Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Е. С. Данильчик

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

*Рекомендовано
учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования
в качестве учебно-методического пособия
по курсовым и практическим работам
для студентов учреждений высшего образования
по специальности 7-07-0712-02
«Теплоэнергетика и теплотехника»*

Минск 2025

УДК [532.5+533](075.8)
ББК 22.253я73
Д18

Рецензенты:
кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета (доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой *И. В. Качанов*);
кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией турбулентности ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси» *А. Д. Чорный*

Данильчик, Е. С.
Д18 Механика жидкости и газа : учеб.-метод. пособие по курсовым и практическим работам для студентов специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника» / Е. С. Данильчик. – Минск : БГТУ, 2025. – 92 с.
ISBN 978-985-897-312-4.

В учебно-методическом пособии рассмотрены теоретические сведения, основные понятия и определения, приведены расчетные формулы, рисунки и схемы, а также отражены методики расчета трех контрольных задач для выполнения курсовой работы «Гидравлический расчет простой и сложной трубопроводных систем». Кроме того, в пособии также представлены задачи для практических занятий с примерами их решения.

Издание предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Теплоэнергетика и теплотехника», а также может быть использовано при освоении дисциплин «Гидравлика и гидропривод», «Гидравлика, гидромашины и гидропривод» и «Гидромеханика, гидро- и пневмотехника».

УДК [532.5+533](075.8)
ББК 22.253я73

ISBN 978-985-897-312-4

ПРЕДИСЛОВИЕ

Механика жидкости и газа – наука, рассматривающая основные законы движения и равновесия жидкостей (как капельных, так и газообразных), а также их силовое взаимодействие с твердыми телами. Это одна из наук, составляющих фундамент инженерных знаний, задачей которой является не только изучение самих законов, но и их применение для решения многих технических вопросов в области теплогазоснабжения, вентиляции и санитарной техники. Расчет всевозможных трубопроводов (воздухопроводы, водопроводы, газопроводы, паропроводы и т. д.), конструирование гидравлических и воздуходувных машин (насосы, компрессоры, вентиляторы и т. д.), проектирование котельных агрегатов, печных и сушильных установок, воздухо- и газоочистных аппаратов, теплообменных аппаратов, расчет многих отопительных и вентиляционных устройств требуют четкого понимания законов механики жидкости и газа.

Учебно-методическое пособие содержит теоретические и расчетные сведения, контрольные задачи для выполнения курсовой работы по дисциплине «Механика жидкости и газа» и методику расчета контрольных задач, а также задачи для практических занятий с примерами их решения.

Целью курсовой работы «Гидравлический расчет простой и сложной трубопроводных систем» является изучение методов расчета простой и сложной трубопроводных систем для приобретения у студентов навыков применения теоретических знаний в решении конкретных практических задач.

Студентам при выполнении различных контрольных задач в зависимости от варианта предлагается:

1) *контрольная задача № 1 (расчет простого трубопровода)*: определить расход воды, проходящей по трубе переменного

сечения, и давление в сечении *X–X*; рассчитать трубопровод на прочность по максимальному давлению в сети и на стенки резервуара(ов);

2) *контрольная задача № 2 (расчет простого трубопровода)*: найти скорости движения воды и потери напора (по длине и местные) на каждом участке трубопровода; установить величину напора в резервуаре; построить напорную и пьезометрическую линии (диаграмму Бернулли);

3) *контрольная задача № 3 (расчет сложного трубопровода)*: определить расход питающего резервуара.

Номера вариантов заданий выдаются по усмотрению преподавателя и охватывают такие разделы, как «Гидродинамика» и «Механика жидкости и газа в приложениях», а также частично раздел «Гидростатика» рассматриваемого курса.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа выполняется строго в соответствии с Положением о курсовом проекте (курсовой работе) учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» (в редакции 2024 г.) и состоит из пояснительной записки и графической части (для контрольной задачи № 2 приводится схема короткого трубопровода с линией полной энергии и пьезометрической линией). Курсовая работа выполняется на стандартных листах бумаги формата А4 (210×297 мм) с текстом на одной стороне и имеет поля для замечаний преподавателя.

Для выполнения курсовой работы каждый студент получает индивидуальное задание, в котором указаны сроки защиты, исходные данные, содержание пояснительной записки, перечень графического и иллюстрационного материала, календарный график работ. Задание на курсовую работу подписывается руководителем, студентом и утверждается заведующим кафедрой.

Пояснительная записка курсовой работы включает структурные элементы, расположенные в приведенной последовательности [1]:

– титульный лист;
– задание на курсовую работу;
– реферат;
– оглавление;
– введение;
– основная часть;
– заключение;
– список использованных источников;
– приложения (при необходимости).

Текст должен быть напечатан на принтере (через одинарный межстрочный интервал шрифтом Times New Roman размером 14 пт). Размеры полей, мм: правое – 10; левое – 23; нижнее – 15; верхнее – 20.

В формулах и уравнениях размер основных символов соответствует размеру основного текста.

Размер шрифтов надписей на рисунках, диаграммах, в подрисуночных подписях и в таблицах должен быть равным 12 пт.

Каждый раздел (3 задачи, 3 раздела) и подраздел должен иметь заголовок. Заголовки разделов и подразделов записываются строчными буквами (кроме первой прописной) с абзацного отступа, равного 12,5 мм (так же, как и все абзацы в тексте пояснительной записки). Перенос слов в заголовках не допускается. Точку в конце заголовка не ставят.

Заголовки разделов и подразделов выполняются шрифтом основного текста и выделяются полужирным шрифтом. Заголовки разделов должны быть отделены от текста интервалом в 18 пт, заголовки подразделов и пунктов: сверху – интервалом в 18 пт, снизу – интервалом в 12 пт. Соседние, последовательно записанные заголовки раздела и подраздела следует отделять друг от друга интервалом в 12 пт, а подраздела и пункта – интервалом в 6 пт.

Нумерация страниц сквозная. Номер страницы проставляют над текстом в правом верхнем углу страницы на расстоянии (10 ± 2) мм от ее границ. Исчисление страниц пояснительной записки начинают с титульного листа, номер страницы на котором не ставят.

Все разделы и подразделы должны быть пронумерованы арабскими цифрами, в конце их номеров точка не ставится. Подразделы должны быть пронумерованы в пределах раздела. Номер состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой (например, 3.1 (первый подраздел третьего раздела)).

Структурным элементам «Титульный лист», «Задание на курсовую работу», «Реферат», «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Список использованных источников», «Приложение» номера не присваиваются. Их необходимо начинать с нового листа.

Все расчеты выполняются только в системе СИ, за исключением использования формул из первоисточников, в которых употреблены внесистемные единицы. Результаты расчетов по формулам с внесистемными единицами должны быть переведены в единицы системы СИ.

Все формулы и уравнения нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией по тексту или в пределах раздела. В случае нумерации в пределах раздела номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой. Номер формулы указывают в круглых скобках с правой стороны листа на уровне формулы. Одну формулу обозначают – (1). В формулах и уравнениях в качестве символов (условных обозначений) величин следует применять обозначения, установленные соответствующими стандартами, а при их отсутствии – принятые в отрасли. Пояснения каждого символа с указанием единицы измерения даются под формулой с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него и записываться без абзацного отступа. Далее приводятся числовые значения всех величин. Формула отделяется от текста отступом в один межстрочный интервал (14 пт). Все используемые формулы, а также подставляемые в них величины и коэффициенты должны снабжаться ссылками на источники.

Расчетные формулы и уравнения записываются в общем виде, затем расшифровываются символы, входящие в эти формулы (если они ранее в тексте не были расшифрованы), далее приводятся числовые значения всех величин и коэффициентов в том порядке, в каком они располагаются в формуле, после этого записывается окончательный результат с указанием единиц измерения. Промежуточные вычисления, сокращения и зачеркивания не допускаются.

Например. Расход воды Q, м^3/с, можно определить с помощью уравнения неразрывности:

$$Q = \upsilon S, \tag{1}$$

где υ – средняя скорость движения воды, м/с;

S – площадь живого сечения, м^2.

$$Q = 5 \cdot 240 = 1200 \text{ м}^2.$$

Таблицу следует располагать непосредственно после текста, где на нее ссылаются впервые, или на следующей странице. На все таблицы должны быть даны ссылки. При ссылке необходимо писать слово «таблица» и указывать ее номер (например, «по данным, приведенным в таблице 3.1»).

Таблицы, за исключением таблиц приложения, нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией по тексту или в пределах раздела. При нумерации в пределах раздела номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы в данном разделе, разделенных точкой.

Таблица отделяется от текста отступом 14 пт. Название таблицы (14 пт) от самой таблицы не отделяется. Перенос слов в названии таблицы не допускается.

Иллюстрации следует размещать непосредственно после текста, где они упоминаются впервые, или на следующей странице. Рисунки должны располагаться симметрично тексту с выравниванием по центру. Иллюстрации отделяются от текста отступом 14 пт.

На все иллюстрации должны быть даны ссылки. При ссылке необходимо писать слово «рисунок» и его номер (например, «в соответствии с рисунком 5.1»).

Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложения, нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией по тексту или в пределах раздела. При нумерации в пределах раздела номер рисунка состоит из номера раздела и порядкового номера рисунка в данном разделе, разделенных точкой.

Обозначение позиций на рисунке, кривых на графиках и прочих элементов выполняется цифрами с размером шрифта 12 пт, курсивом.

При использовании справочных материалов и методических пособий по тексту курсовой работы должны даваться ссылки на них (обозначаются квадратными скобками, например [2]). Далее согласно порядку их появления в тексте формируется «Список использованных источников».

Раздел 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ТРУБОПРОВОДОВ И ИХ РАСЧЕТ

Трубопроводы, предназначенные для перемещения различных жидкостей и газов, бывают короткие и длинные.

К ***коротким*** относят трубопроводы небольшой длины, в которых местные потери составляют более 5–10% от потерь напора по длине.

Примерами таких трубопроводов могут служить всасывающие трубопроводы насосных установок, системы смазки и охлаждения двигателей, гидролинии гидроприводов, обвязки химических установок и т. д.

К ***длинным*** относят трубопроводы, в которых потери по длине настолько превышают местные потери напора, что последними можно пренебречь (без ущерба для точности расчета) или принять ориентировочно равными 5–10% от потерь напора по длине (городские водопроводные и отопительные сети, внутризаводские магистральные трубопроводы, трубопроводы ирригационных систем, магистральные газопроводы, нефтепроводы, маслопроводы и т. д.).

Трубопроводы по конструкции можно разделить на жесткие и гибкие. ***Жесткие трубопроводы*** в основном изготавливают из стальных бесшовных холоднотянутых труб или из труб цветных металлов (меди или алюминия). Стальные трубы применяют для всех значений давлений и расходов, встречающихся в промышленном гидроприводе. Медные трубы используют при $p < 16$ МПа. По сравнению со стальными они тяжелее, дороже и менее прочные. Кроме того, они интенсифицируют процесс окисления минеральных рабочих жидкостей. Достоинство медных труб – их гибкость, что обеспечивает монтаж сложных по конструкции схем.

Трубы из сплавов алюминия отличаются большой легкостью, гибкостью и удобством монтажа. Их применяют при давлениях до 20 МПа в гидросистемах с ограниченной массой, а также в сливных и всасывающих гидролиниях.

Гибкие трубопроводы предназначены для соединения элементов гидропривода, которые расположены на подвижных частях машин и могут перемещаться друг относительно друга. В качестве гибкого трубопровода в основном используют резинотканевые шланги (рукава высокого давления) и металлические рукава.

Рукав высокого давления имеет внутренний резиновый слой, затем хлопчатобумажный слой, металлическую оплетку и снова толстый резиновый слой, предохраняющий рукав от повреждения. Рукава высокого давления характеризуются следующими недостатками: малая долговечность (1,5–3 года), снижение общей жесткости системы, неудобство эксплуатации из-за подвижности при изменении давления. Поэтому при проектировании гидропривода следует по возможности не применять рукава высокого давления.

Металлические рукава имеют гофрированную внутреннюю трубку, выполненную из бронзовой или нержавеющей стальной ленты, и наружную проволочную оплетку. Для повышения виброустойчивости наружную поверхность перед оплеткой заполняют губчатой резиной. По сравнению с резинотканевыми шлангами металлические рукава обладают большей гибкостью, а при больших диаметрах имеют меньший вес. Их применяют для давлений до 30 МПа, в специфических условиях эксплуатации гидросистем (в контакте с агрессивными рабочими жидкостями, при больших давлениях и расходах).

Движение жидкости в трубопроводе происходит благодаря разности давлений (напоров) в начальном и конечном сечениях. Эта разность может быть создана за счет работы насоса, разности уровней жидкости либо под действием давления газа. В основном используют первые два случая.

В зависимости от вида движения по ним жидкостей трубопроводы можно разделить на две категории: ***напорные*** и ***безнапорные*** (самотечные) ***трубопроводы***.

Также трубопроводы различают по виду сечения: трубопроводы круглого и некруглого сечения (прямоугольные, квадратные и другого профиля). Исходя из материала, из которого трубопроводы изготовлены, бывают трубопроводы стальные, бетонные, пластмассовые и др.

В зависимости от конфигурации все трубопроводы подразделяют на простые и сложные (рис. 1.1).

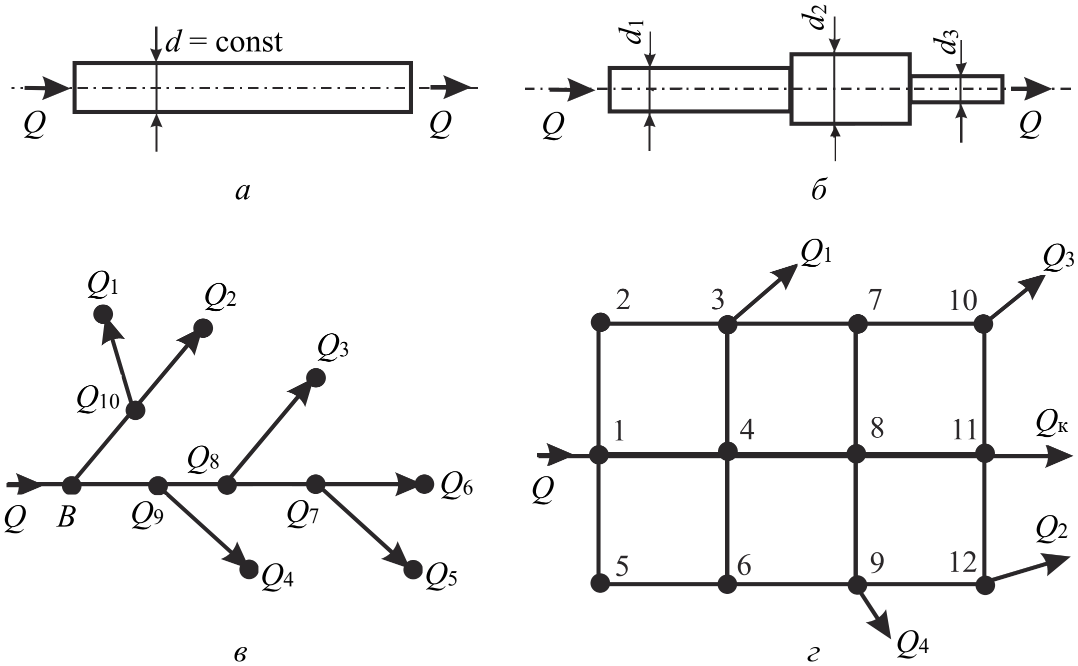


Рис. 1.1. Виды трубопроводов в зависимости от конфигурации:
а, *б* – простые; *в* – тупиковые; *г* – кольцевые

К ***простым*** (рис. 1.1, *а* и *б*) относят трубопроводы, состоящие из труб одного или нескольких диаметров и не имеющие по пути ответвления, т. е. с постоянным расходом вдоль всего трубопровода. ***Сложный трубопровод*** состоит из магистрали с ответвлениями в различных точках и имеет переменный расход по длине. Сложные трубопроводы подразделяют на тупиковые (рис. 1.1, *в*) и кольцевые (рис. 1.1, *г*) [2].

1.1. Расчет простого короткого трубопровода с постоянным диаметром

Запишем уравнение Бернулли для простого трубопровода (рис. 1.2) постоянного сечения (d = const), произвольно расположенного в пространстве и содержащего ряд местных гидравлических сопротивлений (вентиль, фильтр и обратный клапан):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \upsilon_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \upsilon_2^2}{2g} \sum h_{\text{п}1-2}, \qquad (1.1)$$

где $z_2 - z_1 = H_{\text{г}}$ – геометрический напор, т. е. высота, на которую необходимо перемещать жидкость, м (здесь z_2, z_1 – соответственно геодезические отметки уровня жидкости в начальном и конечном сечениях трубопровода или в приемном и питающем резервуарах, м); $p_2 - p_1$ – разность давлений в начальном и конечном сечениях трубопровода или на поверхностях жидкости в приемном и питающем резервуарах, Па; ρ – плотность воды, принимаемая 1000 кг/м^3; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с^2; α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса при соответствующих скоростях движения воды; υ_1, υ_2 – скорости движения воды соответственно в начальном и конечном сечениях трубопровода или в приемном и питающем резервуарах, м/с; $\sum h_{\text{п}1-2}$ – суммарные потери напора трубопровода на участке *1–2*, м.

Таким образом, $z_2 - z_1 = H_{\text{г}}$ – геометрическая высота подъема жидкости, м; $p_2 / \rho g$ – конечный напор (необходимый напор в конечном сечении), м. Эти две составляющие не зависят от расхода жидкости Q, и их можно обозначить как статический напор $H_{\text{ст}} = H_{\text{г}} + p_2 / \rho g$. Скорость в трубопроводе постоянного диаметра одинакова: $\upsilon_1 = \upsilon_2$, соответственно, скоростная составляющая в уравнении Бернулли убирается: $\alpha_1 \upsilon_1^2 / 2g$ и $\alpha_2 \upsilon_2^2 / 2g$.

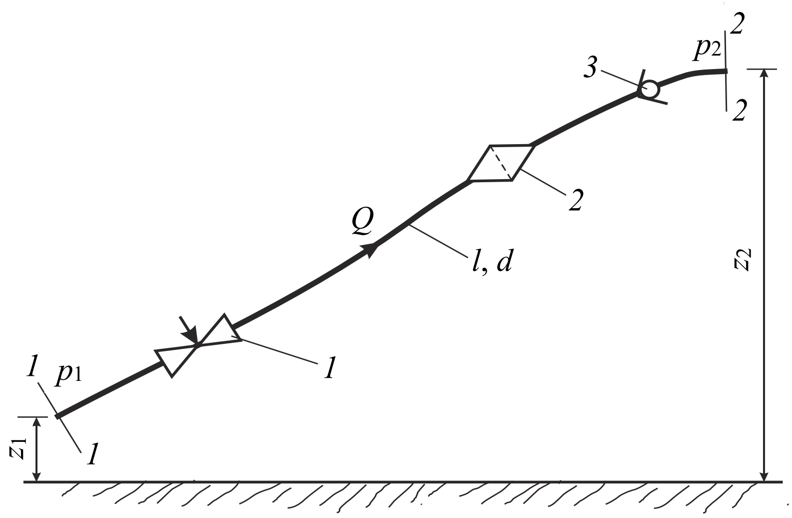


Рис. 1.2. Простой трубопровод:
1 – вентиль; *2* – фильтр; *3* – обратный клапан

Тогда расчетное уравнение потребного напора в начальном сечении ($p_2 / \rho g = p_п / \rho g = H_п$) имеет вид

$$H_п = \frac{p_1}{\rho g} = z_2 - z_1 + \frac{p_2}{\rho g} + \sum h_{п1-2} = H_{ст} + \sum h_{п1-2}. \qquad (1.2)$$

Величину $H_п$, если она не задана, называют ***потребный напор***, а если задана, то ***располагаемый напор***.

Потребный напор необходим для преодоления геометрической высоты подъема жидкости $H_г$, для преодоления потерь в трубопроводе $\sum h_{п1-2}$ и на создание напора в конце трубопровода $p_2 / \rho g$.

Потери напора составляют сумму потерь по длине и на местные сопротивления:

$$\sum h_{п1-2} = h_{дл} + h_м = \lambda \frac{l}{d} \frac{\upsilon^2}{2g} + \sum \zeta \frac{\upsilon^2}{2g} = \lambda \frac{(l + l_{экв})}{d} \frac{\upsilon^2}{2g}, \qquad (1.3)$$

где $h_{дл}$ – потери напора по длине, м; $h_м$ – местные потери напора, м; λ – коэффициент гидравлического трения; l – длина участка трубы, м; d – диаметр трубы, м; υ – средняя скорость движения жидкости, м/с; ζ – коэффициент местных сопротивлений; $l_{экв} = \frac{d}{\lambda} \sum \zeta$ – длина трубопровода, на которой потери напора по длине равны потерям напора в местных сопротивлениях данного трубопровода, м.

Потеря напора $\sum h_{п1-2}$ зависит от расхода и режима движения жидкости, ее можно выразить по формуле Лейбензона:

$$\sum h_{п1-2} = \frac{B \nu^m (l + l_{экв}) Q^{2-m}}{d^{5-m}}. \qquad (1.4)$$

Для ламинарного режима при подсчете местных сопротивлений через эквивалентную длину, согласно формуле Пуазеля:

$$\sum h_{п1-2} = \frac{128 \nu (l + l_{экв}) Q}{\pi g d^4} = \frac{B \nu (l + l_{экв}) Q}{d^4}. \qquad (1.5)$$

Следовательно, $B = \frac{128}{\pi g}$, $m = 1$, т. е. $\sum h_{п1-2} = f\left(Q^1\right)$.

Для зоны гидравлически гладких труб турбулентного режима $B = \frac{0{,}241}{g}$, $m = 0{,}25$, т. е. $\sum h_{п1-2} = f\left(Q^{1{,}75}\right)$.

Для зоны квадратичного сопротивления турбулентного режима $B = \dfrac{0,289\varepsilon^{0,25}}{g}$, $m = 0$, т. е. $\sum h_{\text{п}1-2} = f\left(Q^2\right)$.

В зоне смешанного сопротивления потери напора определяются суммированием двух степенных функций от расхода:

$$\sum h_{\text{п}1-2} = \frac{B_1 \nu^{m_1}\left(l + l_{\text{экв}}\right)Q^{2-m_1}}{d^{5-m_1}} + \frac{B_2 \nu^{m_2}\left(l + l_{\text{экв}}\right)Q^{2-m_2}}{d^{5-m_2}}, \qquad (1.6)$$

где $B_1 = \dfrac{0,089\varepsilon^{0,25}}{g}$, $m_1 = 0$, $B_2 = \dfrac{68}{\pi g \varepsilon^{0,75}}$, $m_2 = 1$.

Используя основное расчетное уравнение и эти зависимости, можно решить следующие основные задачи по расчету простых трубопроводов.

Задача № 1.1. Известны перекачиваемая жидкость (ее плотность ρ и кинематическая вязкость ν), давление p_2 в конечном сечении, расход жидкости Q, материал трубопровода и качество поверхности трубы (абсолютная эквивалентная шероховатость $\Delta_э$), размеры трубопровода (l, d) и виды местных сопротивлений. Найти потребный напор $H_п$.

