся движении несжимаемой жидкости произведение площади живого сечения на среднюю

скорость потока является постоянной величиной.

### 3.2.2. Уравнение Бернулли для потока жидкости

Рассмотрим поток жидкости с плавно изменяющимся движением (рис. 49). Наметим два произвольных сечения  $I-I$  и  $II-II$ , нормальных к оси потока, с площадью  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

Применим к участку потока, заключенного между сечениями  $I-I$  и  $II-II$ , закон сохранения энергии. За время  $\Delta t$  частицы из сечений преодолеют путь равный  $v_1 \cdot \Delta t$  и  $v_2 \cdot \Delta t$ . Через сечение  $I-I$  в рассматриваемый участок за время  $\Delta t$  войдет объем жидкости  $Q_1 \cdot \Delta t$ , за это же время из этого участка через сечение  $II-II$  выйдет объем жидкости  $Q_2 \cdot \Delta t$ .

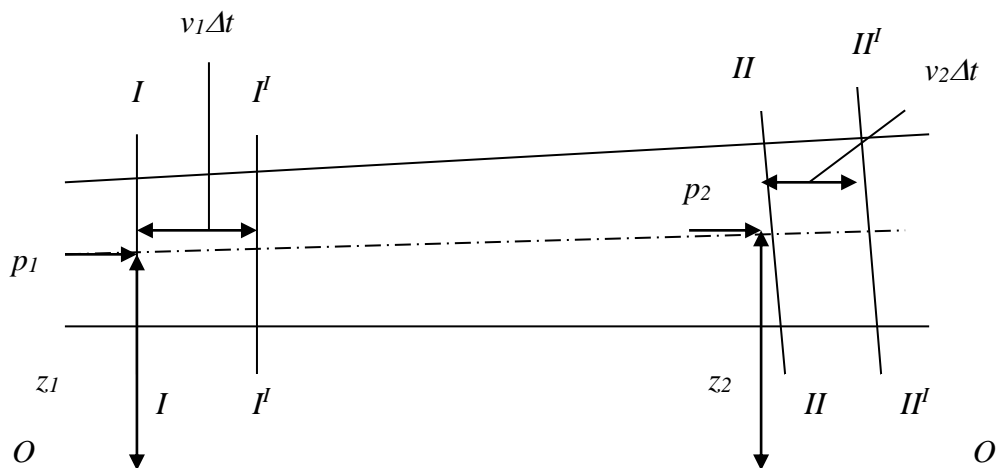


Рис. 49. Схема к выводу уравнения Бернулли

Объем жидкости  $Q_1 \cdot \Delta t$  обладает массой  $m_1 = \rho_1 \cdot Q_1 \cdot \Delta t$ .

Потенциальная энергия положения этого объема равна:

$$m_1 \cdot g \cdot z_1 = Q_1 \cdot \Delta t \cdot \rho_1 \cdot g \cdot z_1, \quad (41)$$

а кинетическая энергия этого же объема

$$\frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} Q_1 \cdot \Delta t \cdot \rho_1 \cdot v_1^2. \quad (42)$$

Рассматриваемый объем обладает также потенциальной

энергией давления

$$p_1 \cdot \omega_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = \rho_1 \cdot Q_1 \cdot \Delta t. \quad (43)$$

По закону сохранения энергии суммарная энергия, внесенная через сечение *I-I*, будет равна суммарной энергии, вынесенной через сечение *II-II*, с учетом потерь энергии.

$$p_2 \cdot Q_2 \cdot g \cdot \Delta t \cdot h_{nom}^{I-II}. \quad (44)$$

Разделим каждый член уравнения Бернулли на  $\rho \cdot g \cdot Q$  и получим

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_{nom}^{I-II}, \quad (45)$$

где  $z$  – геометрическая высота (удельная энергия положения);  $\frac{p}{\rho \cdot g}$  – пьезометрическая высота (удельная потенциальная энергия);  $\frac{v^2}{2 \cdot g}$  – скоростной напор (удельная кинетическая энергия);  $h_{nom}^{I-II}$  – высота, соответствующая потерям напора (удельная энергия потерь);  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределение скоростей по живому сечению потока.

*Пример 1:*

Из открытого резервуара *A* при абсолютном давлении на поверхности воды в нем  $p_{01} = 120$  кПа вода перетекает в нижний резервуар *B* по вертикальной трубе. Диаметр вертикальной трубы увеличивается от  $d = 100$  мм до  $D = 125$  мм (рис. 50). Расстояние между поверхностью воды в резервуаре *A* и выходным сечением трубы  $H = 3$  м, а расстояние между сечениями с диаметрами  $d$  и  $D$  составляет  $l = 2$  м. Показания ртутного манометра, присоединенного к резервуару *B*,  $\Delta h = 250$  мм. Определить расход воды  $Q$  в трубе и давление  $p_d$  в сечении 2-2.

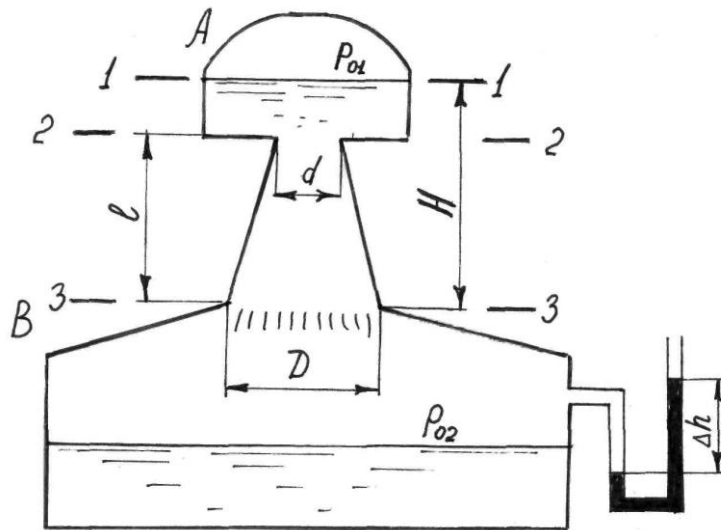


Рис. 50. Схема к примеру 1

Вначале используем уравнение Бернулли применительно к сечениям 1-1 и 3-3

$$\frac{p_{01}}{\rho \cdot g} + H = \frac{p_{02}}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot v_3^2}{2 \cdot g}$$

В этом случае

$$v_3 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

$$p_{02} = p_a + \rho_p \cdot g \cdot \Delta h$$

где  $\rho_p$  - плотность ртути, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда расход будет определяться по формуле:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\alpha} \cdot \frac{p_{01} - p_a}{\rho \cdot g} + H - \frac{\rho_p}{\rho} \cdot \Delta h}$$

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,125^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{1,05} \cdot \frac{120000 - 98100}{1000 \cdot 9,81} + 3 - \frac{13600}{1000} \cdot 0,25} = 0,072 \text{ м}^3/\text{с}$$

Составляем уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2

$$\frac{p_{01}}{\rho \cdot g} + H = \frac{p_d}{\rho \cdot g} + l + \frac{8 \cdot \alpha \cdot Q^2}{\pi \cdot g \cdot d^4}$$

Из уравнения выражаем  $p_d$ :

$$p_d = p_0 + \rho \cdot g \cdot (H - l) - \frac{8 \cdot \alpha \cdot Q^2}{\pi \cdot g \cdot d^4} = 98100 + 1000 \cdot 9,81 \cdot (3 - 2) - \frac{8 \cdot 1,05 \cdot 0,072^2}{3,14 \cdot 9,81 \cdot 0,1^4} = 64$$

кПа

*Пример 2:*

Определить давление  $p_1$  в сечении 1-1 горизонтально расположенного сопла гидромонитора, необходимое для придания скорости воде в выходном сечении 2-2 –  $v_2 = 40$  м/с, если скорость движения воды в сечении 1-1 –  $v_1 = 3$  м/с. Давление в сечении на выходе из гидромонитора равно  $p_2 = 100000$  Па.

*Решение:*

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

Определим давление в сечении 1-1

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) = 100000 + \frac{1000}{2} (40^2 - 3^2) = 895500 \text{ Па}$$

*Пример 3:*

Определить диаметр  $d$  суженной части горизонтального трубопровода, при котором вода поднимается на высоту  $h = 3,5$  м, расход  $Q = 6$  л/с, диаметр широкой части  $D = 10$  см. Давление в сечении 2-2 равно атмосферному давлению  $p_a = p_2$ .

*Решение:*

Составляем уравнение Бернулли для двух сечений 1-1 и 2-2

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_a}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

$$\frac{p_a}{\rho \cdot g} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} + h .$$

Решая совместно эти два уравнения, получим

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} = h + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} .$$

Скорость в первом сечении равна

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} .$$

Скорость во втором сечении будет равна

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} .$$

Тогда диаметр суженной части

$$d = \frac{2 \cdot \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{2 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot h + \frac{16 \cdot Q^2}{D^4}}} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,006}}{\sqrt[4]{2 \cdot 9,81 \cdot 3,14^2 \cdot 3,5 + \frac{16 \cdot 0,006^2}{0,1^4}}} = 0,03 \text{ м.}$$

### Задачи

3.51. Трубоччатый водомер (рис. 51) наклонен таким образом, что разница между отметками  $Z_1, Z_2$  сечений 1-1 и 2-2 составляет  $\Delta Z$ . Определить: а) расход воды  $Q$ , если диаметры  $D = 100$  мм,  $d = 50$  мм; разница давлений в сечениях:  $p_1 - p_2 = 40$  кПа;  $\Delta Z = 1$  м; б) разницу давлений, если  $D = 125$  мм,  $d = 75$  мм,  $Q = 25$  л,  $\Delta Z = 2$  м.

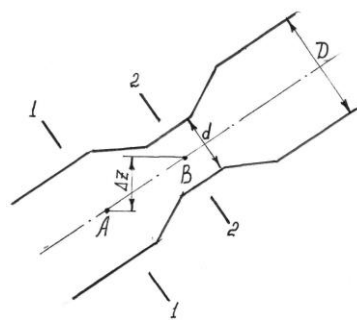


Рис. 51 К задаче 3.51

3.52. Аэродинамическая труба имеет открытую рабочую часть диаметром  $d$ . Спиртовой чашечный манометр, присоединен к широкой части трубы диаметром  $D$  (рис. 52). Определить: а) скорость потока воздуха в рабочей части  $v_d$ , если показания спиртового

манометра  $\Delta h = 150$  мм, отношение  $\frac{d}{D} = 0,4$ ; б) показания  $\Delta h$ , если скорость потока воздуха в рабочей части равна  $v_d = 50$  м/с, отношение  $\frac{d}{D} = 0,25$ .

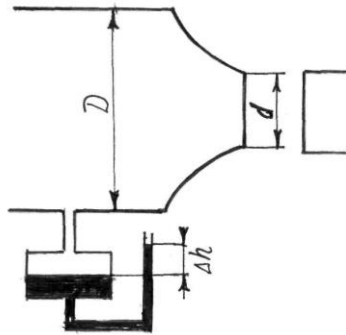


Рис. 52 К задаче 3.52

3.53. В цилиндре  $A$  (рис. 53) поршень движется вверх со скоростью  $v_n$ . При этом он поднимает воду из закрытого резервуара  $B$ , в котором манометрическое давление  $p_0$ . Разница уровней под поршнем и в резервуаре  $B$   $\Delta H$ . Пренебрегая сопротивлениями в соединительной трубке, определить скорость  $v_n$ , если  $\Delta H = 2$  м,  $p_0 = 15$  кПа,  $p_n = 90$  кПа.

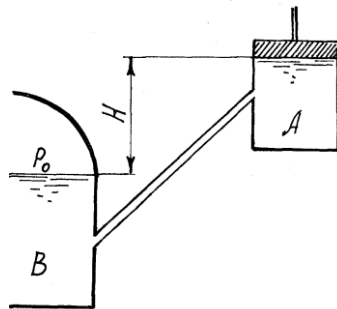


Рис. 53. К задаче 3.53

3.54. По трубопроводам  $A$ ,  $B$  диаметрами  $D = 400$  мм,  $d = 200$  мм подается вода под давлением (рис. 54). К трубопроводам присоединен ртутный пьезометр для измерения разницы давлений в них. Полный напор в трубопроводе  $B$  превышает аналогичный напор в трубопроводе  $A$  на  $\Delta H = 10$  см, Определить расход воды в трубопроводе  $A$   $Q_A$ , если показание пьезометра  $\Delta h = 10$  мм, средняя

скорость в трубопроводе  $B$   $v_B = 1,5$  м/с.

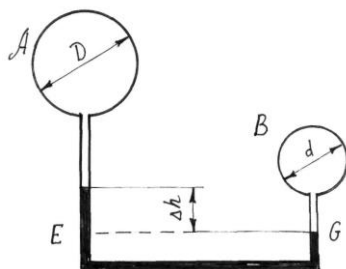


Рис. 54. К задаче 3.54

3.55. Насос производительностью  $Q$  забирает воду из колодца (рис. 55) по трубе диаметром  $D$  длиной  $l$  и находится выше поверхности воды на высоту  $h$ . Определить высоту  $h$ , если  $p_e = 60$  кПа,  $Q = 8$  л/с,  $D = 50$  мм.

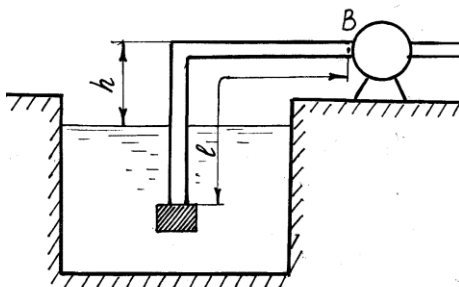


Рис. 55. К задаче 3.55

3.56. Из открытого резервуара по сифонному трубопроводу (рис. 56) диаметром  $d$  следует вода. Горизонтальная его часть находится выше уровня воды на  $h$ , а выходное отверстие ниже поверхности воды на  $l$ . Пренебрегая потерями напора в трубе определить: а) длину  $l$ , если абсолютное давление в сечении 1-1  $p_1 = 50$  кПа,  $h = 3$  м,  $d = 50$  мм; б) давление  $p_1$ , если  $l = 2,5$  м,  $h = 2,5$  м,  $d = 75$  мм.

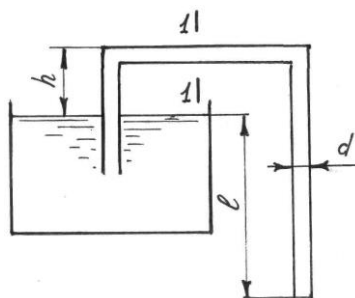


Рис. 56. К задаче 3.56

3.57. Вода вытекает из резервуара через трубку переменного сечения с небольшим углом конусности (рис. 57) и граничными диаметрами  $d$ ,  $D=150$  мм. Уровень воды выше оси трубки на  $H$ , манометрическое давление на поверхности воды  $p_0$ . Определить диаметр  $d$ , если  $p_1=50$  кПа,  $p_0=10$  кПа,  $H=1$  м и давление  $p_0$ , если  $p_1=70$  кПа,  $H=1$  м,  $d=100$  мм.

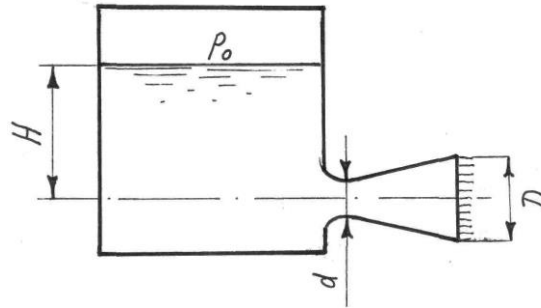


Рис. 57. К задаче 3.57

3.58. Из резервуара по трубопроводу диаметром  $D$ , который имеет сужение диаметра  $d$ , протекает вода (рис. 58). К зауженной части трубопровода присоединена трубка, противоположный конец которой опущен в открытый сосуд с ртутью. Пренебрегая потерями напора в трубопроводе определить: диаметр  $d$ , если абсолютное давление в зауженной части трубопровода  $p_d=10$  кПа, глубина воды в резервуаре  $H=10$  м,  $D=100$  мм.

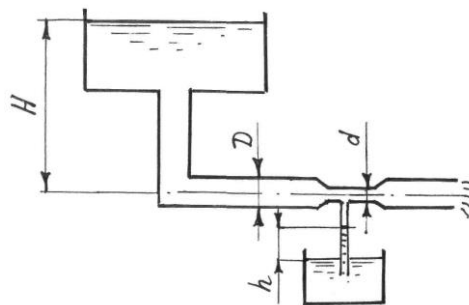


Рис. 58. К задаче 3.58

3.59. Из бачка А (рис. 59) по трубке диаметром  $d_3=25$  мм, которая подведена к трубопроводу диаметром  $d_1=300$  мм, следует хлорная вода плотностью  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>, расход хлорной воды. Определить расход хлорной воды  $Q_A$ , если напор  $H=5$  м, диаметр

зауженной части  $d_2 = 125$  мм, давление на входе в трубопровод  $p_1 = 120$  кПа, расход воды в нем  $Q = 150$  л/с; а также диаметр зауженной части  $d_2$ , если расход воды  $Q = 200$  л/с, расход хлорной воды  $Q_A = 6$  л/с, напор  $H = 6$  м, давление на входе в трубопровод  $p_1 = 140$  кПа.

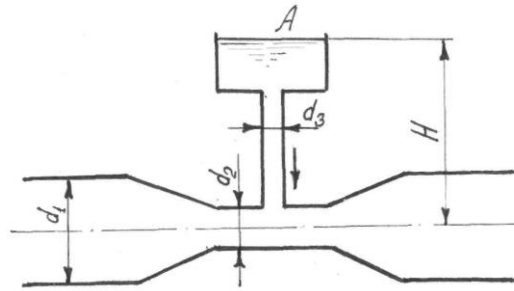


Рис. 59. К задаче 3.59

3.60. Вода вытекает в атмосферу из закрытого резервуара с подсоединенным ртутным дифференциальным манометром по трубе переменного сечения (рис. 60) с диаметрами  $D$ ,  $d$ . Уровень воды в резервуаре выше оси трубы на величину  $H$ . Построить пьезометрическую линию и определить: расход воды в трубе  $Q$ , если показания ртутного манометра  $h = 150$  мм,  $d = 50$  мм,  $D = 100$  мм.

