

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Кубанский государственный технологический университет

Кафедра технической механики и гидравлики

## **Гидравлика**

Методические указания по изучению дисциплины и выполнению  
контрольных работ для студентов заочной формы обучения  
и МИППС направления 18.03.01 - Химическая технология

Краснодар  
2015

Составители: ст. преп. Т.М. Романенко

**Гидравлика:** методические указания по изучению дисциплины и выполнению контрольных работ для студентов заочной формы обучения направления 18.03.01 Химическая технология /Сост: Т.М. Романенко; Кубан. гос. технол. ун-т. Каф. гидравлики и гидравлических машин.– Краснодар: КубГТУ, 2015. – 36 с.

Приведены материалы, необходимые для самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины, контрольные задания, а также справочные данные, необходимые при решении задач.

Ил. 11. Табл. 2. Библиогр: 9 назв.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. кафедры ГиГМ КубГТУ С.В. Данилин;  
д.т.н., проф. кафедры ТНиГ КубГТУ Ю.П. Ясьян

## Содержание

Введение.....	4
1 Нормативные ссылки.....	4
2 Программа дисциплины.....	6
3 Контрольные задания.....	17
4 Методические указания к выполнению контрольного задания.....	18
Список литературы.....	31
Приложение А (справочное) Основные условные обозначения.....	32
Приложение Б (справочное) Единицы временно допускаемые к применению.....	33
Приложение В (справочное) Среднее значение модуля упругости некоторых жидкостей.....	33
Приложение Г (справочное) Коэффициент объёмного расширения.....	33
Приложение Д (справочное) Переводные коэффициенты единиц измерения давления.....	33
Приложение Е (справочное) Значение коэффициента температурного расширения некоторых жидкостей.....	34
Приложение Ж (справочное) Средние значения коэффициента объёмного расширения.....	34
Приложение И (справочное) Модуль упругости твердых тел.....	35
Приложение К (справочное) Кинематическая вязкость некоторых жидкостей.....	35
Приложение Л (справочное) Коэффициент местных сопротивлений....	36

## **Введение**

Методические указания составлены в соответствии с учебной программой курса «Гидравлика» для студентов заочной формы обучения и МИППС, обучающихся по специальности 18.03.01 – Химическая технология. Законы гидравлики – основа инженерных расчётов в нефтегазовом деле. Основное назначение методических указаний – помочь студентам выработать навыки применения теоретических знаний для решения конкретных технических задач.

Методические указания содержат краткие вопросы теории статики и динамики жидкости. Приведены необходимые пояснения на примерах решения задач, задания для выполнения контрольных работ и методические указания по их выполнению.

## **1. Нормативные ссылки**

В настоящих методических указаниях использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 1.5–2002 ГСС РФ Стандарты. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению

ГОСТ 2. 105 – 95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам

ГОСТ 2. 106 – 96 ЕСКД. Текстовые документы

ГОСТ Р 7.05 – 2008 СИБИБД. Библиографические ссылки. Общие требования и правила составления

ГОСТ 8.417 – 2002 ГСИ. Единицы величин

ГОСТ 2.302 – 68 ЕСКД. Масштабы

ОК 015–94 Общероссийский классификатор единиц измерения

МР КубГТУ 4.4.4.–2005 СМК. Учебно-методическая деятельность. Учебные и учебно-методические издания

## **2. Программа дисциплины**

### **Тема 1. Основные физические свойства жидкостей и газов.**

Понятие о гидравлике. Основные физические свойства жидкостей и газов. Силы, действующие в жидкости. Модель идеальной жидкости. Закон внутреннего трения Ньютона. Вязкость жидкостей и газов. Основы гидростатики.

### **Тема 2. Общие законы статики жидкостей и газов**

Уравнения Эйлера. Основная формула гидростатики. Относительный покой жидкости. Сила давления жидкости на плоские стенки. Сила давления жидкости на криволинейные поверхности.

### **Краткие теоретические сведения**

Техническая механика жидкости или гидравлика – это наука о законах равновесия и движения жидкостей и способах применения этих законов к решению практических задач.

Жидкостью называют вещество, находящееся в таком агрегатном состоянии, которое сочетает в себе качества твёрдого состояния (малая сжимаемость) и газообразного (текучесть).

Основной физической характеристикой жидкости является плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), определяемая для однородной жидкости отношением её массы  $m$  к объёму  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

В гидравлике часто пользуются также понятием удельного веса  $\gamma$  (н/м<sup>3</sup>), т.е. весом  $G$  единицы объёма жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{V}.$$

Плотность и удельный вес жидкости связаны между собой соотношением

$$\gamma = \rho g,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Важнейшие физические параметры жидкостей, которые, используются в гидравлических расчётах – сжимаемость, температурное расширение, вязкость и испаряемость.