Решение. По расходу жидкости Q и диаметру трубопровода d рассчитаем скорость движения υ; по υ, d и ν определим число Рейнольдса Re и установим режим движения. Затем по соответствующим формулам оценим местные сопротивления ($l_{экв} / d$ или ζ); по Re и шероховатости вычислим коэффициент трения трубы λ; по расчетному уравнению найдем $H_п$.

Задача № 1.2. Известны все параметры задачи № 1.1, кроме Q, но дополнительно задан располагаемый напор $H_{расп}$. Определить расход жидкости Q.

Решение. Задача решается графоаналитическим методом в следующей последовательности. Зададим произвольные значения расходов жидкости (Q_1–Q_i) и для каждого из них, решая задачу № 1.1, вычислим значения $H_п$. По значениям $H_п$ и Q построим график зависимости $H_п = f(Q)$, на котором по заданному значению $H_{расп}$ найдем искомый расход жидкости Q (рис. 1.3).

Задача № 1.3. Заданы расход жидкости Q, располагаемый напор $H_{расп}$, свойства жидкости и все размеры трубопровода, кроме диаметра. Найти диаметр d.

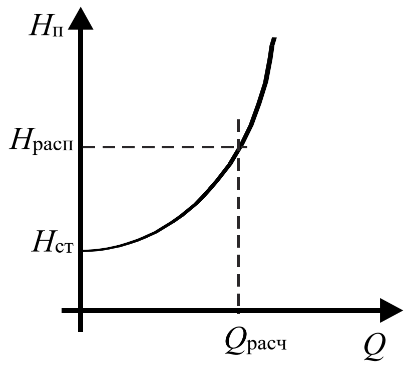


Рис. 1.3. К задаче № 1.2

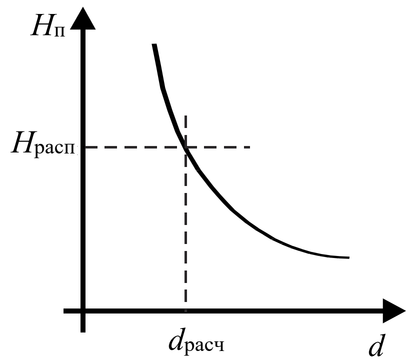


Рис. 1.4. К задаче № 1.3

Решение. Задача также решается графоаналитическим способом. Зададим значения стандартных диаметров (d_1–d_i) и для каждого из них, решая задачу № 1.1, рассчитаем потребный напор. По полученным значениям построим график зависимости $H_п = f(Q)$, на котором по заданному значению $H_{расп}$ найдем искомый диаметр d и примем ближайший больший стандартный (рис. 1.4).

1.2. Последовательное соединение простых трубопроводов

Последовательное соединение трубопроводов представляет собой трубопровод, состоящий из нескольких труб различной длины, разного диаметра и содержащий различные местные сопротивления. Очевидно, что при подаче жидкости по такому трубопроводу **расход Q во всех последовательно соединенных участках будет один и тот же, а полная потеря напора будет равна сумме потерь напора во всех последовательно соединенных трубах** (в нашем случае в трубах *1–3*), т. е. имеем следующие основные расчетные соотношения (рис. 1.5):

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_i = \text{const}; \quad \sum h = \sum h_1 + \sum h_2 + \sum h_3 = \sum h_i. \qquad (1.7)$$

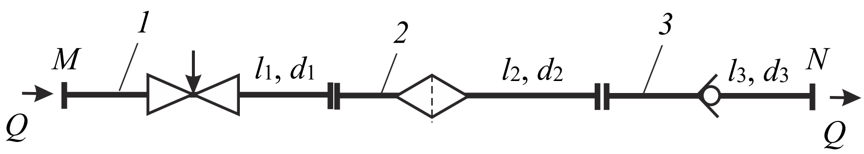


Рис. 1.5. Последовательное соединение трубопроводов *1–3*

Поскольку скорости υ_M и υ_N различны, то выражение потребного напора для всего участка M–N должно содержать разность скоростных напоров в конце и начале трубопровода:

$$H_\text{п} = z_N - z_M + \frac{\alpha_N \upsilon_N^2 - \alpha_M \upsilon_M^2}{2g} + \sum h_{M-N} + \frac{p_N}{\rho g}. \qquad (1.8)$$

Эти зависимости определяют правило построения характеристики всего последовательного соединения при известных характеристиках трубопроводов: необходимо проводить графическое сложение потерь напора во всех трубопроводах при одинаковых расходах (рис. 1.6).

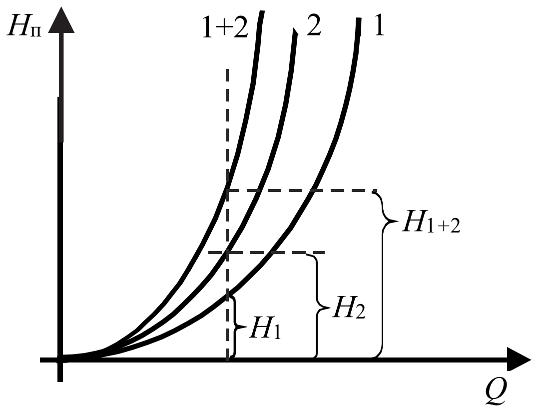


Рис. 1.6. Построение характеристики последовательного соединения трубопроводов

1.3. Параллельное соединение простых трубопроводов

При параллельном соединении простые трубопроводы имеют общее начало (точку M) и общее окончание (точку N) (рис. 1.7).

Для простоты рассмотрим эти трубопроводы, лежащими в горизонтальной плоскости, т. е. $z_1 = z_2 = z_3$. Напоры в начальном и конечном сечениях обозначим через H_M и H_N. Потери напора в каждом из трубопроводов можно выразить через напоры H_M и H_N:

$$\sum h_1 = H_M - H_N; \ \sum h_2 = H_M - H_N; \ \sum h_3 = H_M - H_N. \qquad (1.9)$$

Следовательно, **потери напора в параллельных трубопроводах равны между собой**:

$$\sum h_1 = \sum h_2 = \sum h_3 = \sum h_i = \text{const}. \qquad (1.10)$$

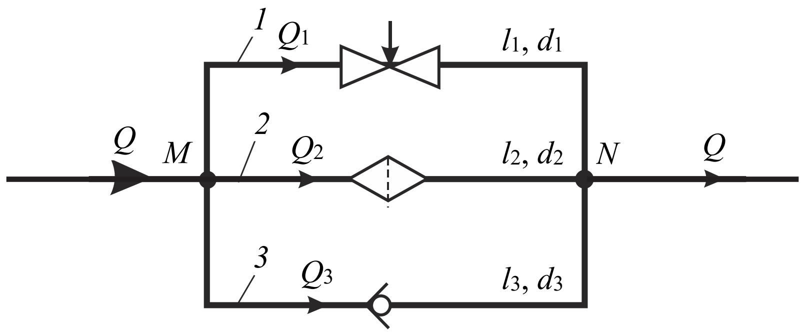


Рис. 1.7. Параллельное соединение трубопроводов *1–3*

Второе соотношение можно получить из предположения о постоянстве общего расхода жидкости:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sum Q_i. \tag{1.11}$$

Из этих выражений вытекает правило построения характеристики параллельного соединения трубопроводов: необходимо при одинаковых напорах складывать расходы через каждый трубопровод (рис. 1.8).

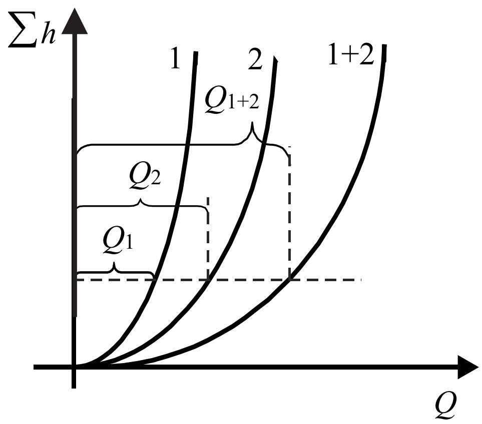


Рис. 1.8. Построение характеристики параллельного соединения трубопроводов

1.4. Разветвленное соединение простых трубопроводов

Разветвленное соединение представляет систему простых трубопроводов, имеющих одно общее начало или окончание (рис. 1.9, точка *M*).

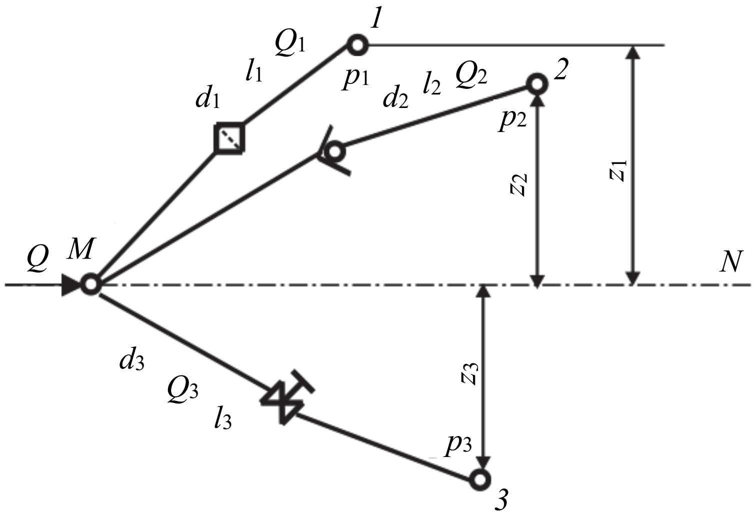


Рис. 1.9. Разветвленное соединение трубопроводов *1–3*

Определим связь между потребным напором $H_п = p / \rho g$ в точке M и расходами жидкости Q_1, Q_2, Q_3:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sum Q_i. \tag{1.12}$$

Потребный напор в точке M найдем, записав уравнение Бернулли для сечения M и для выходного сечения первого трубопровода (пренебрегая скоростными напорами в сечениях). Тогда мы имеем:

$$H_п = \frac{p}{\rho g} = H_{ст1} + \sum h_{M-1}. \tag{1.13}$$

Аналогично записав уравнения Бернулли для других трубопроводов, получим:

$$H_п = H_{ст1} + \sum h_{M-1} = H_{ст2} + \sum h_{M-2} = \\ = H_{ст3} + \sum h_{M-3} = H_{стi} + \sum h_{M-i}. \tag{1.14}$$

Следовательно, **сумма статического напора и потерь напора в разветвленных трубопроводах равна**. Такой трубопровод работает при условии $H_п > H_{стi}$.

Основной задачей по расчету данного трубопровода является следующая. Известны общий расход жидкости Q, все размеры ветвей, все местные сопротивления, геометрическая высота z_i и давления во всех конечных сечениях p_i. Необходимо определить расходы жидкости в ветвях Q_i и потребный напор $H_п$.

Возможна и другая постановка задачи на основе приведенных уравнений. Задача решается графоаналитическим способом. Строим характеристики потребного напора для каждого из трубопроводов. Имея такие характеристики, производим их графическое сложение так же, как и параллельно соединенных трубопроводов, т. е. при постоянных значениях $H_п$ складываем расход Q_i каждого из них.

1.5. Сложный трубопровод

Сложный трубопровод в общем случае состоит из простых трубопроводов с параллельным и последовательным соединениями, а также с разветвлениями (рис. 1.10).

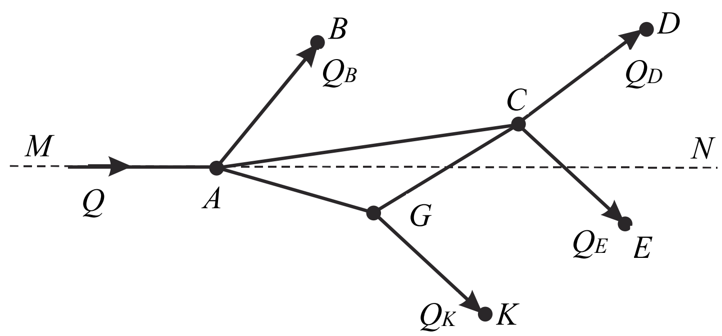


Рис. 1.10. Сложный трубопровод

Магистральный трубопровод разветвляется в точках A, C и G, жидкость подается к точкам (сечениям) B, D, E, K с расходами Q_B, Q_D, Q_E и Q_K. Обычно в этом случае известны размеры магистрали и всех ветвей (простых трубопроводов), заданы все местные сопротивления, а также геометрические высоты конечных точек, отсчитываемые от плоскости $M–N$, и избыточные давления (свободный напор) в конечных сечениях p_B, p_D, p_E и p_K.

В этом случае встречаются следующие основные задачи.

Задача № 1.4. Даны общий расход жидкости Q в основной магистрали $M–A$, перемещаемая жидкость и ее свойства (ρ и ν), все геометрические характеристики (l, d, z и др.), абсолютная эквивалентная шероховатость $\Delta_э$. Определить расходы жидкости в каждой ветви – Q_B, Q_D и Q_E, Q_K, а также потребный напор в точке M – $H_M = p_M / \rho g$.

Задача № 1.5. Заданы напор в точке M (H_M) и все остальные данные, как в задаче № 1.4. Найти расход в магистрали Q и расход в каждой ветви – Q_B, Q_D, Q_E и Q_K.

Решение. Обе задачи решаются на основе системы уравнений для последовательных, параллельных и разветвленных ветвей, число которых на единицу больше числа конечных ветвей.

Построение кривой потребного напора для всего сложного трубопровода выполним, руководствуясь следующим правилом:

1) сложный трубопровод разобьем на ряд простых;

2) построим кривые потребных напоров для каждого из них, причем для участков с конечной задачей с учетом статического напора $H_{ст}$, а для промежуточных (AC, MA, AG, GC) – без учета статического напора $H_{ст}$;

3) выполним графическое сложение всех характеристик с учетом их последовательного и параллельного соединения трубопровода.

Таким образом, при расчете необходимо идти от конечных точек сложного трубопровода к начальной его точке, т. е. против движения жидкости.

Выполнив описанное построение и получив график зависимости $H_п = f(Q)$, можно с его помощью решить рассмотренные выше задачи № 1.4 и 1.5 в различных вариантах.

1.6. Гидравлический расчет длинных трубопроводов

Для расчета длинных трубопроводов применяются те же зависимости, что и при расчете коротких трубопроводов, только потери напора определяют *без учета местных сопротивлений*. При расчете таких трубопроводов имеют место те же задачи, что и при расчете коротких трубопроводов, порядок решения тот же. Если же требуется учесть местные сопротивления, то вводят коэффициент:

$$H_п = H_{ст} + (1{,}05–1{,}1)\sum h_{дл}. \tag{1.15}$$

Расчет длинного водопровода производят, как правило, по упрощенным формулам, которые выведены на основе следующих допущений:

– принимают экономически обоснованные скорости движения жидкости;

– из-за малой вязкости воды режим движения жидкости принимают турбулентный в квадратичной области сопротивлений.

Тогда расчетные формулы водопровода можно извлечь из формулы Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d_{\text{экв}}} \frac{\upsilon^2}{2g} = \lambda \frac{l}{4R} \frac{\upsilon^2}{2g}, \tag{1.16}$$

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр, м; R – гидравлический радиус трубы, м.

Откуда получают формулу Шези:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{8g}{\lambda} \frac{h_{\text{дл}}}{l} R} = C\sqrt{iR}, \tag{1.17}$$

где C – скоростной множитель (коэффициент Шези), который находят по формуле $C = \sqrt{8g / \lambda}$; i – гидравлический уклон, определяемый по формуле $i = h_{\text{дл}} / l$.

Тогда расход жидкости равен:

$$Q = \upsilon S = CS\sqrt{iR} = K\sqrt{i}, \tag{1.18}$$

где S – площадь поперечного сечения трубопровода, м^2, рассчитываемая по формуле $S = \pi d^2 / 4$; K – расходная характеристика (модуль расхода), м^6/с^2, т. е. расход воды через трубопровод заданного сечения при гидравлическом уклоне i, равном единице. При этом модуль расхода вычисляется по формуле $K = SC\sqrt{R}$.

Отсюда потери по длине в трубах при турбулентном движении в зоне квадратичного отклонения можно определить по формуле

$$h_{\text{дл}} = \frac{Q^2}{K^2} l. \tag{1.19}$$

При $\Delta_э$ = const $K = f(d)$. Значения K^2 для наиболее употребляемых диаметров водопроводных труб приведены в таблице [3].

Имея похожие таблицы (для труб из стали, чугуна, пластмассы и т. д.) и используя формулу Шези, можно решить следующие задачи по расчету трубопровода.

Задача № 1.6. Известны расход жидкости Q, материал трубопровода и качество поверхности трубы ($\Delta_э$), размеры трубопровода (l, d). Найти потери напора по длине $h_{\text{дл}}$.

Решение. По абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_э$ и диаметру трубопровода d с помощью таблицы определим расходную характеристику K. Затем по соответствующей формуле рассчитаем потери напора по длине $h_{дл}$.

Расходная характеристика (модуль расхода)

Диаметр трубы, мм	K^2, м^6/с^2, при абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_э$, мм		
	0,2	0,5	1,0
75	0,0011	0,0009	0,0007
100	0,0052	0,0040	0,0032
125	0,0160	0,0125	0,0097
150	0,4340	0,0341	0,0276
175	0,0981	0,0768	0,0623
200	0,1972	0,1555	0,1271
250	0,6342	0,5041	0,4154
300	1,6490	1,4143	1,0913
400	7,4062	5,7950	4,9746
500	23,7394	19,2578	16,1306

Задача № 1.7. Известны потери напора по длине $h_{дл}$, материал трубопровода и качество поверхности трубы ($\Delta_э$), размеры трубопровода (l, d). Определить расход жидкости Q.

Решение. По абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_э$ и диаметру трубопровода d с помощью таблицы найдем расходную характеристику K. Вычислим гидравлический уклон ($i = h_{дл} / l$), затем по формуле Шези определим расход жидкости Q.

Задача № 1.8. Известны потери напора по длине $h_{дл}$, расход жидкости Q, материал трубопровода и качество поверхности трубы ($\Delta_э$), длина трубопровода l. Найти диаметр трубопровода d.

Решение. Рассчитаем гидравлический уклон ($i = h_{дл} / l$), а затем расходную характеристику ($K = Q / \sqrt{i}$). По абсолютной шероховатости $\Delta_э$ и расходной характеристике K с помощью таблицы определим диаметр трубопровода d [2, 3].

Раздел 2

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

В курсовой работе предлагается решить три задачи для освоения навыков расчета простых и сложных трубопроводов.

Контрольная задача № 1 предполагает расчет простого короткого трубопровода методом последовательных приближений с оценкой трубопровода на прочность по максимальному давлению в сети и на стенки резервуаров.

Контрольная задача № 2 включает в себя расчет простого короткого трубопровода с построением напорной и пьезометрической линий (диаграммы Бернулли).

Контрольная задача № 3 направлена на расчет сложного длинного трубопровода.

Номера вариантов в контрольных задачах выдаются по усмотрению преподавателя.

Контрольная задача № 1

Определить расход воды Q, м^3/с, проходящей по трубе переменного сечения, и давление p_x, Па, в сечении X–X, используя данные табл. 2.1 и рис. 2.1 (см. с. 25–26). В расчетах считать абсолютную эквивалентную шероховатость труб равной $\Delta_э = 0{,}5$ мм, диаметры резервуаров $d_1 = d_4 = 5$ м. Для сопротивления колена со скруглениями принять радиусы скругления $R = d_2$. Температура воды $t_в = 10$°С, коэффициент кинематической вязкости воды $\nu_в = 1{,}3061 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Рассчитать стальной трубопровод на прочность по максимальному давлению в сети и на стенки резервуара(ов).

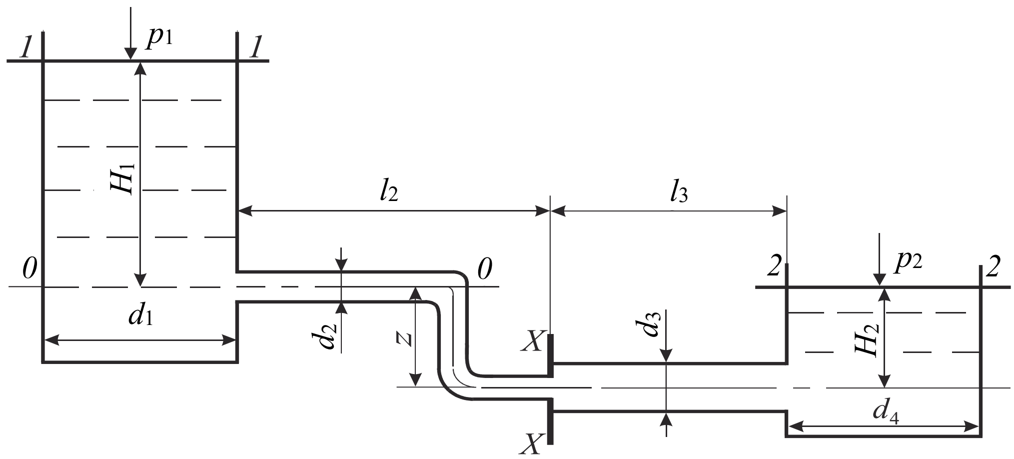
Таблица 2.1

Исходные данные к контрольной задаче № 1

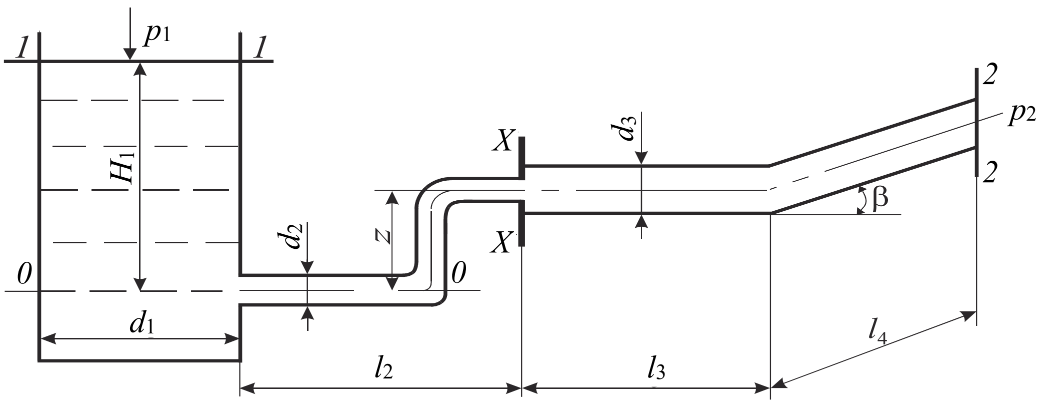
Номер варианта	p_1, МПа	p_2, МПа	H_1, м	H_2, м	d_2, м	d_3, м	l_2, м	l_3, м	l_4, м	z, м	β, °
На рис. 2.1, *а* левый и правый резервуары открыты											
1	$p_{атм}$	$p_{атм}$	20	17	80	105	150	200	–	17	–
2	$p_{атм}$	$p_{атм}$	12	10	50	70	250	120	–	10	–
3	$p_{атм}$	$p_{атм}$	17	15	85	125	300	175	–	15	–
4	$p_{атм}$	$p_{атм}$	22	17	75	85	100	400	–	17	–
5	$p_{атм}$	$p_{атм}$	35	30	60	70	50	100	–	30	–
На рис. 2.1, *б* левый резервуар закрыт											
6	$p_{абс}$ = = 0,18	$p_{атм}$	35	–	75	100	200	150	150	4	10
7	$p_{абс}$ = = 0,25	$p_{атм}$	22	–	80	150	120	250	100	3	15
8	$p_{абс}$ = = 0,35	$p_{атм}$	17	–	95	200	175	300	150	1	20
9	$p_{абс}$ = = 0,32	$p_{атм}$	12	–	60	80	400	100	350	2	25
10	$p_{абс}$ = = 0,20	$p_{атм}$	20	–	100	250	100	50	80	5	30
На рис. 2.1, *в* левый резервуар закрыт											
11	$p_{изб}$ = = 0,25	$p_{атм}$	20	–	80	105	150	200	210	5	15
12	$p_{изб}$ = = 0,30	$p_{атм}$	12	–	50	70	250	120	150	2	25
13	$p_{изб}$ = = 0,18	$p_{атм}$	17	–	85	125	300	175	180	1	30
14	$p_{изб}$ = = 0,65	$p_{атм}$	22	–	75	85	100	400	450	3	10
15	$p_{изб}$ = = 0,25	$p_{атм}$	35	–	60	70	50	100	150	4	5
На рис. 2.1, *г* левый резервуар закрыт, правый резервуар открыт											
16	$p_{изб}$ = = 0,15	$p_{атм}$	30	17	100	75	50	100	–	–	–
17	$p_{изб}$ = = 0,32	$p_{атм}$	20	10	150	80	100	400	–	–	–
18	$p_{изб}$ = = 0,15	$p_{атм}$	15	8	200	95	300	175	–	–	–
19	$p_{изб}$ = = 0,60	$p_{атм}$	10	5	80	60	250	120	–	–	–
20	$p_{изб}$ = = 0,25	$p_{атм}$	25	12	250	100	150	200	–	–	–