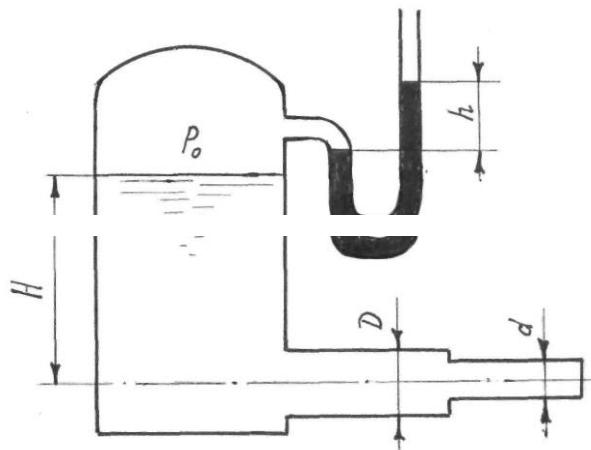


Рис. 60. К задаче 3.60

### **Контрольные вопросы**

1. В чем состоит основная задача гидродинамики?
2. Назовите основные уравнения гидродинамики.
3. Чем отличаются установившееся и неустановившееся движения жидкости?
4. Назовите основные гидравлические элементы потока и дайте им определение.
5. Чем отличаются равномерное и неравномерное движения жидкости?
6. Дайте определение пьезометрическому и гидравлическому уклонам.

### **Рекомендуемая литература**

1. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.И. Калицун [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1980. – 359 с.

2. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев; Ленинградский политехн. ин-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1971. – 552 с.

#### 4. Режимы движения жидкости. Гидравлические сопротивления

Поток жидкости в трубке характеризуется двумя режимами:

- 1) ламинарным (параллельно струйным);
- 2) турбулентным (хаотичным, беспорядочным).

Ламинарный режим возникает при относительно малых скоростях течения жидкости, при этом окрашенная струйка, вводимая в поток жидкости, движется параллельно стенкам трубки, не перемешиваясь с водой.

Турбулентный режим возникает при относительно больших скоростях движения жидкости, при этом окрашенная струйка, вводимая в поток жидкости, начинает размываться и вся вода в трубке равномерно окрашивается.

Опыты О. Рейнольдса показали, что основным критерием для определения режима движения жидкости является безразмерный параметр  $Re$  (число Рейнольдса):

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (46)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, принимается по таблице в зависимости от температуры.

Число Рейнольдса, при котором ламинарный режим переходит в турбулентный называется критическим  $Re_{kp}$ . Для круглых сечений  $Re_{kp} = 2320$ , для русел  $Re_{kp} = 580$ . При  $Re < Re_{kp}$  – движение жидкости происходит при ламинарном режиме, при  $Re > Re_{kp}$  – движение жидкости происходит при турбулентном режиме.

Скорость, соответствующую критическому числу Рейнольдса, называют критической скоростью

$$v_{kp} = \frac{2320 \cdot \nu}{d}. \quad (47)$$

При безнапорном движении жидкости число Рейнольдса определяют по формуле:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot v \cdot R}{\nu}, \quad (48)$$

где  $R$  – гидравлический радиус.

*Пример 1:*

Определить режим движения жидкости в трубах при следующих условиях: жидкость – вода, средняя скорость течения  $v = 1$  м/с, диаметр трубы  $d = 100$  мм, кинематическая вязкость при  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 0,01$  см<sup>2</sup>/с.

*Решение:*

С помощью уравнения (46) найдем число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1 \cdot 0,1}{0,01 \cdot 10^4} = 10000 ,$$

Определяем режим движения жидкости, пользуясь условием, что  $\text{Re}_{кр} = 2320$ .  $\text{Re} > \text{Re}_{кр}$  – режим движения турбулентный.

*Пример 2:*

Вода при температуре  $t = 12^\circ\text{C}$  подается по трубе диаметром  $d = 4$  см. Расход воды  $Q = 70$  см<sup>3</sup>/с. Определить режим движения жидкости. Какой расход нужно пропускать по трубе, чтобы изменить режим движения?

*Решение:*

Коэффициент кинематической вязкости при температуре  $t = 12^\circ\text{C}$  равен  $\nu = 1,24 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Скорость движения в трубе

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,00007}{0,013} = 0,054 \text{ м/с} ,$$

где  $\omega$  – площадь сечения трубы, м<sup>2</sup>

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,04^2}{4} = 0,0013 \text{ м}^2 .$$

Вычислим число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\nu \cdot d}{\nu} = \frac{0,054 \cdot 0,04}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 1742 .$$

Так как  $\text{Re} < \text{Re}_{kp} = 2320$ , то движение будет ламинарным. Находим скорость, при превышении которой режим перейдет в турбулентный

$$\nu_{kp} = \frac{\text{Re}_{kp} \cdot \nu}{d} = \frac{2320 \cdot 1,24 \cdot 10^{-6}}{0,04} = 0,072 \text{ м/с} .$$

Расход  $Q$  определяем по формуле

$$Q = \omega \cdot \nu_{kp} = 0,0013 \cdot 0,072 = 0,000094 \text{ м}^3/\text{с} = 94 \text{ см}^3/\text{с} .$$

Следовательно, для создания в трубе турбулентного режима необходимо пропускать расход больше  $94 \text{ см}^3/\text{с}$ .

*Пример 3:*

По трубе диаметром  $d_1 = 40$  мм подается вода со скоростью  $\nu_1 = 4,96$  см/с при температуре  $t = 12^\circ \text{C}$ . Труба постепенно суживается до диаметра  $d_2 = 20$  мм. Определить расход воды и режимы движения в широкой и узкой части трубы. Коэффициент кинематической вязкости равен  $\nu = 1,24 \cdot 10^{-6}$ .

*Решение:*

Определяем площадь сечения широкой части трубы  $\omega_1$

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,04^2}{4} = 0,0013 \text{ м}^2 .$$

Определяем число Рейнольдса в широкой части трубы

$$\text{Re}_1 = \frac{\nu_1 \cdot d_1}{\nu} = \frac{0,0496 \cdot 0,04}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 1600 - \text{ламинарный режим} .$$

Определяем расход жидкости в трубе

$$Q = \omega_1 \cdot \nu_1 = 0,0013 \cdot 0,0496 = 0,000064 \text{ м}^3/\text{с} = 64 \text{ см}^3/\text{с} .$$

Находим скорость движения жидкости в узкой части трубы

$$\nu_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,000064}{3,14 \cdot 0,02^2} = 0,204 \text{ м/с} .$$

Определяем число Рейнольдса в узкой части трубы

$$Re_2 = \frac{v_2 \cdot d_2}{\nu} = \frac{0,204 \cdot 0,02}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 3290 - \text{турбулентный режим.}$$

### Задачи

4.61. Определить режим движения жидкости в трубах при следующих условиях:

а) жидкость – газ,  $v = 4 \text{ м/с}$ ,  $d = 15 \text{ мм}$ ,  $\nu = 0,165 \text{ см}^2/\text{с}$ ;

б) жидкость – горячая вода,  $v = 0,1 \text{ м/с}$ ,  $d = 32 \text{ мм}$ ,  $\nu = 0,0037 \text{ см}^2/\text{с}$  при  $t = 80^\circ \text{ С}$ ;

в) жидкость – воздух,  $v = 6 \text{ м/с}$ ,  $d = 200 \text{ мм}$ ,  $\nu = 0,16 \text{ см}^2/\text{с}$ .

4.62. Какой режим движения воды будет при температуре  $t = 15^\circ \text{ С}$ :

а) в круглой напорной трубе диаметром  $d = 250 \text{ мм}$ , если расход  $Q = 12 \text{ л/с}$ ;

б) в открытом прямоугольном лотке, если  $Q = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ , глубина  $h = 0,4 \text{ м}$  и ширина лотка  $b = 0,7 \text{ м}$ ?

4.63. Нефть с кинематическим коэффициентом вязкости  $\nu = 0,3 \text{ см}^2/\text{с}$  движется по трубопроводу. Найти:

а) минимальный диаметр  $d$  трубопровода, при котором нефть будет двигаться при ламинарном режиме с расходом  $Q = 8,14 \text{ л/с}$ ;

б) с каким расходом  $Q$  нефть будет двигаться по трубопроводу диаметром  $d = 150 \text{ мм}$  при числе Рейнольдса  $Re = 5000$ .

4.64. По трубе диаметром  $d = 50 \text{ мм}$  движется вода. Определить:

а) расход  $Q$ , при котором турбулентный режим движения сменится ламинарным, если температура  $t = 15^\circ \text{ С}$ ;

б) режим движения при расходе  $Q = 110 \text{ см}^3/\text{с}$  и температуре  $t = 5^\circ \text{ С}$ ;

в) скорость, при которой происходит смена режимов движения, если  $t = 20^\circ \text{ С}$ .

4.65. Канал трапецеидального сечения имеет следующие размеры: ширина по дну  $b = 3,8$  м, коэффициент заложения откоса  $m = 1,5$ , глубина воды  $h = 1,2$  м. Определить режим движения в канале при пропуске расхода  $Q = 5,2$  м<sup>3</sup>/с. Температура воды  $t = 20^\circ\text{C}$ .

4.66. В трубе  $d = 25$  мм движется вода с расходом  $Q = 0,052$  л/с. Определить: а) изменится ли режим движения воды при возрастании ее температуры от  $5^\circ\text{C}$  до  $20^\circ\text{C}$ ; б) при какой температуре вода будет двигаться с числом Рейнольдса, равным критическому.

4.67. По конической сужающейся трубе движется вода при температуре  $t = 15^\circ\text{C}$  и с постоянным расходом  $Q$ . Определить:

а) сможет ли произойти смена режимов движения воды в трубопроводе, если в начальном сечении режим ламинарный;

б) в сечении, с каким диаметром будет наблюдаться смена режимов движения, если расход  $Q = 207$  см<sup>3</sup>/с.

4.68. Какой режим движения воды будет при температуре  $t = 15^\circ\text{C}$  в круглой напорной трубе диаметром  $d = 25$  мм, если расход равен  $Q = 0,3$  л/с ?

4.69. По напорной трубе диаметром  $d = 40$  мм движется вода, температура которой составляет  $t = 10^\circ\text{C}$ . Определить расход  $Q$  в л/с, при котором наступает смена режима движения.

4.70. Вода движется в прямоугольном лотке шириной  $b = 25$  см при температуре  $t = 10^\circ\text{C}$ . Определить при каком максимальном расходе  $Q$  сохранится ламинарный режим, если глубина потока  $h = 9$  см.

#### 4.1. Виды сопротивлений

Решение многих практических задач гидравлики сводится к установлению зависимости, определяющей изменение скорости и давления по длине потока. Для этого могут быть использованы:

уравнение постоянства расхода и уравнения Бернулли.

Эти уравнения обычно имеют три неизвестных:  $v$ ,  $p$  и  $h_{пот}$ , поэтому для их решения необходимо третье уравнение. В качестве третьего уравнения используют зависимость потерь напора от скорости  $v$  и ряда других факторов.

Потери напора (энергии) потока вызываются сопротивлениями двух видов:

- 1) сопротивлениями по длине, обусловленными силами трения;
- 2) местными сопротивлениями, обусловленными изменениями скорости потока по величине и направлению.

Потери напора по длине трубопровода обычно определяют по формуле Дарси – Вейсбаха

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (49)$$

а местные потери – по формуле Вейсбаха

$$h = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (50)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);  $l$  – длина трубопровода;  $d$  – диаметр трубопровода;  $v$  – средняя скорость потока за местным сопротивлением;  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициенты  $\lambda$  и  $\zeta$  безразмерны. Экспериментальные исследования показали, что эти коэффициенты зависят от многих факторов, в частности, от режима движения и шероховатости стенок.

При ламинарном режиме движения жидкости закон распределения скоростей по живому сечению является параболическим. При этом коэффициент гидравлического трения при ламинарном режиме движения жидкости зависит от числа Рейнольдса и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} . \quad (51)$$

При турбулентном режиме движения жидкости закон распределения скоростей по живому сечению потока является логарифмическим. Коэффициент гидравлического трения зависит как от числа Рейнольдса, так и от относительной шероховатости. При турбулентном режиме выделяют три области сопротивления:

– область гидравлически гладких труб ( $\lambda = f(\text{Re})$ ). Коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} . \quad (51)$$

– переходная область сопротивления ( $\lambda = f\left(\text{Re}; \frac{\Delta}{d}\right)$ ). Коэффициент гидравлического трения определяется по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} . \quad (52)$$

– область гидравлически шероховатых труб ( $\lambda = f\left(\frac{\Delta}{d}\right)$ ). Коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Б.Л. Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} . \quad (53)$$

*Пример 1:*

Определить потери напора при подаче воды со скоростью  $v = 14$  см/с через трубку диаметром  $d = 4$  см и длиной  $l = 20$  м при температуре воды  $t = 10$  °С. Коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

*Решение:*

Определяем число Рейнольдса по формуле (46):

$$\text{Re} = \frac{0,14 \cdot 0,04}{1,31 \cdot 10^{-6}} = 4275$$

Режим турбулентный, область гидравлически гладких труб.  
Коэффициент гидравлического трения определяем по формуле (51):

$$\lambda = \frac{0,3164}{4275^{0,25}} = 0,039 \text{ .}$$

Определяем по формуле (49) потери напора по длине:

$$h_l = 0,039 \cdot \frac{20}{0,04} \cdot \frac{0,14^2}{2 \cdot 9,81} = 0,019 \text{ м.}$$

*Пример 2:*

Определить потери напора при подаче воды со скоростью  $v = 13,1$  см/с, при температуре  $t = 10^\circ\text{C}$  по трубопроводу диаметром  $d = 200$  мм, длиной  $l = 1500$  м. Трубы стальные новые. Коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

*Решение:*

Определяем число Рейнольдса по формуле (46):

$$\text{Re} = \frac{0,131 \cdot 0,2}{1,31 \cdot 10^{-6}} = 20000$$

Режим турбулентный, область гидравлически гладких труб.  
Коэффициент гидравлического трения определяем по формуле (51):

$$\lambda = \frac{0,3164}{20000^{0,25}} = 0,027 \text{ .}$$

Определяем по формуле (49) потери напора по длине:

$$h_l = 0,027 \cdot \frac{1500}{0,2} \cdot \frac{0,131^2}{2 \cdot 9,81} = 0,18 \text{ м.}$$

*Пример 3:*

Определить потери напора в водопроводе длиной  $l = 500$  м при подаче  $Q = 100$  л/с, если трубы чугунные, бывшие в эксплуатации с  $d = 250$  мм и  $\Delta = 1,35$  мм. Температура воды  $t = 20^\circ\text{C}$ . Коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

*Решение:*

Определяем скорость течения жидкости в водопроводной трубе по формуле:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 0,25^2} = 2,04 \text{ м/с} .$$

Определяем число Рейнольдса по формуле (46):

$$\text{Re} = \frac{2,04 \cdot 0,25}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 504950$$

Режим турбулентный, переходная область сопротивления.  
Коэффициент гидравлического трения определяем по формуле (52):

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{0,00135}{0,25} + \frac{68}{504950} \right)^{0,25} = 0,03 .$$

Определяем по формуле (49) потери напора по длине:

$$h_l = 0,03 \cdot \frac{500}{0,25} \cdot \frac{2,04^2}{2 \cdot 9,81} = 12,72 \text{ м} .$$

### Задачи

4.71. Определить потери напора по длине в стальном нефтепроводе длиной  $l = 1000$  м при расходе нефти  $Q = 180$  м<sup>3</sup>/час, если кинематический коэффициент вязкости нефти  $\nu = 0,8$  см<sup>2</sup>/с, диаметр трубопровода  $d = 200$  мм.

4.72. Как изменятся потери напора по длине в трубопроводе диаметром  $d = 50$  мм и длиной  $l = 500$  м при изменении расхода воды от  $Q = 0,02$  л/с до  $Q = 2$  л/с. Трубы новые стальные.

4.73. Определить потери напора при внезапном расширении стальной трубы диаметром до расширения  $d_1 = 50$  мм при расходе  $Q = 7$  л/с и диаметром после расширения  $d_2 = 100$  мм.

4.74. Определить потери напора по длине водопровода диаметром  $d = 15$  см, длиной  $l = 10$  км при расходе воды  $Q = 35$  л/с.

4.75. По стальному трубопроводу диаметром  $d = 200$  мм и длиной  $l = 3000$  м перекачивается нефть в количестве  $Q = 90$  т/час. Плотность нефти  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>. Температура нефти  $t = 15$  °С. Определить потери напора по длине трубопровода.

4.76. При каком предельном расходе в стальном трубопроводе диаметром  $d = 150$  мм и длиной  $l = 1000$  м потери напора не превысят величины  $h_l = 20$  м.

4.77. Определить скорость движения жидкости в железобетонном трубопроводе диаметром  $d = 600$  мм, длиной  $l = 2$  км, если потери напора по длине  $h_l = 5$  м.

4.78. Определить потери напора в водопроводе длиной  $l = 1$  км при подаче  $Q = 40$  л/с, если трубы стальные, бывшие в эксплуатации с  $d = 300$  мм и  $\Delta = 0,8$  мм. Температура воды  $t = 10$  °С. Коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

4.79. В канале трапецеидального сечения с шириной по дну  $b = 8,5$  м глубина воды при равномерном движении  $h = 1,7$  м. Расход  $Q = 15$  м<sup>3</sup>/с. Определить потери напора на участке длиной  $l = 1$  км. При расчетах принять коэффициент заложения откоса  $m = 1$ . Температура воды  $t = 10$  °С. Коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (потери напора определять по формуле Агроскина).

4.80. Определить потери напора и скорость движения при подаче воды расходом  $Q = 0,0136$  м<sup>3</sup>/с через трубу диаметром  $d = 200$  мм и длиной  $l = 2000$  м при температуре воды  $t = 10$  °С. Коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

### ***Контрольные вопросы***

1. Назовите два режима движения жидкости. Чем они отличаются?
2. Что такое критическое число Рейнольдса и чему оно равно?
3. Что представляет собой число Рейнольдса с физической точки зрения?

4. По каким зависимостям определяются местные потери напора и потери напора по длине?

5. Назовите законы распределения скоростей по живому сечению потока при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости.

6. От чего зависит коэффициент гидравлического трения при ламинарном режиме движения жидкости?

7. Объясните смысл полуэмпирической теории турбулентности Прандтля.

8. От чего зависит коэффициент гидравлического трения при турбулентном режиме движения жидкости?

9. Какие три области сопротивления существуют в зоне турбулентного режима?

### **Рекомендуемая литература**

1. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.

2. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.И. Калицун [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1980. – 359 с.

3. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев; Ленинградский политехн. ин-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1971. – 552 с.

## 5. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

### 5.1. Основные задачи расчета трубопроводов

Для перемещения жидкостей и газов применяют трубопроводы, изготовленные из разных материалов. Трубопроводы бывают напорные и безнапорные, короткие, длинные, простые, сложные.