Сжимаемость жидкостей характеризуется модулем объёмной упругости  $K$ , входящий в обобщенный закон Гука:

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta P}{K},$$

где  $\Delta V$  – приращение (в данном случае уменьшение) объёма жидкости  $V$ , обусловленное увеличением давления на  $\Delta p$ . Например, для воды  $K = 2 \cdot 10^3$  МПа.

Температурное расширение определяется соответствующим коэффициентом, равным относительному изменению объёма при изменении температуры на  $t$  °С:

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{V \Delta t}.$$

Вязкость – это способность жидкости сопротивляться сдвигу. Различают динамический  $\mu$  и кинематический  $\nu$  коэффициенты вязкости. Первый входит в закон жидкостного трения Ньютона, выражающий касательное напряжение

$\tau$  через поперечный градиент скорости  $\frac{du}{dy}$ ,

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

где  $u$  – актуальная (мгновенная) скорость частицы жидкости;

$y$  – ордината.

Кинематический коэффициент вязкость связана с динамическим соотношением:

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

Единица измерения коэффициента кинематической вязкости является м<sup>2</sup>/с.

Основные параметры некоторых жидкостей, их единицы в СИ и внесистемные единицы, допускаемые к применению, приводятся в Приложениях А, Б.

Давление в неподвижной жидкости называется гидростатическим и обладает следующими свойствами:

- на внешней поверхности жидкости оно всегда направлено по нормали внутрь объёма жидкости;
- в любой точке внутри жидкости оно по всем направлениям одинаково, т.е. не зависит от угла наклона площадки, на которую действует.

Уравнение, выражающее гидростатическое давление  $p$  в любой точке неподвижной жидкости в том случае, когда из числа массовых сил на неё действует лишь сила тяжести, называется основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh = p_0 + \gamma h \quad (1)$$

где  $p_0$  – давление на какой-либо поверхности уровня жидкости, например на свободной поверхности;

$h$  – глубина расположения рассматриваемой точки, отсчитанная от поверхности с давлением  $p_0$ .

В тех случаях, когда рассматриваемая точка находится выше поверхности с давлением  $p_0$ , второе слагаемое в формуле (1) отрицательно.

Основное уравнение гидростатики (1) можно записать в следующем виде:

$$z + \frac{p}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g}, \quad (2)$$

где  $z_0$  и  $z$  – вертикальные координаты произвольной точки и свободной поверхности, отсчитываемые от горизонтальной плоскости вверх;

$\frac{p}{\rho g}$  – пьезометрическая высота.

Сила гидростатического давления на плоскую стенку равна произведению гидростатического давления  $p_c$  в центре тяжести площади стенки на площадь стенки  $S$ , т.е.

$$F = p_c \cdot S. \quad (3)$$

Центр давления (точка приложения силы  $F$ ) расположен ниже центра тяжести площади или совпадает с последним в случае горизонтальной стенки.

Расстояние между центром тяжести площади и центром давления в направлении нормали к линии пересечения плоскости стенки со свободной поверхностью жидкости равно:

$$\Delta y = \frac{I_0}{y_c \cdot S}, \quad (4)$$

где  $I_0$  – момент инерции площади стенки относительно оси, проходящей через центр тяжести площади и параллельной линии пересечения плоскости стенки со свободной поверхностью;

$y_c$  – координата центра тяжести площади.

Сила давления жидкости на криволинейную стенку, симметричную относительно вертикальной плоскости, складывается из горизонтальной  $P_z$  и вертикальной  $P_v$  составляющих:

$$F = \sqrt{F_z^2 + F_v^2}. \quad (5)$$

Горизонтальная составляющая  $P_z$  равна силе давления жидкости на вертикальную проекцию данной стенки:

$$F_z = \rho g h_c \cdot S_v. \quad (6)$$

Вертикальная составляющая  $F_v$  равна весу жидкости в объёме  $V$ , заключённом между данной стенкой, свободной поверхностью жидкости и вертикальной проектирующей поверхностью, проведенной по контуру стенки. Если избыточное давление  $P$  на свободной поверхности жидкости отлично от нуля, то при расчете следует эту поверхность мысленно поднять (или опустить) на высоту  $\frac{P}{\rho g}$  (пьезометрическую высоту).