Окончание табл. 2.1

Номер варианта	p_1, МПа	p_2, МПа	H_1, м	H_2, м	d_2, м	d_3, м	l_2, м	l_3, м	l_4, м	z, м	β, °
На рис. 2.1, *д* левый и правый резервуары закрыты											
21	$p_{абс}$ = = 0,28	$p_{изб}$ = = 0,10	20	17	75	75	200	150	150	4	–
22	$p_{абс}$ = = 0,35	$p_{изб}$ = = 0,18	12	10	80	80	120	250	250	3	–
23	$p_{абс}$ = = 0,35	$p_{изб}$ = = 0,12	17	15	95	95	175	300	300	1	–
24	$p_{абс}$ = = 0,32	$p_{изб}$ = = 0,18	22	17	60	60	400	100	100	2	–
25	$p_{абс}$ = = 0,25	$p_{изб}$ = = 0,10	35	30	100	100	100	50	50	5	–



а



б

Рис. 2.1. Схемы простого короткого трубопровода
(начало; окончание см. на с. 26):
а – левый и правый резервуары открыты; *б* – левый резервуар закрыт

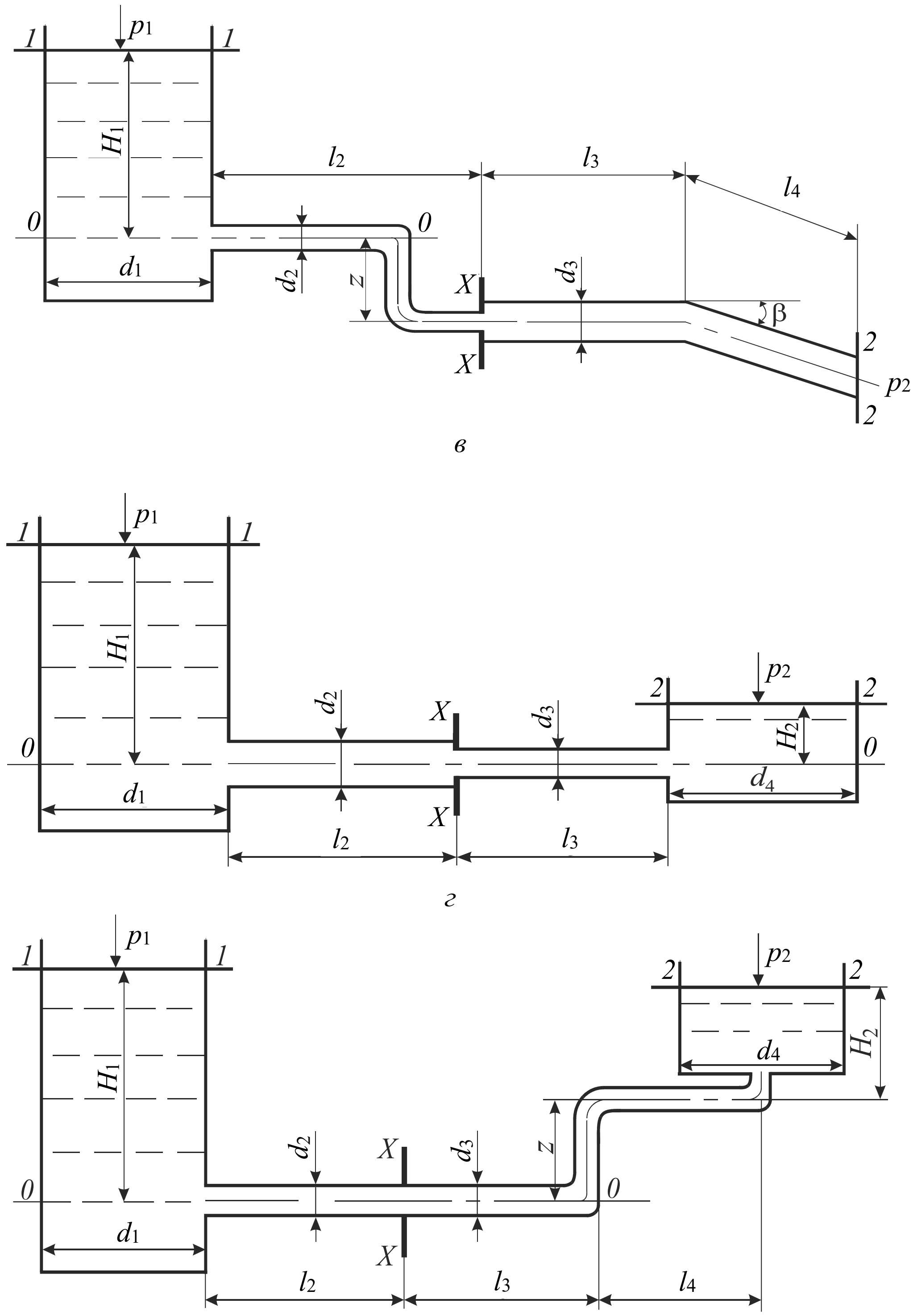


Рис. 2.1. Окончание (начало см. на с. 25):
в – левый резервуар закрыт;
г – левый резервуар закрыт, правый резервуар открыт;
д – левый и правый резервуары закрыты

Контрольная задача № 2

Из открытого резервуара диаметром d_0 = 3 м, в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному трубопроводу (абсолютная эквивалентная шероховатость $\Delta_э$ = 0,1 мм), состоящему из труб различного диаметра d, м, и различной длины l, м, вытекает в атмосферу вода, расход которой Q, л/с, и температура $t_в$, °С.

Определить скорости движения воды υ_1, υ_2, υ_3, м/с, и потери напора (по длине $\sum h_{дл i}$, м, и местные $\sum h_{м i}$, м) на каждом участке трубопровода, установить величину напора H, м, в резервуаре. Построить напорную и пьезометрическую линии (диаграмму Бернулли) с соблюдением масштаба на миллиметровой бумаге формата А4.

Исходные данные к контрольной задаче № 2 приведены в табл. 2.2 и на рис. 2.2, где позицию *а* выбирают те студенты, которым преподаватель назначил нечетный вариант, а позицию *б* – четный вариант.

Таблица 2.2

Исходные данные к контрольной задаче № 2

Номер варианта	Q, л/с	d_1, мм	d_2, мм	d_3, мм	l_1, м	l_2, м	l_3, м	$t_в$, °С
1	15	250	100	200	150	100	170	5
2	20	100	250	50	250	200	270	10
3	45	200	85	125	300	250	330	15
4	10	75	100	250	100	80	120	20
5	35	100	50	70	50	40	70	5
6	42	150	200	75	200	180	220	10
7	18	250	80	150	120	100	140	15
8	10	200	350	95	175	150	190	20
9	50	120	60	80	400	350	430	5
10	37	220	400	100	100	80	120	10
11	16	280	80	105	150	130	172	15
12	31	100	150	50	250	220	270	20
13	9	150	85	125	300	280	320	5
14	15	120	180	75	100	80	130	10
15	48	100	60	70	50	40	70	15
16	20	200	350	100	50	40	75	20
17	15	300	150	250	100	80	150	5
18	20	150	200	95	300	250	330	10

Окончание табл. 2.2

Номер варианта	Q, л/с	d_1, мм	d_2, мм	d_3, мм	l_1, м	l_2, м	l_3, м	$t_в$, °C
19	45	350	200	250	250	200	270	15
20	10	150	450	100	150	100	170	20
21	35	245	100	200	200	170	225	5
22	42	100	150	50	120	100	150	10
23	18	150	70	100	175	150	200	15
24	10	200	250	90	400	350	430	20
25	50	100	50	70	100	80	125	5

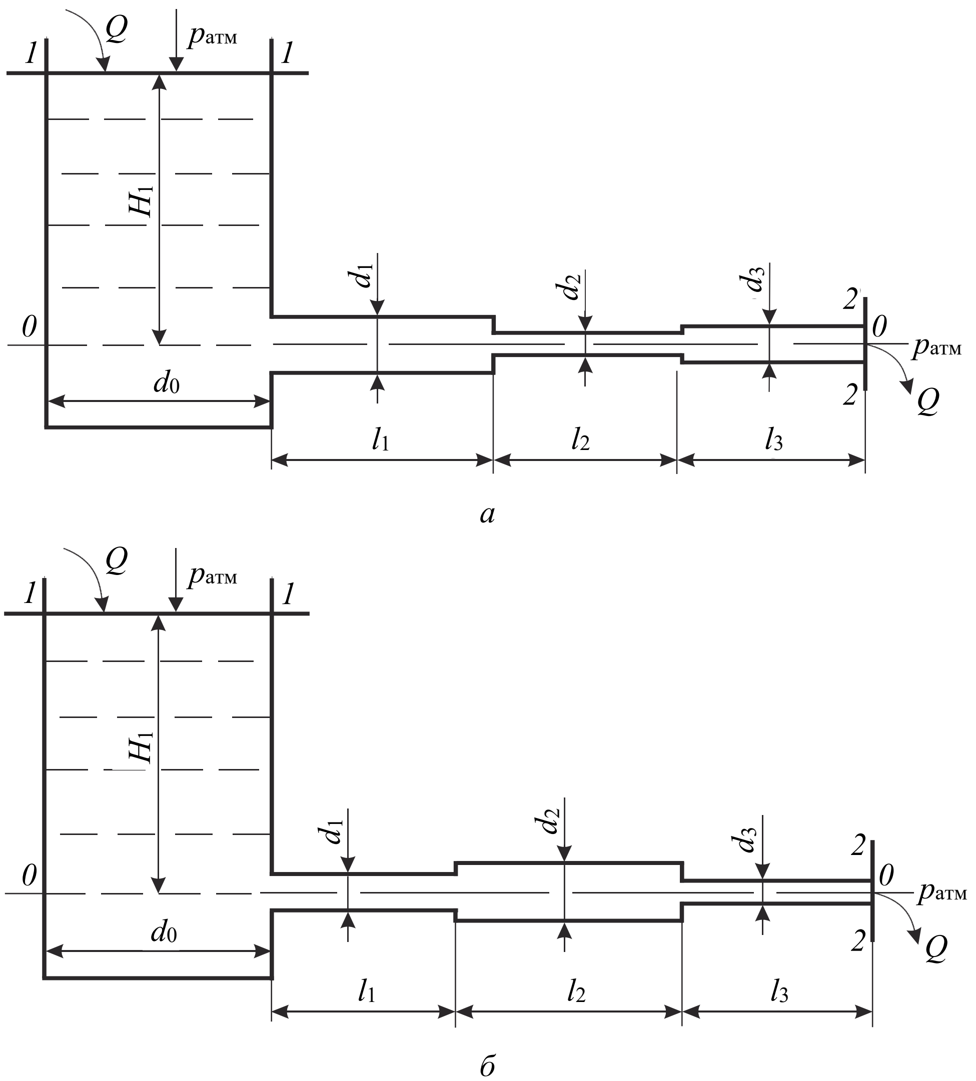


Рис. 2.2. Схемы простой короткой трубопроводной системы:
а – с внезапным сужением и расширением трубопровода;
б – с внезапным расширением и сужением трубопровода

Контрольная задача № 3

Определить расход Q, л/с, питающего резервуара, если известны напоры в резервуарах H_1 и H_2, м, расходы в узлах q_1 и q_2, л/с, и расстояние между осями резервуаров z, м. Коэффициент абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_э = 0{,}2$ мм, диаметры резервуаров $d_1 = d_4 = 5$ м. Геометрические характеристики сложного магистрального водопровода, согласно вариантам, представлены в табл. 2.3 и отмечены на рис. 2.3. В расчетах принять квадратичный закон распределения.

Таблица 2.3

Исходные данные к контрольной задаче № 3

Номер варианта	H_1, м	H_2, м	q_1, л/с	q_2, л/с	z, м	d_2, мм	d_3, мм	l_2, м	l_3, м	l_4, м
1	50	30	0	5	2	200	100	150	100	170
2	37	20	5	10	7	100	75	250	200	270
3	16	8	10	8	5	125	120	300	250	330
4	31	15	7	5	2	250	180	100	80	120
5	15	10	3	0	7	150	70	50	40	70
6	18	10	0	5	5	120	75	200	180	220
7	48	20	10	6	2	200	150	120	100	140
8	20	8	5	0	7	125	95	175	150	190
9	17	10	7	3	5	100	80	400	350	430
10	20	15	10	5	2	150	100	100	80	120
11	45	35	15	8	7	150	105	150	130	172
12	20	10	5	2	5	100	75	250	220	270
13	35	25	10	3	2	200	125	300	280	320
14	42	30	7	3	7	150	75	100	80	130
15	18	10	3	0	5	160	70	50	40	70
16	20	10	0	7	2	150	100	50	40	75
17	20	8	5	0	7	300	250	100	80	150
18	35	20	2	0	5	150	95	300	250	330
19	55	30	7	10	2	300	250	250	200	270
20	22	15	3	5	7	150	100	150	100	170
21	35	15	0	2	5	250	200	200	170	225
22	50	25	5	5	2	100	75	120	100	150
23	37	20	2	8	7	150	100	175	150	200
24	16	10	7	5	5	120	90	400	350	430
25	31	20	3	5	2	90	70	100	80	125

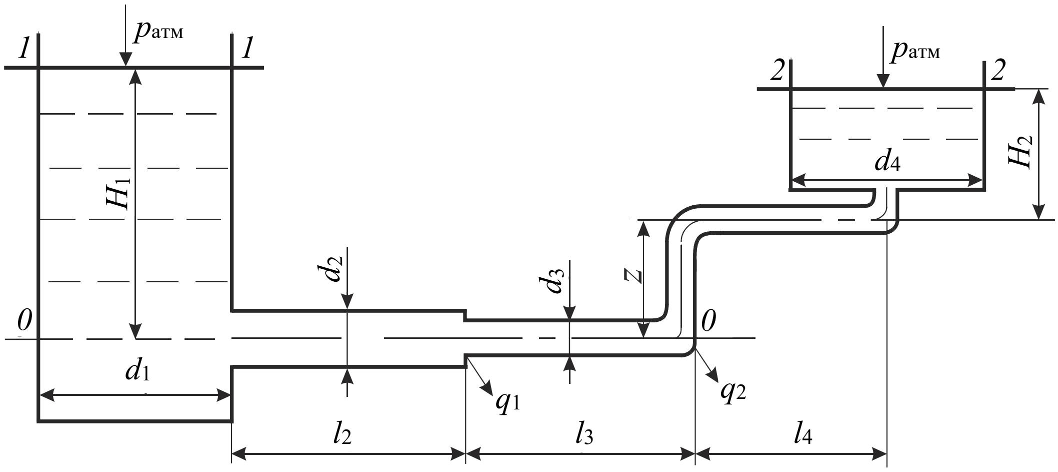


Рис. 2.3. Схема сложного длинного трубопровода

Раздел 3

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАЧ

3.1. Методика расчета контрольной задачи № 1

Расчеты будем вести методом последовательного приближения, так как из-за отсутствия расхода неизвестны скорости, следовательно, режим движения и зоны сопротивления.

3.1.1. Определение расхода воды, проходящей по трубе

1. Расход воды Q, м^3/с, можно вычислить по уравнению неразрывности:

$$Q = \upsilon S, \tag{3.1}$$

где υ – средняя скорость движения воды, м/с; S – площадь живого сечения, м^2, рассчитываемая по формуле $S = \pi d^2 / 4$ (здесь d – диаметр трубы на данном участке трубопровода, м).

2. Для нахождения расхода воды нужно определить скорость воды с помощью уравнения Бернулли. Для этого назначим горизонтальную (нормально к вектору силы тяжести) плоскость сравнения *0–0*, проходящую по оси нижней части трубы. Далее для уравнения Бернулли выберем два живых сечения: сечение по свободной поверхности воды в резервуаре *1–1* и выходное сечение трубы *2–2*. Пример приведен на рис. 3.1.

Запишем уравнение Бернулли для сечений *1–1* и *2–2*, в которых имеется большинство известных характеристик (сумма всех членов уравнения представляет собой полный напор H, м) [3]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \upsilon_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \upsilon_2^2}{2g} \sum h_{п1-2}, \tag{3.2}$$

где $z_2 - z_1 = H_г$ – геометрический напор, т. е. высота, на которую необходимо перемещать жидкость, м (здесь z_2, z_1 – соответственно геодезические отметки уровня жидкости в начальном и конечном сечениях трубопровода или в приемном и питающем резервуарах, м); $p_2 - p_1$ – разность давлений в начальном и конечном сечениях трубопровода или на поверхностях жидкости в приемном и питающем резервуарах, Па; ρ – плотность воды, принимаемая 1000 кг/м^3; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с^2; α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса при соответствующих скоростях движения воды; υ_1, υ_2 – скорости движения воды соответственно в начальном и конечном сечениях трубопровода или в приемном и питающем резервуарах, м/с; $\sum h_{п1-2}$ – суммарные потери напора трубопровода на участке *1–2*, м [3].

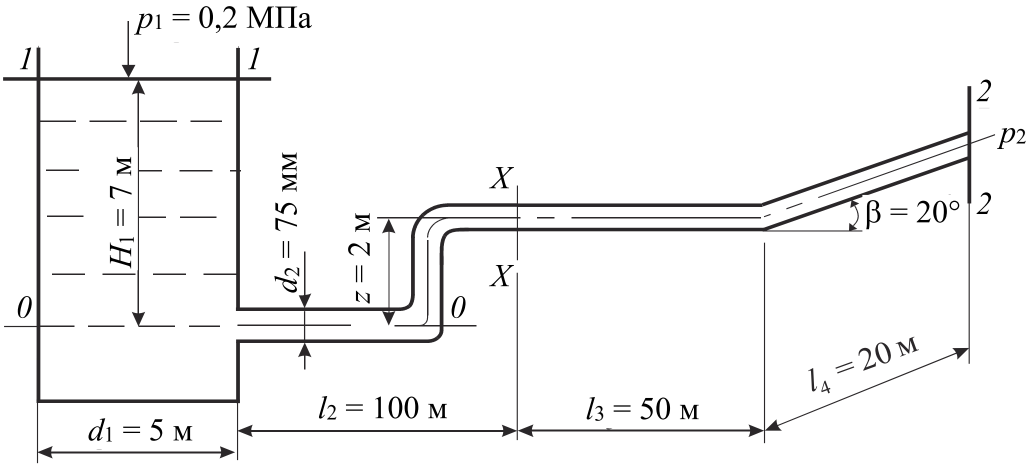


Рис. 3.1. Схема простого короткого трубопровода
с численными значениями

3. Определим геометрические высоты сечений *1–1* и *2–2*:

$$z_1 = H_1;$$
$$z_2 = \pm H_2 \pm z,$$

где H_2 дано по условию или определяется по формуле $H_2 = l \sin\beta$, здесь l – длина участка трубопровода с углом наклона β, м; β – угол наклона к горизонтальной плоскости, °; $+z$, $-z$ – геодезическая отметка уровня жидкости, расположенная соответственно выше и ниже плоскости отсчета.

Значение z_2 положительное, в случае если геодезическая отметка уровня жидкости находится выше плоскости сравнения *0–0* (см. рис. 2.1 на с. 25–26), значение z_2 отрицательное – соответственно ниже.

4. Зададим систему отсчета давления или выберем шкалу давления, которая представлена на рис. 3.2 (см. пример в [4, с. 11]):

– ***шкала абсолютных давлений*** (началом ее служит полное отсутствие давления, т. е. за начало шкалы принят абсолютный нуль давлений);

– ***шкала избыточных давлений*** (нуль этой шкалы соответствует атмосферному давлению).

1 атм = 101 325 Па = 760 мм рт. ст. (техническая атмосфера); 1 ат = 98 100 Па = 1 кгс/см^2 (физическая атмосфера).

Рис. 3.2. Шкалы давлений

Давление может быть как положительным, так и отрицательным. Положительное давление показывает избыток давления над атмосферным. Отрицательное давление по этой шкале называют вакуумом, т. е. вакуум – это давление, которого не хватает до атмосферного [5].

Избыточное давление рассчитаем по формуле

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}. \tag{3.3}$$

Вакуумметрическое давление вычислим, используя следующую формулу:

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}} = -p_{\text{изб}}. \tag{3.4}$$

Важно отметить, что величины давлений в начальном и конечном сечениях трубопровода или на поверхностях жидкости в приемном и питающем резервуарах (p_1 и p_2) должны быть приведены в одной шкале!

Подставим известные величины давлений (см. задание на курсовую работу) в уравнение Бернулли (3.2).

5. Рассчитаем суммарные потери напора трубопровода. Потери напора в трубопроводе определяются суммой потерь по длине $\sum h_{\text{дл}i}$, м, и суммой местных потерь $\sum h_{\text{м}i}$, м:

$$\sum h_{\text{п}1-2} = \sum h_{\text{дл}i} + \sum h_{\text{м}i}. \tag{3.5}$$

Потери по длине обусловлены наличием сил внутреннего трения между слоями жидкости, а также трением жидкости о стенки русел при ее движении в трубах или каналах. Они зависят от длины трубопровода и скорости движения жидкости и в общем случае для любого участка определяются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d}\frac{\upsilon^2}{2g};\ p_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d}\frac{\rho\upsilon^2}{2}, \tag{3.6}$$

где $h_{\text{дл}}$ – потери напора по длине, м; λ – безразмерный коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); $p_{\text{дл}}$ – потери давления, Па.

На основании результатов многочисленных экспериментальных исследований установлено, что коэффициент гидравлического трения λ в общем случае зависит от двух параметров: числа Рейнольдса Re (характеризует режим движения жидкости) и относительной шероховатости ε ($\lambda = f(\text{Re}, \varepsilon)$). Относительная шероховатость определяется отношением абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_\text{э}$, м, к диаметру трубопровода: $\varepsilon = \Delta_\text{э} / d$. Формулы для нахождения коэффициента λ в зависимости от режима движения и зоны сопротивления приведены в табл. 3.1 [6].