Пропускная способность напорных трубопроводов зависит от потерь напора по длине и в местных сопротивлениях.

Трубопроводы малой длины и с большим числом местных сопротивлений, потери напора в которых превышают 10 % потерь напора по длине, называют короткими.

Длинные – трубопроводы большой протяженности, в которых потери напора на преодоление местных сопротивлений составляют менее 10 % от потерь напора по длине.

Трубопроводы из труб одного или нескольких диаметров без ответвлений и без раздачи расхода по пути движения жидкости называют простыми.

Трубопроводы из сети труб различного диаметра с магистральными линиями и с ответвлениями называют сложными.

При гидравлическом расчете трубопроводов различают две основные задачи.

*1. Прямая задача.* Можно рассмотреть два варианта:

а) Когда заданы геометрическая форма и размеры трубопровода: длина  $l$ , диаметр  $d$ , уклон  $i$ , шероховатость  $n$  и расход жидкости в трубопроводе  $Q$ . Требуется определить необходимый напор  $H$  для пропускания известного расхода.

б) Когда заданы геометрическая форма и размеры трубопровода: длина  $l$ , диаметр  $d$ , уклон  $i$ , шероховатость  $n$  и напор в трубопроводе  $H$ . Требуется определить пропускную способность труб  $Q$ .

2. *Обратная задача.* Заданы расход  $Q$  и напор  $H$ , а также геометрическая форма и размеры трубопровода. Необходимо определить сечение трубопровода  $d$ .

Таким образом, можно выделить три задачи при расчете трубопроводов: *задача 1а, задача 1б и задача 2.* Любая задача должна начинаться с построения напорной линии.

## 5.2. Расчет коротких трубопроводов

В качестве примера рассмотрим трубопровод (рис. 61), состоящий из двух участков разного диаметра при истечении жидкости в атмосферу. Для этого построим напорную линию  $E-E$ .

Необходимый напор для пропуска расхода определяется по формуле  $H = h_f + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$ , где  $h_f$  – суммарные потери напора в трубопроводе. Суммарные потери напора в трубопроводе определяются по формуле  $h_f = h_{ex} + h_{l_1} + h_{pc} + h_{l_2}$ , где  $h_{ex} = \zeta_{ex} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g}$  – потери напора на входе в трубопровод;  $h_{l_1} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g}$  – потери напора по длине на первом участке трубопровода;  $h_{pc} = \zeta_{pc} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$  – потеря напора на резкое сжатие;  $h_{l_2} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$  – потери напора по длине на втором участке трубопровода.

Выразим скорость на первом участке  $v_1$  через скорость на втором участке  $v_2$  из уравнения неразрывности  $v_1 = v_2 \cdot \frac{d_2^2}{d_1^2}$ . Тогда необходимый напор для пропуска расхода определим по формуле:

$$H = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left( \zeta \cdot \frac{d_2^4}{d_1^4} + \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{d_2^4}{d_1^4} + \zeta_{pc} + \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} + 1 \right). \quad (54)$$

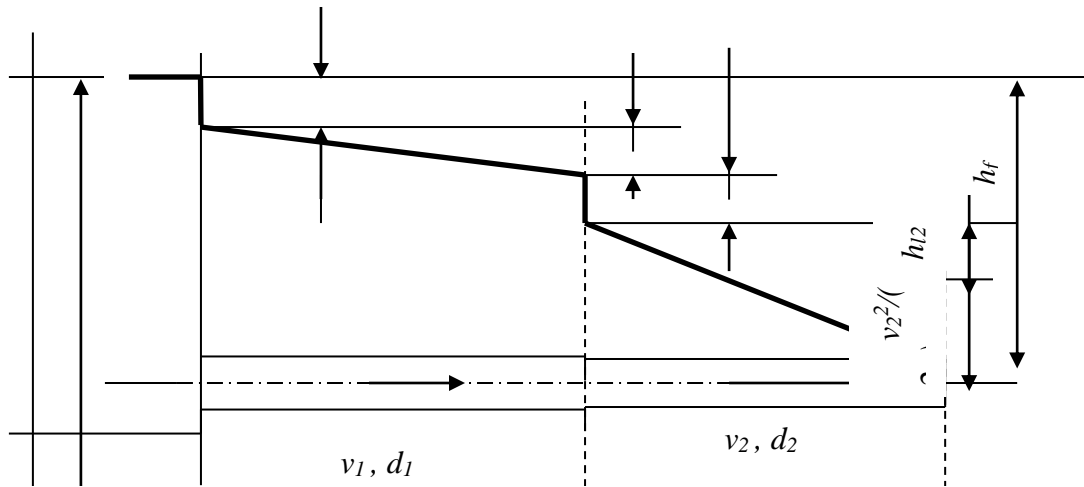


Рис. 61. Схема к расчету короткого трубопровода

По уравнению (54) решается задача 1а. Чтобы решить задачу 1б, обозначим выражение в скобках в уравнении (54) как  $(1 + \zeta_f)$ , тогда для расхода окончательно будем иметь:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_f}} \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (55)$$

где  $\frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_f}} = \mu_T$  – коэффициент расхода трубопровода.

Обратную задачу 2 решают графически. Задавая произвольно значение искомого диаметра и принимая расход, равным заданному, сводят задачу к задаче 1а и строят зависимость  $H = f(d_2)$ . По заданному значению  $H_{зад}$  определяем искомый диаметр  $d_{иск}$  и округляем его до ближайшего стандартного значения в большую или меньшую сторону в зависимости от цели поставленной задачи.

### 5.3. Расчет длинных трубопроводов

При расчете длинного трубопровода местными потерями пренебрегают.

При этом формулу Дарси-Вейсбаха (49) переписывают в виде

$$J = \frac{h_l}{l} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g} \cdot \left( \frac{4}{\pi \cdot d^2} \right)^2 = \frac{Q^2}{K^2}, \quad (56)$$

Где  $K = \left( \frac{\pi^2 \cdot g \cdot d^5}{8 \cdot \lambda} \right)^{0.5}$  – *модуль расхода*, или расход при уклоне, равном единице.

Так как технология изготовления и монтажа водопроводных труб в значительной мере стандартизирована, то можно считать, что абсолютная шероховатость этих труб колеблется в небольших пределах и модуль расхода  $K$  зависит только от диаметра трубы. В гидравлических справочниках приводятся значения модулей расхода новых и неновых (корродированных) труб в зависимости от диаметра и материала. Расчет водопроводных систем выполняют, используя значения модуля расхода  $K$  для *неновых труб*.

Формулу (56) можно переписать в виде

$$Q = K \cdot \sqrt{\frac{h_l}{l}}, \quad (57)$$

или

$$K = Q \cdot \sqrt{\frac{l}{h_l}}, \quad (58)$$

или

$$h_l = \frac{l \cdot Q^2}{K^2}. \quad (59)$$

По формуле (57) решается *задача 1б*, по формуле (58) – *задача 2*, а по формуле (54) – *задача 1а*.

При расчете длинных трубопроводов часто встречаются случаи с параллельным и последовательным соединениями труб различного диаметра.

### Последовательное соединение трубопроводов.

Последовательным называют соединение в одну нитку трубопроводов разных диаметров. При этом расход на участках остается неизменным

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q, \quad (57)$$

Таким образом, систему с последовательным соединением трубопроводов разного диаметра можно рассматривать как один простой трубопровод, в котором сумма потерь на каждом участке равна потере напора во всем трубопроводе

$$h_f = h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3}, \quad (58)$$

или

$$h_f = \frac{l_1 \cdot Q^2}{K_1^2} + \frac{l_2 \cdot Q^2}{K_2^2} + \frac{l_3 \cdot Q^2}{K_3^2}. \quad (59)$$

*Параллельное соединение труб* (рис. 62). Между точками *A* и *B* трубы 1 и 2 соединены параллельно. Если в этих точках измерить пьезометрический напор, то он, конечно, будет одинаков для обеих труб, следовательно, потери напора в них одинаковы:

$$h_f = h_{l1} = h_{l2}. \quad (60)$$

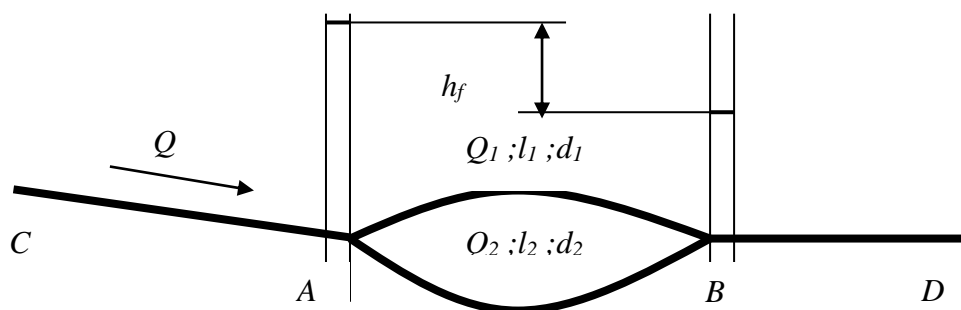


Рис. 62. Параллельное соединение труб

В то же время очевидно, что сумма расходов в параллельно соединенных трубах будет равна расходу  $Q$  в трубах  $CA$  или  $BD$ :

$$Q_1 + Q_2 = Q. \quad (61)$$

При близко расположенных отводах воды из трубопровода (например, при подводе воды к домам, расположенным близко друг к другу) расход воды по длине трубы уменьшается. При этом полагают, что раздача воды происходит непрерывно и равномерно с удельным расходом  $q_p$  (рис. 63). Если на участке длиной  $l$  раздается суммарный расход  $Q_p = q_p \cdot l$ , а проходит дальше этого участка транзитный расход  $Q_T$ , то потери напора на этом участке равны:

$$h_l = l \cdot \frac{(Q_T + 0,55 \cdot Q_p)^2}{K^2}; \quad (62)$$

при  $Q_T=0$ :

$$h_l = l \cdot \frac{Q_p^2}{3 \cdot K^2}. \quad (63)$$

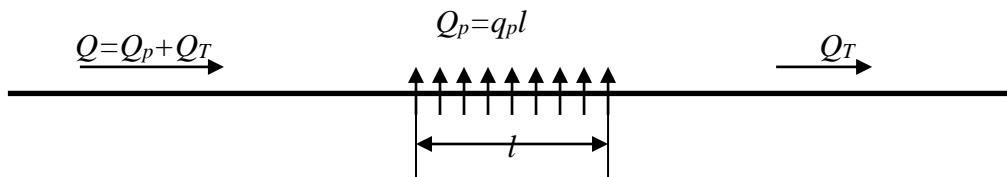


Рис. 63. Непрерывная раздача расхода по длине

#### 5.4. Гидравлический удар в трубах

В напорном трубопроводе при внезапном изменении скорости движения жидкости (мгновенная остановка движения или появление движения) возникает гидравлический удар, сопровождающийся повышением или понижением давления. Например, при мгновенной остановке движения жидкости, когда кинетическая энергия переходит в работу сил давления, т.е. жидкость становится сжатой, возникает удар непосредственно у крана на трубопроводе. Ударная волна распространяется по жидкости с постепенным затуханием колебаний.

Теоретическое обоснование явления гидравлического удара в

трубах и методика его расчета были разработаны Н.Е. Жуковским еще в 1898 г.

Передача сжатых частиц жидкости от одного сечения к другому происходит со скоростью ударной волны  $c$ , которая по Н.Е. Жуковскому, определяется по формуле:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{d \cdot E_0}{\delta \cdot E_{cm}}}}, \quad (64)$$

где  $E_0$  и  $E_{cm}$  – соответственно модули упругости жидкости и материала стенок трубопровода (для стали  $E_{cm} = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; для чугуна  $E_{cm} = 1,2 \cdot 10^5$  МПа; для полиэтилена  $E_{cm} = 4000$  МПа);  $d$  – диаметр трубопровода;  $\delta$  – толщина стенок трубопровода.

Выражение  $\frac{E_0}{\rho}$  в формуле (64) есть скорость распространения упругих деформаций в жидкости и для воды составляет  $1425$  м/с.

Так, при мгновенном закрытии задвижки на трубопроводе, повышение давления жидкости перед ней определяется по формуле Жуковского

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_0 + \rho \cdot v_0^2, \quad (65)$$

где  $\Delta p$  – изменение давления перед задвижкой;  $\rho$  – плотность жидкости;  $v_0$  – средняя скорость движения жидкости перед закрытием задвижки;  $c$  – скорость распространения ударной волны, или скорость распространения звука в данной среде.

Поскольку  $c \gg v_0$ , а, следовательно, и  $\rho \cdot c \cdot v_0 \gg \rho \cdot v_0^2$ , то выражение (65) принимает окончательный вид

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_0. \quad (66)$$

При мгновенном закрытии задвижки перед ней резко повышается давление на величину, определенную по формуле (66). Это давление начинает распространяться влево от

завдвижки со скоростью распространения ударной волны  $c$ . Когда ударная волна дойдет до конца трубопровода, сжатая до этого жидкость в трубопроводе начинает обратное движение с той же скоростью  $c$ .

На самом деле, в случае реальной жидкости, процесс изменения давления носит затухающий характер.

Различают *прямой* и *непрямой* гидравлический удар.

*Прямой гидравлический удар* будет наблюдаться в том случае, если время закрытия задвижки  $T \leq 2 \cdot t_0 = 2 \cdot \frac{l}{c}$ , где  $t_0 = \frac{l}{c}$  – время распространения ударной волны в одном направлении.

При этом, изменение давления перед запорной арматурой определяется зависимостью (66).

Если время закрытия задвижки  $T > 2 \cdot t_0 = 2 \cdot \frac{l}{c}$ , то в этом случае будет иметь место *непрямой гидравлический удар*.

Формула изменения давления при непрямом гидравлическом ударе имеет вид:

$$\Delta p = \rho \cdot v_0 \cdot 2 \cdot \frac{l}{T} . \quad (67)$$

*Пример 1:*

Определить расход и скорость в трубопроводе, имеющем диаметр  $d = 250$  мм и длину  $l = 180$  м, если в напорном баке отметка горизонта воды  $H_1 = 12$  м, в конечном пункте отметка пьезометрической линии  $H_2 = 7$  м, трубы загрязненные, коэффициент шероховатости  $n = 0,015$ .

*Решение:*

Определяем площадь живого сечения по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 0,049 \text{ м}^2 .$$

Определяем гидравлический радиус круглого сечения

$$R = \frac{d}{4} = \frac{0,25}{4} = 0,0625 \text{ м} .$$

По формуле Маннинга определяем коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6} = \frac{1}{0,015} \cdot 0,0625^{1/6} = 47,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с} .$$

Находим гидравлический уклон

$$i = \frac{H}{l} = \frac{12-7}{180} = 0,027 .$$

Определяем расход жидкости по формуле

$$Q = 0,049 \cdot 47,3 \cdot \sqrt{0,0625 \cdot 0,027} = 0,095 \text{ м}^3/\text{с} .$$

Скорость в трубопроводе определяем по формуле (34)

$$v = \frac{0,095}{0,049} = 1,94 \text{ м/с} .$$

*Пример 2:*

Определить повышение давления  $\Delta p_{\max}$  при мгновенном закрытии задвижки на стальном трубопроводе, имеющем диаметр  $d = 400$  мм,  $\delta = 7$  мм, при начальной скорости движения воды  $v_0 = 1,85$  м/с, длине трубопровода  $l = 1130$  м от задвижки до резервуара. Время закрытия задвижки  $T_{\text{зак}} = 3$  с. Модуль упругости воды  $E_0 = 2 \cdot 10^9$  Па, модуль упругости материала стенок трубопровода  $E_{\text{ст}} = 2,1 \cdot 10^5$  МПа. Плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

*Решение:*

Определяем по формуле (64) скорость распространения ударной волны  $c$ :

$$c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{0,4 \cdot 2 \cdot 10^9}{0,007 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}}}} = 1149 \text{ м/с} .$$

Определяем время распространения ударной волны в двух направлениях

$$t_0 = \frac{l}{c} = \frac{1130}{1149} = 0,98 \text{ с} .$$

тогда  $T_{\text{зак}} \geq 2 \cdot t_0 = 2 \cdot 0,98 = 1,96 \text{ с}$  – удар непрямой.

Определяем повышение давления при мгновенном закрытии задвижки по формуле (67):

$$\Delta p_{\text{макс}} = 1000 \cdot 1,85 \cdot 2 \cdot \frac{1130}{3} = 1393666 \text{ Па}.$$

### Задачи

5.81. По трубопроводу диаметром  $d = 100 \text{ мм}$  и длиной  $l = 3 \text{ м}$  движется масло (рис. 64). Чему равен напор  $H$ , при котором происходит смена ламинарного режима в турбулентный? Местные потери напора не учитывать. Температура жидкости  $t = 20^\circ \text{C}$ . При решении задачи воспользоваться формулой для потерь на трения при ламинарном режиме (формула Пуазейля).

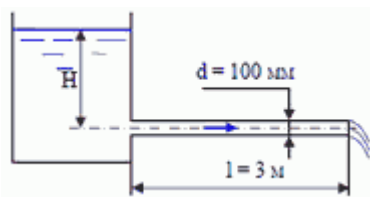


Рис. 64. К задаче 5.81

5.82. Расход воды при температуре  $t = 10^\circ \text{C}$  (кинематическая вязкость воды  $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) в горизонтальной трубе кольцевого сечения, состоящей из двух концентрических оцинкованных стальных труб (при  $\Delta = 0,15 \text{ мм}$ ),  $Q = 0,0075 \text{ м}^3/\text{с}$ . Внутренняя труба (рис. 65) имеет наружный диаметр  $d = 0,075 \text{ м}$ , а наружная труба имеет внутренний диаметр  $D = 0,1 \text{ м}$ . Найти потери напора на трение на длине трубы  $l = 300 \text{ м}$ .

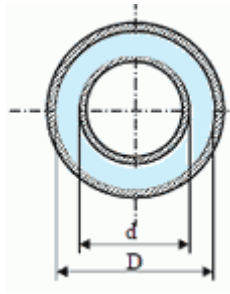


Рис. 65. К задаче 5.82

5.83. Из одного резервуара в другой поступает вода по сифонному трубопроводу (рис. 66) диаметром  $d = 50$  мм, длиной  $l = 10$  м. Разность уровней воды в резервуарах  $H = 1,2$  м. Превышение наивысшей точки сифона над уровнем воды в первом резервуаре  $h = 1$  м. Определить расход воды в сифоне и абсолютное давление в наивысшей точке сифона, если длина от начала сифона до этой точки  $l_1 = 4$  м. Коэффициент Дарси принять равным  $\lambda = 0,03$ , коэффициент потерь на плавном повороте  $\zeta = 0,45$ .