#### Указания к решению задач

При решении задач по гидростатике, прежде всего, нужно хорошо усвоить и не смешивать такие понятия, как давление и сила.

При решении задач на определение давления в той или иной точке неподвижной жидкости следует пользоваться основным уравнением гидростатики (1). Применяя это уравнение, нужно иметь в виду, что второй член в правой части этого уравнения может быть как положительным, так и отрицательным.

Необходимо твёрдо различать давление абсолютное, избыточное и вакуум и обязательно знать связь между давлением, удельным весом и высотой, соответствующей этому давлению (пьезометрической высотой).

При решении задач, в которых даны поршни или системы поршней, следует писать уравнение равновесия, т.е. равенство нулю суммы всех сил, действующих на поршень (систему поршней).

### Тема 3. Основы кинематики. Общая интегральная форма уравнения количества движения и момента количества движения.

Кинематика жидкости. Методы описания движения жидкости. Линии и трубки тока. Геометрические параметры потока жидкости. Кинематические параметры потока жидкости. Виды движения жидкости. Уравнение неразрывности в разных формах.

#### **Тема 4. Подобие гидромеханических процессов. Режимы течения жидкости.**

Два режима движения жидкости. Критерий Рейнольдса. Подобие гидромеханических процессов. Метод размерностей.

#### **Тема 5 Обще уравнение энергии в интегральной и дифференциальной формах. Уравнение Бернулли для элементарной струйки. Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости.**

Общее уравнение энергии в интегральной и дифференциальных формах. Турбулентность, осреднённые параметры, структура турбулентного потока. Конечно-разностные формы уравнений Навье-Стокса. Уравнение Бернулли для элементарной струйки жидкости. Физический смысл уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.

Общее уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости. Физический и геометрический смысл уравнения Бернулли. Определение потерь удельной энергии потока. Гидравлический, пьезометрический и геометрический уклоны.

#### **Краткие теоретические сведения**

При решении задач о движении жидкостей часто в первом приближении делают допущение о том, что движущаяся жидкость является идеальной. Под идеальной жидкостью понимают жидкость, лишённую перечисленных выше свойств, т.е. жидкость абсолютно не сжимаемую и не расширяемую, не способную сопротивляться растяжению и сдвигу. Главное, чем отличается жидкость идеальная от жидкости реальной, это отсутствие в ней вязкости, вызывающей способность сопротивления сдвигу, т.е. возникновение касательных напряжений (трения в жидкости).

Следовательно, в движущейся идеальной жидкости возможен лишь один вид напряжений – напряжение сжатия, т.е. давление  $p$ , а касательное напряжение  $\tau = 0$ .

Основными уравнениями, позволяющими решать простейшие задачи о движении идеальной жидкости, являются уравнение расхода и уравнение Бернулли.

Уравнение расхода представляет собой условие неразрывности потока несжимаемой жидкости или, что то же самое, равенство объёмных расходов в каких-то двух сечениях одного и того же потока, например 1 и 2, т.е.  $Q_1 = Q_2$  или  $u_1 S_1 = u_2 S_2$ . Отсюда следует, что

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{S_1}{S_2}, \quad (7)$$

т.е. скорости обратно пропорциональны площадям живых сечений потока. При этом предполагается, что скорость во всех точках данного сечения одинакова.

Уравнение Бернулли для потока идеальной жидкости выражает собой закон сохранения и превращения удельной энергии жидкости вдоль потока.



Под удельной понимают энергию, отнесённую к единице веса, объёма или массы жидкости. Обычно удобнее бывает относить энергию к единице веса. В этом случае уравнение Бернулли, записанное для сечений 1 и 2 элементарной струйки или потока идеальной жидкости, имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (8)$$

где  $z$  – вертикальные координаты центров тяжести сечений, или удельная энергия положения, геометрическая высота, геометрический напор;

$\frac{p}{\rho g}$  – пьезометрическая высота, пьезометрический напор, или удельная энергия давления;

$\frac{v^2}{2g}$  – скоростная высота, (скоростной напор), или удельная кинетическая энергия;

$H$  – полный напор или полная удельная энергия единицы веса жидкости.

Для потока реальной (вязкой) жидкости уравнение Бернулли следует писать в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha \frac{v_{cp1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha \frac{v_{cp2}^2}{2g} + \sum h \quad (9)$$

где  $v_{cp}$  – средняя по сечению скорость, равная  $v_{cp} = \frac{Q}{S}$ ;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечениям потока и равный отношению действительной кинетической энергии потока к кинетической энергии того же потока, но при равномерном распределении скоростей;

$\sum h$  – суммарная потеря полного напора между сечениями 1 и 2, обусловленная вязкостью жидкости.