Определим потери напора по длине трубопровода:

– при равных диаметрах на различных участках трубопровода $d_2 = d_3$ потери напора на трение вычисляются по формуле (3.6), где $l = l_2 + z + l_3 + l_4$;

– при $d_2 \neq d_3$ формула потерь напора на трение (3.6) примет следующий вид:

$$h_{\text{дл}} = \left(\lambda_2 \frac{(l_2 + z)}{d_2}\frac{\upsilon_{d_2}^2}{2g}\right) + \left(\lambda_3 \frac{(l_3 + l_4)}{d_3}\frac{\upsilon_{d_3}^2}{2g}\right), \tag{3.7}$$

где $l_2 + z$ – длина трубопровода на участке с диаметром d_2, м; $l_3 + l_4$ – длина трубопровода на участке с диаметром d_3, м.

Таблица 3.1

Формулы для определения коэффициента трения в зависимости от режима движения жидкости

Режим движения жидкости (зона сопротивления)	Граничные числа Рейнольдса Re	Формула для определения коэффициента потерь по длине
Ламинарный	$2320 \le \mathrm{Re}$	$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$ (формула Стокса)
Турбулентный: – переходная зона между ламинарным и турбулентным режимами	$2320 < \mathrm{Re} < 3000$	$\lambda = \frac{2,7}{\mathrm{Re}^{0,53}}$ (формула Н. З. Френкеля)
– зона гидравлически гладких труб	$3000 < \mathrm{Re} < 20\frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda = \frac{0,3164}{\mathrm{Re}^{0,25}}$ (формула Блазиуса), $\lambda = \frac{1}{(1,8\lg \mathrm{Re} - 1,5)^2}$ (формула П. К. Конакова)
– переходная зона (зона смешанного сопротивления)	$20\frac{d}{\Delta_э} < \mathrm{Re} < 500\frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda = 0,11\left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0,25}$ (формула А. Д. Альтшуля)
– зона квадратичного сопротивления (шероховатых труб)	$\mathrm{Re} > 500\frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda = 0,11\left(\frac{\Delta_э}{d}\right)^{0,25}$ (формула Б. Л. Шифринсона), $\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2\lg\left(\frac{d}{\Delta_э}\right)\right)^2}$ (формула Прандтля – Никурадзе)

Задача для нахождения расхода решается методом последовательных приближений. Для этого скоростной напор $\upsilon^2 / 2g$ в уравнениях (3.6) и (3.7) выразим через расход и площадь живого сечения с помощью уравнения неразрывности (3.1):

а) при $d_2 = d_3$:

$$\frac{\upsilon^2}{2g} = \frac{\upsilon_{d_2}^2}{2g} = \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d_2^2} = 0,0827\frac{Q^2}{d_2^4}; \qquad (3.8)$$

б) при $d_2 \neq d_3$: для скорости υ_{d_2} справедлива формула (3.8), для скорости υ_{d_3} соответственно:

$$\frac{\upsilon^2}{2g} = \frac{\upsilon_{d_3}^2}{2g} = \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d_3^2} = 0{,}0827\frac{Q^2}{d_3^4}. \qquad (3.9)$$

Для определения коэффициентов гидравлического трения λ_i в формулах (3.6), (3.7) при заданной абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_э$ = 0,5 мм выберем турбулентный режим движения и зону квадратического сопротивления, в которой λ не зависит от числа Рейнольдса Re (формула Шифринсона, табл. 3.1 (см. с. 35)).

6. *Местные потери напора* вычисляются по формуле Вейсбаха:

$$h_м = \zeta\frac{\upsilon^2}{2g}; \;\; p_м = \zeta\frac{\rho\upsilon^2}{2}, \qquad (3.10)$$

где $h_м$ – местные потери напора, м; ζ – безразмерный коэффициент местного сопротивления, который для каждого сопротивления можно считать постоянным и определить в справочнике (табл. 3.2 [6]); $p_м$ – потери давления, Па.

Средняя скорость движения воды в трубопроводе υ, м/с, учитывается за местным сопротивлением.

Таблица 3.2

Значения коэффициента местного сопротивления в зависимости от его вида

Вид местного сопротивления	ζ
Вход в трубу при острых кромках	0,5
Вход в трубу со скругленными кромками	0,05–0,20
Вход в трубу, снабженный приемной сеткой и клапаном	5–10
Внезапные расширения трубы ($d_2 > d_1$)	$(S_2 / S_1 - 1)^2$
Внезапные сужения трубы ($d_2 < d_1$)	$0{,}5(1 - S_2 / S_1)$
Выход из трубы под уровень	1,0
Резкий поворот трубы (колено) на 90°	1,1
Плавный поворот трубы (отвод) на 90°	0,15
Задвижка при полном открытии	0,05–0,15
Вентиль с поворотом потока на 90°	2,5–5,0
Вентиль без поворота потока	0,5–1,0

Окончание табл. 3.2

Вид местного сопротивления	ζ
Обратный и предохранительный клапаны	2,0–3,0
Присоединительные штуцера и проходники	0,15
Распределительный золотник	2,0–4,0
Редукционный клапан	4,0–5,0
Прямоугольные тройники для разделения и объединения потоков	0,9–2,5

В курсовой работе учитываются следующие местные сопротивления (см. исходные схемы задания): вход в трубу при острых кромках $\zeta_{вх}$, внезапные расширения трубы $\zeta_{вн.р}$, внезапные сужения трубы $\zeta_{вн.с}$, плавный поворот трубы (отвод) на 90° $\zeta_{90°}$, плавный поворот трубы (отвод) на угол β, например $\zeta_{30°}$ (на схеме задания обозначен резким), выход из трубы под уровень $\zeta_{вых}$ (т. е. на схеме есть резервуар).

Плавный поворот (отвод) трубопровода зависит от угла β и радиуса закругления R, м (задан в задаче), поворота и определяется по эмпирическим формулам или по таблицам. При угле поворота $\beta > 90°$ и $R / d > 1,0$ коэффициент местного сопротивления рассчитывается по формуле

$$\zeta_{\beta} = \zeta_{90°}\left(0,70 + 0,35\frac{\beta}{90}\right). \qquad (3.11)$$

При угле поворота $\beta < 90°$:

$$\zeta_{\beta} = \zeta_{90°}\sin\beta,$$

где $\zeta_{90°}$ – коэффициент потерь напора при $\beta = 90°$, вычисляемый по формуле $\zeta_{90°} = 0,051 + 0,19d / R$, здесь d – внутренний диаметр трубы (см. рис. 2.1 на с. 25–26).

При различных диаметрах трубопроводов до и после местного сопротивления скорости потока до и после сопротивления также различны. В этом случае в формулу Вейсбаха подставляют среднюю скорость потока после сопротивления (если специально не указано другое) [2].

Определим местные потери напора в трубопроводе с учетом преобразования скоростного напора $\upsilon^2 / 2g$ в формуле (3.10) через уравнение неразрывности (3.1):

– при $d_2 = d_3$:

$$h_{\text{м}} = \sum \zeta_i \cdot 0{,}0827 \frac{Q^2}{d_2^4}, \qquad (3.12)$$

где $\sum \zeta_i$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке трубопровода с диаметром d_2;

– при $d_2 \neq d_3$ формула местных потерь напора в трубопроводе (3.10) примет вид

$$h_{\text{м}} = \left(\sum \zeta_i \cdot 0{,}0827 \frac{Q^2}{d_2^4} \right) + \left(\sum \zeta_j \cdot 0{,}0827 \frac{Q^2}{d_3^4} \right), \qquad (3.13)$$

где $\sum \zeta_j$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке трубопровода с диаметром d_3.

7. Рассчитаем суммарные потери напора в трубопроводе $\sum h_{\text{п}1-2}$ по формуле (3.5) с учетом выражений (3.6)–(3.13).

8. Полученные результаты подставим в уравнение Бернулли (3.2) в соответствии с заданием и определим расход воды. При этом скоростным напором $\alpha_1 \upsilon_1^2 / 2g$ в сечении *1–1* пренебрежем в связи с тем, что скорость движения воды в резервуаре значительно меньше скорости в трубе, что видно из уравнения неразрывности (3.1) при заданных диаметрах $d_1 >> d_2$. Предположим, что в трубопроводе турбулентный режим, тогда коэффициент Кориолиса $\alpha_2 = 1$. Если в сечении *2–2* также имеется резервуар с водой, скоростным напором $\alpha_2 \upsilon_2^2 / 2g$ аналогично пренебрежем, так как $d_3 << d_4$.

9. Сделаем проверку допущения, что режим движения в трубопроводе турбулентный. Для этого вычислим число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon d}{\nu_{\text{в}}}, \qquad (3.14)$$

где $\nu_{\text{в}}$ – коэффициент кинематической вязкости воды (по условию $\nu_{\text{в}} = 1{,}3061 \cdot 10^{-6}$ м^2/с).

Если Re < 2320, то режим ламинарный, если Re > 2320, то режим турбулентный.

При $d_2 = d_3$ определим число Рейнольдса для d_2 при скорости воды с этим диаметром (в уравнение неразрывности (3.1) подставим полученный расход Q и найдем скорость $\upsilon = Q / (\pi d^2 / 4)$).

При $d_2 \neq d_3$ определим число Рейнольдса для d_2, а также для d_3 при скоростях воды с этими диаметрами.

По полученному значению числа Рейнольдса ($\mathrm{Re} > 500d / \Delta_э$) установим режим движения жидкости и сделаем вывод: допущение верно или неверно.

Если допущение верно, проверим найденные потери $\sum h_{п1-2}$ через уравнение Бернулли (3.2), подставив в него значение скорости через найденный расход, а также использовав формулы из п. 5–6, подставив в них найденное значение расхода.

Сделаем вывод: потери вычислены правильно или неправильно. Расхождение величин не должно превышать 1,5%.

Если режим движения воды определен неверно, перезададим режим движения жидкости (спустимся в зону ниже) и п. 5, 7–9 повторим заново, при этом предварительно зададим значение числа Рейнольдса для определения коэффициента гидравлического трения λ.

3.1.2. Определение давления в заданном сечении

1. Давление p_x, Па, в сечении *X–X* определим с помощью уравнения Бернулли (3.2), составив его для сечения *X–X* и любого поперечного сечения потока с известными характеристиками. Составим уравнение Бернулли для сечений *1–1* и *X–X*:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \pm z + \frac{p_x}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \upsilon_{d_2}^2}{2g} + \sum h_{п1-x}, \tag{3.15}$$

где $\pm z$ – геодезическая отметка уровня жидкости: положительное значение – над горизонтальной плоскостью сравнения (см. рис. 3.1 на с. 32), отрицательное – под горизонтальной плоскостью сравнения, м; $\sum h_{п1-x}$ – общие потери напора между выбранными сечениями *1–1* и *X–X*, м, вычисляемые по формуле $\sum h_{п1-x} = \left(\lambda_2 \frac{(l_2 + z)}{d_2} \frac{\upsilon_{d_2}^2}{2g} \right) + \left((\zeta_{вх} + 2\zeta_{90^\circ}) \frac{\upsilon_{d_2}^2}{2g} \right)$. $\sum h_{п1-x}$ упрощается согласно схеме задания.

2. Найдем искомое давление по следующей формуле:

$$p_x = \left(z_1 \pm z + \frac{p_1}{\rho g} - \frac{\alpha_2 \upsilon_{d_2}^2}{2g} - \sum h_{п1-x} \right) \rho g. \tag{3.16}$$

3.1.3. Расчет трубопровода на прочность по максимальному гидростатическому давлению в сети

1. Расчет трубопровода на прочность выполним по формуле [7], предварительно определив силу P_x, Н, стремящуюся разорвать трубу:

$$P_x = pDl, \tag{3.17}$$

где p – максимальное давление в трубе, Па; D – диаметр трубопровода на участке длиной l, м.

Если в трубопроводе два различных диаметра на соответствующих его участках определенной длины, расчет трубопровода проводят для обоих диаметров трубопровода.

2. Найдем давление в трубе p, Па, через полный напор, который в данном случае равен $H = z_1 + (p_1 / \rho g)$:

$$p = \rho g H. \tag{3.18}$$

3. Разрывающей силе противодействует сила сопротивления материала стенок трубы $P_{сопр}$, Н, определяемая по формуле

$$P_{сопр} = 2\delta l[\sigma_{разр}], \tag{3.19}$$

где δ – толщина стенки трубы, м; $[\sigma_{разр}]$ – предел прочности стали на разрыв, МПа (для стенок трубопровода из стали 3 $[\sigma_{разр}] = 4{,}9$ МПа [8]).

Принимая во внимание, что $P_{сопр} = pDl$, получим:

$$pDl = 2\delta l[\sigma_{разр}]. \tag{3.20}$$

Рассчитаем толщину стенки трубы δ, м (мм):

$$\delta = \frac{pD}{2[\sigma_{разр}]} + k, \tag{3.21}$$

где k – технологический припуск трубы (k = 3–7 мм) [8].

При переменном сечении трубопровода определяются толщины стенки трубы для его каждого диаметра.

3.1.4. Расчет толщины стенки резервуаров при расчетных напорах H_1 и H_2

1. Определим давление в первом резервуаре p_1, Па, по следующей формуле:

$$p_1 = \rho g H_1.$$

2. Вычислим толщину стенки первого резервуара δ_1, м (мм), по формуле (3.21), где D – диаметр первого резервуара d_1; $[\sigma_{разр}]$ = = 70 МПа (для стенок резервуара из стали 3 [9]).

3. Если в конце трубопровода имеется также и второй резервуар, то найдем давление p_2, Па, по формуле

$$p_2 = \rho g H_2,$$

а толщину стенки δ_2, м (мм), – согласно п. 2.

3.2. Методика расчета контрольной задачи № 2

3.2.1. Определение скорости движения воды, потерь напора и величины напора

1. Составим уравнение Бернулли в общем виде для сечений *0–0* (на свободной поверхности жидкости в резервуаре) и *3–3* (на выходе потока из трубы) (см. рис. 2.2 на с. 28, формулу (3.2)).

При написании уравнения Бернулли следует помнить, что индексы у всех членов уравнения должны соответствовать номерам рассматриваемых сечений. Например, величины, относящиеся к сечению *0–0*, следует обозначать z_0, p_0, α_0, υ_0, а к сечению *3–3* – z_3, p_3, α_3, υ_3.

2. Наметим горизонтальную плоскость сравнения. При горизонтальном трубопроводе плоскость сравнения проводится по оси трубопровода. После этого устанавливается, чему равно каждое слагаемое, входящее в уравнение Бернулли, применительно к условиям решаемой задачи. Например, $z_0 = H$ (искомая величина напора в резервуаре); $p_0 = p_{атм}$ (атмосферное давление); $\upsilon_0 = 0$ (скорость движения воды в сечении *0–0*) и т. д. Из рис. 2.2 видно, что давление на выходе из трубопровода также атмосферное $p_3 = p_{атм}$. Значение плотности воды ρ, кг/м^3, определим методом двойной интерполяции по приложению А в зависимости от температуры [10].

3. После подстановки всех найденных величин в уравнение Бернулли и его преобразования запишем расчетное уравнение в буквенном выражении для определения искомой величины H.

4. Рассчитаем скорости движения воды на каждом участке υ_1, υ_2, υ_3, м/с, зная расход Q, с помощью уравнения неразрывности (3.1).

5. Зная скорости движения воды, вычислим числа Рейнольдса для трех участков по формуле (3.14) и установим режим движения на каждом участке. Значение кинематического коэффициента вязкости $\nu_в$, м^2/с, определим методом двойной интерполяции по приложению А в зависимости от температуры $t_в$ [10]. Например, при температуре воды $t_в$ = 20°С коэффициент кинематической вязкости составляет $\nu_в = 1{,}006 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

6. Рассчитаем потери напора по длине каждого участка по формуле (3.6) ($h_{дл1}$, $h_{дл2}$, $h_{дл3}$, м) и в каждом местном сопротивлении по формуле (3.10) (вход воды из резервуара $h_{вх}$, м, внезапное расширение $h_{вн.р}$, м, и внезапное сужение $h_{вн.с}$, м).

7. После определения потерь напора по длине и в местных сопротивлениях вычислим искомую величину – напор H, м, в резервуаре, который в данной задаче находится по формуле

$$H = \frac{\alpha_3 \upsilon_3^2}{2g} + \sum h_{длi} + \sum h_{мi}. \tag{3.22}$$

Для ламинарного режима движения $\alpha = 2$, а для турбулентного α можно принять равным 1. Для удобства построения диаграммы Бернулли значение всех видов напоров необходимо перевести в миллиметры.

3.2.2. Построение напорной и пьезометрической линий (диаграммы Бернулли)

1. Построим напорную линию (жирная линия на рис. 3.3 (см. с. 44)). Напорная линия показывает, как изменяется полный напор (полная удельная энергия) по длине потока. Значения H откладываются вертикально вверх от осевой линии трубопровода.

При построении напорной линии нужно вертикалями выделить расчетные участки. Таких участков в данной задаче будет три. Далее в произвольно выбранном вертикальном масштабе отложим от осевой линии величину найденного уровня жидкости в резервуаре H. Проведя по этому уровню горизонтальную линию, получим линию исходного (первоначального) напора. От уровня жидкости в резервуаре по вертикали, отвечающей сечению при входе жидкости в трубопровод, отложим в масштабе вниз отрезок, равный потере напора при входе жидкости в трубу (потеря напора в местном сопротивлении $h_{вх}$). На участке l_1 имеет место потеря напора по длине трубопровода $h_{дл1}$. Для получения точки, принадлежащей напорной линии в конце участка l_1, отложим от линии полного напора после входа жидкости в трубу по вертикали в конце участка l_1 вниз в масштабе отрезок, соответствующий потере напора на этом участке $h_{дл1}$. Затем от точки полного напора в конце участка l_1 отложим в масштабе отрезок, соответствующий потере напора в местном сопротивлении (например, внезапное расширение $h_{вн.р}$), и так до конца трубопровода. Соединяя точки полного напора в каждом сечении, получим напорную линию (три участка).

2. Пьезометрическая линия (штрихпунктирная линия на рис. 3.3) показывает, как изменяется пьезометрический напор (удельная потенциальная энергия) по длине потока. Удельная потенциальная энергия меньше полной удельной энергии на величину удельной кинетической энергии $\alpha\upsilon^2 / 2g$. Поэтому чтобы построить пьезометрическую линию, нужно вычислить на каждом участке величину $\alpha\upsilon^2 / 2g$ в начале и в конце каждого участка. Соединив полученные точки, построим пьезометрическую линию.

Графики напорной и пьезометрической линий будут построены правильно в том случае, если при их построении были выдержаны принятые вертикальный и горизонтальный масштабы, а также верно вычислены все потери напора и все скоростные напоры $\alpha\upsilon^2 / 2g$.

Для того чтобы проверить правильность построения напорной и пьезометрической линий, необходимо помнить следующее:

– напорная линия вниз по течению всегда убывает. Нигде и никогда напорная линия не может вниз по течению возрастать;

– поскольку потеря энергии потока на трение зависит от скорости движения жидкости, интенсивность потери напора (потеря напора на единицу длины или гидравлический уклон) будет больше на том участке, где скорость выше. Следовательно, на участках с меньшими диаметрами и большими скоростями наклон напорной и пьезометрической линий будет больше;

– в отличие от напорной пьезометрическая линия может вниз по течению как убывать, так и возрастать (при переходе с меньшего сечения на большее);

– в пределах каждого участка пьезометрическая линия должна быть параллельна напорной, поскольку в пределах каждого участка постоянна величина $\alpha\upsilon^2 / 2g$;

– на тех участках, где скорость больше, расстояние между напорной и пьезометрической линиями больше;

– как бы ни изменялась пьезометрическая линия по длине потока при выходе его в атмосферу (свободное истечение), она неизбежно должна приходить в центр тяжести выходного сечения. Это происходит потому, что пьезометрическая линия показывает изменение избыточного давления по длине трубопровода, которое в выходном сечении равно нулю, поскольку в выходном сечении абсолютное давление равно атмосферному.

После построения напорной и пьезометрической линий на графике показывают все потери напора и все скоростные напоры с указанием их численных значений. Примерный вид графика приведен на рис. 3.3.

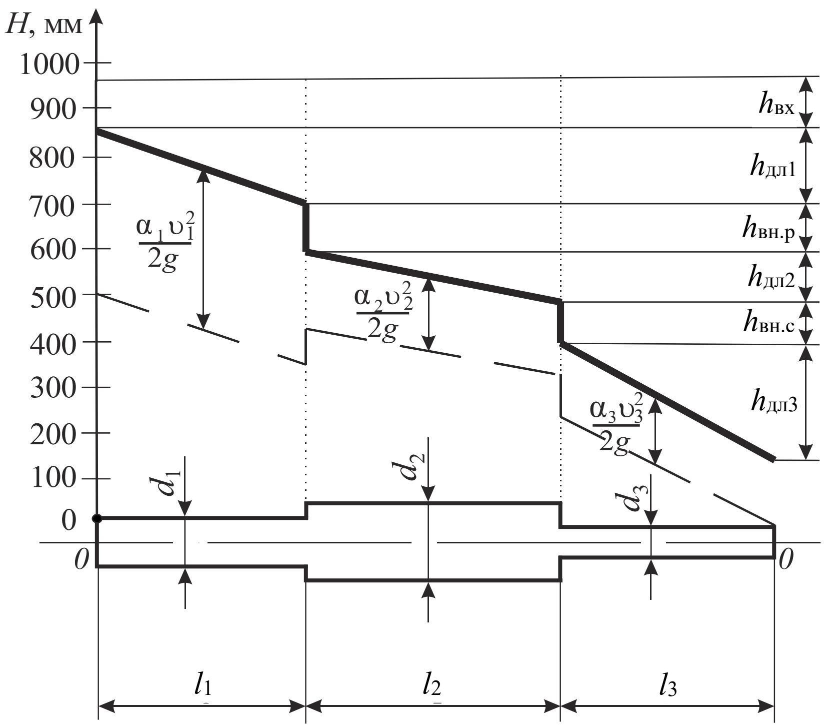


Рис. 3.3. Схема простого короткого трубопровода с напорной и пьезометрической линиями (диаграмма Бернулли)

Построение напорной линии (диаграммы Бернулли, чертеж формата А4) и пьезометрической линии нужно проводить на миллиметровой бумаге формата А4 (оформляется как приложение А), соблюдая масштаб так, чтобы диаграмма занимала максимально возможное поле чертежа. При этом на графике нужно отобразить все числовые значения в миллиметрах.

3.3. Методика расчета контрольной задачи № 3

1. Составим уравнение Бернулли в общем виде для сечений *1–1* (на свободной поверхности жидкости в первом резервуаре) и *2–2* (во втором резервуаре) (см. рис. 2.3 на с. 30, формулу (3.2)).

2. Определим геометрические высоты сечений *1–1* и *2–2*, руководствуясь п. 3 к контрольной задаче № 1 (см. с. 32–33).

3. Скоростными напорами $\alpha_1 \upsilon_1^2 / 2g$ и $\alpha_2 \upsilon_2^2 / 2g$ в сечении *1–1* можно пренебречь в связи с тем, что скорость движения воды в первом и втором резервуарах значительно меньше скорости в трубе (см. диаметры в табл. 2.3 на с. 29).