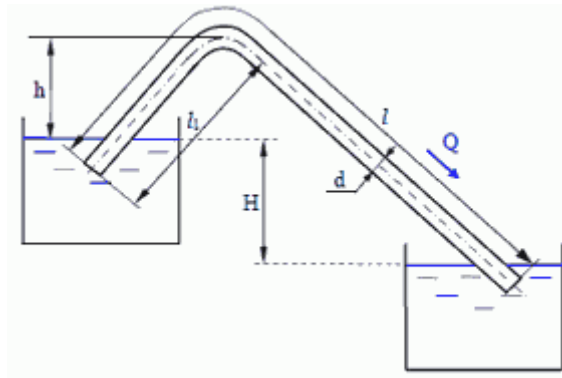


Рис. 66. К задаче 5.83

5.84. Для подачи воды в количестве  $Q = 0,031$  м<sup>3</sup>/с на расстоянии  $l = 400$  м под напором  $H = 9$  м по чугунным трубам (рис. 67) диаметрами  $d_1 = 150$  мм и  $d_2 = 200$  мм. Определить необходимые длины участков трубопроводов  $l_1$  и  $l_2$ , принимая шероховатость труб  $\Delta = 1,2$  мм.

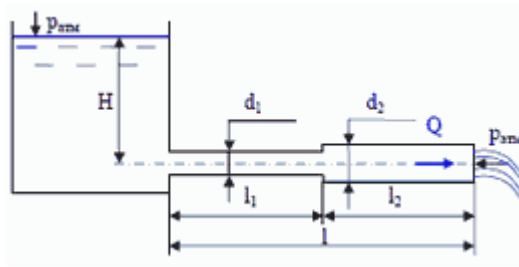


Рис. 67. К задаче 5.84

5.85. Вода перетекает из бака А в резервуар Б (рис. 68) по трубе диаметром  $d = 25$  мм, длиной  $l = 10$  м. Определить расход воды  $Q$ , если избыточное давление в баке  $p_1 = 200$  кПа; высоты уровней  $H_1 = 1$  м;  $H_2 = 5$  м. Режим течения считать турбулентным. Коэффициенты сопротивления принять: на входе в трубу  $\zeta_1 = 0,5$ ; в вентиле  $\zeta_2 = 4$ ; в коленах  $\zeta_3 = 0,2$ ; на трение  $\lambda = 0,025$ .

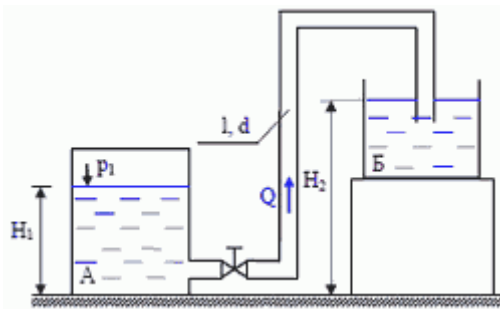


Рис. 68. К задаче 5.85

5.86. Из напорного бака (рис. 69) вода течет по трубе диаметром  $d_1 = 20$  мм и затем вытекает в атмосферу через насадок (брандспойт) с диаметром выходного отверстия  $d_2 = 10$  мм. Избыточное давление воздуха в баке  $p_0 = 0,18$  МПа; высота  $H = 1,6$  м. Пренебрегая потерями энергии, определить скорости течения воды в трубе  $v_1$  и на выходе из насадка  $v_2$ .

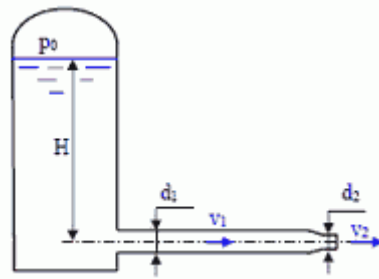


Рис. 69. К задаче 5.86

5.87. Определить расход и скорость, с которой данная жидкость перетекает из одного бака (рис. 70) в другой через соединительную трубу, диаметр  $d = 35$  мм и длина  $L = 11$  м которой заданы. Уровни в баках  $H_D = 3,3$  м и  $H_{II} = 2,7$  м. Поддерживается постоянными, избыточное давление на свободной поверхности жидкости показывается манометрами  $p_D = 0,58$  атм и  $p_{II} = 0,4$  атм. По результатам расчета построить пьезометрическую и напорную линии.

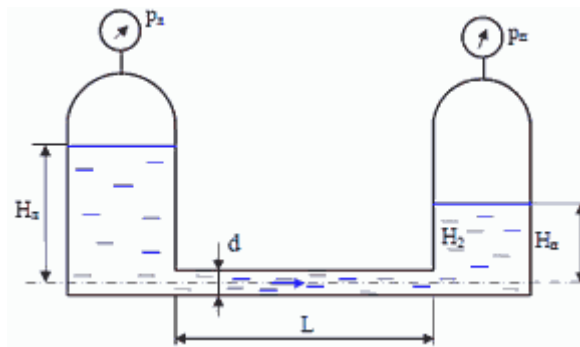


Рис. 70. К задаче 5.87

5.88. Определить расход воды вытекающей из бака (рис.71), в котором поддерживается уровень ее  $H = 10$  м и давления на свободной поверхности  $h_{\text{вак}} = 150$  мм.рт.ст. Геометрические размеры трубопровода:  $l_1 = 10$  м;  $d_1 = 40$  мм;  $l_2 = 25$  м;  $d = 60$  мм. Эквивалентную шероховатость на соответствующем участке принять равной  $\Delta_1 = 0,1$  мм,  $\Delta_2 = 0,2$  мм. Коэффициент сопротивления крана  $\zeta_k = 5$ . Кинематический коэффициент вязкости воды  $\nu = 1,16 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

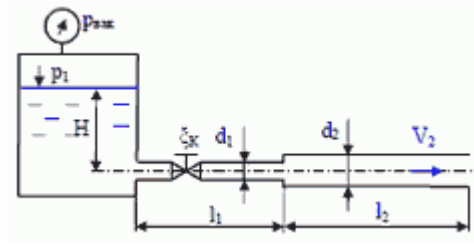


Рис. 71. К задаче 5.88

5.89. Из открытого резервуара А (рис. 72), в котором поддерживается постоянный уровень жидкости, по трубопроводу, состоящему из двух последовательно соединенных труб, жидкость течет в резервуар Б. Разность уровней жидкости в резервуарах равна  $H = 6,3$  м. Длина труб  $l_1 = 13$  м и  $l_2 = 10$  м, а их диаметры  $d_1 = 0,04$  м и  $d_2 = 0,032$  м. Определить расход  $Q$  жидкости, протекающей по трубопроводу. В расчетах принять, что потери напора на местные сопротивления составляют 15 % от потерь напора по длине. Коэффициент гидравлического трения обеих труб принять  $\lambda = 0,03$ .

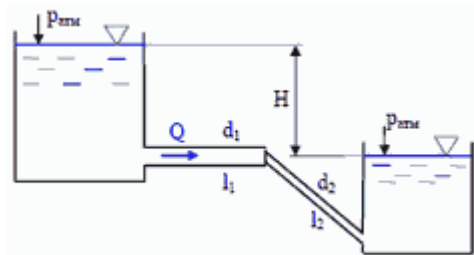


Рис. 72. К задаче 5.89

5.90. Из открытого резервуара (рис. 73), в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному трубопроводу (эквивалентная шероховатость  $\Delta = 0,1$  мм), состоящему из труб различных диаметров  $d_1 = 32$  мм,  $d_2 = 50$  мм,  $d_3 = 32$  мм и различной длинны  $L_1 = 5$  м,  $L_2 = 8$  м,  $L_3 = 3$  м, вытекает в атмосферу вода, расход которой  $Q = 1$  л/с и температура  $t = 20$  °С. Определить скорости движения воды и потери напора (по длине и местные) на каждом участке трубопровода и установить величину напора  $H$  в резервуаре.

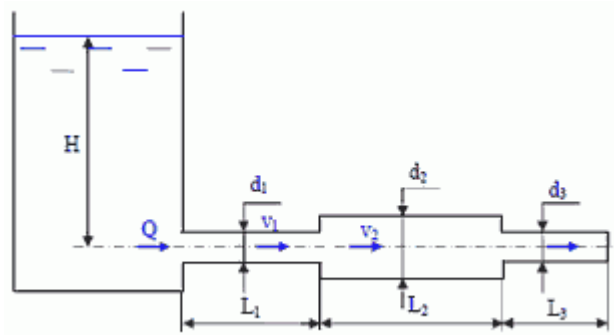


Рис. 73. К задаче 5.90

### **Контрольные вопросы**

1. Какие трубопроводы называют длинными, короткими, простыми и сложными?
2. Задачи расчета трубопроводов.
3. Что такое модуль расхода?
4. Чему равны расходы и потери напора при последовательном соединении труб?
5. Чему равны расходы и потери напора при параллельном соединении труб?
6. Особенности расчета трубопроводов с близко расположенными отводами воды.
7. Что такое гидравлический удар?
8. Прямой и непрямой гидравлические удары.

### **Рекомендуемая литература**

1. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
2. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.И. Калицун [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. –

Москва: Стройиздат, 1980. – 359 с.

3. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев; Ленинградский политехн. ин-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1971. – 552 с.

## 6. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

### 6.1. Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре

Рассмотрим случай истечения жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре.

Отверстие считают *малым*, если его размер по высоте значительно меньше напора – не более  $0,1 \cdot H$ . *Тонкой стенкой* считают такую, у которой отверстие имеет заостренную кромку, при этом струя, вытекающая из отверстия, преодолевает лишь местные сопротивления.

При вытекании жидкости из отверстия на некотором расстоянии от него наблюдается сжатие поперечного сечения струи. Отношение площади сжатого сечения  $\omega_c$  к площади отверстия  $\omega$  называется коэффициентом сжатия струи:

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega} . \quad (68)$$

Сжатие бывает *полным*, если струя получает сжатие по всему периметру отверстия, и *неполным*, если струя не имеет бокового сжатия с одной или нескольких сторон, например, когда струя примыкает к стенке или ко дну резервуара.

Полное сжатие будет *совершенным*, если отверстие расположено на значительном расстоянии от боковых стенок и дна сосуда, так что они не оказывают влияния на сжатие струи (когда это расстояние  $m > 3a$ , где  $a$  – минимальное расстояние от стенок или дна до края отверстия), и *несовершенным*, если на него оказывают влияние стенки или дно сосуда ( $m < 3a$ ).

При истечении жидкости из отверстия задача сводится к определению скорости и расхода истечения жидкости.

Составим уравнение Бернулли для сечений *I-I* и *C-C*. За плоскость сравнения примем плоскость *n-n*, проходящую через центры отверстия и сжатого сечения (рис. 74):

$$H + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_c^2}{2g} + h_{ном}. \quad (69)$$

Потери напора в этом случае вызываются местным сопротивлением входа в отверстие  $h_{ном} = \zeta_{ex} \frac{v_c^2}{2g}$ . Тогда:

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{ex}}} \sqrt{2g \left( H + \frac{v_0^2}{2g} \right)}. \quad (70)$$

Принимая обозначения:  $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{ex}}}$ , где  $\varphi$  - коэффициент

скорости (для полного совершенного сжатия  $\varphi = 0,97$ );  $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$ , где

$H_0$  – напор с учетом скорости подхода (при  $v_0 \rightarrow 0$ ,  $H_0 = H$ ), перепишем (72) в виде

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH_0}. \quad (71)$$

Так как расход  $Q$  равен  $Q = \omega_c v_c$ , а  $\omega_c = \omega \varepsilon$ , тогда:

$$Q = \varepsilon \varphi \omega \sqrt{2gH_0}. \quad (72)$$

Введем понятие *коэффициента расхода отверстия*

$$\mu = \varepsilon \varphi, \quad (73)$$

тогда окончательно (74) примет вид

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (74)$$

При полном совершенном сжатии коэффициент  $\mu$  колеблется в пределах  $0,59 \dots 0,63$ , составляя в среднем  $\mu = 0,62$ . В общем случае коэффициент расхода является функцией числа Рейнольдса.

## 6.2. Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при переменном напоре

Выделим здесь два случая.

1. Опорожнение резервуара с жидкостью.

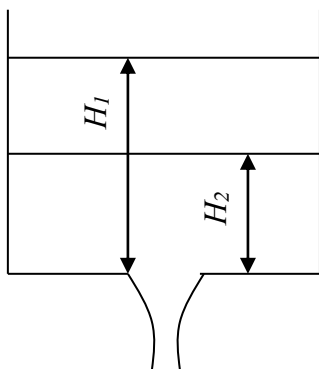


Рис. 74. Опорожнение резервуара с жидкостью

2. Выравнивание уровней в сообщающихся сосудах.

Рассмотрим *опорожнение резервуара с жидкостью через малое отверстие в тонкой стенке* (рис. 74).

Введем обозначения:  $\Omega$  - площадь горизонтального сечения резервуара;  $H_1$  - начальный напор;  $H_2$  - конечный напор.

Расход жидкости  $Q$  при истечении жидкости из отверстия определяется по формуле (74), с другой стороны, расход есть изменение объема в течении времени ( $Q = \frac{dW}{dT}$ ).

Таким образом,  $\mu\omega\sqrt{2gH} = \frac{dW}{dT}$ . Проинтегрировав данное выражение, получим время  $t$ , за которое уровень в резервуаре опустится с глубины  $H_1$  до  $H_2$ :

$$t = 2\Omega \frac{\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}}{\mu\omega\sqrt{2g}}. \quad (75)$$

При  $H_2=0$  (полное опорожнение резервуара), умножим числитель и знаменатель выражения (75) на  $\sqrt{H_1}$ , получим:

$$t = \frac{2\Omega H_1}{\mu\omega\sqrt{2gH_1}} = 2 \frac{W}{Q}, \quad (76)$$

где  $W$  - начальный объем жидкости в резервуаре;  $Q$  - начальный расход.

Выражение (76) свидетельствует о том, что время полного опорожнения резервуара в 2 раза больше времени, необходимого для

вытекания того же количества жидкости при постоянном напоре, равном  $H_1$ .

Рассмотрим *выравнивание уровней в сообщающихся сосудах через малое отверстие в тонкой стенке*.

Введем обозначения:  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  – соответственно площади горизонтального сечения левого и правого резервуаров;  $H_1$  – напор в левом резервуаре;  $H_2$  – напор в правом резервуаре;  $H$  – разность уровней в резервуарах.

Рассуждая аналогично случаю опорожнения резервуара с жидкостью, для времени  $t$  выравнивания уровней в сообщающихся сосудах через малое отверстие в тонкой стенке будем иметь:

$$t = \frac{2\Omega_1\Omega_2\sqrt{H}}{\mu\omega\sqrt{2g}(\Omega_1 + \Omega_2)}. \quad (77)$$

### 6.3. Истечение жидкости через насадки

*Насадком* (рис. 75) называют короткую трубу (весьма короткий трубопровод, в котором не учитываются потери напора по длине), присоединенную к малому отверстию.

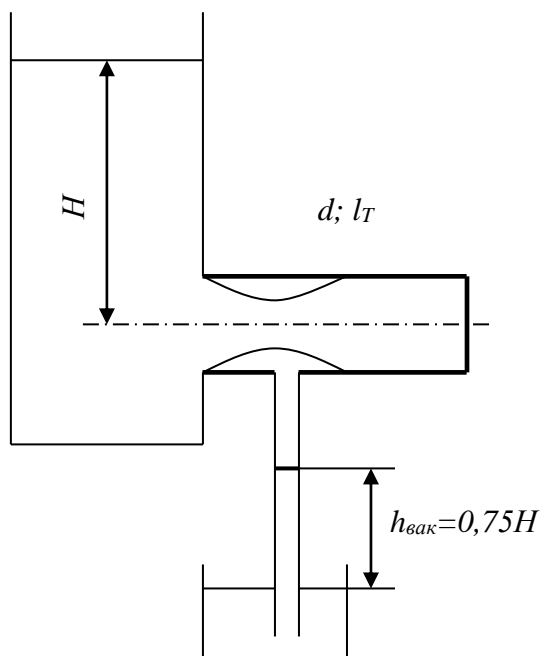


Рис. 75. Истечение жидкости через насадок

Насадок имеет длину  $l_T=(3...5)d$ . При большей длине возникает необходимость учитывать потери напора по длине. В этом случае насадок становится коротким трубопроводом. При меньшей длине, вытекающая из насадка жидкость может не задевать его стенки, и насадок будет работать как отверстие.

По форме насадок может быть цилиндрическим внешним и внутренним, коническим

сходящимся и расходящимся, коноидальным.

Расход через насадок определяется по формуле (74), так же как и для отверстия. Отличие от отверстия состоит только в коэффициентах  $\mu$ ,  $\varepsilon$  и  $\varphi$ .

*Внешний цилиндрический насадок.* После входа в насадок струя жидкости образует сжатое сечение, а из насадка вытекает полным сечением, поэтому  $\varepsilon = 1$  (так же и для других насадков). Коэффициент скорости насадка равен коэффициенту расхода  $\mu = \varphi = 0,82$ , т.е. расход через внешний цилиндрический насадок в 1,32 раза больше, чем через отверстие при прочих равных условиях. Это объясняется наличием вакуума в сжатом сечении, который создает дополнительный подсос

жидкости. Если к отверстию насадка, расположенном в сжатом сечении, присоединить жидкостный вакуумметр, то жидкость в нем поднимется на высоту  $h_{\text{вак}}=0,75H$  (рис. 75).

*Внутренний цилиндрический насадок.* Этот насадок имеет большее сопротивление на входе, чем внешний, поэтому его коэффициент расхода равен  $\mu=0,707$ .

*Конический сходящийся насадок.* Коэффициент расхода этого насадка зависит от угла конусности  $\theta$ . При этом наибольший коэффициент расхода  $\mu_{\text{max}}=0,94$  получается при угле конусности  $\theta=13^{\circ}24'$ . Такие насадки дают струю с наибольшими скоростями и применяются в пожарном деле (брандспойт).

*Конический расходящийся насадок.* Коэффициент расхода таких насадков при угле конусности  $\theta=5...7^{\circ}$  равен  $\mu=0,5$ .

*Конoidalный насадок.* Форма внутренней поверхности этого насадка близка к форме струи, вытекающей из отверстия. Его коэффициент расхода равен  $\mu=0,97...0,98$ .

*Пример 1:*

Через цилиндрический насадок, расположенный в стенке, расходуется вода в количестве  $Q=5,6$  л/с. Диаметр насадка  $d=3,8$  см. Коэффициент расхода  $\mu=0,82$ . Определить напор  $H$  над центром насадка и скорость в сжатом сечении.