## Тема 6. Гидравлические сопротивления

Линейные потери напора при ламинарном режиме движения. Зоны сопротивления при турбулентном движении жидкости. Теорема Борда. Виды местных гидравлических сопротивлений.

### Краткие теоретические сведения

Различают два вида гидравлических потерь: местные потери и потери на трение по длине.

Местные потери напора происходят в так называемых местных гидравлических сопротивлениях, т.е. в местах изменения формы и размеров русла, где поток так или иначе деформируется – расширяется, сужается, искривляется, или имеет место более сложная деформация. Местные потери выражают формулой Вейсбаха:

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g}, \quad (10)$$

где  $v$  – средняя скорость потока в сечении перед местным сопротивлением (расширение), или за ним (при сужении) и в тех случаях, когда рассматриваются потери напора в гидроарматуре различного назначения;

$\xi_m$  – безразмерный коэффициент местного сопротивления.

Числовое значение коэффициента местного сопротивления в основном определяется формой местного сопротивления, его геометрическими параметрами, но иногда влияет также число Рейнольдса, которое для труб диаметром  $d$  выражается формулой:

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} \quad (11)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Для некруглых труб  $Re = \frac{vD_e}{\nu}$ , где  $D_e$  – гидравлический диаметр, равный отношению площади сечения трубы к  $1/4$  смоченного периметра сечения.

Число Рейнольдса определяет режим движения жидкостей (и газов) в трубах.

При  $Re < Re_{кр}$ , где  $Re_{кр} = 2320$ , режим движения ламинарный, т.е. слоистый – без перемешивания жидкости и без пульсации скоростей и давления.

При  $Re > Re_{кр}$ , режим движения турбулентный, т.е. с перемешиванием жидкости и с пульсацией скоростей и давления.

Можно считать, что при турбулентном режиме коэффициент местных сопротивлений  $\xi$  от числа Рейнольдса не зависит и, следовательно, как видно из формулы (10), потеря напора пропорциональна квадрату скорости (квадратичный режим сопротивления).

При ламинарном режиме считают, что

$$\zeta = \frac{A}{Re} + \zeta_{кв}, \quad (12)$$

где  $A$  – число, определяемое формой местного сопротивления;

$\zeta_{кв}$  – коэффициент местного сопротивления при режиме квадратичного сопротивления, т.е. при  $Re \rightarrow \infty$ .

При турбулентном режиме в случае внезапного расширения трубы происходит изменение количества движения, и потеря напора определяется формулой Борда:

$$h_{рас} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \zeta \frac{v_1^2}{2g}, \quad (13)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – скорости до и после расширения потока;

$\zeta$  – коэффициент сопротивления, равный для данного случая

$$\zeta = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2, \quad (14)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечений трубы до и после внезапного расширения.

При внезапном сужении трубы коэффициент сопротивления определяют по полуэмпирической формуле Идельчика:

$$\zeta_{суж} = 0,5\left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right), \quad (15)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечения трубы до и после сужения.

Коэффициенты сопротивления для постепенно расширяющихся (конических труб) – диффузоров, плавно сужающихся труб – сопел, поворотов и других, более сложных местных гидравлических сопротивлений (кранов, клапанов, сеток, фильтров), находят в справочной литературе.

Потери напора на трение по длине  $l$  определяются общей формулой Дарси–Вейсбаха:

$$h_{тр} = h_L = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (16)$$

где  $\lambda$  – безразмерный коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси) определяется в зависимости от режима течения:

при ламинарном режиме  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (17)$$

при турбулентном режиме течения  $\lambda$  помимо числа Рейнольдса зависит ещё от относительной шероховатости  $\frac{\Delta}{d}$ , т.е.

$$\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right)$$

### Указания к решению задач

Часть задач данного раздела рассчитана на применение уравнения Бернулли для струйки идеальной жидкости (8), т.е. без учёта гидравлических потерь (потерь напора) и неравномерности распределения скоростей (коэффициента Кориолиса). Другая часть задач решается с помощью уравнения Бернулли для потока реальной жидкости (9) в общем случае с учётом указанных выше обстоятельств.

Однако коэффициент Кориолиса следует учитывать лишь при ламинарном режиме течения, когда  $\alpha = 2$ . Для турбулентных потоков можно принять  $\alpha = 1$ .

При применении уравнения Бернулли важно правильно выбрать те два сечения, для которых оно записывается.