4. Как отмечалось выше, длинные трубопроводы характерны тем, что в них доля местных сопротивлений $h_м$ по сравнению с сопротивлениями по длине труб $h_{дл}$ мала, поэтому местные потери энергии не учитываются.

Трубопровод является последовательным. При подаче жидкости по такому трубопроводу расход Q во всех последовательно соединенных участках будет один и тот же, а полная потеря напора между сечениями *1–1* и *2–2* равна сумме потерь напора во всех последовательно соединенных трубах, т. е. имеем следующие основные расчетные соотношения:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3;$$

$$\sum h_{п1-2} = \sum h_{дл2} + \sum h_{дл3} + \sum h_{дл4}.$$

Для определения $h_{дл}$ в трубах при турбулентном движении в зоне квадратичного сопротивления, кроме формулы Дарси – Вейсбаха, в практике водопроводных расчетов широко используется следующая формула:

$$h_{дл} = \frac{Q^2}{K^2} l, \tag{3.23}$$

где K^2 – расходная характеристика (модуль расхода), м^6/с^2, т. е. расход воды через трубопровод заданного сечения при гидравлическом уклоне ($i = h_{дл} / l$), который равен единице (см. таблицу на с. 22).

Значение расходной характеристики определим методом двойной интерполяции.

5. Величину потерь по длине $h_{дл}$, м, рассчитаем, воспользовавшись следующим выражением:

$$H = H_1 = z + H_2 + h_{дл}.$$

Тогда в данной задаче потери по длине $h_{дл}$, м, с учетом расходов в узлах q_1 и q_2 могут быть определены так:

$$h_{дл} = \frac{Q^2}{K_1^2} l_2 + \frac{(Q - q_1)^2}{K_2^2} l_3 + \frac{(Q - q_1 - q_2)^2}{K_3^2} l_4. \qquad (3.24)$$

6. Далее из формулы (3.24) найдем искомый расход.

Квадратное уравнение решим с помощью формул разности квадратов и дискриминант (необходимо представить полный расчет).

Примеры решения контрольных задач № 1–3 приведены в методических указаниях по выполнению курсовой работы [4].

Раздел 4

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ С ТИПОВЫМИ ПРИМЕРАМИ РЕШЕНИЯ

Практическое занятие № 1
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА (ПЛОТНОСТЬ, СЖИМАЕМОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСШИРЕНИЕ)

Задача № 4.1. Вычислить плотности воды и нефти при $t = 4°C$, если известно, что $V = 10$ л воды при $t = 4°C$ имеет массу $m_в = 10$ кг, а масса того же объема нефти равна $m_н = 8{,}2$ кг. Сравнить плотность нефти $\rho_н$, кг/м^3, с плотностью воды $\rho_в$, кг/м^3.

Задача № 4.2. Найти плотность смеси жидкостей $\rho_{см}$, кг/м^3, которая имеет следующий массовый состав: керосин – $\beta_1 = 30\%$, мазут – $\beta_2 = 70\%$, если плотность керосина $\rho_к = 790$ кг/м^3, а мазута $\rho_м = 900$ кг/м^3.

Задача № 4.3. Определить, насколько поднимется уровень нефти в цилиндрическом резервуаре Δh, м (рис. 4.1), при увеличении температуры от $t_0 = 15°C$ до $t_1 = (40 + N)°C$. Плотность нефти при $t_0 = 15°C$ равна $\rho_н = 900$ кг/м^3. Диаметр резервуара $d = (10 + N / 2)$ м. Нефть заполняет резервуар при $t_0 = 15°C$ до $H = (12 + 0{,}1N)$ м. Коэффициент температурного расширения составляет $\beta_t = 6{,}4 \cdot 10^{-4}$ °C^{-1}. Расширение резервуара не учитывать.

Задача № 4.4. Канистра, полностью заполненная бензином, нагрелась на солнце от температуры $t_0 = 20°C$ до температуры $t_1 = 50°C$. Модуль объемной упругости бензина $E = (1000 + 40N)$ МПа, коэффициент температурного расширения $\beta_t = 8 \cdot 10^{-4}$ °C^{-1}. Определить повышение давления в канистре Δp, Па.

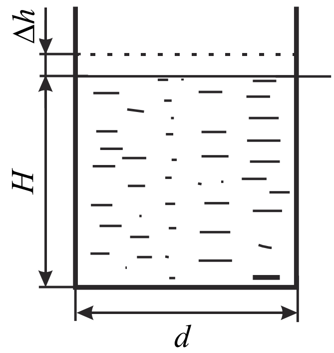


Рис. 4.1. К задаче № 4.3

Пример № 4.1. В вертикальном цилиндрическом резервуаре диаметром $d = 4$ м хранится 100 т нефти, плотность которой при 0°C $\rho_0 = 850$ кг/м^3.

Определить изменение уровня нефти в резервуаре при изменении температуры нефти от 0 до 30°C.

Расширение резервуара не учитывать. Коэффициент теплового расширения нефти принять равным $\beta_t = 0{,}00072$ °C^{-1}.

Решение. Объем, занимаемый нефтью при температуре 0°C, найдем по формуле

$$V_0 = \frac{m}{\rho_0} = \frac{100 \cdot 10^3}{850} = 118 \text{ м}^3.$$

Изменение объема при изменении температуры на 30°C вычислим по следующей формуле:

$$\Delta V = \beta_t V_0 \Delta t = 0{,}00072 \cdot 118 \cdot 30 = 2{,}55 \text{ м}^3.$$

Изменение уровня нефти в резервуаре рассчитаем из соотношения

$$\Delta h = \frac{4\Delta V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 2{,}55}{3{,}14 \cdot 4^2} = 0{,}203 \text{ м}.$$

Пример № 4.2. Винтовой пресс Рухгольца (рис. 4.2) для тарировки пружинных манометров работает на масле с коэффициентом сжимаемости $\beta_p = 0{,}638 \cdot 10^{-9}$ Па$^{-1}$.

Определить, на сколько оборотов надо повернуть маховик винта, чтобы поднять давление на $9{,}8 \cdot 10^4$ Па, если начальный объем рабочей камеры пресса $V_0 = 0{,}628 \cdot 10^{-3}$ м^3, диаметр плунжера $d = 20$ мм, шаг винта $h = 2$ мм. Стенки рабочей камеры считать недеформируемыми.

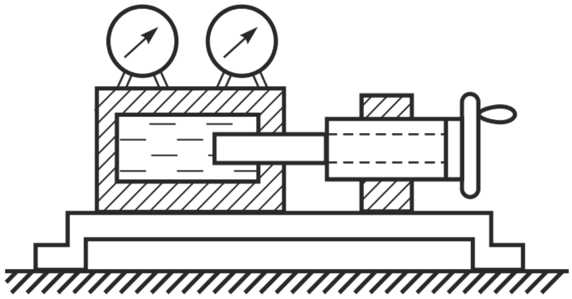


Рис. 4.2. К примеру № 4.2

Решение. Для повышения давления на Δp необходимо, чтобы объем жидкости в рабочей камере пресса уменьшился на величину:

$$\Delta V = \beta_p V \Delta p = 0,638 \cdot 10^{-9} \cdot 0,628 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 10^{4} = 3,93 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

Длина, на которую должен продвинуться плунжер, равна:

$$l = \frac{4\Delta V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 3,93 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

При этом маховик винта необходимо повернуть на $n = l / h =$ $= 0,125 / 2 \approx 0,06$ оборота.

Практическое занятие № 2 ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА (ВЯЗКОСТЬ, СЖИМАЕМОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСШИРЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ, КАПИЛЛЯРНОСТЬ)

Задача № 4.5. Рассчитать кинематическую вязкость воды $\nu_в$, м^2/с, в трубах радиатора автомобиля, температура которой t = 41°С, а плотность $\rho_в$ = 998 кг/м^3.

Примечание. Формула Пуазейля (для чистой пресной воды) для нахождения динамической вязкости μ, Па · с, записывается следующим образом:

$$\mu = \frac{0,00179}{1 + 0,0368t + 0,000221t^2}, \quad (4.1)$$

где t – температура жидкости, °С.

Задача № 4.6. Трубопровод диаметром $d = 300$ мм и длиной $l = 500$ м наполнен водой при давлении $p_0 = 392{,}4$ кПа и температуре $t_0 = 10$°C (рис. 4.3). Определить, пренебрегая деформацией трубопровода, избыточное давление в нем $p_{изб}$, кПа, при нагреве воды до $t = 20$°C. Коэффициент объемного сжатия $\beta_p = 0{,}49 \cdot 10^{-9}$ Па$^{-1}$, а коэффициент температурного расширения $\beta_t = 0{,}00015$ °C^{-1}.

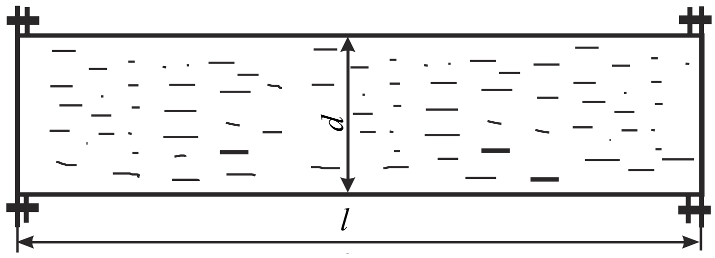


Рис. 4.3. К задаче № 4.6

Задача № 4.7. Внутренний диаметр трубопровода $d = 0{,}4$ м, его длина $l = 1$ км, давление $p = 2 \cdot 10^6$ Па. Найти изменение давления Δp, Па, при нагреве воды в трубе от $t_1 = 10$°C до $t_2 = (10 + 5N)$°C. Коэффициент объемного сжатия $\beta_p = 5 \cdot 10^{-5}$ Па$^{-1}$, коэффициент температурного расширения $\beta_t = 155 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

Задача № 4.8. Определить изменение высоты подъема воды в стеклянном капилляре Δh, мм, если диаметр капилляра составляет $d = 1$ мм при нагреве воды в нем от $t_1 = 5$°C до $t_2 = (30 + 2N)$°C. Плотность воды при температуре t_1 равна $\rho = 998$ кг/м^3, коэффициент температурного расширения $\beta_t = 155 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Поверхностное натяжение σ, Н/м, имеет следующую зависимость от температуры t: $\sigma = 0{,}0756 - 0{,}00015t$.

Пример № 4.3. Найти динамическую вязкость мазута, если плотность его $\rho = 900$ кг/м^3, а условная вязкость, определенная по вискозиметру, составляет 8°E.

Решение. Вычислим кинематическую вязкость по формуле

$$\nu = \left(0{,}0731 \cdot {}^\circ\text{E} - \frac{0{,}0631}{{}^\circ\text{E}}\right) \cdot 10^{-4} =$$

$$= \left(0{,}0731 \cdot 8 - \frac{0{,}0631}{8}\right) \cdot 10^{-4} = 0{,}58 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Динамическая вязкость будет равна:

$$\mu = \rho\nu = 900 \cdot 0{,}58 \cdot 10^{-4} = 0{,}052 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Пример № 4.4. Жидкость плотностью $\rho_ж$ вытекает из отверстия трубки диаметром $d_т$. Коэффициент поверхностного натяжения капли равен σ. Определить отрывной диаметр капли $d_к$. Сколько капель получится из 1 см^3 вытекающей жидкости?

Считать, что капля отрывается в месте ее контакта с нижним концом трубки.

Решение. Рассмотрим условия равновесия капли непосредственно перед ее отрывом от нижнего среза трубки. В момент отрыва капли вес капли равен силе поверхностного натяжения по линии касания капли с трубкой.

Вес капли определим из соотношения

$$G_к = \rho_ж g \frac{\pi d_к^{\ 3}}{6} = \rho_ж g V_к, \qquad (4.2)$$

где $V_к$ – объем капли, м^3.

Сила поверхностного натяжения равна:

$$F_п = \pi d_т \sigma. \qquad (4.3)$$

Приравняв (4.2) и (4.3), получим:

$$V_к = \frac{\pi d_т \sigma}{\rho_ж g}; \qquad (4.4)$$

$$d_к = \sqrt[3]{\frac{6V_к}{\pi}}. \qquad (4.5)$$

Для нахождения числа капель в 1 см^3 необходимо разделить объем вытекающей жидкости на объем одной капли.

Пример № 4.5. Определить высоту столбика жидкости $h_ж$, которая может удержаться в трубке, если ее полностью заполнить жидкостью в горизонтальном положении, а затем повернуть вертикально.

Диаметр и высота капиллярной трубки соответственно равны $d_к$ и $H_к$. Краевой угол смачивания равен θ.

Решение. Найдем решение из баланса давлений вследствие кривизны свободных поверхностей жидкости в капилляре (их две) и гидростатического давления столба жидкости $h_ж$.

Высота столба жидкости составит:

$$h_ж = \frac{8\sigma \cdot \cos\theta}{\rho g d_к}. \qquad (4.6)$$

Практическое занятие № 3
ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОСТАТИКИ. РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Задача № 4.9. Рассчитать, на какую высоту h, м, поднимется вода в пьезометрической трубке под действием плунжера при следующих условиях (рис. 4.4): диаметр плунжера $d = (100 + 2N)$ мм, заглубление плунжера $a = 30$ см, действующая на плунжер сила $P = (200 + 2N)$ Н. Собственный вес плунжера не учитывать.

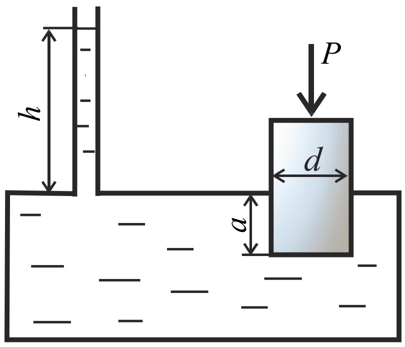


Рис. 4.4. К задаче № 4.9

Задача № 4.10. Определить природу давления в верхней точке правого сосуда и его значение p_x, Па (рис. 4.5), если манометрическое давление в верхней точке левого сосуда $p_м = 13$ кПа, высоты уровней жидкости в левом и правом сосудах соответственно $h_1 = 600$ мм, $h_2 = 400$ мм, плотность масла $\rho_м = 880$ кг/м^3.

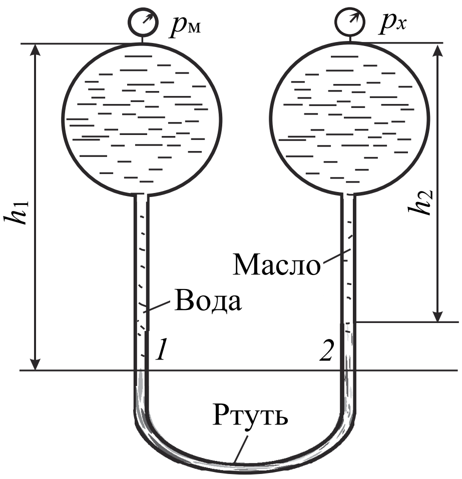


Рис. 4.5. К задаче № 4.10

Задача № 4.11. В закрытом сосуде хранится жидкость плотностью $\rho_ж = (850 + 3N)$ кг/м^3. Давление в сосуде измеряется ртутным манометром; в открытом конце манометрической трубки над ртутью имеется столб воды высотой h_1 = 15 см. Высоты столбов жидкости h_2 = 23 см, h_3 = 35 см. Найти абсолютное давление на поверхности жидкости в сосуде $p = p_{абс}$ (рис. 4.6), если барометрическое давление соответствует $p_{бар} = (742 + 10N)$ мм рт. ст.

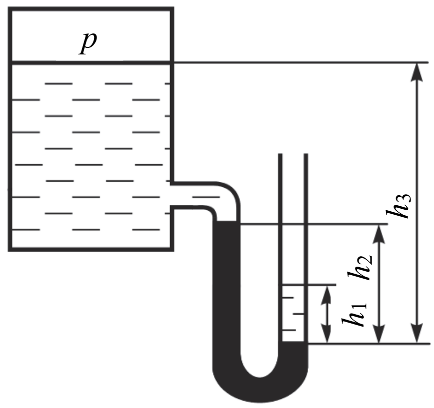


Рис. 4.6. К задаче № 4.11

Задача № 4.12. Барометр, установленный у подножия холма, показывает давление $p_{бар1}$ = 760 мм рт. ст., на вершине холма – $p_{бар2} = (720 + N)$ мм рт. ст. Определить высоту холма H, м, считая температуру воздуха постоянной и равной $t_в = (8 + N / 4)$°C.

Задача № 4.13. Колокол массой $M = (3 + 0{,}05N)$ т, диаметром $D = (4 + 0{,}5N)$ м опустили в сосуд с водой. Рассчитать перепад H, мм, уровней воды в сосуде и под колоколом (рис. 4.7).

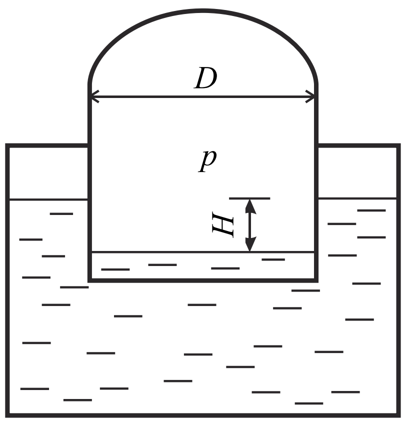


Рис. 4.7. К задаче № 4.13

Пример № 4.6. Вычислить, на какую высоту h может поднять воду прямодействующий паровой насос (рис. 4.8) при следующих данных: диаметр парового цилиндра d_1 = 0,3 м и манометрическое давление в нем $p_м$ = 80 кПа, диаметр водяного цилиндра d_2 = 0,05 м. Плотность воды ρ = 1000 кг/м^3. Считать, что система находится в равновесии. Трением поршней в цилиндрах пренебречь.

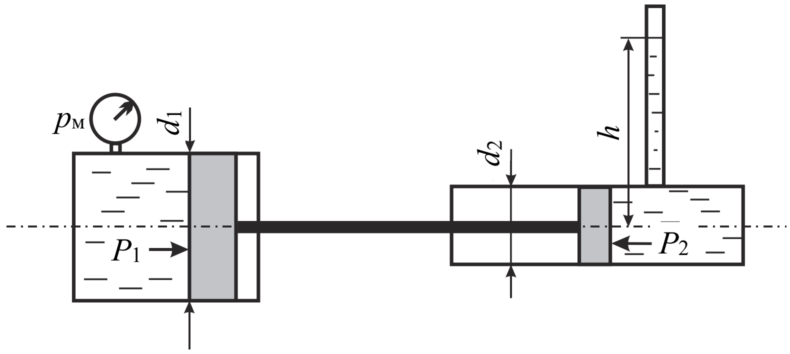


Рис. 4.8. К примеру № 4.6

Решение. По условию равновесия силы, действующие слева и справа, должны быть равны:

$$P_1 = P_2.$$

Тогда

$$p_м \frac{\pi d_1^2}{4} = \rho_в g h \frac{\pi d_2^2}{4}, \quad (4.7)$$

откуда получаем:

$$h = \frac{p_м d_1^2}{\rho_в g d_2^2} = \frac{80000 \cdot 0{,}3^2}{1000 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}05^2} = 294 \text{ м}.$$

Пример № 4.7. В закрытом резервуаре с нефтью плотностью ρ = 880 кг/м^3 вакуумметр, установленный на его крышке, показывает $p_в$ = 1,18 · 10^4 Па (рис. 4.9).

Определить показание манометра $p_м$, присоединенного к резервуару на глубине h = 6 м от поверхности жидкости, и положение пьезометрической плоскости.

Решение. Проведем плоскость *1–1* на уровне присоединения манометра. В этой плоскости абсолютное давление в соответствии с основным уравнением гидростатики равно:

$$p_{1-1} = p_0 + \rho g h, \tag{4.8}$$

где p_0 – абсолютное давление на поверхности, равное $p_а - p_в$.

Тогда

$$p_{1-1} = p_а - p_в + \rho g h.$$

Поскольку манометр измеряет избыточное давление, то:

$$p_{1-1} = p_а + p_в.$$

Приравняв эти два выражения для p_{1-1}, найдем:

$$p_м = -p_в + \rho g h =$$

$$= -1{,}18 \cdot 10^4 + 880 \cdot 9{,}8 \cdot 6 = 3{,}99 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Так как на поверхности жидкости давление меньше атмосферного, то пьезометрическая высота отрицательна:

$$h_п = \frac{\Delta p}{\rho g} = -\frac{p_в}{\rho g} =$$

$$= -\frac{1{,}18 \cdot 10^4}{880 \cdot 9{,}8} = -1{,}37 \text{ м},$$

т. е. пьезометрическая плоскость расположена ниже поверхности жидкости.

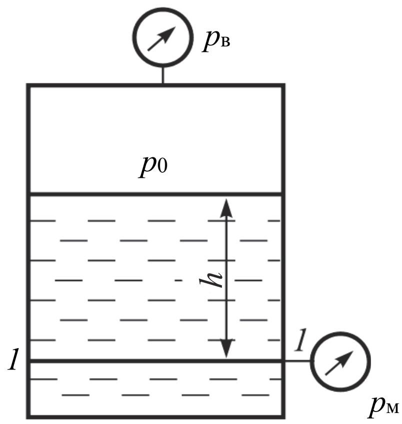


Рис. 4.9. К примеру № 4.7

Пример № 4.8. Определить давление на забое закрытой газовой скважины (рис. 4.10), если глубина скважины H = 2200 м, избыточное давление на устье $p_м$ = 10,7 МПа, плотность природного газа при атмосферном давлении и температуре в скважине (считаемой неизменной по высоте) $\rho = 0{,}76$ кг/м^3, атмосферное давление $p_а = 98$ кПа.

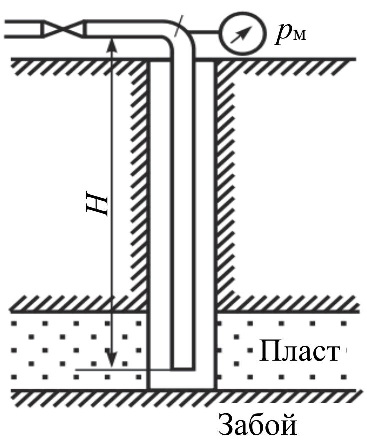


Рис. 4.10. К примеру № 4.8

Решение. Для нахождения давления на забое газовой скважины воспользуемся барометрической формулой:

$$p = p_0 e^{\frac{\rho_0 g(z_0 - z)}{p_0}}. \qquad (4.9)$$

В нашем случае p_0 – абсолютное давление на устье скважины:

$$p_0 = p_а + p_м =$$
$$= 98 \cdot 10^3 + 10{,}7 \cdot 10^6 = 10{,}8 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

При этом ρ_0 – плотность при давлении p_0, а $z_0 - z = 2200$ м.

Из уравнения состояния газа следует, что:

$$\frac{\rho_0}{p_0} = \frac{\rho_а}{p_а} =$$
$$= \frac{0{,}76}{98 \cdot 10^3} = 7{,}76 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2/\text{м}^2,$$

а показатель степени:

$$\rho_0 g(z_0 - z) = 7{,}76 \cdot 10^{-6} \cdot 9{,}8 \cdot 2200 = 0{,}167.$$

Тогда

$$p = 10{,}8 \cdot 10^6 \cdot e^{0{,}167} = 12{,}8 \text{ МПа}.$$

Практическое занятие № 4
ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Задача № 4.14. Найти силу давления воды на дно сосуда P, Н, диаметром $D = (1 + N / 10)$ м (рис. 4.11), если глубина $H = 0{,}7$ м, вес поршня $G = (300 + N)$ Н, диаметр поршня $d = 0{,}5$ м.