*Решение:*

Определяем площадь живого сечения насадка

$$\omega = \frac{3,14 \cdot 0,038^2}{4} = 0,00113 \text{ м}^2 .$$

Определяем напор над центром насадка из формулы (74):

$$H = \frac{Q^2}{\mu^2 \cdot \omega^2 \cdot 2 \cdot g} = \frac{0,0055^2}{0,82^2 \cdot 0,00113^2 \cdot 2 \cdot 9,81} = 1,59 \text{ м} .$$

Находим скорость в выходном сечении насадка

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,0055}{0,00113} = 4,87 \text{ м/с} .$$

Из условия неразрывности  $\omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2$  определяем скорость в сжатом сечении, полагая  $\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega} = 0,64$ ,

$$v_c = v \cdot \frac{\omega}{\omega_c} = \frac{v}{\varepsilon} = \frac{4,87}{0,64} = 7,6 \text{ м/с} .$$

*Пример 2:*

В дне цилиндрического бака, имеющего площадь  $\Omega = 2,4 \text{ м}^2$ , расположено круглое отверстие диаметром  $d = 6 \text{ см}$ . Определить за какое время  $t$  из бака через отверстие вытечет половина объема воды, если в момент открытия отверстия глубина наполнения  $h = 2 \text{ м}$ . Притока воды в баке нет.

*Решение:*

Чтобы определить время, за которое уровень в баке опустится с глубины  $h$  до  $h_1$ , необходимо составить выражение

$$\mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \frac{dW}{dt} .$$

Проинтегрируем данное уравнение и получим время снижения уровня

$$t = \frac{2 \cdot \Omega \cdot (\sqrt{h} - \sqrt{h_1})}{\mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g}} = \frac{2 \cdot 2,4 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1}}{0,82 \cdot 0,0028 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81}} = 680 \text{ с} ,$$

где  $h_1 = \frac{h}{2} = \frac{2}{2} = 1 \text{ м}$ .

### *Задачи*

6.51. Определить напор в баке, если расход воды при истечении через цилиндрический насадок диаметром  $d = 0,05 \text{ м}$  составляет  $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ . Истечение происходит при постоянном напоре (рис. 76).

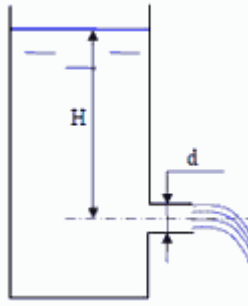


Рис. 76. К задаче 6.51

6.52. В баке (рис. 77), имеющем в дне отверстия диаметром  $d_1 = 100$  мм и в стенке цилиндрический насадок диаметром  $d_2 = 100$  мм, установился уровень воды на высоте  $H = 1,6$  м. Определить, какой расход воды поступает в бак, если центр цилиндрического насадка возвышается над дном бака на высоте  $h = 0,2$  м.

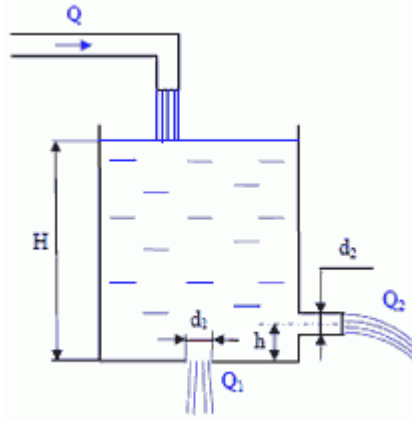


Рис. 77. К задаче 6.52

6.53. Определить какой напор необходимо создать в открытом резервуаре диаметром  $d = 0,09$  м чтобы из отверстия диаметром  $d_0 = 0,06$  м расположенного в центре дна резервуара, вытекала струя расходом  $Q = 0,005$  м<sup>3</sup>/с, коэффициент расхода  $\mu = 0,62$ .

6.54. Определить объем воды  $W$ , налитой в цилиндрический бак (рис. 78) диаметром  $D = 0,8$  м, если вся вода вытекла из бака через отверстия в дне диаметром  $d = 100$  мм за время  $t = 60$  с. Какое время  $t_1$  потребуется для опорожнения такого же объема воды, если уменьшить диаметр бака в полтора раза?

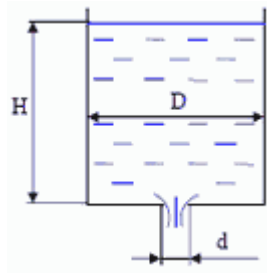


Рис. 78. К задаче 6.54

6.55. Из отверстия диаметром  $d = 0,4$  см в тонкой стенке резервуара (рис. 79) вытекает вода, имеющая температуру  $t = 18$  °С. Отверстие расположено на высоте  $h = 8$  м над поверхностью земли. Постоянный напор воды в резервуаре  $H = 6$  м. Определить расход и скорость истечения, а также расстояние  $x$ , на котором струя коснется поверхности земли.

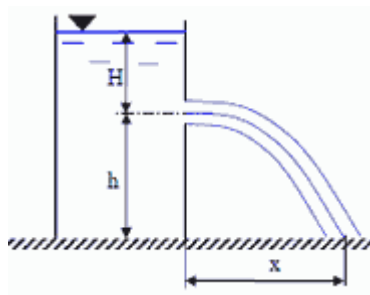


Рис. 79. К задаче 6.55

6.56. Определить расход и скорость воды при истечении из круглого отверстия (рис. 80) диаметром  $d = 0,065$  м в тонкой стенке и установить, как они изменяются, если к этому отверстию присоединить цилиндрический насадок длиной  $l = 4 \cdot d$ . Напор в центре тяжести отверстия  $H = 2,8$  м.

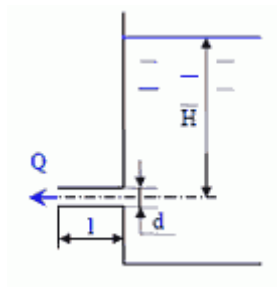


Рис. 80. К задаче 6.56

6.57. Определить расход и скорость воды, вытекающей из

бассейна через отверстие диаметром  $d = 100$  мм в стенке, если уровень воды находится на высоте  $H = 5$  м над центром отверстия. Как изменятся расход и скорость истечения, если к отверстию подключить: а) внешний цилиндрический насадок; б) внутренний цилиндрический насадок; в) коноидальный насадок?

6.58. Вода вытекает из бассейна шириной  $B = 2$  м и глубиной  $H_1 = 3$  м в лоток шириной  $b = 0,15$  м и глубиной  $H_2 = 0,25$  м через круглое отверстие в тонкой стенке диаметром  $d = 0,1$  м, центр которого расположен на расстоянии  $a = 0,1$  м от дна бассейна. Определить расход воды  $Q$ , проходящий через отверстие.

6.59. В дне цилиндрического резервуара, площадью поперечного сечения  $\Omega = 7,5$  м<sup>2</sup>, находится отверстие с острыми кромками площадью  $\Omega = 0,05$  м<sup>2</sup>. Глубина воды в резервуаре  $h = 5$  м. За сколько времени из резервуара вытечет половина имеющегося объема воды?

6.60. Определить время выравнивание уровней воды в двух соседних камерах многокамерного шлюза (рис. 81) при следующих данных: ширина камеры  $b = 30$  м, длина камер  $l = 70$  м, диаметр трубы, соединяющей камеры  $d = 1,1$  м, перепад уровней воды  $z = 5$  м. Коэффициент расхода для водопроводной галереи принять  $\mu = 0,70$ .

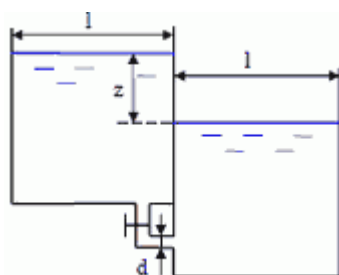


Рис. 81. К задаче 6.60

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое коэффициент сжатия струи?
2. Полное и неполное сжатие
3. Совершенное и несовершенное сжатие.
4. Чему равен коэффициент расхода отверстия?
5. Что такое насадок?
6. Чему равны коэффициенты расхода внешнего и внутреннего цилиндрических насадков?
7. Конический сходящийся насадок. Чему равны угол конусности брандспойта и его коэффициент расхода?
8. Какой насадок имеет максимальный коэффициент расхода?

### **Рекомендуемая литература**

1. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
2. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.И. Калицун [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1980. – 359 с.
3. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев; Ленинградский политехн. ин-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1971. – 552 с.

## 7. Движение воды в каналах и естественных руслах

### 7.1. Равномерное безнапорное движение воды в открытых руслах

Открытые русла могут быть искусственными и естественными. К естественным руслам относятся реки, к искусственным – цилиндрические каналы.

На практике равномерное безнапорное движение воды встречается в искусственных руслах (каналы различного назначения, безнапорные трубы).

Наиболее часто встречающиеся формы поперечного сечения каналов следующие: трапецеидальные, треугольные, прямоугольные, параболические, круглые и полигональные.

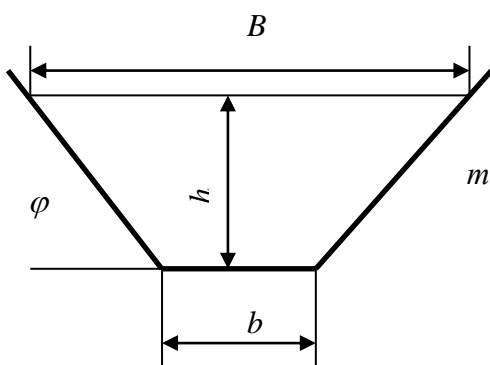


Рис. 81. Трапецеидальное поперечное сечение канала

Рассмотрим трапецеидальное поперечное сечение канала (рис. 81). Введем обозначения:  $b$  – ширина канала по дну;  $h$  – глубина потока;  $m = \text{ctg } \varphi$  – коэффициент откоса;  $B = b + 2mh$  – ширина потока по верху (на уровне свободной поверхности).

Площадь живого сечения такого канала определяется по

зависимости

$$\omega = b \cdot h + m \cdot h^2, \quad (78)$$

а смоченный периметр

$$\chi = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}. \quad (79)$$

Гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} . \quad (80)$$

Уклон дна канала определяем по формуле

$$i = \frac{h_l}{l} = \sin \theta . \quad (81)$$

Так как величина  $i$  обычно невелика, то глубина воды  $h$  в канале измеряется по вертикали; при этом условно считается, что живые сечения потока вертикальны, а не перпендикулярны дну.

Средняя скорость в канале определяется по формуле Шези:

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i} , \quad (82)$$

где  $C$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6} . \quad (83)$$

Коэффициент шероховатости  $n$  для земляных каналов находится в пределах  $n=0,02 \dots 0,04$ , составляя в среднем  $0,03$ .

Учитывая, что расход  $Q = v \cdot \omega$ , уравнение (82) можно переписать в виде

$$Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i} . \quad (84)$$

Введем понятие *относительной ширины канала по дну*  $\beta = \frac{b}{h}$ .

Один и тот же расход воды может быть пропущен при разных значениях относительной ширины канала по дну. *Гидравлически наивыгоднейшим сечением канала* (при заданном расходе  $Q$  и уклоне  $i$ ) будем считать такой, который характеризуется минимальной площадью живого сечения и максимальной средней скоростью (или минимальной поверхностью трения, определяемой смоченным периметром  $\chi$ ). Иными словами можно сказать, что из всех сечений с одинаковой площадью живого сечения (при постоянных  $i$  и  $n$ ) гидравлически наивыгоднейшее имеет максимальную пропускную

способность (максимальный расход).

Самой гидравлически наивыгоднейшей формой живого сечения является полукруг. Для трапецеидального канала гидравлически наивыгоднейшее сечение характеризуется соотношением

$$\beta = \left(\frac{b}{h}\right) = 2 \cdot (\sqrt{1+m^2} - m). \quad (85)$$

Для гидравлически наивыгоднейшего канала треугольного сечения значение коэффициента заложения откоса  $m$  равно единице.

В практике водохозяйственного строительства, при устройстве искусственных русел чаще других проектируются русла трапецеидального профиля.

Трапецеидальное (в поперечном сечении) русло (рис. 82) характеризуется следующими шестью величинами  $b, m, h$  (эти величины определяют размеры всего живого сечения потока) и  $i, n, Q$ . Некоторые из приведенных величин бывают заданы теми или иными условиями проектирования. Задача гидравлического расчета обычно состоит в том, чтобы, зная пять из названных величин, найти шестую.

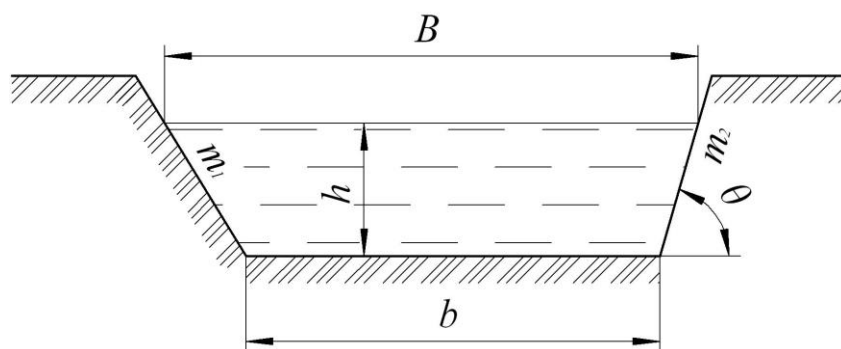


Рис. 82. С хема трапецеидального канала

### Задача I

Заданы размеры живого сечения русла: ширина по дну  $b$ , глубина потока  $h$  и коэффициент заложения откоса  $m$ , а также уклон дна  $i$  и коэффициент шероховатости русла  $n$ . Определить пропускную способность русла (расход)  $Q$  и среднюю скорость движения потока  $v$ , развиваемую при данных условиях.

Расчет производится в следующей последовательности:

1) определяется площадь живого сечения потока по формуле (78).

В случае несимметричного русла:

$$\omega = (b + m_{\bar{n}\delta} \cdot h) \cdot h, \quad (86)$$

где

$$m_{\bar{n}\delta} = \frac{m_1 + m_2}{2}; \quad (87)$$

2) определяется смоченный периметр русла по формуле (79).

Или

$$\chi = b + h \cdot (\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}); \quad (88)$$

3) определяется гидравлический радиус по формуле (80).

4) по таблице [10] определяется коэффициент шероховатости  $n$ , рассчитывается коэффициент Шези по формуле Маннинга (83).

5) определяется развиваемая потоком скорость по формуле (82).

6) находится пропускная способность русла по формуле (84).

### Задача II

Заданы размеры живого сечения русла: ширина по дну  $b$ , глубина потока  $h$ , коэффициент заложения откоса  $m$ , а также коэффициент шероховатости русла  $n$  и его пропускная способность  $Q$ . Определить уклон дна, при котором русло заданного поперечного сечения и шероховатости будет пропускать заданный расход.

Расчет производится в следующей последовательности:

1) определяется площадь поперечного сечения, смоченный периметр, гидравлический радиус и коэффициент Шези;

2) определяется средняя скорость потока:

$$v = \frac{Q}{\omega}; \quad (89)$$

3) из формулы (89) находим уклон дна:

$$i = \frac{v^2}{C^2 \cdot R}. \quad (90)$$

### Задача III

Размеры живого сечения русла неизвестны. Определить  $b$  или  $h$ . Задача решается методом подбора.

Задача 3а.

Задано: коэффициент заложения откоса  $m$ , ширина по дну  $b$ , коэффициент шероховатости русла  $n$ , уклон дна русла  $i$  и его пропускная способность  $Q$ . Определить глубину наполнения  $h$ .

Расчет производится в следующей последовательности:

1) определяется модуль расхода, которым должно характеризоваться рассчитываемое русло:

$$K_{\text{необх}} = \frac{Q}{\sqrt{i}}; \quad (91)$$

2) задаваясь рядом значений  $h$ , для каждого вычисляется соответствующий модуль расхода:

$$K_i = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R}. \quad (92)$$

Результаты сводим в таблицу.

Приближение	$h, м$	$\omega, м^2$	$\chi, м$	$R, м$	$C, м^{0.5}/с$	$K_i, м^3/с$
1						
2						
3						
4						
5						

3) по данным таблицы строится график  $K = f(h)$ ,

4) по графику, зная  $K_{\text{необх}}$ , находится искомое значение глубины наполнения русла.

Задача 3б.

Задано: коэффициент заложения откоса  $m$ , глубина наполнения  $h$ , коэффициент шероховатости русла  $n$ , уклон дна русла  $i$  и его пропускная способность  $Q$ . Определить ширину по дну  $b$ .

Расчет ведется в последовательности, описанной в задаче 3а.

#### Задача IV

Задано: коэффициент заложения откоса  $m$ , коэффициент шероховатости русла  $n$ , уклон дна русла  $i$  и его пропускная способность  $Q$ . Определить ширину по дну  $b$  и глубину наполнения  $h$ .

Расчет производится в следующей последовательности:

1) находим относительную ширину гидравлически наивыгоднейшего сечения по формуле (85).

2) по формуле (91) определяем модуль расхода, которым должно характеризоваться рассчитываемое русло;

3) задаваясь рядом значений  $h$ , исходя из относительной ширины гидравлически наивыгоднейшего сечения, определяем ширину русла по дну:

$$b_i = \beta_{ar} \cdot h_i; \quad (93)$$

4) далее по алгоритму, описанному в задаче 3а, производим расчет и строим график зависимости  $K = f(h)$ ;

5) по графику, зная  $K_{необх}$ , находим искомое значение глубины наполнения русла  $h_{иск}$ .

Исходные данные для выполнения вышеуказанных задач приведены в приложении Б.

*Пример 1:*

Определить расход в трапецидальном канале при следующих исходных данных: ширина по дну канала  $b = 0,2$  м, глубина наполнения  $h = 0,12$  м, коэффициент заложения откоса  $m = 1$ , коэффициент шероховатости  $n = 0,03$ , гидравлический уклон  $i = 0,0005$ .

*Решение:*

Определяем площадь живого сечения по формуле (78):

$$\omega = 0,2 \cdot 0,12 + 1 \cdot 0,12^2 = 0,038 \text{ м}^2 ,$$

а смоченный периметр по формуле (79):

$$\chi = 0,2 + 2 \cdot 0,12 \cdot \sqrt{1+1^2} = 0,54 \text{ м} .$$

Гидравлический радиус по формуле (80)

$$R = \frac{0,038}{0,54} = 0,07 \text{ м} .$$

Средняя скорость в канале определяется по формуле Шези (82):

$$v = 21,3 \cdot \sqrt{0,07 \cdot 0,0005} = 0,13 \text{ м/с} ,$$

где  $C$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле (83) Маннинга:

$$C = \frac{1}{0,03} \cdot 0,07^{1/6} = 21,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с} .$$

Определяем расход по формуле:

$$Q = \omega \cdot v = 0,038 \cdot 0,13 = 0,0049 \text{ м}^3/\text{с} = 4,94 \text{ л/с} .$$

*Пример 2:*

Определить ширину трапецидального канала по дну при расходе  $Q = 5,2$  м<sup>3</sup>/с, глубине наполнения  $h = 1,2$  м, коэффициенте заложения откоса  $m = 1$ , коэффициенте шероховатости  $n = 0,025$ , уклоне  $i = 0,0006$ .