В качестве живых сечений рекомендуется брать:

- свободную поверхность жидкости в резервуаре (баке), где  $z = 0$ ;
- выход в атмосферу, где  $p_{изб} = 0$ ,  $p_{абс} = p_{ат}$ ;
- сечение, где присоединён тот или иной манометр, пьезометр или вакуумметр.

Сечения должны выбираться с учётом всех геометрических параметров системы.

Уравнение Бернулли рекомендуется сначала записать в общем виде, а затем переписать, заменяя его члены заданными численными величинами и исключая члены, равные нулю.

При этом необходимо помнить следующее:

- вертикальная ордината  $z$  всегда отсчитывается от произвольной плоскости (плоскости сравнения) вверх;
- давление  $p$ , входящее в правую и левую части уравнения должно быть задано в одной системе отсчета (абсолютное или избыточное);
- суммарная потеря напора  $\sum h$  всегда пишется в правой части уравнений Бернулли со знаком «+»;
- величина  $\sum h$  в общем случае складывается из местных потерь, которые можно выражать формулой Вейсбаха (10) и потерь на трение по длине, определяемых формулой Дарси–Вейсбаха (16).

Если в той или иной трубе имеется внезапное расширение, то при турбулентном режиме необходимо учитывать потерю напора по теореме Борда (13).

В частном случае, когда жидкость подводится к резервуару, баку и т.п., можно считать, что теряется вся кинетическая энергия жидкости.

При выражении и подсчёте гидравлических потерь по формуле Вейсбаха следует обращать внимание на указание относительно того, к какой скорости (или какой площади) отнесены заданные коэффициенты сопротивления  $\xi$ .

## **Тема 7. Прикладные задачи гидравлики. Общая схема применения численных методов и их реализация на ЭВМ**

### **7.1 Истечение жидкости через отверстия и насадки**

Истечение жидкости через отверстия и насадки. Коэффициенты расхода, сжатия и скорости. Истечение под уровень жидкости. Истечение жидкости при переменном напоре.

#### **Краткие теоретические сведения**

В процессе истечения запас потенциальной энергии жидкости в резервуаре переходит в кинетическую энергию свободной струи.

Из уравнения Бернулли легко выводится выражение для скорости истечения:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (18)$$

где  $H$  – расчётный напор, который в общем случае равен сумме геометрического и пьезометрического напоров, т.е.

$$H = \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g}, \quad (19)$$

$\varphi$  – коэффициент скорости, определяемый как

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}}. \quad (20)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса;  
 $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.

Расход жидкости при истечении через отверстия и насадки определяется произведением скорости истечения на площадь сечения струи. Вследствие сжатия струи площадь её «живого» сечения отлична от площади отверстия. Поэтому вводится коэффициент сжатия струи

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_0}, \quad (21)$$

где  $S_c$  и  $S_0$  – площади сечения струи и отверстия.

Отсюда расход равен

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2gH}, \quad (22)$$

где  $\mu = \varphi \varepsilon$  – коэффициент расхода.

Вместо расчётного напора  $H$  часто используется расчётный перепад давлений  $\Delta p = \rho g H$  и вместо (22) пишут:

$$Q = \mu S_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (23)$$

Истечение жидкости может происходить либо в газовую среду, например, в атмосферу, либо в среду той же жидкости. В последнем случае вся кинетическая энергия струи теряется на вихреобразование.

Отверстием в тонкой стенке называется отверстие, диаметр которого больше толщины стенки. В этом случае коэффициент расхода  $\mu$  и другие коэффициенты однозначно определяются числом Рейнольдса, а в расчётах обычно принимают:  $\varepsilon=0,64$ ,  $\varphi=0,97$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\xi=0,065$ ,  $\mu=0,62$ .

При истечении через внешний цилиндрический насадок, который представляет собой короткую трубку или при истечении через отверстие, диаметр которого  $d_0$  в 2...6 раз больше толщины стенки отверстия  $\delta$ , в расчётах обычно принимают следующие значения коэффициентов:  $\mu=\varphi=0,82$ ,  $\xi=0,5$ ,  $\varepsilon=1$ .

Внутренний цилиндрический насадок – это короткая трубка, присоединенная к отверстию внутри. При этом  $\mu=0,71$ ;  $\varepsilon=1$ .

Конoidalный насадок обеспечивает плавное безотрывное сужение потока внутри насадка и параллельно-струйное течение на выходе. Для него в расчётах можно принимать:  $\mu = \varphi = 0,97$ ,  $\xi = 0,06$ .