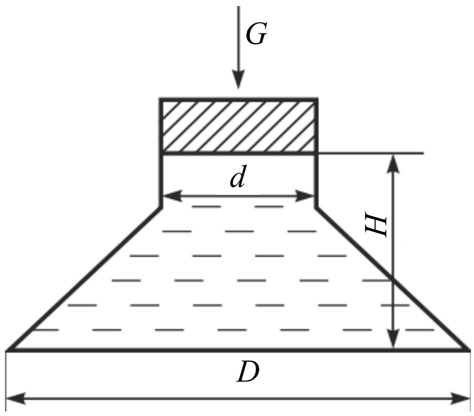


Рис. 4.11. К задаче № 4.14

Задача № 4.15. Прямоугольный открытый резервуар предназначен для хранения воды объемом $V = (30 + 10N) \cdot 10^6$ см^3 (рис. 4.12). Определить силы давления на стенки $P_{с1}$ и $P_{с2}$, Н, и дно резервуара $P_д$, Н, если ширина дна $b = (3 + N / 5)$ м, а длина $a = (5 + N / 10)$ м.

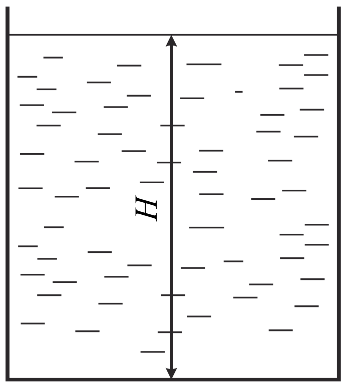


Рис. 4.12. К задаче № 4.15

Задача № 4.16. Вертикальный щит A, который перекрывает водослив плотины, может перемещаться в пазах B вверх и вниз (рис. 4.13).

Глубина жидкости $H = (1,4 + N / 10)$ м, ширина щита $b = 2,6$ м. Какую силу нужно приложить F, кН, чтобы поднять щит, если его вес $G = (32 + N / 5)$ кН, а коэффициент трения между щитом и поверхностью пазов $l = 0,3$?

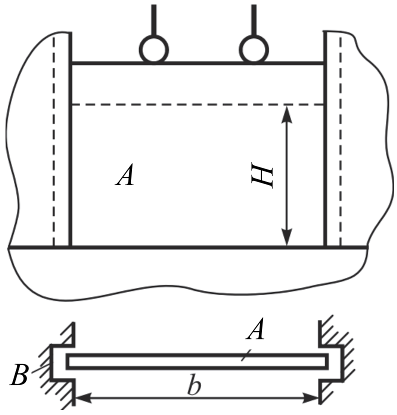


Рис. 4.13. К задаче № 4.16

Задача № 4.17. Рассчитать силу T, кН, которую нужно приложить к тросу, чтобы поднять плотину (рис. 4.14). Высота плотины $h = (1,4 + 0,1N)$ м, ее ширина $b = 2$ м. Высота уровня воды в канале $H = 5$ м. Угол наклона плотины $\alpha = 60°$.

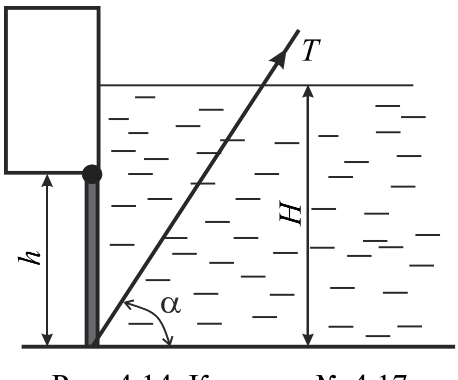


Рис. 4.14. К задаче № 4.17

Пример № 4.9. Вычислить минимальную массу m груза, способную удержать прямоугольный щит высотой $h = 3$ м и шириной $b = 2$ м в закрытом положении (рис. 4.15), при уровне воды в канале $H = 5$ м. Длина рычага, на котором укреплен груз, $l = 3$ м. Щит может поворачиваться в подшипниках вокруг оси O. Выше оси расположены неподвижные балки, концы которых заделаны в боковые стенки канала.

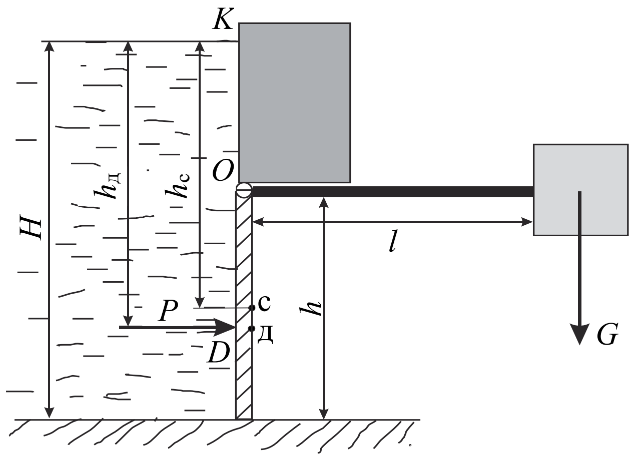


Рис. 4.15. К примеру № 4.9

Решение. Сила тяжести минимального груза G может быть найдена из уравнения моментов, составленного относительно оси O:

$$\sum M_0 = 0,$$

или

$$Gl - P \cdot DO = 0.$$

Тогда

$$G = \frac{P \cdot DO}{l},$$

где P – сила давления воды на щит, Н, рассчитываемая по формуле $P = \rho g h_c S$; DO – плечо силы P, м, определяемое по формуле $DO = h_д - KO = h_д - (H - h)$.

Площадь щита вычислим по следующей формуле:

$$S = bh = 2 \cdot 3 = 6 \text{ м}^2.$$

Расстояние центра тяжести щита от свободной поверхности найдем из выражения

$$h_c = H - \frac{h}{2} = 5 - \frac{3}{2} = 3{,}5 \text{ м}.$$

Момент инерции щита относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести, рассчитаем по следующей формуле:

$$I_c = \frac{bh^3}{12} = \frac{2 \cdot 3^3}{12} = 4{,}5 \text{ м}^4.$$

Расстояние центра давления от свободной поверхности определим по формуле

$$h_д = h_с + \frac{I_с}{h_с S} = 3,5 + \frac{4,5}{3,5 \cdot 6} = 3,71 \text{ м.}$$

Подставив полученные значения в вышеприведенные формулы, получим:

$$DO = h_д - (H - h) = 3,71 - (5 - 3) = 1,71 \text{ м};$$

$$P = \rho g h_с S = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5 \cdot 6 = 206 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Тогда

$$G = \frac{P \cdot DO}{l} = \frac{206 \cdot 10^3 \cdot 1,71}{3} = 117 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$m = \frac{G}{g} = \frac{117 \cdot 10^3}{9,81} = 11\ 926,6 \text{ кг.}$$

Практическое занятие № 5
ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ НА НАКЛОННЫЕ ПЛОСКИЕ И КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ. ЗАКОН АРХИМЕДА

Задача № 4.18. Определить силу гидростатического давления воды на квадратный щит P, Н, закрывающий отверстие в наклонной плоской стенке, а также глубину погружения центра давления $h_д$, м, при следующих данных (рис. 4.16): сторона щита $d = 0,3$ м, длина $l_с = 1$ м, $\alpha = 45°$, плотность воды $\rho = 1000$ кг/м^3.

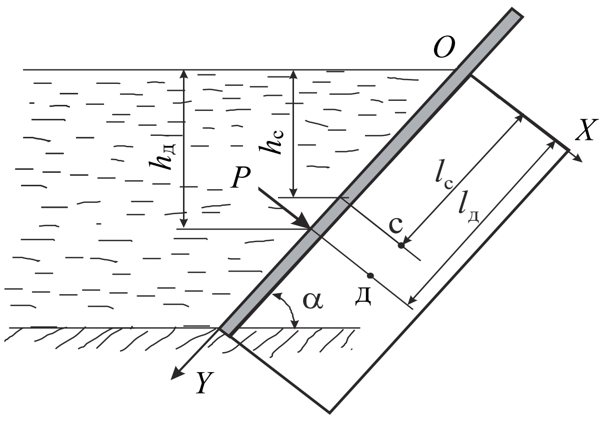


Рис. 4.16. К задаче № 4.18

Задача № 4.19. Найти силу давления нефти P, Н, на цилиндрическую стенку резервуара и центр приложения этой силы $h_д$, м, а также угол наклона α линии действия этой силы к горизонту (рис. 4.17), если радиус стенки R = 800 мм, ширина стенки b = 3 м, высота нефти в резервуаре H = 2 м, плотность нефти ρ = 900 кг/м^3.

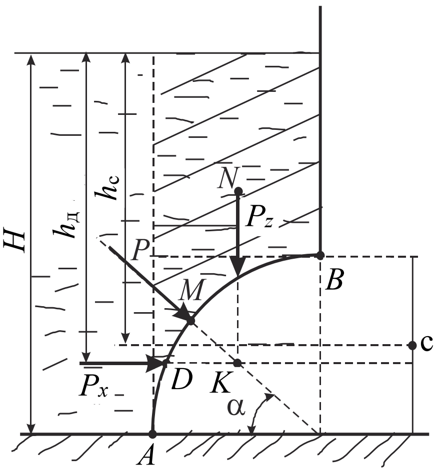


Рис. 4.17. К задаче № 4.19

Задача № 4.20. Какой объем бензина $V_б$, м^3, при ρ = 740 кг/м^3 можно залить в железнодорожную цистерну внутренним объемом V = 50 м^3 и массой m = 23 т, чтобы она еще сохраняла плавучесть в пресной воде? Будет ли при плавании цистерна устойчива?

Пример № 4.10. Для слива жидкой субстанции из хранилища имеется квадратный патрубок со стороной h = 0,3 м, закрытый шарнирно закрепленной в точке O крышкой. Крышка опирается на торец патрубка и расположена под углом 45° к горизонту (рис. 4.18).

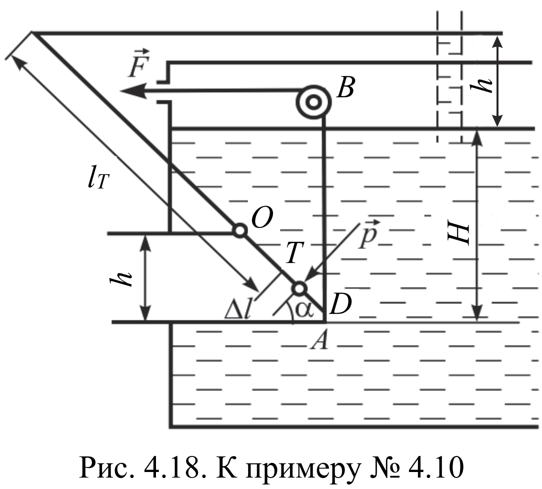


Рис. 4.18. К примеру № 4.10

Определить (без учета трения в шарнире O и рамке B) силу F, кН, натяжения троса, необходимую для открытия крышки AO, если уровень жидкости $H = 3$ м, давление над ней, измеренное манометром, $p_{\text{м}} = 5$ кПа, а плотность $\rho = 700$ кг/м^3. Вес крышки не учитывать.

Решение. Найдем силу давления на стенку AO.

Рассматриваемой смоченной поверхностью является прямоугольная наклонная стенка высотой $h / \sin\alpha$ и шириной h, т. е. площадь составит $S = h^2 / \sin\alpha$.

Центр тяжести этой стенки находится на глубине $h_{\text{с}} = H - h / 2$, $\Delta p = p_{\text{м}}$, т. е.

$$P = \left[p_{\text{м}} + \rho g \left(H - \frac{h}{2} \right) \right] S =$$

$$= \left[5 \cdot 10^3 + 700 \cdot 9,8 \cdot \left(3 - \frac{0,3}{2} \right) \right] \cdot \frac{0,3^2}{\sin 45^{\circ}} = 3,13 \text{ кН.}$$

Найдем теперь расстояние между центром давления и центром тяжести крышки:

$$h = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{p_{\text{м}}}{\rho g} = \frac{5 \cdot 10^3}{9,8 \cdot 700} = 0,729 \text{ м.}$$

Тогда

$$l_T = \frac{h + H - \dfrac{h}{2}}{\sin\alpha} = \frac{0,729 + 3 - 0,15}{0,707} = 5,06 \text{ м.}$$

Момент инерции прямоугольной стенки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести стенки, вычислим по формуле

$$I = \left(\frac{h}{\sin\alpha} \right)^3 \frac{h}{12} = \frac{h^4}{12 \cdot \sin^3 \alpha}. \tag{4.10}$$

Тогда

$$\Delta l = \frac{I}{l_T S} = \frac{h^4 \sin\alpha}{12 l_T \sin^3 \alpha \, h^2} = \frac{h^2}{12 l_T \sin^2 \alpha} =$$

$$= \frac{0,09}{12 \cdot 5,06 \cdot 0,5} = 0,003 \text{ м.}$$

Рассчитаем силу натяжения троса из уравнения моментов сил, взятых относительно оси шарнира:

$$\frac{F}{OA\cos\alpha} - P(OT + \Delta l) = 0.$$

Тогда

$$F = \frac{P(OT + \Delta l)}{h} = \frac{P\left(\dfrac{h}{2\cdot\sin\alpha} + \Delta l\right)}{h} =$$

$$= \frac{3{,}13\cdot 10^3}{0{,}3}\cdot\left(\frac{0{,}3}{2\cdot 0{,}707} + 0{,}003\right) = 2{,}24 \quad \text{кН}.$$

Пример № 4.11. Определить минимальную толщину стенки трубы (рис. 4.19) при допустимом напряжении материала трубы на разрыв $[\sigma] = 45\,000$ кН/м^2, внутреннем диаметре трубы $d = 150$ мм и манометрическом давлении жидкости в трубе $p_м$ = = 600 кПа.

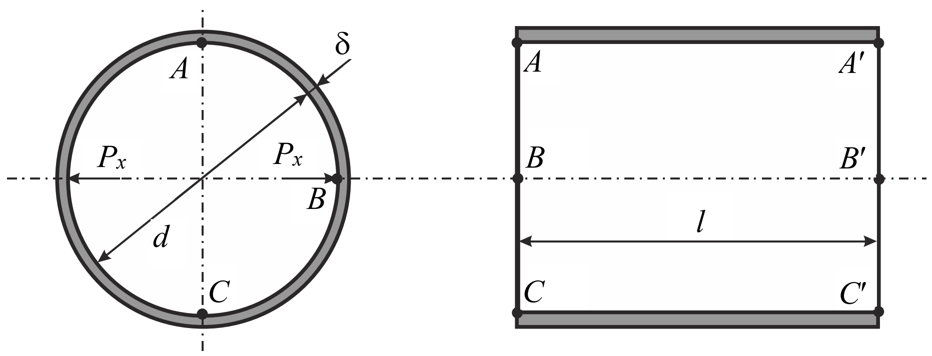


Рис. 4.19. К примеру № 4.11

Решение. Опасным сечением для трубы является любое ее диаметральное сечение. Пренебрегая силой тяжести жидкости в трубе, определим силу давления жидкости на цилиндрическую поверхность $ABCC'B'A'$:

$$P = P_x = p_м S_z = p_м l d,$$

где l – длина трубы.

Поскольку сила P стремится разорвать трубу в двух местах (по линиям AA' и CC'), т. е. воспринимаются двумя сечениями стенки трубы $l\delta$, то:

$$p_м ld = 2l\delta[\sigma].$$

Отсюда минимальная толщина стенки трубы составит:

$$\delta_{min} = \frac{p_м d}{2[\sigma]} = \frac{600 \cdot 0,15}{2 \cdot 45\,000} = 0,001 = 1 \text{ мм}.$$

Практическое занятие № 6
ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

Задача № 4.21. По трубам одноходового кожухотрубного теплообменного аппарата (число труб n = 121 шт., наружный диаметр труб $d_н$ = 38 мм, толщина стенки σ = 2 мм) проходит воздух при средней температуре $t_в$ = 50°C и давлении по манометру $p_м$ = 2 ат, со скоростью υ = 9 м/с. Барометрическое давление $p_{бар}$ = 740 мм рт. ст.

Найти массовый расход воздуха Q_m, кг/с, объемный расход воздуха при рабочих условиях $Q_{р.у}$, м^3/с, объемный расход воздуха при нормальных условиях $Q_{н.у}$, м^3/с.

Задача № 4.22. Определить режим движения воды в трубах радиатора автомобиля, трубки которого имеют прямоугольное сечение $a \times b$ мм, где a = 3N мм и b = 7N мм. Расход воды, пропускаемой каждой трубкой, составляет Q = 10,5 см^3/с, температура воды $t_в$ = (40 + N)°C.

Задача № 4.23. Определить режим движения воды в канале трапецеидального сечения (безнапорное течение, открытое русло). Ширина канала по дну b = 7 м, глубина воды в канале h = 4,5 м, коэффициент заложения откоса m = 1,5 (рис. 4.20). Расход воды в канале Q = 20 м^3/с, температура воды $t_в$ = 12°C.

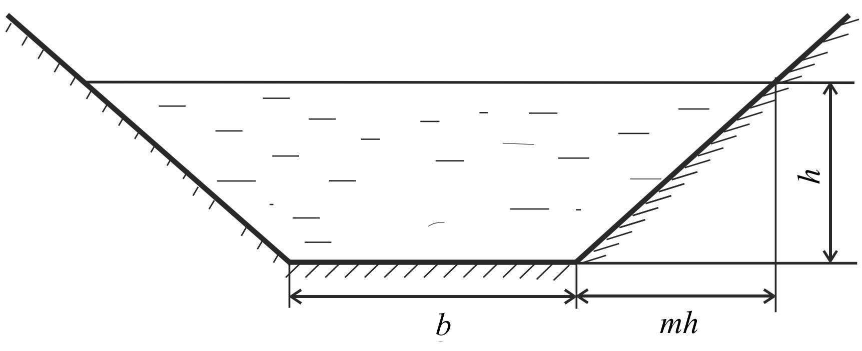


Рис. 4.20. К задаче № 4.22

Примечание. Число Рейнольдса в случае безнапорного движения (в каналах, канавах и т. д.) находится по формуле: $Re = \upsilon R_г / \nu$, где $R_г$ – гидравлический радиус, м (сравнивается с $Re_{кр} = 580$).

Пример № 4.12. Жидкость движется по трубопроводу, состоящему из трех участков (рис. 4.21), диаметры которых соответственно равны $d_1 = 50$ мм, $d_2 = 100$ мм и $d_3 = 150$ мм. Трубопровод присоединен к напорному баку, напор в котором поддерживается постоянным. Найти среднюю скорость движения жидкости на каждом из участков трубопровода, если она, вытекая из трубопровода, заполняет резервуар объемом $V = 2{,}5$ м^3 за время $t = 10$ мин.

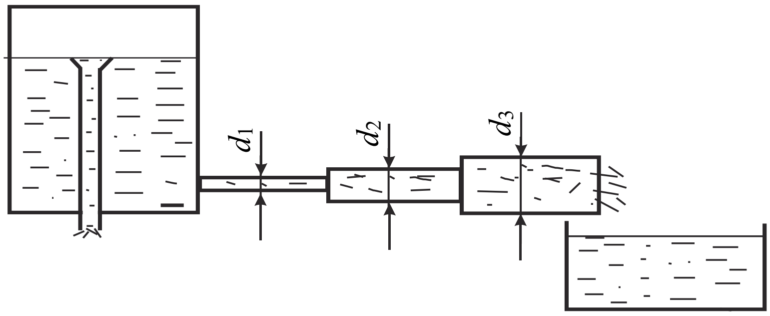


Рис. 4.21. К примеру № 4.12

Решение. Определим расход жидкости с помощью следующей формулы:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{2{,}5}{10 \cdot 60} = 0{,}00417 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Вычислим площадь живого сечения потока в трубах из соотношений

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}05^2}{4} = 0{,}0020 \text{ м}^2;$$

$$S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1^2}{4} = 0{,}00785 \text{ м}^2;$$

$$S_3 = \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}15^2}{4} = 0{,}0177 \text{ м}^2.$$

Для определения скоростей воспользуемся уравнением неразрывности:

$$Q = S_1\upsilon_1 = S_2\upsilon_2 = S_3\upsilon_3 = \text{const}.$$

Тогда

$$\upsilon_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{0,00417}{0,0020} = 2,085 \text{ м/с};$$

$$\upsilon_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{0,00417}{0,00785} = 0,531 \text{ м/с};$$

$$\upsilon_3 = \frac{Q}{S_3} = \frac{0,00417}{0,0177} = 0,236 \text{ м/с}.$$

Пример № 4.13. Найти массовый и объемный расход воздуха, проходящего по трубе диаметром d = 0,4 м со скоростью υ = 10 м/с. Давление в потоке $p = 5 \cdot 10^5$ Па, температура T = 313 К.

Решение. Плотность воздуха при нормальных условиях (атмосферном давлении $p_{н.у} = 1,01 \cdot 10^5$ Па и температуре $T_{н.у}$ = 293 К) равна $\rho_{н.у}$ = 1,2 кг/м^3. Тогда определим плотность воздуха в трубе при T = 313 К:

$$\rho = \rho_{н.у} \frac{p}{p_{н.у}} \frac{T_{н.у}}{T} = 1,2 \cdot \frac{5 \cdot 10^5}{1,01 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{313} = 5,54 \text{ кг/м}^3.$$

Массовый расход найдем по формуле

$$Q_m = \rho\upsilon \frac{\pi d^2}{4} = 5,54 \cdot 10 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 6,95 \text{ кг/с}.$$

Объемный расход вычислим из следующего соотношения:

$$Q = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{6,95}{5,54} = 1,26 \text{ м}^3\text{/с}.$$

Пример № 4.14. Радиатор автомобиля состоит из прямоугольных трубок сечением 8×12 мм. Рассчитать расход воды, которую нужно подавать в каждую трубку радиатора для того, чтобы обеспечить турбулентный режим движения (при турбулентном движении происходит лучшая теплоотдача от воды к воздуху, чем при ламинарном). Температура воды t = 60°C.

Решение. Площадь живого сечения прямоугольных трубок составит:

$$S = 8 \cdot 12 = 96 \text{ мм}^2 = 0,000096 \text{ м}^2.$$

Смоченный периметр равен:

$$\chi = 8 \cdot 2 + 12 \cdot 2 = 40 \text{ мм} = 0{,}04 \text{ м}.$$

Гидравлический радиус найдем из следующего соотношения:

$$R = \frac{S}{\chi} = \frac{0{,}0000096}{0{,}04} = 0{,}0024 \text{ м}.$$

При температуре воды $t = 60$°С кинематическая вязкость воды $\nu = 0{,}0047 \cdot 10^{-4}$ м^2/с.

Нижнюю критическую скорость при $\mathrm{Re}_{\text{н.к}} = 580$ (где $\mathrm{Re}_{\text{н.к}}$ – критическое число Рейнольдса) для прямоугольных трубок вычислим по формуле

$$\upsilon_{\text{н.к}} = \frac{\mathrm{Re}_{\text{н.к}}\nu}{R} = \frac{580 \cdot 0{,}0047 \cdot 10^{-4}}{0{,}0024} = 0{,}114 \text{ м/с}.$$

Искомый расход определим по формуле

$$Q = S\upsilon_{\text{н.к}} = 0{,}000096 \cdot 0{,}114 = 11{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Практическое занятие № 7
УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Задача № 4.24. Установить расход воды Q, м^3/с, протекающей через суженную трубу, если диаметры трубы $d_1 = (1400 + 20N)$ мм, $d_2 = 1250$ мм (рис. 4.22). Показания пьезометров: $h_1 = (2 - 0{,}05N)$ м и $h_2 = 0{,}3$ м.