*Решение:*

Задаемся значением ширины канала по дну  $b = 3,85$  м. Находим

площадь сечения по формуле (78):

$$\omega = 3,85 \cdot 1,2 + 1 \cdot 1,2^2 = 6,06 \text{ м}^2 ,$$

а смоченный периметр по формуле (79):

$$\chi = 3,85 + 2 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{1+1^2} = 7,306 \text{ м} .$$

Гидравлический радиус по формуле (80)

$$R = \frac{6,06}{7,306} = 0,83 \text{ м} .$$

Средняя скорость в канале определяется по формуле Шези (82):

$$v = 38,8 \cdot \sqrt{0,83 \cdot 0,0006} = 0,87 \text{ м/с} ,$$

где  $C$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле (83) Маннинга:

$$C = \frac{1}{0,25} \cdot 0,83^{1/6} = 38,8 \text{ м}^{0,5}/\text{с} .$$

Определяем расход по формуле:

$$Q = \omega \cdot v = 6,06 \cdot 0,87 = 5,2 \text{ м}^3/\text{с} .$$

### **Контрольные вопросы**

1. Дать определение равномерному движению жидкости.
2. Какие формы поперечного сечения каналов вы знаете?
3. Дать определение безнапорному движению жидкости.
4. Назовите задачи при расчете каналов.
5. Что называется гидравлически наивыгоднейшим сечением канала.
6. Дать определение относительной ширины канала.

### **Рекомендуемая литература**

1. Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений и русел. – 3-е изд. доп. и перераб. – Москва: Трансжелдориздат, 1967.

2. СНиП 2.06.03-85. Мелиоративные системы и сооружения. – Взамен СНиП II-52-74; утвержд. 1985-17-12. – Москва: ЦНИП Госстроя СССР, 1986. – 60 с.

3. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев; Ленинградский политехн. Ин-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1971. – 552 с.



Введем следующие термины и определения.

1. *Стенка*, через которую переливается вода, называется *водосливной*; область потока перед водосливной стенкой будем называть *верхним бьефом*, за стенкой – *нижним бьефом*.

2. На расстоянии  $l_g \approx (3 \dots 5)H$  от верховой грани водосливной стенки наметим сечение  $B-B$  (рис. 83), в котором начинается спад свободной поверхности. Величина  $H$ , измеренная в этом сечении, называется *геометрическим напором на водосливе*. Таким образом, *геометрический напор на водосливе* представляет собой превышение над гребнем водосливной стенки горизонта воды в сечении, где еще нет спада свободной поверхности, обусловленного истечением воды через водослив.

Кроме того, на рис. 83 обозначены:

$b$  – *ширина водослива*, или иначе, ширина водосливного отверстия;

$\delta$  – *толщина водосливной стенки*;

$c_v$  и  $c_n$  – *высоты водосливной стенки* соответственно в верхнем и нижнем бьефах; в случае их равенства ( $c_v = c_n$ ) эту высоту обозначают  $c$ ;

$B_0$  – *ширина русла*, в котором устроен водослив;

$Z$  – *геометрический перепад на водосливе* (разность горизонтов воды в верхнем и нижнем бьефах);

$U_0$  – *скорость подхода* – средняя скорость в сечении  $B-B$ ;

$H_0$  – *полный напор на водосливе*, или иначе, напор с учетом скорости подхода:

$$H_0 = H + \frac{\alpha U_0^2}{2g}; \quad (94)$$

$Z_0$  – *полный перепад на водосливе*, или, перепад на водосливе с учетом скорости подхода:

$$Z_0 = Z + \frac{\alpha U_0^2}{2g}. \quad (95)$$

Водосливы принято классифицировать по следующим

признакам.

1. В зависимости от формы и размеров поперечного сечения водосливной стенки. Эта классификация является наиболее важной.

Различают:

а) водосливы с тонкой стенкой, когда

$$\delta \leq (0,1 \dots 0,5)H ; \quad (96)$$

б) водосливы с широким порогом, когда

$$2H \leq \delta \leq 8H ; \quad (97)$$

высота водосливной стенки водослива с широким порогом может быть любая, гребень водослива – горизонтален. Водослив с широким порогом характеризуется наличием на гребне плавно изменяющегося движения воды. При  $\delta > 8H$  имеет место не водослив, а канал с горизонтальным дном, при расчете которого необходимо учитывать потери напора по длине; при расчете же водослива с широким порогом (весьма короткий канал) потерями напора по длине пренебрегают, учитывая только местные;

в) водосливы со стенкой практического профиля; к ним относят все водосливы, не удовлетворяющие условиям (96) и (97).

2. В зависимости от влияния нижнего бьефа на истечение различают: а) неподтопленные водосливы, когда  $Q$  и (или)  $H$  не зависят от глубины воды  $h_n$  в нижнем бьефе; б) подтопленные водосливы, когда  $Q$  и (или)  $H$  зависят от глубины воды  $h_n$  в нижнем бьефе.

3. В зависимости от геометрической формы водосливного отверстия различают водосливы: а) прямоугольные; б) треугольные; в) трапецеидальные; г) круговые; д) параболические; е) с наклонным гребнем.

4. В зависимости от начертания гребня водосливной стенки в плане различают: а) водосливы с прямолинейным в плане гребнем (прямые или лобовые, косые, боковые); б) водосливы с

непрямолинейным в плане гребнем (полигональные, криволинейные, замкнутые).

5. В зависимости от отношения  $b$  и  $B_0$  (только для прямоугольных водосливов) различают: а) без бокового сжатия, когда  $b=B_0$ ; б) с боковым сжатием, когда  $b<B_0$  (рис. 83).

Основная расчетная формула прямоугольного водослива имеет вид, аналогичный формуле при истечении из отверстий и насадков:

$$Q=m_0bH\sqrt{2gH} \quad , \quad (98)$$

или

$$Q=m_0b\sqrt{2g} H^{1.5} \quad , \quad (99)$$

или

$$Q=mb\sqrt{2g} H_0^{1.5} \quad , \quad (100)$$

где  $m$  – коэффициент расхода водослива;

$m_0$  – коэффициент расхода водослива, учитывающий скорость подхода  $U_0$ .

## 8.2. Прямые (лобовые) водосливы с тонкой стенкой

Прямые (лобовые) водосливы дополнительно классифицируются:

1) в зависимости от наклона водосливной стенки к горизонту:

а) с вертикальной стенкой; б) с наклонной стенкой;

2) в зависимости от степени свободы доступа воздуха (или воды нижнего бьефа) под струю жидкости, переливающейся через стенку:

а) со свободным истечением, когда в пространство под струю с боков обеспечен доступ воздуха при атмосферном давлении, или, когда горизонт воды нижнего бьефа выше гребня водослива; б) с несвободным истечением, когда в подструйное пространство доступ воздуха затруднен.

Неподтопленный прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой при свободном истечении без бокового сжатия называется *нормальным водосливом*. Картина истечения жидкости в случае нормального водослива показана на рис. 83, при условии  $b=B_0$ .

Величину расхода нормального водослива обычно определяют по формуле (99), где коэффициент расхода водослива с учетом скорости подхода рекомендуется определять как

$$m_{0н} = 0,4 + 0,05 \frac{H}{c_в} . \quad (101)$$

Формула (101) справедлива при  $H \geq 0,1$  м и  $c_в \geq 0,5H$ . Точность расчетов, относящихся к нормальному водосливу, является достаточно высокой, поэтому их часто применяют в качестве измерительных водосливов на каналах различного назначения.

Рассмотрим свободное истечение через *подтопленный* прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой (рис. 84).

При свободном истечении *подтопленный* прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой *получается*, если одновременно выполняются два условия:

1) горизонт воды нижнего бьефа расположен выше гребня водослива:

$$h_n > 0 , \quad (102)$$

где  $h_n$  – высота подтопления водослива;

2) в нижнем бьефе имеет место спокойный режим движения воды. При несоблюдении данного условия, т.е. при наличии в нижнем бьефе бурного режима непосредственно за водосливной стенкой появляется отогнанный гидравлический прыжок, и водослив оказывается неподтопленным даже при соблюдении условия (102). Спокойный режим в нижнем бьефе зачастую имеет место, если *относительный*

перепад  $\frac{Z}{c_y} < (0,70 \dots 0,75)$ .

Расход для случая подтопленного водослива со свободным истечением без бокового сжатия определяется по формуле (99), где

$$m_0 = \sigma_n m_{0n}, \quad (103)$$

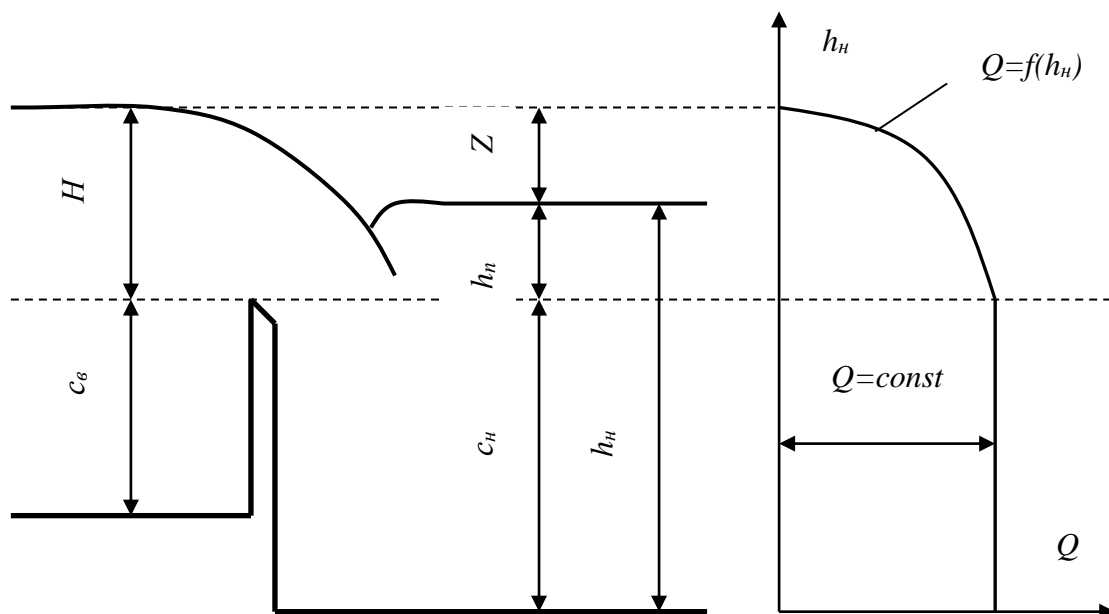


Рис. 84. Свободное истечение через подтопленный прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой

причем  $m_{0n}$  определяется по формуле (103), а  $\sigma_n$  – коэффициент подтопления водослива – по эмпирической формуле Базена:

$$\sigma_n = 1,05 \left( 1 + 0,2 \frac{h_n}{c_n} \right) \sqrt[3]{\frac{Z}{H}}. \quad (104)$$

На рис. 84 представлен график изменения расхода в зависимости от изменения глубины в нижнем бьефе  $Q=f(h_n)$ . Как видно из этого графика, до тех пор, пока горизонт воды нижнего бьефа находится ниже линии, проведенной на уровне гребня водослива, имеет место *неподтопленный водослив* ( $Q=const$ ). Как только горизонт воды нижнего бьефа становится выше линии гребня водослива, получаем подтопленный водослив, и величина расхода  $Q$  становится зависящей от  $h_n$ , причем с увеличением  $h_n$  расход  $Q$

уменьшается до нуля. Как следует из формулы (104), если  $Z=0$ , то  $\sigma_n=0$ , следовательно,  $m_0=0$  и  $Q=0$ .

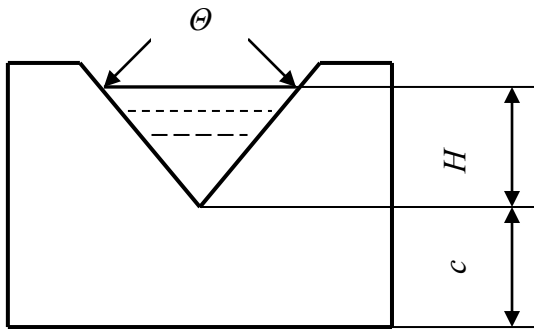


Рис. 85. Треугольный водослив

Из прямых неподтопленных водосливов с тонкой стенкой со свободным истечением, отличных от прямоугольного, наибольшее распространение получил треугольный, часто применяющийся в качестве измерительного (рис. 85).

При угле  $\theta$ , равном  $90^\circ$ , расход через треугольный водослив равен:

а) по Кингу

$$Q=1,343H^{2,47}; \quad (105)$$

б) по Томсону

$$Q=1,4H^{2,5}. \quad (106)$$

При  $22^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  расход по Граве равен:

$$Q=1,331[\operatorname{tg}(0,5\theta)]^{0,996}H^{2,47}. \quad (107)$$

### 8.3. Прямые прямоугольные водосливы с широким порогом

Неподтопленный водослив с широким порогом обычно характеризуется наличием двух перепадов свободной поверхности:  $Z_e$  и  $Z_n$  (рис. 86).

Поясним причины возникновения первого перепада  $Z_e$  с физической точки зрения. Представим себе безнапорное спокойное движение воды, например, в верхнем бьефе перед водосливной стенкой

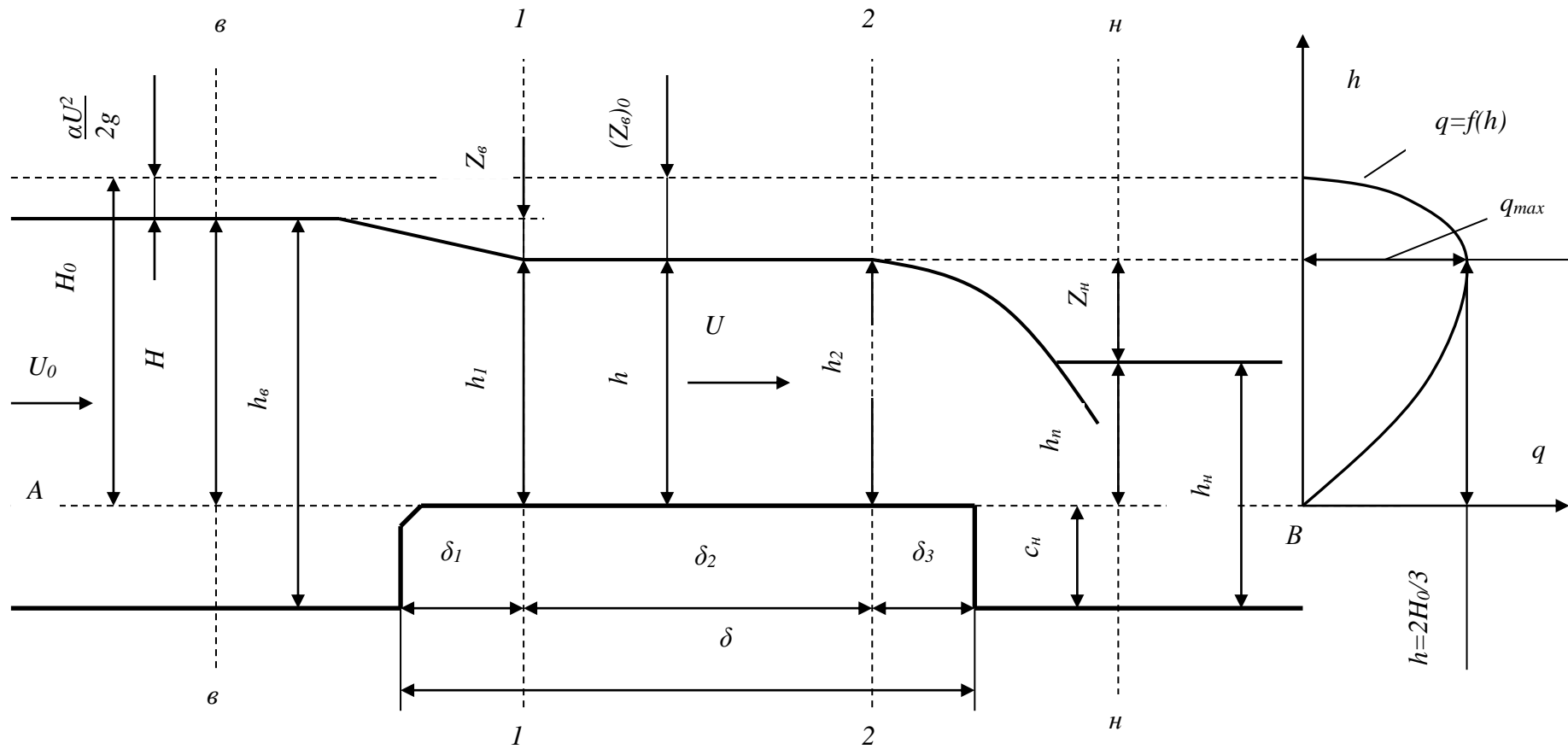


Рис. 86. Неподтопленный водослив с широким порогом

(рис. 86). Ясно, что при наличии сжатия такого потока, будет иметь место: а) увеличение скорости  $U$  в месте сжатия; б) увеличение кинетической и уменьшение потенциальной энергии потока; в) снижение свободной поверхности, обусловленное уменьшением потенциальной энергии. Таким образом, в месте сжатия безнапорного потока (при спокойном движении жидкости) всегда получается резкое снижение его свободной поверхности.

Несмотря на то, что горизонт воды нижнего бьефа выше отметки гребня водослива ( $h_n = h_n - c_n > 0$ ), будем все же иметь неподтопленный водослив, т.к. условия подтопления водослива с широким порогом отличаются от условий подтопления водослива с тонкой стенкой.