#### Указания к решению задач

Задачи данного раздела можно решать без записи уравнения Бернулли. Так, если дана задача на истечение через отверстие и насадки и задан коэффициент расхода  $\mu$ , то следует применять основное выражение (22). При этом следует помнить, что расчётный напор в общем случае складывается из суммы геометрических и пьезометрических высот (19).

Следует знать, что коэффициентами расхода  $\mu$  однозначно определяются коэффициенты сжатия струи  $\varepsilon$  и скорости  $\varphi$  (или сопротивления  $\xi$ ).

Указанное выше основное выражение для расхода справедливо при истечении через отверстия, насадки и дроссели. Последние могут иметь форму

отверстия или насадка, но всегда истечение через них происходит в среду, заполненную жидкостью (истечение под уровень).

Если истечение жидкости происходит при переменном напоре (опорожнение резервуаров), то в каждый данный момент движение жидкости можно рассматривать как установившееся.

## 7.2 Гидравлический расчет трубопроводов

При гидравлических расчетах рассматривается несколько видов трубопроводов.

Простыми называют трубопроводы, которые не содержат разветвлений. Они могут быть соединены так, что образуют последовательное или параллельное соединения. Если трубопровод имеет несколько труб, выходящих из одного места, он называется разветвлённым. Трубопровод, содержащий как последовательное, так и параллельное соединение труб или разветвлений, называется сложным.

В основе расчёта трубопроводов лежит формула Дарси–Вейсбаха (16) для определения потерь напора на трение по длине и формула Дарси (10) для местных потерь.

При ламинарном режиме вместо формул (16) и (17) обычно бывает удобнее воспользоваться зависимостью, называемой законом Пуазейля:

$$h_{TP} = \frac{128\nu l Q}{\pi g d^4}, \quad (24)$$

или

$$P_{TP} = \frac{128\nu \rho l Q}{\pi d^4} \quad (25)$$

Формулу Дарси – Вейсбаха (16) обычно выражают через расход и получают

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4}. \quad (26)$$

Коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  или коэффициент Дарси при турбулентном режиме в общем случае зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости  $\frac{\Delta}{d}$ . Если для так называемых гидравлически гладких труб шероховатость на сопротивление не влияет, то коэффициент  $\lambda$  однозначно определяется числом Re. Для этого случая используют формулу Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (27)$$

Универсальной формулой, учитывающей одновременно оба фактора, является формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (28)$$

При малых значениях  $Re$  и  $\frac{\Delta}{d}$  вторым слагаемым можно пренебречь и (28) обращается в (27). Наоборот, при больших значениях  $Re$  и  $\frac{\Delta}{d}$  первое слагаемое делается ничтожно малым и формула (28) принимает вид

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (29)$$

Суммарная потеря напора в простом трубопроводе складывается из потерь на трение по длине и местных потерь

$$\sum h = \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4}, \quad (30)$$

Формула (30) в принципе справедлива для обоих режимов течения, однако при ламинарном режиме чаще используют формулу (24) с заменой в ней фактической длины трубопровода расчётной, равной  $l_{рас} = l + l_{эв}$ , где  $l_{эв}$  – длина, эквивалентная всем местным гидравлическим сопротивлениям в трубопроводе.

Если в трубопроводе необходимо обеспечить расход жидкости  $Q$ , то потребный для этого напор  $H_{нотр}$ , т.е. пьезометрическая высота в начальном сечении  $\frac{P_1}{\rho g}$ , определяется формулой

$$\frac{P_1}{\rho g} = H_{ст} + \sum h, \quad (31)$$

где  $H_{ст}$  – статический напор, включающий геометрическую высоту  $\Delta z$ , на которую необходимо поднять жидкость в процессе её движения по трубопроводу и пьезометрическую высоту в конечном сечении трубопровода  $\frac{P_2}{\rho g}$ , т.е.

$$H_{ст} = \Delta z + \frac{P_2}{\rho g}, \quad (32)$$

где  $\sum h$  – суммарные потери напора на сопротивление в трубопроводе. Обычно потери выражают через расход и тогда формула (31) принимает вид:

$$H_{нотр} = H_{ст} + BQ^m, \quad m=1 \quad (33)$$

С достаточной степенью точности можно принять:  
для ламинарного режима течения

$$B = \frac{128 \nu_{жид}}{g\pi^2 d^4} \mu, \quad (34)$$

для турбулентного режима течения

$$B = \left( \lambda_m \frac{l_{рас}}{d} + \sum \zeta \right) \frac{8}{g\pi^2 d^4}, \quad m=2 \quad (35)$$