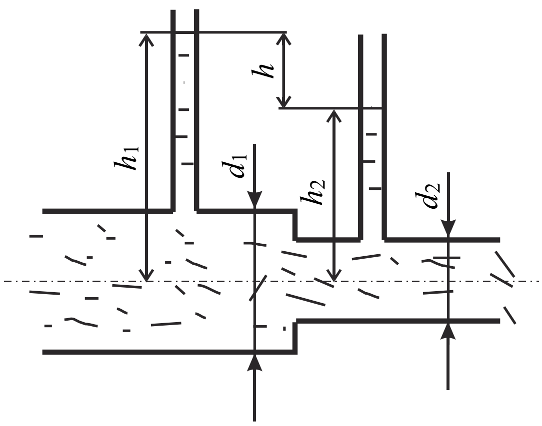


Рис. 4.22. К задаче № 4.24

Задача № 4.25. Определить показания пьезометра $h_{вак}$, м, если расход воды, протекающей через суженную трубу, равен $Q = (0{,}044 + 0{,}00N)$ м^3/с (рис. 4.23). Диаметры трубы d_1 = 100 мм, d_2 = 70 мм. Показание манометра $p_м$ = 49 кПа.

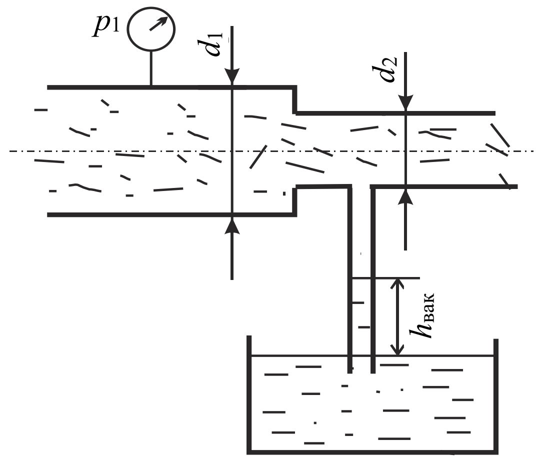


Рис. 4.23. К задаче № 4.25

Пример № 4.15. Манометр, присоединенный к трубке Пито – Прандтля, которая служит для измерения скорости воздуха (рис. 4.24), заполнен спиртом. Вычислить скорость воздуха, если высота h = 36 мм. Воздух считать идеальной жидкостью. Плотность спирта $\rho_{сп}$ = 800 кг/м^3, плотность воздуха $\rho_{возд}$ = 1,2 кг/м^3.

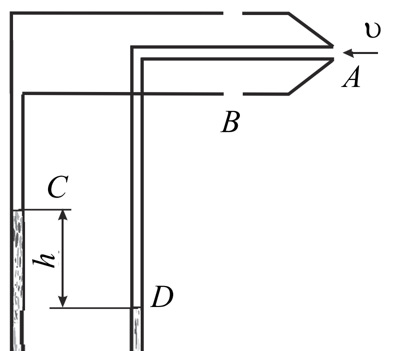


Рис. 4.24. К примеру № 4.15

Решение. Спирт в манометре находится в равновесии под действием разности давлений, действующих на его поверхность в левой и правой трубках. Давление на свободную поверхность спирта в левой трубке (в точке C) равно давлению в точке B, последнее равно давлению в невозмущенном потоке p. Давление же на свободную поверхность спирта в правой трубке (в точке D) будет равно давлению в точке A. Поскольку в точке A скорость равна нулю, то по уравнению Бернулли получим, что давление p_A будет равно:

$$p_A = p + \frac{\rho_{\text{возд}} g \upsilon^2}{2g} = p_D. \tag{4.11}$$

С помощью основного уравнения гидростатики давление в точке D можно выразить через давление в точке C:

$$p_D = p_C + \rho_{\text{сп}} g h = p_A. \tag{4.12}$$

Подставив в эту зависимость значения давлений p_C и p_D, получим следующее уравнение:

$$p + \frac{\rho_{\text{возд}} g \upsilon^2}{2g} = p + \rho_{\text{сп}} g h. \tag{4.13}$$

Скорость воздуха рассчитаем по формуле

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2g\rho_{\text{сп}}h}{\rho_{\text{возд}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 800 \cdot 0{,}036}{1{,}2}} = 21{,}7 \text{ м/с.}$$

Пример № 4.16. Определить расход в сужающем устройстве (трубе Вентури), если диаметры труб d_1 = 0,2 м, d_2 = 0,1 м, а замеренный дифференциальным манометром (рис. 4.25) скоростной напор $H_д$ = 0,2 м.

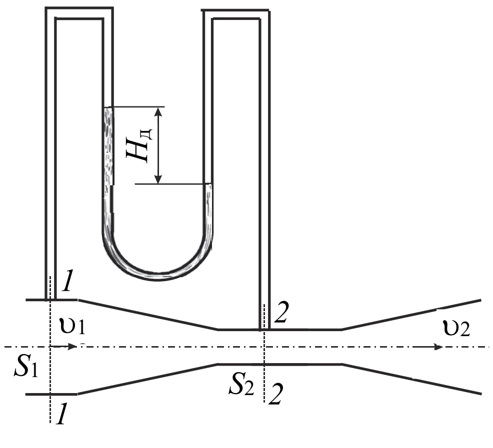


Рис. 4.25. К примеру № 4.16

Решение. Плоскость сравнения проведем через центры тяжести сечений, исключая тем самым геометрические напоры ($z = 0$). Составим уравнение Бернулли для сечений *1–1* и *2–2*, пренебрегая потерями напора между этими сечениями:

$$\frac{\upsilon_1^2}{2g}+\frac{p_1}{\rho g}=\frac{\upsilon_2^2}{2g}+\frac{p_2}{\rho g}, \tag{4.14}$$

где $\frac{p_1}{\rho g}-\frac{p_2}{\rho g}=\frac{\upsilon_2^2}{2g}-\frac{\upsilon_1^2}{2g}=H_д$ – напор по показанию дифференциального манометра, соответствующий скоростному напору, м.

Из уравнения неразрывности $Q = \upsilon_1 d_1 = \upsilon_2 d_2$ получим:

$$\upsilon_1=\frac{\upsilon_2 S_2}{S_1}.$$

Тогда

$$\frac{\upsilon_2^2}{2g}-\frac{\upsilon_1^2}{2g}=\frac{\upsilon_2^2}{2g}-\frac{\upsilon_2^2}{2g}\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2=$$

$$=\frac{\upsilon_2^2}{2g}\left(1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right). \tag{4.15}$$

Скорость во втором сечении вычислим из соотношения

$$\upsilon_2=\sqrt{\frac{2gH_д}{1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}}. \tag{4.16}$$

Определим расход, используя следующую формулу:

$$Q=\upsilon_2 S_2=\frac{\pi d_2^2}{4}\sqrt{\frac{2gH_д}{1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}}=$$

$$=\frac{3{,}14\cdot 0{,}1^2}{4}\sqrt{\frac{2\cdot 9{,}81\cdot 0{,}2}{1-\left(\frac{0{,}1}{0{,}2}\right)^4}}=0{,}016\ м^3/с.$$

Практическое занятие № 8
УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ РЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ. ПОТЕРИ НАПОРА (ДАВЛЕНИЯ) ПО ДЛИНЕ И С МЕСТНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

Задача № 4.26. Определить потери напора по длине в новом стальном трубопроводе $h_{\text{дл в}}$, м вод. ст., с абсолютной эквивалентной шероховатостью $\Delta_э = 0{,}1$ мм, диаметром $d = (200 + 2N)$ мм и длиной $l = (2 + N)$ км, если по нему транспортируется вода с расходом $Q = (20 + N / 4)$ л/с. Коэффициент кинематической вязкости воды $\nu_в = 0{,}01$ см^2/с. Как изменятся потери напора ($h_{\text{дл н}}$, м нефт. ст.), если по этому же трубопроводу будет транспортироваться нефть с тем же расходом, с коэффициентом кинематической вязкости $\nu_н = 1$ см^2/с?

Задача № 4.27. Найти расход воды Q, м^3/с, пропускаемый самотечной трубой длиной $l = 50$ м и диаметром $d = 250$ мм при разности уровней воды в колодцах $H = 2{,}5$ м (рис. 4.26). Коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0{,}023$. Коэффициенты местных сопротивлений: $\zeta_{\text{сетки}} = 6{,}0$; $\zeta_{\text{выхода}} = 1{,}0$.

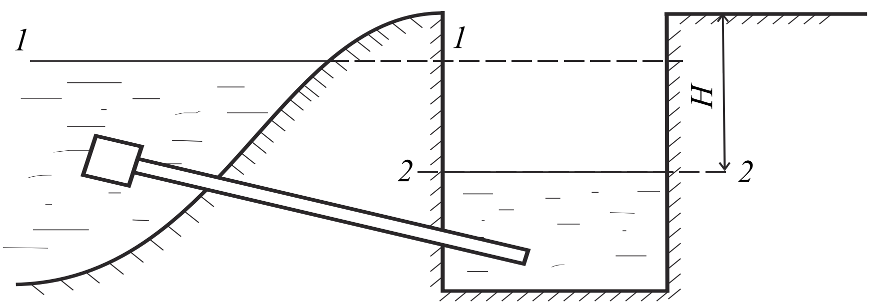


Рис. 4.26. К задаче № 4.27

Задача № 4.28. Жидкость плотностью $\rho = 900$ кг/м^3 и вязкостью $\nu = 0{,}0085$ см^2/с перемещается по горизонтальному трубопроводу длиной $l = 4$ м и диаметром $d = 25$ мм. Рассчитать давление в начальном сечении $p_{\text{нач}}$, Па, если в конечном сечении давление атмосферное. Расход жидкости $Q = 6$ л/с и абсолютная эквивалентная шероховатость стенок $\Delta_э = 0{,}06$ мм. Местные потери не учитывать, коэффициент трения определять для квадратичной области.

Пример № 4.17. Жидкость с заданными свойствами (ρ, μ) должна перетекать из верхнего резервуара в нижний (уровни в которых считаются постоянными) с заданным расходом Q = 2,5 м^3/ч по трубопроводу с длиной трубопровода l = 15 м и внутренним диаметром d = 0,04 м (рис. 4.27).

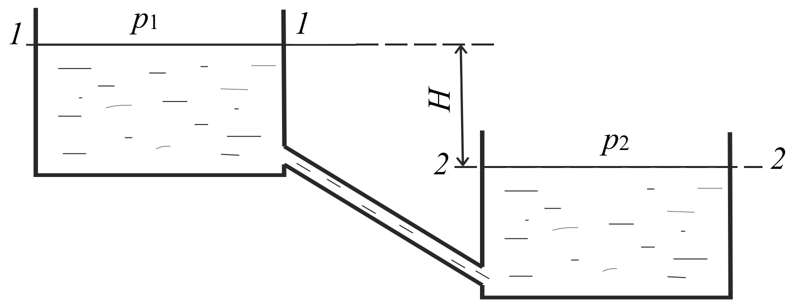


Рис. 4.27. К примеру № 4.17

Давления p_1 и p_2 на свободных поверхностях жидкости известны и равны, например, атмосферному давлению: $p_1 = p_2 = p_а$.

Высоты уровней верхнего и нижнего резервуаров поддерживаются постоянными.

Определить требуемый нивелирный напор $\Delta p_{нив}$, Па, самотечного трубопровода и разность уровней свободных поверхностей жидкости, исходя из условия, что потери напора в местных сопротивлениях малы по сравнению с потерями напора на трение по длине трубопровода.

В расчетах коэффициента трения по формуле Никурадзе принять значение абсолютной эквивалентной шероховатости труб $\Delta_э$ = 0,05 мм.

Решение. Требуемый нивелирный напор найдем из равенства нивелирного напора потерям напора на трение при заданной скорости потока υ, определив сначала нивелирное давление:

$$\Delta p_{нив} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \upsilon^2}{2} = \lambda \frac{\rho l}{d} \frac{\left(\frac{Q}{S} \right)^2}{2}. \quad (4.17)$$

Вычислим коэффициент гидравлического трения:

$$\lambda = \frac{1}{\left(2\lg \frac{d}{2\Delta_э} + 1,74 \right)^2} = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \frac{40}{2 \cdot 0,05} + 1,74 \right)^2} = 0,02.$$

Тогда

$$\Delta p_{\text{нив}} = 0{,}02 \cdot \frac{15}{0{,}04} \cdot 1000 \cdot \frac{\left(\dfrac{4 \cdot \dfrac{2{,}5}{3600}}{3{,}14 \cdot 0{,}04^2} \right)^2}{2} = 1146 \text{ Па.}$$

Рассчитаем искомый нивелирный напор по формуле

$$H = \frac{\Delta p_{\text{нив}}}{\rho g} = \frac{1146}{1000 \cdot 9{,}81} = 0{,}1 \text{ м.}$$

Практическое занятие № 9 УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ РЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ НА ПРАКТИКЕ

Задача № 4.29. Найти потери напора при движении воды в межтрубном пространстве $h_{\text{дл}}$, м (рис. 4.28), если диаметры труб D = (0,072 + 0,004N) м, d = (0,061 + 0,002N) м, расход воды Q = 0,0075 м^3/с, абсолютная эквивалентная шероховатость трубы $\Delta_э$ = 0,2 мм, длина трубы l = 300 м. Кинематическая вязкость воды $\nu = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ м^2/с.

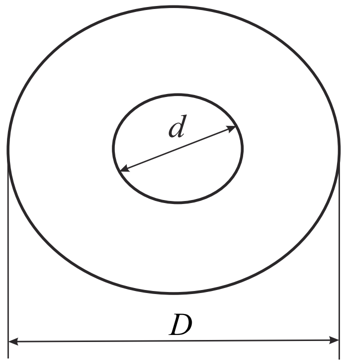


Рис. 4.28. К задаче № 4.29

Задача № 4.30. Определить вакуум в насосе $p_{\text{вак}}$, кПа, забирающем воду из колодца и подающем ее в систему автоматической мойки автомобилей (рис. 4.29). Температура воды t = 15°С. Плотность воды ρ = 1000 кг/м^3. Длина всасывающего трубопровода

$l = 40$ м, диаметр $d = (0{,}061 + 0{,}002N)$ м, расход воды $Q = 45$ л/с, высота установки насоса над поверхностью воды в колодце $h = 4{,}8$ м. Коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0{,}04$. Коэффициенты местных сопротивлений: $\zeta_{\text{сетки}} = 5{,}0$; $\zeta_{\text{колена}} = 0{,}2$; $\zeta_{\text{задвижки}} = 3{,}0$.

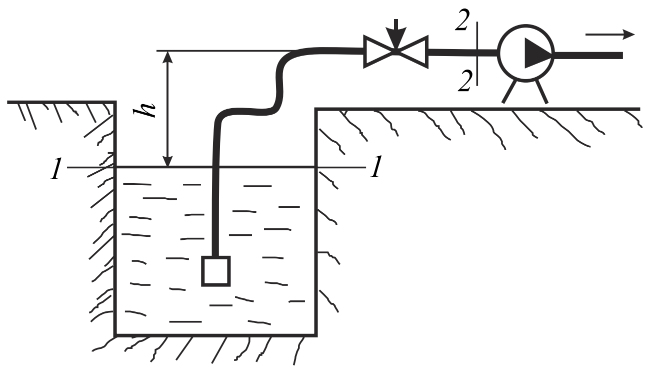


Рис. 4.29. К задаче № 4.30

Задача № 4.31. Определить превышение h, м, оси насоса над осью горизонтального трубопровода (рис. 4.30). Расход масла в трубопроводе $Q_m = 2$ кг/с, длина трубопровода $l = 122$ м, диаметр труб $d = 50$ мм, давление на выходе из насоса $p_м = 180$ кПа, кинематическая вязкость масла $\nu_м = 0{,}1407 \cdot 10^{-4}$ м^2/с, его плотность $\rho_м = 860$ кг/м^3. Местными сопротивлениями можно пренебречь.

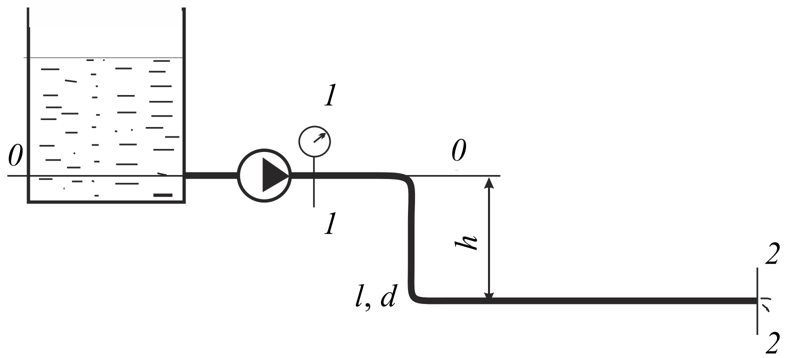


Рис. 4.30. К задаче № 4.31

Пример № 4.18. Определить показание манометра $p_м$, Па, при расходе воды в трубопроводе $Q = 50$ м^3/ч. Длина трубопровода $l = 120$ м, диаметр труб $d = 100$ мм, высота $h = 960$ мм, абсолютная эквивалентная шероховатость $\Delta_э = 0{,}5$ мм, сумма коэффициентов местных сопротивлений $\sum\zeta_м = 2{,}1$ (рис. 4.31).

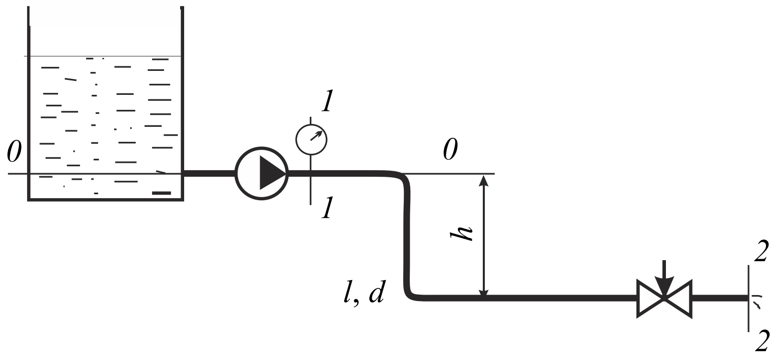


Рис. 4.31. К примеру № 4.18

Решение. Проведем по оси трубопровода плоскость сравнения (след ее на схеме – линия *0–0*) и два сечения: *1–1* – по трубопроводу в месте подключения манометра; *2–2* – по струе воды в месте выхода ее из трубопровода в атмосферу.

Запишем для этих сечений уравнение Бернулли (1.1):

$$\frac{\alpha_1 \upsilon_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha_2 \upsilon_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \sum h_{\text{п}1-2}.$$

Подставим в него $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, $\upsilon_1 = \upsilon_2 = \upsilon$, $p_1 = p_\text{а} + p_\text{м}$, $p_2 = p_\text{а}$, $z_1 = 0$, $z_2 = -h$ и $\sum h_{\text{п}1-2} = h_\text{дл} + h_\text{м} = \lambda l \upsilon^2 / (2gd) + \sum \zeta_\text{м} \upsilon^2 / (2g)$, получим:

$$\frac{\alpha \upsilon^2}{2g} + \frac{p_\text{а} + p_\text{м}}{\rho g} = \frac{\alpha \upsilon^2}{2g} + \frac{p_\text{а}}{\rho g} - h + \lambda \frac{l}{d} \frac{\upsilon^2}{2g} + \sum \zeta_\text{м} \frac{\upsilon^2}{2g}, \tag{4.18}$$

откуда

$$p_\text{м} = \rho g \left[\left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_\text{м} \right) \frac{\upsilon^2}{2g} - h \right]. \tag{4.19}$$

Среднюю скорость воды в трубопроводе вычислим по следующей формуле:

$$\upsilon = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 50}{3{,}14 \cdot 0{,}1^2 \cdot 3600} = 1{,}77 \text{ м/с},$$

а число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\upsilon d}{\nu} = \frac{1{,}77 \cdot 0{,}1}{0{,}01 \cdot 10^{-4}} = 177\ 000.$$

Так как $\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{кр} = 2320$, режим движения воды турбулентный. Поскольку $\mathrm{Re} > 500d / \Delta_э = 500 \cdot 0{,}1 / 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 10^5$, то λ находится в квадратичной области, для которой справедлива формула Шифринсона:

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{d}\right)^{0,25} = 0{,}11\cdot\left(\frac{0{,}0005}{0{,}1}\right)^{0,25} = 0{,}0293.$$

Подставив эти значения в полученное выше уравнение для $p_м$, получим:

$$p_м = 1000\cdot 9{,}8\cdot\left[\left(0{,}0293\cdot\frac{120}{0{,}1}+2{,}1\right)\cdot\frac{1{,}77^2}{2\cdot 9{,}81}-0{,}96\right] = 48\,950\ \text{Па}.$$

Пример № 4.19. Найти избыточное давление p_0, Па, в напорном баке (рис. 4.32), необходимое для получения скорости $\upsilon_2 = 20$ м/с истечения воды из брандспойта в атмосферу. Длина шланга $l = 40$ м, диаметр шланга $d_1 = 40$ мм, диаметр выходного отверстия брандспойта $d_2 = 20$ мм. Высота расположения отверстия брандспойта относительно уровня в баке $H = 5$ м. Учесть следующие местные сопротивления: вход в трубу $\zeta_1 = 0{,}1$; кран $\zeta_2 = 3{,}5$; брандспойт $\zeta_3 = 0{,}1$. Кинематическая вязкость воды $\nu = 0{,}01 \cdot 10^{-4}$ м^2/с. Шланг считать практически гладким.

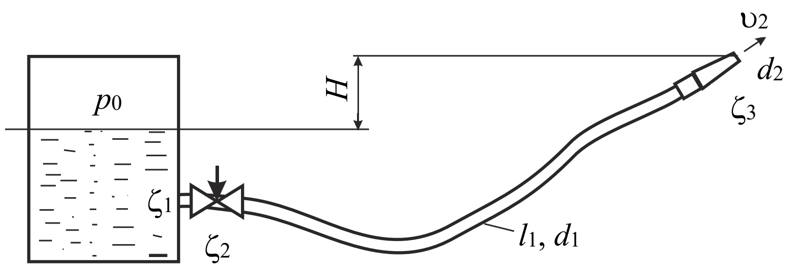


Рис. 4.32. К примеру № 4.19

Решение. Скорость в трубопроводе определим из уравнения неразрывности:

$$\upsilon_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{\upsilon_2 S_2}{S_1} = \upsilon_2\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 =$$
$$= 20\cdot\frac{0{,}02^2}{0{,}04^2} = 5\ \text{м/с}.$$

Тогда число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon_1 d_1}{\nu} = \frac{5 \cdot 0{,}04}{0{,}01 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^5 > \mathrm{Re}_{\text{кр}} = 2320,$$

следовательно, режим движения воды в трубопроводе турбулентный.