Так как потерей напора по длине вдоль порога водослива пренебрегают, то свободную поверхность в пределах гребня водослива считают горизонтальной и полагают, что

$$h_1 = h_2 = h. \quad (108)$$

Длины  $\delta_1$  и  $\delta_3$ , определяющие положение сечений 1-1 и 2-2, ограничивающих горизонтальный участок свободной поверхности потока, равны:

$$\delta_1 \approx 2H; \quad \delta_3 = 0 \dots H. \quad (109)$$

Соединяя уравнением Бернулли сечения  $v-v$  и 1-1 (рис. 89) и принимая, что местные потери напора между этими сечениями  $h_M = \zeta \frac{\alpha U^2}{2g}$ , относительно плоскости сравнения  $A-B$  можем записать:

$$H + \frac{\alpha U_0^2}{2g} = h + \frac{\alpha U^2}{2g} + \zeta \frac{\alpha U^2}{2g}, \quad (110)$$

откуда

$$U = \varphi \sqrt{2g(H_0 - h)} = \varphi \sqrt{2g(Z_e)_0}, \quad (111)$$

где  $U$  – средняя скорость на пороге водослива;  $(Z_e)_0$  – полный верховой перепад, или перепад с учетом скорости подхода

$$(Z_e)_0 = Z_e + \frac{\alpha U_0^2}{2g}; \quad (112)$$

$\varphi$  – коэффициент скорости,

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\zeta}}. \quad (113)$$

Для прямоугольного водослива величина расхода равна:

$$Q = bhU = bh\varphi \sqrt{2g(H_0 - h)} = bh\varphi \sqrt{2g(Z_e)_0}, \quad (114)$$

или, переходя к удельному (на единицу ширины потока) расходу,

$$q = \frac{Q}{b} = \varphi h \sqrt{2g(H_0 - h)} = \varphi h \sqrt{2g(Z_e)_0}, \quad (115)$$

Очевидно, для того, чтобы определить расход, необходимо знать глубину  $h$ , которая при заданном  $H$  устанавливается на пороге водослива. Для определения  $h$  и  $Q$  в случае водослива с широким порогом предложено много способов. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Принцип максимума расхода (способ Беланже)*. Как видно из рис. 66, при  $q = q_{max}$  искомая глубина  $h$  должна удовлетворять условию

$$\frac{dq}{dh} = 0, \text{ т.е.}$$

$$\frac{dq}{dh} = \frac{d(h\sqrt{(H_0 - h)})}{dh} = \sqrt{H_0 - h} - \frac{1}{2} \frac{h}{\sqrt{H_0 - h}} = 0, \quad (116)$$

откуда

$$h = \frac{2}{3} H_0. \quad (117)$$

Введем обозначение  $k = \frac{h}{H_0}$ . Как видно, по Беланже

$$k = \frac{2}{3}. \quad (118)$$

Перепишем уравнение (114) в виде:

$$Q = \varphi b \frac{h}{H_0} H_0 \sqrt{2gH_0(1 - \frac{h}{H_0})} = \varphi k \sqrt{(1-k)} b \sqrt{2g} H_0^{1.5}, \quad (119)$$

или

$$Q = mb \sqrt{2g} H_0^{1,5} , \quad (120)$$

где  $m$  – коэффициент расхода водослива,

$$m = \varphi k \sqrt{1-k} . \quad (121)$$

Подставляя в уравнение (62) величину  $k$  по Беланже, получим:

$$m = 0,385\varphi . \quad (122)$$

Значения  $m$  и  $\varphi$  в зависимости от очертаний входного ребра водослива приведены на рис. 87.

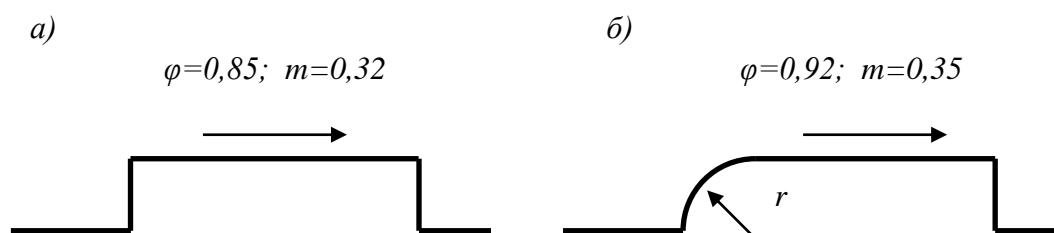


Рис. 87. Коэффициенты скорости и расхода в зависимости от очертаний входного ребра водослива по Беланже

2. *Способ Бахметева*, согласно которому на пороге водослива сама собой устанавливается глубина, соответствующая минимуму удельной энергии сечения, т.е. критическая глубина. Таким образом, по Бахметеву,

$$k = \frac{h_K}{H_0} . \quad (123)$$

Из уравнения (120) для критической глубины в случае прямоугольного русла имеем:

$$h_K = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} . \quad (124)$$

Подставляя уравнение (124) в (123), получим:

$$k = \frac{1}{H_0} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} , \quad (125)$$

что, с учетом (119), после некоторых преобразований, дает:

$$k = \frac{2\varphi^2}{1 + 2\varphi^2} . \quad (126)$$

Как видно из (126), значение  $k$  по Бахметеву и Беланже совпадают и равны  $\frac{2}{3}$  только при  $\varphi=1,0$ .

Значение коэффициента расхода, по Бахметеву, можно найти из (121), если в эту зависимость подставить значение  $\varphi$ , определенное по уравнению (126):

$$m = \sqrt{\frac{k^3}{2}} , \quad (127)$$

откуда

$$k = \sqrt[3]{2m^2} . \quad (128)$$

Таким образом, для схем, представленных на рис. 87, при тех же значениях коэффициента расхода, по Бахметеву, получим значения  $k$ , равные соответственно 0,59 и 0,63.

3. *Экспериментальными исследованиями* позднее было показано, что постулат Беланже и постулат Бахметева не вполне отвечают действительности. Оказывается, что

$$h < h_K < \frac{2}{3} H_0 , \quad (129)$$

т.е., *действительная глубина на пороге прямоугольного водослива с широким порогом  $h$  меньше критической глубины, а также меньше глубины, определенной по Беланже*; только при весьма плавном скруглении входного ребра водослива величина  $h$  приближается к критической.

Кроме того, экспериментальные исследования показали, что величина коэффициента расхода  $m$  существенно зависит от отношения  $\frac{c_g}{H}$ , а также от степени бокового сжатия потока, поступающего на водослив  $\frac{b}{B_0}$ .

*Расчет неподтопленного водослива с широким порогом выполняют следующим образом.*

Расход воды (или напор на водосливе) определяют по формуле (41), принимая в первом приближении значения коэффициента расхода, в зависимости от очертаний входного ребра водослива. Уточненные значения коэффициента расхода определяем по табл. 2 и 3.

Таблица 2 – Коэффициенты расхода  $m$  для водослива с широким порогом без бокового сжатия с вертикальной верховой гранью (рис. 87, а)

$\frac{c_6}{H}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
$m$	0,385	0,366	0,356	0,350	0,345
$\frac{c_6}{H}$	1,0	2,0	4,0	8,0	$\infty$
$m$	0,342	0,333	0,327	0,324	0,320

Глубину  $h$  на пороге водослива определяют по уравнению (55), принимая значения коэффициента скорости  $\varphi$  по табл. 4 в зависимости от определенного ранее коэффициента расхода водослива  $m$ .

Как уже было отмечено выше, условия подтопления водослива с широким порогом отличаются от условий подтопления водослива с тонкой стенкой. В общем случае, можно утверждать, что водослив с широким порогом получается подтопленным, если уровень воды нижнего бьефа поднимается выше того горизонта воды, который сам собой устанавливается на пороге водослива. Экспериментальные исследования показали, что *водослив с широким порогом следует считать подтопленным, если высота подтопления*

$$h_n > nH_0, \quad (130)$$

где  $n=0,75 \dots 0,85$ .

Расчет подтопленного водослива проводится по формуле

$$Q = \varphi_n b h_l \sqrt{2g(H_0 - h_l)}, \quad (131)$$

где  $\varphi_n$  – коэффициент скорости подтопленного водослива; принимается по табл. 5 в зависимости от коэффициента расхода  $m$ , определяемого аналогично неподтопленному водосливу;

$h_l$  – глубина потока на пороге водослива; принимается равной

$$h_l \approx h_n. \quad (132)$$

Таблица 3 – Коэффициенты расхода  $m$  для водослива с широким порогом без бокового сжатия с вертикальной верховой гранью и округленным входным ребром (рис. 87, б)

$\frac{c_e}{H}$	$\frac{r}{H}$						
	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	$\infty$
0,0	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385
0,2	0,372	0,374	0,375	0,377	0,379	0,381	0,382
0,4	0,365	0,368	0,370	0,374	0,376	0,379	0,381
0,6	0,361	0,364	0,367	0,370	0,374	0,378	0,380
0,8	0,357	0,361	0,368	0,368	0,372	0,377	0,379
1,0	0,355	0,359	0,362	0,366	0,371	0,376	0,378
2,0	0,349	0,354	0,358	0,363	0,368	0,375	0,377
4,0	0,345	0,350	0,355	0,360	0,366	0,373	0,376
6,0	0,344	0,349	0,354	0,359	0,366	0,373	0,376
$\infty$	0,340	0,346	0,351	0,357	0,364	0,372	0,375

Таблица 4 – Значения коэффициента скорости  $\varphi$  в зависимости от коэффициента расхода водослива  $m$

$m$	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
$\varphi$	0,943	0,956	0,960	0,983	0,996

Таблица 5 – Значения коэффициента скорости  $\varphi_n$  подтопленного водослива в зависимости от коэффициента расхода  $m$

$m$	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
$\varphi_n$	0,77	0,84	0,90	0,96	0,99

В действительности  $h_1 < h_n$ , т.к. имеет место соотношение

$$h_1 = h_n - Z_{вс} \quad , \quad (133)$$

что объясняется возникающим при расширении потока так называемого *перепада восстановления (отрицательного)*  $Z_{вс}$ , связанного с переходом части кинетической энергии в потенциальную с учетом местной потери напора.

### Контрольные вопросы

1. Что называется водосливом?
2. Классификация водосливов.
3. Какие способы определения глубины и расхода на водосливах вы знаете?
4. Что называется геометрическим напором?

### Рекомендуемая литература

13. Сборник задач по гидравлике: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Большакова. – 4-е изд. перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1979. – 336 с.

15. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев; Ленинградский политехн. ин-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1971. – 552 с.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В учебном пособии рассмотрены основные теоретические вопросы, изучаемые в курсе гидравлики: основные физические свойства жидкости, гидростатическое давление в точке, относительный покой жидкости, давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности, использование гидростатического давления в механизмах, основные понятия и уравнения гидродинамики, гидравлические сопротивления, установившееся движение жидкости в напорных трубопроводах, истечение жидкости из отверстий и насадков, водосливы.

Учебное пособие предназначено для студентов всех технических специальностей.

В учебном пособии практически после каждого раздела приведены примеры решения типовых задач, а также задачи для самостоятельного решения, что позволит студентам более глубоко понять основные положения механики жидкости.

## ГЛОССАРИЙ

*Аэрация потока* – это процесс насыщения движущегося с большими скоростями потока проникающими в него снаружи пузырьками воздуха.

*Безнапорное движение жидкости* – это движение жидкости, характеризующееся наличием свободной поверхности.

*Вязкость* – свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу. Вязкость проявляется в том, что при относительном перемещении слоев жидкости на поверхностях их соприкосновения возникают силы сопротивления сдвигу, называемые *силами внутреннего трения*, или *силами вязкости*. Вязкость характеризуется коэффициентами кинематической  $\nu$  (м<sup>2</sup>/с) и динамической  $\mu$  (Па·с) вязкости.

*Гидравлика (техническая механика жидкости)* – это наука о движении и покое жидких тел, в которой все вопросы рассматриваются в свете их приложения к решению технических задач.

*Гидравлический радиус* есть отношение площади живого сечения к смоченному периметру.

*Гидравлический удар* – это практически мгновенное значительное повышение или снижение давления в результате резкого изменения скорости течения напорного потока жидкости.

*Гидравлический уклон* есть падение напорной линии на единицу длины.

*Гидростатика* – раздел гидравлики, изучающий законы равновесия покоящейся жидкости.

*Гидростатическое давление в точке* есть предел отношения силы давления, действующей на элементарную площадку, к ее площади, если последняя стремится к нулю.

*Длинный трубопровод* – это трубопровод, в котором местные потери напора составляют менее 10 %, поэтому при его расчете учитываются только потери напора по длине.

*Живое сечение потока* – это поверхность, нормальная линиям тока и лежащая внутри потока.

*Жидкость* – это физическое тело, обладающее двумя характерными свойствами:

1) она очень мало изменяет свой объем при изменении давления и температуры; в этом жидкости сходны с твердыми телами;

2) она обладает свойством текучести, т.е. не имеет собственной формы, а принимает форму того сосуда, в который ее помещают; в этом жидкость сходна с газообразными телами.

*Кавитацией* жидкости называется случай, когда появившиеся при  $p < p_{н.п.}$  в движущейся жидкости пузырьки пара не выходят из нее, а захлопываются (закрываются) внутри жидкости, перейдя в область, где  $p > p_{н.п.}$ . Кавитация сопровождается сильными ударами, которые способствуют постепенному разрушению поверхности твердых стенок, ограничивающих поток (*кавитационная эрозия*).

*Кипением* жидкости называется случай, когда пузырьки пара, появившиеся в жидкости при  $p < p_{н.п.}$ , всплывают и выходят из жидкости через ее свободную поверхность.

*Короткий трубопровод* – это трубопровод, при расчете которого учитываются и местные потери напора и потери напора по длине.

*Коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии потока)* – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по живому сечению; равен отношению действительной кинетической энергии к «средней» кинетической энергии массы жидкости.

*Коэффициент объемного сжатия* – это относительное

изменение объема жидкости на единицу изменения давления.

*Коэффициент температурного расширения* – это относительное изменение объема жидкости на единицу изменения температуры.

*Линия тока* – это кривая, проведенная внутри потока так, что в данный момент времени векторы скорости во всех точках этой кривой являются касательными к ней.

*Модуль расхода* есть расход при уклоне, равном единице.

*Напорное движение жидкости* – это такое движение жидкости, при котором поток со всех сторон ограничен твердыми стенками.

*Насадок* – это весьма короткий трубопровод, в котором потери напора по длине незначительны и в расчетах не учитываются.

*Неустановившееся движение жидкости* – это движение, при котором скорость и давление в каждой точке пространства изменяются с течением времени. *Плотность жидкости* – это масса жидкости, заключенная в единице объема.

*Поверхность равного давления, или поверхность уровня* – это поверхность, в каждой точке которой значение давления постоянно.

*Пьезометрический уклон* есть падение пьезометрической линии на единицу длины.

*Равномерное движение* – это движение, при котором живые сечения и скорости в соответственных точках одинаковы. В противном случае будем иметь *неравномерное движение жидкости*. Равномерное движение является *параллельноструйным*.

*Расход жидкости (объемный)* – это объем жидкости, проходящий в единицу времени через живое сечение потока. Различают также *весовой* и *массовый* расходы.

*Свободная поверхность* – это поверхность раздела жидкой и газообразной среды.

*Свободная струя (струя)* – это движение жидкости, при

котором поток не соприкасается с твердыми стенками.

*Смоченный периметр  $\chi$*  – это часть периметра живого сечения потока, где жидкость граничит с твердыми стенками.

*Средняя скорость потока* – это отношение объемного расхода потока к площади его живого сечения

*Удельный вес жидкости* – это вес единицы объема жидкости.

*Установившееся движение жидкости* – это движение, при котором скорость и давление в каждой точке пространства не изменяются с течением времени.

*Центр давления* – точка приложения силы давления.

*Число Рейнольдса* – это отношение сил инерции к силам вязкости. *Критическое число Рейнольдса* является основным критерием для определения режима движения жидкости (*ламинарный, турбулентный*).

*Эпюра* есть графическое изображение величины и направления какой-либо физической величины (эпюра скорости, эпюра гидростатического давления и т.д.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учебник для вузов / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – Москва: Стройиздат, 1987. – 414 с.
2. Альтшуль А.Д. Примеры расчетов по гидравлике: учеб. пособие для вузов / А.Д. Альтшуль [и др.]; под ред. А.Д. Альтшуля. – Москва: Стройиздат, 1977. – 255 с.
3. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
4. Боровков В.С. Сборник задач по гидравлике: учеб. пособие для вузов / В.С. Боровков [и др.]. – Москва, 2011. – 51 с.
5. Гиргидов А.Д. Инженерно-строительные задачи механики жидкости: учеб. пособие / А.Д. Гиргидов; Ленинградский политехн. ин-т. – Ленинград: ЛПИ им.М.И. Калинина, 1986. – 80 с.
6. Гиргидов А.Д. Техническая механика жидкости и газа (одномерные задачи): учеб. пособие / А.Д. Гиргидов; Ленинградский политехн. Ин-т. – Ленинград: ЛПИ им.М.И. Калинина, 1985. – 80 с.
7. Калищун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.И. Калищун [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1980. – 359 с.
8. Косарев С.Г. Общий курс гидравлики: метод. указ. Ч.1. / С.Г. Косарев; Читинский гос. техн. ун-т. – Чита: ЧитГТУ, 1999. – 32 с.
9. Косарев С.Г. Общий курс гидравлики: метод. указ. Ч.2. / С.Г. Косарев; Читинский гос. техн. ун-т. – Чита: ЧитГТУ, 1999. – 32с.
10. Косарев С.Г. Гидравлика: учеб. пособие. Ч.1. / С.Г. Косарев. – Чита: ЧитГТУ, 1996. – 132 с.
11. Палишкин Н.А. Гидравлика и сельскохозяйственное

водоснабжение: учебник для вузов / Н.А. Палишкин. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 351 с.

12. Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений и русел. – 3-е изд. доп. и перераб. – Москва: Трансжелдориздат, 1967.

13. Сборник задач по гидравлике: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Большакова. – 4-е изд. перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1979. – 336 с.

14. СНиП 2.06.03-85. Мелиоративные системы и сооружения. – Взамен СНиП II-52-74; утвержд. 1985-17-12. – Москва: ЦНИП Госстроя СССР, 1986. – 60 с.

15. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев; Ленинградский политехн. ин-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1971. – 552 с.