Согласно формулам (34) и (35), характеристики потребного напора и

$H_{\text{потр}} = f(Q)$  трубопроводов  $\sum h = f(Q)$  при ламинарном режиме течения представляют прямые линии, а при турбулентном – параболы 2-й степени.

$$H = \frac{Q^2}{\left(\sum \frac{K_i}{\sqrt{l_i}}\right)^2}. \quad (36)$$

### Указания к решению задач

При расчёте напорных трубопроводов применяется уравнение Бернулли (9), постоянства расхода (7). По отношению местных потерь и потерь на трение трубопроводы подразделяются на короткие и длинные. К коротким относят всасывающие трубопроводы насосов, сифонные трубы, некоторые линии гидроприводов. При их расчёте оценивают и определяют потери на трение и местные потери.

При расчёте длинных трубопроводов местные потери либо совсем не оценивают, либо без точного расчёта принимают равным некоторой доле потерь по длине – обычно 10%.

Гидравлический расчёт трубопровода сводится к решению трёх основных задач:

1. Определение потребного напора  $H$ , необходимого для обеспечения пропускания известного расхода  $Q$  по трубопроводу длиной  $l$  и диаметром  $d$ .

По данным  $Q, d$  находим число Рейнольдса и определяем режим течения жидкости.

При ламинарном режиме искомый напор находим по формулам (33) и (34).

При турбулентном режиме задача решается с помощью формул (33) и (35) с использованием формул (27) или (28) в зависимости от шероховатости труб.

2. Определение расхода трубопровода  $Q$ , если известны напор  $H$ , длина  $l$  и диаметр  $d$  трубопровода, с учётом наличия определённых местных сопротивлений или при их отсутствии.

Так как число Рейнольдса в данной задаче подсчитать нельзя, то поступить можно двояко. Либо задаться режимом течения, основываясь на роде жидкости – значении вязкости (вода, керосин, бензин режим обычно турбулентный; масло – ламинарный) с последующей проверкой режима после решения задачи и определения числа Рейнольдса. Либо по формулам (33) и (34) выразить расход жидкости через критическое число Рейнольдса и определить  $H_{кр}$ , соответствующее смене режима. Сравнив  $H_{кр}$  с  $P_{расп}$ , определим режим течения.

При ламинарном режиме задача решается просто с помощью формул (33) и (34).

При турбулентном режиме в уравнениях (33) и (35) содержатся две неизвестные  $Q$  и  $\lambda_t$ , зависящие от числа Рейнольдса. Поэтому для решения задачи рекомендуется метод последовательных приближений. Для этого в



первом приближении следует задаться коэффициентом  $\lambda_r$  (например,  $\lambda_r=0,03$ ) или, если задана шероховатость  $\Delta$ , определить его из (28) при  $Re = \infty$ . Обычно бывает достаточно второго приближения.

3. Определение диаметра трубопровода  $d$  в случае известных величин напора  $H$ , расхода  $Q$  и длины  $l$ .

Так как число Рейнольдса, как и в предыдущей задаче, подсчитать нельзя, то режимом течения следует либо задаться, либо по формулам (33) и (34) выразить диаметр через критическое число Рейнольдса и определить  $N_{кр}$ , соответствующее смене режима. Сравнивая  $N_{кр}$  с  $N_{расп}$ , определяют режим течения.

При ламинарном режиме задача решается просто на основании формул (33) и (34).

При турбулентном режиме задачу решают графически. Для этого задаются рядом значений диаметра  $d$  и для каждого рассчитывают  $N_{номр}$ . Строят зависимость  $N_{номр}=f(d)$  и по ней, зная  $N_{расп}$ , определяют  $d$ .

При расчёте сложных трубопроводов удобно пользоваться графоаналитическим способом, графически суммируя гидравлические характеристики отдельных труб.

### 7.3 Особые случаи движения жидкости

Это случаи, когда в движущейся жидкости происходят явления, отсутствующие в обычных условиях. К таким явлениям можно отнести нестационарность, изменение агрегатного состояния жидкости, проявление свойств, которыми в обычных условиях пренебрегают. Так, кавитация, возникающая при сильном понижении давления в движущейся жидкости, приводит к разрывам сплошности, а последующее повышение давления – к возникновению микрогидроударов, вызывающих кавитационную эрозию материалов в гидросистемах.

Неустановившееся движение – движение, когда скорость и давление в определённых точках потока жидкости изменяется по времени.