Рассчитаем коэффициент потерь на трение по формуле Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1{,}8 \cdot \lg \mathrm{Re} - 1{,}5\right)^2} = \frac{1}{\left(1{,}8 \cdot \lg(2 \cdot 10^5) - 1{,}5\right)^2} = 0{,}0155.$$

Искомое давление найдем из уравнения Бернулли для свободной поверхности жидкости в напорном баке и выходного отверстия брандспойта:

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_0 \upsilon_0^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \upsilon_2^2}{2g} + \sum h_{\text{п}0-2}.$$

Примем $z_2 - z_1 = H$, $\upsilon_1 = 0$, $\alpha_1 = 1$.

Тогда

$$p_0 = \rho g \left(H + \sum h_{\text{п}0-2} + \frac{\upsilon_2^2}{2g} \right) =$$

$$= \rho g \left(H + \left(\zeta_1 + \zeta_2 + \lambda \frac{l}{d_1} \right) \frac{\upsilon_1^2}{2g} + \zeta_3 \frac{\upsilon_2^2}{2g} + \frac{\upsilon_2^2}{2g} \right) = 1000 \cdot 9{,}8 \times$$

$$\times \left(5 + \left(0{,}5 + 3{,}5 + 0{,}0155 \cdot \frac{40}{0{,}04} \right) \cdot \frac{5^2}{2 \cdot 9{,}81} + 0{,}1 \cdot \frac{20^2}{2 \cdot 9{,}81} + \frac{20^2}{2 \cdot 9{,}81} \right) =$$

$$= 5{,}15 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Практическое занятие № 10
ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ
(приложение дисциплины «Механика жидкости и газа»)

Задача № 4.32. Вода подается в резервуар А, откуда через сопло диаметром $d_1 = (0{,}1 + 0{,}01N)$ м перетекает в резервуар Б. Далее через насадку диаметром $d_2 = (0{,}2 + 0{,}01N)$ м вода попадает в резервуар В и, наконец, перетекает через насадку диаметром $d_1 = d_3$ в сосуд Г (рис. 4.33). Общий перепад уровней $H = (5 + N)$ м. Найти перепады уровней H_1, H_2, H_3, м. Коэффициенты расходов: $\mu_1 = 0{,}82$; $\mu_2 = 0{,}82$; $\mu_3 = 0{,}52$.

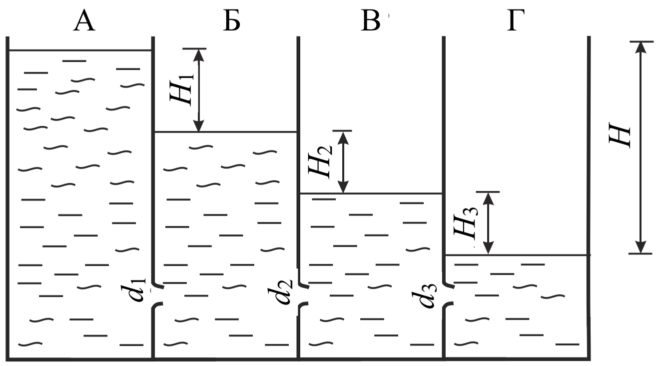


Рис. 4.33. К задаче № 4.32

Задача № 4.33. Определить начальную скорость истечения жидкости из сосуда (из отверстия) $\upsilon_{сж}$, м/с, заполненного слоями воды и масла одинаковой высоты $h = (1 + 0{,}5N)$ м (рис. 4.34). Плотность масла $\rho_м = 800$ кг/м^3.

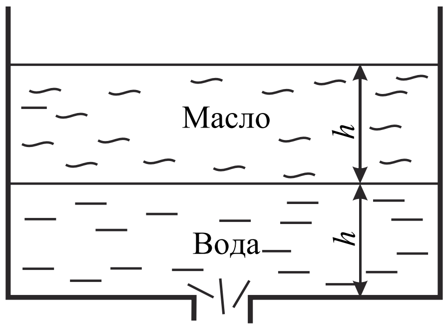


Рис. 4.34. К задаче № 4.33

Пример № 4.20. При исследовании истечения жидкости из круглого отверстия диаметром $d = 10$ мм в тонкой стенке измерен диаметр струи $d_с = 8$ мм. Напор $H = 2$ м. Время наполнения мерного бака емкостью $V = 10$ л составляет $t = 32{,}8$ с. Определить численное значение коэффициентов скорости φ, расхода μ, сжатия ε и местного сопротивления ζ.

Решение. В данном случае отношение:

$$\frac{d}{H} = \frac{0{,}01}{2} = 0{,}005 < 0{,}1,$$

следовательно, отверстие является малым.

Коэффициент сжатия найдем из следующего выражения:

$$\varepsilon = \frac{S_с}{S_{отв}} = \frac{d_с^2}{d^2} = \frac{8^2}{10^2} = 0{,}64.$$

Теоретическую скорость истечения рассчитаем по формуле

$$\upsilon_{\text{т}} = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 6,25 \text{ м/с.}$$

Действительный расход вычислим из следующего выражения:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,01}{32,8} = 0,000305 \text{ м}^3\text{/с.}$$

Действительную скорость истечения определим по формуле

$$\upsilon = \frac{Q}{S_{\text{с}}} = \frac{4Q}{\pi d_{\text{с}}^2} = \frac{4 \cdot 0,000305}{3,14 \cdot 0,008^2} = 6,07 \text{ м/с.}$$

Коэффициент скорости рассчитаем из соотношения

$$\varphi = \frac{\upsilon}{\upsilon_{\text{т}}} = \frac{6,07}{6,25} = 0,97.$$

Коэффициент расхода найдем по следующей формуле:

$$\mu = \varphi\varepsilon = 0,97 \cdot 0,64 = 0,62.$$

Коэффициент местного сопротивления вычислим по формуле

$$\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - 1 = \frac{1}{0,97^2} - 1 = 0,063.$$

Пример № 4.21. Цилиндрический сосуд с водой диаметром D = 0,3 м закрыт крышкой толщиной a = 50 мм (рис. 4.35). В крышке имеется отверстие диаметром d = 10 мм. С какой скоростью υ, м/с, будет опускаться крышка под действием груза весом G = 3000 Н? Трением крышки о стенки сосуда пренебречь.

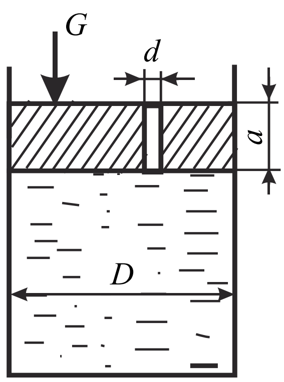


Рис. 4.35. К примеру № 4.21

Решение. Гидростатическое давление, которое создается под крышкой в результате действия груза G, равно:

$$p = \frac{G}{S_{\text{крышки}}} = \frac{4G}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 3000}{3{,}14 \cdot 0{,}3^2} = 42{,}5 \text{ кПа}.$$

Следовательно, напор над отверстием:

$$H = \frac{p}{\rho g} = \frac{42\,500}{1000 \cdot 9{,}8} = 4{,}34 \text{ м вод. ст.}$$

Расход воды через отверстие определим по формуле

$$Q = \mu S_{\text{отв}} \sqrt{2gH} = 0{,}82 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}01^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 4{,}34} = 0{,}000587 \text{ м}^3/\text{с},$$

где коэффициент расхода $\mu = 0{,}82$, так как в данном случае имеем не малое отверстие в тонкой стенке, а насадку ($a > 3d$).

Скорость опускания крышки в сосуде рассчитаем по следующей формуле:

$$\upsilon = \frac{Q}{S_{\text{крышки}}} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0{,}000587}{3{,}14 \cdot 0{,}3^2} = 8{,}3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}.$$

Пример № 4.22. Приток воды через кран в цилиндрический сосуд диаметром $D = 1{,}15$ м равен оттоку через отверстие в боковой стенке сосуда при напоре $H = 1{,}7$ м (рис. 4.36). После того как приток воды прекратился, сосуд опорожнился до уровня отверстия за время $t = 170$ с. Найти диаметр отверстия d, м, и расход воды Q, м^3/с, поступавшей в сосуд через кран.

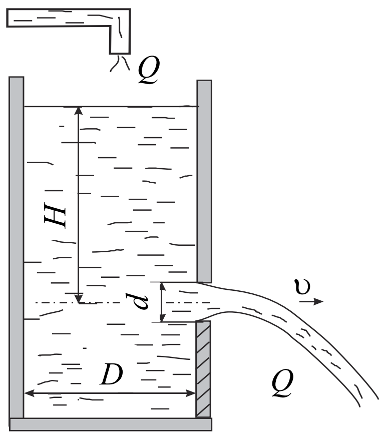


Рис. 4.36. К примеру № 4.22

Решение. Время опорожнения сосуда вычислим по формуле

$$t = \frac{2S\sqrt{H}}{\mu S_{\text{отв}}\sqrt{2g}}, \tag{4.20}$$

откуда выразим площадь отверстия:

$$S_{\text{отв}} = \frac{2S\sqrt{H}}{\mu t\sqrt{2g}} = \frac{\frac{2\pi D^2}{4}\sqrt{H}}{\mu t\sqrt{2g}} = \frac{\frac{2\cdot 3{,}14\cdot 1{,}15^2}{4}\sqrt{1{,}7}}{0{,}62\cdot 170\sqrt{2\cdot 9{,}81}} = 0{,}0058\ \text{м}^2.$$

Рассчитаем диаметр отверстия по следующей формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4S_{\text{отв}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\cdot 0{,}0058}{3{,}14}} = 0{,}086\ \text{м}.$$

Найдем расход воды, поступающей в сосуд:

$$Q = \mu S_{\text{отв}}\sqrt{2gH} = 0{,}62\cdot 0{,}0058\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 1{,}7} = 0{,}000021\ \text{м}^3/\text{с}.$$

Практическое занятие № 11
ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

Задача № 4.34. В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживается давление $p_0 = (5 + N / 20)$ МПа. Газ вытекает через сужающееся сопло в среду с давлением $p = 4$ МПа. Начальная температура кислорода $t_0 = 100$°C. Определить теоретическую скорость истечения υ_a, м/с, и расход Q_m, кг/с, если площадь выходного сечения сопла $f = (20 + N)$ мм^2. Найти также критическую скорость истечения кислорода $\upsilon_{кр}$, м/с, и его расход $Q_{m\ \max}$, кг/с, если течение будет происходить в атмосферу ($p_a = 100$ кПа).

Задача № 4.35. Воздух вытекает из котла с температурой $t_0 = 15$°C. Определить его температуры t_1 и t_2, °C, в тех сечениях, где скорость составляет $\upsilon_1 = (200 + 2N)$ м/с, $\upsilon_2 = (400 + 4N)$ м/с, а также скорости звука a_1, a_2, м/с, числа Маха M_1, M_2 и коэффициенты скорости λ_1 и λ_2 в этих сечениях. Движение считать изоэнтропийным.

Пример № 4.23. В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживается давление $p_0 = 5$ МПа. Газ вытекает через сужающееся сопло в среду с давлением $p = 4$ МПа. Начальная температура кислорода 100°C.

Определить теоретическую скорость истечения газа υ_a, м/с, и расход Q_m, кг/с, если площадь выходного сечения сопла $f = 20$ мм^2.

Решение. В соответствии с молекулярно-кинетической теорией для двухатомного кислорода удельные теплоемкости газовой среды при постоянном давлении c_p, кДж/(кг · К), и объеме c_v, кДж/(кг · К), соответственно равны:

$$c_p = \frac{7}{2}R;\ c_v = \frac{5}{2}R,$$

где R – удельная газовая постоянная кислорода, равная 259,7 Дж/(кг · К).

Коэффициент адиабаты составит:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{7 \cdot 2 \cdot R}{5 \cdot 2 \cdot R} = \frac{7}{5} = 1{,}4.$$

Запишем критическое отношение:

$$\frac{p}{p_0} = \psi_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} =$$

$$= 0{,}528 < \frac{4}{5} = 0{,}8.$$

Следовательно, скорость истечения газа меньше критической скорости.

Найдем удельный объем газа:

$$\upsilon_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{RT}{p_0} =$$

$$= \frac{259{,}7 \cdot (100 + 273{,}15)}{5 \cdot 10^6} = 0{,}0194\ \text{м}^3/\text{кг}.$$

Далее вычислим теоретическую скорость истечения:

$$\upsilon_a = \sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k-1)/k}\right]} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot \frac{1{,}4}{0{,}4} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0{,}0194 \cdot \left[1 - \left(\frac{4}{5}\right)^{0{,}4/1{,}4}\right]} = 205\ \text{м/с}.$$

Расход докритического течения определим так:

$$Q_m = f\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{\upsilon_0}\left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/k} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k+1)/k}\right]} =$$

$$= 20\cdot10^{-6}\sqrt{2\cdot\frac{1,4}{0,4}\cdot\frac{5\cdot10^6}{0,0194}\cdot\left[\left(\frac{4}{5}\right)^{2/1,4} - \left(\frac{4}{5}\right)^{2,4/1,4}\right]} =$$

$$= 0,180 \text{ кг/с.}$$

Пример № 4.24. При условиях предыдущего примера найти теоретическую скорость истечения кислорода $\upsilon_а$, м/с, и его расход Q_{max}, кг/с, если его истечение будет происходить в атмосферу ($p_а = p =$ $= 100$ кПа $= 0,1$ МПа).

Решение. Отношение давлений

$$\frac{p_а}{p_0} = \frac{0,1}{5} < \psi_{кр} = 0,528,$$

следовательно, скорость истечении равна критической:

$$\upsilon_а = \upsilon_{кр} = \sqrt{\frac{kp_{кр}}{\rho_{кр}}} = \sqrt{\left(\frac{2k}{k+1}\right)p_0\upsilon_0} =$$

$$= \sqrt{\frac{2,8}{2,4}\cdot5\cdot10^6\cdot0,0194} = 336 \text{ м/с.}$$

Расход составит:

$$Q_{max} = f\sqrt{2\frac{k}{k+1}\frac{p_0}{\upsilon_0}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{2/(k-1)}} =$$

$$= 20\cdot10^{-6}\sqrt{2\cdot\frac{1,4}{2,4}\cdot\frac{5\cdot10^6}{0,0194}\cdot\left(\frac{2}{2,4}\right)^{2/0,4}} = 0,22 \text{ кг/с.}$$

Пример № 4.25. Воздух при нормальных условиях ($h_б =$ $= 760$ мм рт. ст., $t = 15$°C), имеющий скорость $\upsilon_1 = 136$ м/с, ускоряется в сопле до $\upsilon_2 = 280$ м/с. Найти температуру, давление и плотность в конце сопла, а также температуру и давление торможения, считая движение изоэнтропийным.

Решение. Определим число Маха в сечении *1*:

$$M_1 = \frac{\upsilon_1}{a_1} = \frac{\upsilon_1}{\sqrt{kRT_1}} = \frac{136}{\sqrt{1{,}4 \cdot 287{,}15 \cdot 288}} = 0{,}4.$$

По таблицам газодинамических функций [10], зная $p_1 = p_a =$ $= 760$ мм рт. ст. $= 1{,}01325 \cdot 10^5$ Па и $T_1 = 288$ К, вычислим параметры торможения:

$$p_0 = \frac{p_1}{\pi(M_1)} = \frac{1{,}013 \cdot 10^5}{0{,}895} = 1{,}13 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_0 = \frac{T_1}{\tau(M_1)} = \frac{288}{0{,}969} = 297 \text{ К}.$$

Из уравнения закона сохранения энергии определим температуру в сечении *2*:

$$T_2 = T_0 - \frac{\upsilon_2^2}{2c_p} = 297{,}15 - \frac{280^2}{2 \cdot 1005} = 258 \text{ К}$$

и число Маха:

$$M_2 = \frac{\upsilon_2}{a_2} = \frac{\upsilon_2}{\sqrt{kRT_2}} = \frac{280}{\sqrt{1{,}4 \cdot 287 \cdot 258}} = \frac{280}{322} = 0{,}87.$$

По таблицам газодинамических функций найдем давление в конце сопла:

$$p_2 = \pi(M_2)p_0 = \pi(0{,}870) \cdot 1{,}13 \cdot 10^5 =$$
$$= 0{,}611 \cdot 1{,}13 \cdot 10^5 = 0{,}69 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Из уравнения Клайперона – Менделеева рассчитаем плотность:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{0{,}69 \cdot 10^5}{287 \cdot 258} = 0{,}932 \text{ кг/м}^3.$$

Примеры решения типовых практических задач составлены с помощью пособий [6, 10].

A

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица физических свойств воды при атмосферном давлении
($p_а$ = 1,01325 · 10^5 Па) [11]

t, °C	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг · К)	λ · 10^2, Вт/(м · К)	μ · 10^6, Па · с	ν · 10^6, м^2/с	σ · 10^4, Н/м	Pr
0	999,9	4,212	56,0	1788	1,789	756,4	13,5
10	999,7	4,191	57,4	1306	1,306	741,6	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1004	1,006	726,9	7,02
30	995,7	4,174	61,8	801,5	0,805	712,2	5,42
40	992,2	4,174	63,5	653,3	0,659	696,5	4,31
50	988,1	4,174	64,8	549,4	0,556	676,9	3,54
60	983,2	4,179	65,9	469,9	0,478	662,2	2,93
70	977,8	4,187	66,8	406,1	0,415	643,5	2,55
80	971,8	4,195	67,4	355,1	0,365	625,9	2,21
90	965,3	4,208	68,0	314,9	0,326	607,2	1,95

Б

ПРИЛОЖЕНИЕ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет лесной инженерии, материаловедения и дизайна
Кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники
Специальность 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
____________ Г. С. Маршалова
«____» _____________ 202__ г.

З А Д А Н И Е
на курсовую работу

обучающемуся ____

Тема «Гидравлический расчет простой и сложной трубопроводных систем».

Сроки защиты до________.

Исходные данные:

Контрольная задача № 1 (схема 1, левый резервуар ____________, правый резервуар ____________): давление на поверхности жидкости в питающем резервуаре p_1 = _____ МПа и в приемном резервуаре (на выходе из трубопровода) p_2 = _____ МПа; величина напора в питающем (с диаметром d_1 = 5 м) и приемном (с диаметром d_4 = ___ м) резервуарах H_1 = _____ м и H_2 = _____ м; стальной трубопровод состоит из труб различного диаметра d_2 = _____ мм, d_3 = _____ мм с различной длиной l_2 = _____ м, l_3 = _____ м, l_4 = _____ м; геодезическая отметка z = _____ м; угол наклона трубопровода β = ____°; абсолютная эквивалентная шероховатость труб $\Delta_э = 0{,}5$ мм; для сопротивления колена со скруглениями принять радиусы скругления $R = d_2$; температура воды $t_в = 10$°C, коэффициент кинематической вязкости воды $\nu_в = 1{,}3061 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Контрольная задача № 2 (схема 2): из открытого резервуара диаметром $d_0 = 3$ м, в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному трубопроводу (абсолютная эквивалентная шероховатость $\Delta_э = 0{,}1$ мм), состоящему из труб различного диаметра d_1 = _____ мм, d_2 = _____ мм, d_3 = _____ мм с различной длиной l_1 = _____ м, l_2 = ____ м, l_3 = _____ м, вытекает в атмосферу вода, расход которой Q = ____ л/с и температура $t_в$ = ____°C.

Контрольная задача № 3 (схема 3): величина напора в питающем (с диаметром $d_1 = 5$ м) и приемном (с диаметром $d_4 = 5$ м) резервуарах H_1 = ____ м и H_2 = ___ м; расходы в узлах q_1 = ___ л/с и q_2 = ___ л/с; стальной трубопровод состоит из труб различного диаметра d_2 = ____ мм, d_3 = ____ мм с различной длиной l_2 = ___ м, l_3 = ____ м, l_4 = ____ м; геодезическая отметка z = ____ м; абсолютная эквивалентная шероховатость труб $\Delta_э = 0{,}2$ мм.

Содержание пояснительной записки курсовой работы (перечень вопросов, подлежащих разработке):

Контрольная задача № 1 (расчет простого трубопровода): определить расход воды Q, м³/с, проходящей по трубе переменного сечения, и давление p_x, Па, в сечении X–X (см. схему); рассчитать трубопровод на прочность по максимальному давлению в сети и на стенки резервуара(ов).

Контрольная задача № 2 (расчет простого трубопровода): определить скорости движения воды υ_1, υ_2, υ_3, м/с, и потери напора (по длине $\sum h_{дл i}$, м, и местные $\sum h_{м i}$, м) на каждом участке трубопровода; установить величину напора H, м, в резервуаре. Построить напорную и пьезометрическую линии (диаграмму Бернулли).

Контрольная задача № 3 (расчет сложного трубопровода): определить расход Q, л/с, питающего резервуара.

Перечень графического, иллюстрационного материала (с точным указанием обязательных чертежей, графиков и др.): в ***контрольной задаче № 2*** – схема простого короткого трубопровода с напорной и пьезометрической линиями (диаграмма Бернулли) на миллиметровой бумаге формата А4.

Консультанты (с указанием разделов) Е. С. Данильчик

Календарный график выполнения работы ____________________

____

____

____

____

Дата выдачи задания ____________________

Руководитель _______________ Е. С. Данильчик
(подпись) (инициалы и фамилия)

Задание принял(а) к исполнению ______________________________
(подпись обучающегося)

ЛИТЕРАТУРА

1. Положение о курсовом проекте (курсовой работе) учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»: утв. первым проректором БГТУ 10.05.2024. – Минск: БГТУ, 2024. – 44 с.

2. Сухоцкий, А. Б. Гидравлика и гидропривод: тексты лекций / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Санкович. – Минск: БГТУ, 2007. – 172 с.

3. Санкович, Е. С. Гидравлика, гидромашины и гидропривод: учеб.-метод. пособие по курсовой работе / Е. С. Санкович, А. Б. Сухоцкий. – Минск: БГТУ, 2011. – 141 с.

4. Кондратович, А. Н. Механика жидкости и газа: метод. указания по выполнению курсовой работы / А. Н. Кондратович, И. М. Шаталов, М. М. Михновец. – Минск: БНТУ, 2015. – 32 с.

5. Дмитриченко, А. С. Гидравлика и гидропривод. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие / А. С. Дмитриченко, Е. С. Санкович, А. Б. Сухоцкий. – Минск: БГТУ, 2014. – 94 с.

6. Санкович, Е. С. Гидравлика, гидравлические машины, гидравлические приводы: учеб.-метод. пособие по практическим, расчетно-графическим и курсовым работам / Е. С. Санкович, А. Б. Сухоцкий. – Минск: БГТУ, 2005. – 176 с.

7. Чугаев, Р. Р. Гидравлика: учебник для вузов / Р. Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат: Ленингр. отд-е, 1982. – 672 с.

8. Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия: ГОСТ 3262–75. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 12 с.

9. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия: ГОСТ Р 52910–2008. – М.: Стандартинформ, 2008. – 56 с.

10. Андрижиевский, А. А. Механика жидкости и газа: учеб. пособие / А. А. Андрижиевский. – Минск: БГТУ, 2014. – 203 с.

11. Александров, А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 158 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

Данильчик Екатерина Сергеевна

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Учебно-методическое пособие

Редактор *Е. С. Ватеичкина*
Компьютерная верстка *Е. С. Ватеичкина*
Дизайн обложки *П. В. Ковальцова*
Корректор *Е. С. Ватеичкина*

Подписано в печать 17.12.2025. Формат $60\times84^{1}/_{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 5,3. Уч.-изд. л. 5,5.
Тираж 30 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.