Приложение А

Таблица А 1 – Плотность  $\rho$  и удельный вес  $\gamma$  некоторых жидкостей при атмосферном давлении

Жидкость	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\gamma, \text{Н/м}^3$
Вода пресная	0	999,87	9809
	4	1000,00	9810
	20	998,23	9793
Ртуть	20	13547	132896
Нефть	15	750...900	7358...8829
Бензин	15	680...740	6671...7259
Керосин	15	790...820	7750...8044

Таблица А 2 – Коэффициент температурного расширения воды

Давление, $\text{Па} \cdot 10^5$	$\beta_T$ , при температуре, $^\circ\text{C}$				
	1...10	10...20	40...50	60...70	90...100
1	0,000014	0,000150	0,000422	0,000556	0,000719
10	0,000043	0,000165	0,000422	0,000548	0,000714

Таблица А 3 – Коэффициент кинематической вязкости воды при различных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
0	1,79	30	0,80
4	1,57	40	0,65
10	1,31	50	0,55
20	1,01	60	0,48

Приложение Б

Задача I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
b, м	8	3	5	4	6	5.5	6.5	7.5	8.5	4.5	3.5	7	5	6	4	5	4.5	5.5
h, м	4	1.5	3	2	3.5	2	3.3	5.2	5	2.8	1.3	4	2.7	3.2	3.5	2.79	2.2	2.33
m1	3	1.25	1	2	1.75	1.75	0.75	1.75	0	2.25	2.75	1.5	3	1	1.75	1	2.25	2.5
m2	3.25	1.25	1.5	1.75	1.5	1.25	1.25	2.25	0.25	2.5	2	2	2	2	1.5	0.75	2.5	3
i	0.0005	0.0002	0.0006	0.0009	0.00012	0.0006	0.00038	0.00057	0.00094	0.0015	0.0015	0.00027	0.00046	0.00075	0.0008	0.00092	0.00106	0.0011
характер поверхности	лессовый грунт	гравийный грунт	мощение крупным камнем	одиночное мощение	галечный грунт	каменная наброска	мощение рваным камнем	одернованная поверхность	скальный грунт	земляное русло	мелкий гравий	двойное мощение	лессовый грунт	габионная кладка	каменная наброска	скальный грунт	мелкий гравий	земляное русло
состояние поверхности	хорошее	обычное	оч. хорошее	хорошее	плохое	обычное	хорошее	плохое	оч. хорошее	обычное	хорошее	плохое	обычное	плохое	плохое	плохое	обычное	плохое

Задача I	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
b, м	5	3	3.5	4.7	5.5	4.7	4.5	5.3	4.2	3.72	8.5	6.2	5.2	9	7.3	4.1	5.8	8.2
h, м	2.9	1.92	1.82	2.05	2.41	1.78	2.08	3.12	3	2.74	3.25	3.01	3.8	4.2	2.52	1.89	3.12	3.3
m1	3.25	1.75	1.5	2.25	1.75	1.75	1.75	2	0.5	2.5	2.5	2.25	2.75	1.5	1.75	0	2.75	3.25
m2	3.25	1.5	1.75	1.75	2	2	1.25	2.75	0.75	3	3	2.5	3	2.5	2	0.75	2.5	3
i	0.00057	0.0037	0.00063	0.00079	0.0012	0.0016	0.0038	0.0057	0.0094	0.0018	0.0015	0.0027	0.0046	0.0075	0.008	0.0092	0.00106	0.0011
характер поверхности	лессовый грунт	гравийный грунт	мощение крупным камнем	одиночное мощение	галечный грунт	каменная наброска	мощение рваным камнем	одернованная поверхность	скальный грунт	земляное русло	мелкий гравий	двойное мощение	лессовый грунт	габионная кладка	каменная наброска	скальный грунт	мелкий гравий	земляное русло
состояние поверхности	обычное	оч. хорошее	хорошее	плохое	оч. хорошее	плохое	обычное	оч. хорошее	плохое	хорошее	обычное	хорошее	хорошее	обычное	хорошее	оч.хорошее	хорошее	обычное

Продолжение приложения Б

Задача II	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
b, м	8	3	5	4	6	5.5	6.5	7.5	8.5	4.5	3.5	7	5	6	6.5	7.5	8.5	4
h, м	4	1.5	3	2	3.5	2	3.3	5.2	5	2.8	1.3	4	2.7	3.2	2.7	3.19	4.07	1.91
m1	3	1.25	1	2	1.75	1.75	2.75	2.5	2.75	1.75	3.5	2.5	2	1.75	2.5	1.75	1	1.75
m2	2.5	1	0.75	2.5	1.5	1.25	3.25	2.5	3.25	2.5	2.75	2.25	1.75	2.25	3	2.25	1.25	2
Q, м³/с	250	185	149	231	318	418	198	275	210	152	344	401	283	367	178	212	153	113
характер поверхности	одернованная поверхность	габионная кладка	скальный грунт	гравийный грунт	каменная наброска	галечный грунт	каменная наброска	мощение крупным камнем	земляное русло	одиночное мощение	лессовый грунт	мощение рваным камнем	галечный грунт	двойное мощение	земляное русло	одиночное мощение	скальный грунт	гравийный грунт
состояние поверхности	хорошее	обычное	оч. хорошее	плохое	хорошее	плохое	обычное	плохое	обычное	хорошее	хорошее	хорошее	обычное	хорошее	хорошее	хорошее	плохое	обычное

Задача II	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
b, м	6	12	6.2	6	5.5	8.5	7.5	6.8	7	5	4	6	4.5	5	6	6.5	8	5
h, м	2	2.4	3.8	2	3.5	6.3	4.3	4.3	4.8	3.12	2.18	3.13	2.68	3.05	2.42	1.44	3.5	2.34
m1	2.25	1.25	1	2.25	2	1.75	2.5	2.25	2.75	2	3.25	2.75	2.25	2.5	2.75	2	1.5	1.75
m2	2.5	1.5	1.25	2.5	2.25	1.5	3	2.25	3.25	2.25	3	2.25	2	2.25	3	2.25	1.5	1.75
Q, м³/с	130	112	149	140	210	352	272	240	222	151	278	333	269	318	200	171	169	160
характер поверхности	одернованная поверхность	габионная кладка	скальный грунт	гравийный грунт	каменная наброска	галечный грунт	каменная наброска	мощение крупным камнем	земляное русло	одиночное мощение	лессовый грунт	мощение рваным камнем	галечный грунт	двойное мощение	земляное русло	одиночное мощение	скальный грунт	гравийный грунт
состояние поверхности	оч. хорошее	хорошее	плохое	обычное	плохое	плохое	обычное	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	обычное	хорошее	хорошее	хорошее	плохое	обычное

Продолжение приложения Б

Задача III а	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
b, м	4	5	6	7	8	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	4	5	6	7	4.5	6	3.5	3
m1	2	2.5	1.75	3	3.5	1.75	1.25	1	1.75	2	2.75	1.75	1.75	2.5	2.5	0.5	2.75	2.25
m2	2.5	2.5	1.5	2.5	3.5	2.25	1	0.75	1.25	1.75	3.25	2.25	2.5	2.25	2.25	0.75	3	2.5
i	0.009	0.0057	0.006	0.0094	0.0038	0.002	0.009	0.005	0.009	0.0015	0.0015	0.0094	0.006	0.0075	0.009	0.0062	0.0085	0.007
Q, м³/с	282	179	319	438	262	399	428	401	249	302	215	271	355	341	310	350	212	196
характер поверхности	гравийный грунт	мошение крупным камнем	каменная наброска	одрерованная поверхность	лессовый грунт	двойное мошение	габионная кладка	скальный грунт	галечный грунт	галечный грунт	земляное русло	мошение рваным камнем	одиночное мошение	мошение рваным камнем	мошение рваным камнем	скальный грунт	лессовый грунт	галечный грунт
состояние поверхности	плохое	обычное	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	обычное	оч. Хорошее	плохое	обычное	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	плохое	хорошее	обычное	хорошее

Задача III а	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
b, м	3.5	4	3	4	5.5	2	4.5	3.5	3	4.5	5	5	4	2	3.5	3.5	4	3.5
m1	0.5	2.25	2.25	1.5	1.75	2	2.5	2	3	2	2.25	0	2.75	1	1.75	2.25	2.75	2
m2	0.75	2.5	2.75	1	2	2.25	3	2	3.25	2.5	2	0.5	3	0	2	2.25	3	2.75
i	0.0056	0.0062	0.0079	0.006	0.0058	0.007	0.0032	0.0024	0.0036	0.0074	0.0035	0.0065	0.0009	0.0101	0.0055	0.0055	0.0034	0.0051
Q, м³/с	300	270	192	190	285	92	111	185	261	167	340	200	120	94	153	280	300	200
характер поверхности	скальный грунт	одиночное мошение	гравийный грунт	габионная кладка	каменная наброска	галечный грунт	земляное русло	двойное мошение	лессовый грунт	мошение рваным камнем	галечный грунт	скальный грунт	лессовый грунт	скальный грунт	мошение рваным камнем	мошение рваным камнем	одрерованная поверхность	мошение крупным камнем
состояние поверхности	хорошее	плохое	оч.хорошее	плохое	обычное	хорошее	плохое	обычное	хорошее	обычное	хорошее	оч.хорошее	обычное	обычное	хорошее	обычное	оч.хорошее	плохое

Продолжение приложения Б

Задача III б	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h, м	3.71	3.42	3.62	2.85	2.59	2.38	3.14	2.91	2.07	2.28	2.56	2.47	2.72	3.48	1.85	1.55	2.02	2.3
m1	1	3	1.75	2.5	2.5	1.25	1.75	2	2	1.75	1.75	3.5	2.75	1.75	2.5	2.5	3	0.5
m2	0.75	2.5	2.5	2.5	2.25	1	1.25	2.5	1.75	2.25	1.5	3.5	3.25	2.25	2.75	2.75	2.5	0.25
i	0.005	0.0094	0.006	0.0057	0.0075	0.0089	0.0093	0.009	0.0015	0.002	0.006	0.003	0.0015	0.0094	0.0055	0.0079	0.0077	0.0068
Q, м³/с	301	338	255	179	341	218	249	282	302	199	219	262	215	171	189	80	175	131
характер поверхности	скальный грунт	одернованная поверхность	одиночное мощение	мощение крупным камнем	мощение рваным камнем	габионная кладка	галечный грунт	гравийный грунт	галечный грунт	двойное мощение	каменная наброска	лессовый грунт	земляное русло	мощение рваным камнем	лессовый грунт	мощение рваным камнем	галечный грунт	скальный грунт
состояние поверхности	оч. хорошее	хорошее	хорошее	обычное	хорошее	обычное	плохое	плохое	обычное	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	хорошее	плохое	оч. хорошее

Задача III б	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
h, м	2.42	1.18	2.38	2.74	3.52	2.5	3	2.5	2.1	3	2.7	3.5	2.4	1.72	1.92	2.15	4.3	2.18
m1	2.25	2.5	1.75	3	3.25	2	1.25	0	3	2.5	1.75	2.5	3.5	1.75	2.25	2	0.5	2.75
m2	2.5	2.5	1.5	3.5	3.5	2.25	1.75	0.75	3.25	2.25	2.5	2.25	3.25	1.25	2.75	1.75	0.75	3
i	0.0057	0.009	0.0032	0.0054	0.0078	0.0082	0.0079	0.0065	0.0041	0.0077	0.006	0.0075	0.0085	0.0093	0.0074	0.0045	0.0069	0.0089
Q, м³/с	219	79	170	113	230	220	280	153	215	310	355	450	127	140	196	302	350	212
характер поверхности	гравийный грунт	мощение крупным камнем	каменная наброска	одернованная поверхность	лессовый грунт	двойное мощение	габионная кладка	скальный грунт	земляное русло	мощение рваным камнем	одиночное мощение	мощение рваным камнем	одернованная поверхность	галечный грунт	галечный грунт	галечный грунт	скальный грунт	лессовый грунт
состояние поверхности	обычное	хорошее	хорошее	обычное	обычное	плохое	хорошее	плохое	плохое	обычное	плохое	хорошее	оч.хорошее	плохое	хорошее	обычное	хорошее	обычное

Продолжение приложения Б

Задача IV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
m	2.75	0.25	2.5	2	2	1.5	2.5	2.5	2.25	3.25	0.75	2	2.5	3.5	2	2.75	3	2
i	0.0075	0.0015	0.0068	0.0057	0.009	0.005	0.0055	0.006	0.0058	0.007	0.0079	0.0078	0.002	0.0082	0.0093	0.0074	0.0045	0.0069
Q, м <sup>3</sup> /с	242	315	182	79	164	223	92	302	155	151	213	183	172	307	202	170	168	134
характер поверхности	земляное русло	скальный грунт	галечный грунт	мощение рваным камнем	габионная кладка	мощение крупным камнем	гравийный грунт	лессовый грунт	одиночное мощение	одернованная поверхность	скальный грунт	мелкий гравий	каменная наброска	земляное русло	мощение крупным камнем	гравийный грунт	галечный грунт	каменная наброска
состояние поверхности	хорошее	оч. хорошее	оч.хорошее	плохое	обычное	оч. хорошее	плохое	плохое	плохое	оч.хорошее	хорошее	хорошее	обычное	хорошее	оч.хорошее	обычное	плохое	обычное

Задача IV	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
m	3	0	2.75	2.5	2.25	3	2.5	2.75	2	2.5	0.25	2.25	2.25	3.25	2	3	2.5	2.25
i	0.007	0.005	0.006	0.0087	0.0093	0.0055	0.0068	0.0061	0.0085	0.0057	0.0089	0.007	0.0027	0.0042	0.009	0.0071	0.0058	0.0096
Q, м <sup>3</sup> /с	180	200	250	168	310	115	278	325	172	215	200	222	136	270	169	177	111	222
характер поверхности	земляное русло	скальный грунт	галечный грунт	мощение рваным камнем	габионная кладка	мощение крупным камнем	гравийный грунт	лессовый грунт	одиночное мощение	одернованная поверхность	скальный грунт	мелкий гравий	каменная наброска	земляное русло	мощение крупным камнем	гравийный грунт	галечный грунт	каменная наброска
состояние поверхности	обычное	хорошее	плохое	обычное	хорошее	обычное	оч.хорошее	оч.хорошее	обычное	хорошее	плохое	обычное	плохое	хорошее	хорошее	плохое	оч.хорошее	плохое

Приложение В

Таблица В 1 – Коэффициенты гидравлической шероховатости  $n$  к формулам Павловского

Характер поверхности русла	Состояние поверхности			
	очень хорошее	хорошее	обычное	плохое
<b>Канавы и искусственные русла</b>				
Земляные канавы правильной формы в плотном лёссе или мелком гравии с илистым слоем	-	0,017	0,018	-
То же в лёссе или гравии с илистой пленкой	0,017	0,020	0,020	0,025
То же с замощенным контуром, мощение обычным булыжным камнем одиночное или двойное	-	0,020	0,022	0,027
То же мощение из крупного камня	0,017	0,022	0,023	0,030
То же искусственная габионная кладка	-	0,025	0,027	0,029
Канавы в галечнике	0,025	0,027	0,030	0,033
Земляные канавы неправильной формы (с обвалами) заросшие, каменная наброска или мощение из рваного камня	-	0,027	0,030 0,033	0,035
Канавы с земляным дном и одернованными или сложенными сухой кладкой откосами	0,028	0,030	0,33	0,035
Канавы с одернованными откосами и мощеным дном или грубо высеченным в скале (неправильной формы) .	0,025	0,030	0,035	0,040

Примечания. 1. Характеристики состояния поверхности относятся как к обработке материала поверхности, так и к состоянию поверхности. Так, например, для деревянного лотка состояние: очень хорошее характеризует строганные доски, обычное - нестроганные доски, плохое - нестроганные доски со щелями, выступами, загрязненные при частично занесенном наносами лотке.

Таблица В 2 – Коэффициенты заложения  $m$  откосов каналов и дамб

Грунт	Коэффициенты заложения $m$ откосов каналов в зависимости от грунта, слагающего русло	
	Откосы	
	подводные	надводные
Скальный	0,00 - 0,50	0,00 - 0,25
Полускальный	0,50 - 1,00	0,50
Галечник и гравий с песком	1,25 - 1,50	1,00
Глина, суглинок тяжелый и средний, торф мощностью пласта до 0,7 м, подстилаемый этими грунтами	1,00 - 1,50	0,50 - 1,00
Суглинок легкий, супесь или торф мощностью пласта до 0,7 м, подстилаемый этими грунтами	1,25 - 2,00	1,00 - 1,50
Песок мелкий или торф мощностью пласта до 0,7 м, подстилаемый этими грунтами	1,50 - 2,50	1,00 - 2,00
Песок пылеватый	3,00 - 3,50	2,50
Торф со степенью разложения до 50 %	1,25 - 1,75	1,25
Торф со степенью разложения более 50 %	1,50 - 2,00	1,50

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. Основные физические свойства жидкости.....	6
2. Гидростатика.....	13
2.1. Гидростатическое давление в точке.....	13
2.2. Гидравлические машины гидростатического действия.....	19
2.3. Давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности.....	25
2.3.1. Давление жидкости на плоские поверхности. Центр давления. Эпюра давления.....	25
2.3.2. Давление жидкости на криволинейные поверхности.....	34
2.3.3. Плавание тел в жидкости. Закон Архимеда.....	42
3. Гидродинамика.....	48
3.1. Виды движения жидкости. Гидравлические элементы потока.....	48
3.2. Уравнения движения жидкости.....	49
3.2.1. Уравнение неразрывности потока.....	49
3.2.2. Уравнение Бернулли для потока жидкости.....	51
4. Режимы движения жидкости. Гидравлические сопротивления.....	61
4.1. Виды сопротивлений.....	65
5. Расчет трубопроводов.....	72
5.1. Основные задачи расчета трубопроводов.....	72
5.2. Расчет коротких трубопроводов.....	73
5.3. Расчет длинных трубопроводов.....	74
5.4. Гидравлический удар в трубах.....	77
6. Истечение жидкости из отверстий и насадков.....	88
6.1. Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре.....	88
6.2. Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при переменном напоре.....	90
6.3. Истечение жидкости через насадки.....	92
7. Движение воды в каналах и естественных руслах.....	99
7.1. Равномерное безнапорное движение воды в открытых руслах.....	99
8. Водосливы.....	108
8.1. Терминология и классификация водосливов.....	108
8.2. Прямые (лобовые) водосливы с тонкой стенкой.....	111

8.3. Прямые прямоугольные водосливы с широким порогом.....	114
Заключение.....	123
Глоссарий.....	124
Библиографический список.....	128
Приложения.....	130

*Учебное издание*

***Маслова Алла Владимировна***

***Босов Максим Анатольевич***

***Практикум по гидравлике***

*Учебное пособие*

Лицензия ЛР

Редактор

Сдано в производство

Форм. бум. 60 x 84 1/16

Печать офсетная

литературная

Уч.-изд. л. 6,0

Тираж 100 экз.

Бум. тип № 2

Гарнитура

Усл. печ. л. 5,5

Заказ №

---

Забайкальский государственный университет

672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30

---

РИК ЗабГУ

672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30

[www.rik@zabgu.ru](mailto:www.rik@zabgu.ru)