Расчёт жёсткого трубопровода при неустановившемся движении несжимаемой жидкости ведётся по уравнению Бернулли с дополнительным инерционным членом.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_{cp1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_{cp2}^2}{2g} + h_n + h_{ин}, \quad (37)$$

где  $h_{ин}$  – инерционный напор, который учитывает потери напора на преодоление силы локальной инерции.

При внезапном изменении скорости потока в напорном трубопроводе резко изменяется давление. Явление резкого повышения давления при быстром изменении скорости движения жидкости называется гидравлическим ударом. Наиболее распространённым видом неустановившегося движения является гидравлический удар и считается вредным явлением, так как может вызвать аварии в гидросистемах.

В зависимости от соотношения фазы удара и времени закрытия задвижки гидравлические удары разделяют на прямые и не прямые.

Для определения давления при прямом гидравлическом ударе используют формулу Н. Жуковского

$$\Delta p = \rho v_0 c, \quad (38)$$

где  $c$  – скорость распространения ударной волны.

Формулу Жуковского можно представить через дополнительный инерционный напор в трубопроводе

$$\Delta H = c \frac{v_0}{g}, \quad (39)$$

Скорость распространения упругой деформации по Н. Жуковскому определяется как

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} d}{E_m \delta}}}, \quad (40)$$

где  $E_m$  – модуль упругости материала стенки трубы;

$E_{ж}$  – модуль упругости жидкости;

$\delta$  – толщина стенки трубы.

При не прямом гидравлическом ударе значение повышения давления зависит от длины трубопроводов и не зависит от скорости распространения ударной волны

$$\Delta p_n = 2 \rho v_0 \frac{l}{t_3}, \quad (41)$$

где  $t_3$  – время закрытия задвижки.

В моменты понижения давления при гидроударе могут возникать кавитационные явления. Эти же явления при определённых условиях становятся причиной изменения режима истечения жидкости через насадки и т.д.

Скорости распространения упругой деформации могут быть значительно меньше, чем найденные по формуле (40). На практике могут составлять 50% и ниже расчётной.

Такое расхождение объясняется наличием в жидкости нерастворённого газа (воздуха), а так же твёрдых частиц. Воздух и твёрдые частицы в жидкости изменяют её модуль объёмного сжатия.

### Лабораторный практикум

Лабораторная работа №1 Определение гидростатического давления и сил давления.

Лабораторная работа №2 Изучение режимов течения жидкости в трубопроводе круглого сечения.

Лабораторная работа №3 Практическое ознакомление с уравнением Бернулли.

Лабораторная работа №4 Изучение потерь напора по длине трубопровода.

Лабораторная работа №6 Истечение жидкости через малые отверстия в тонкой стенке и насадки.

### **Практические (семинарские) занятия**

1. Гидростатика. Давление в точке. Определение сил давления на плоские и криволинейные поверхности.
2. Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости.
3. Местные и линейные гидравлические сопротивления.
4. Гидравлический расчёт трубопроводов.

### **Вопросы к экзамену**

1. Определение гидравлики как науки. Что изучает гидростатика? Что изучает гидродинамика? Основные понятия и определения.
2. Основные физические свойства жидкостей и газов.
3. Жидкость идеальная и реальная.
4. Какие физические свойства воды ограничивают применение её в приводах?
5. Силы, действующие в покоящейся жидкости.
6. Гидростатическое давление и его свойства. Приборы для измерения давления
7. Абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления.
8. Пьезометрическая высота и её связь с давлением.
9. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости (Уравнения Эйлера)
10. Основное уравнение гидростатики. Математическая запись. Физический смысл.
11. Силы давления покоящейся жидкости на горизонтальные и наклонные плоские стенки. Центр давления.
12. Гидростатический парадокс.
13. Силы давления покоящейся жидкости на криволинейные поверхности.
14. Гидравлические элементы потока жидкости.
15. Элементарная струйка и её свойства.
16. Расход жидкости. Средняя скорость. Уравнение неразрывности.
17. Уравнение Бернулли для струйки идеальной жидкости.
18. Физическая сущность и графическое представление уравнения Бернулли для струйки идеальной жидкости.
19. Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости.
20. Физическая сущность и графическое представление уравнения Бернулли для потока вязкой жидкости.
21. Практическое применение уравнения Бернулли.
22. Установившееся и неустановившееся движение жидкости.

23. Пьезометрический уклон.
24. Анализ составляющих уравнения Бернулли с энергетической точки зрения.
25. Режимы течения жидкостей. Гидродинамическое подобие.
26. Теория ламинарного течения жидкостей в трубах.
27. Турбулентное течение жидкости в трубах.
28. Потери напора при турбулентном течении жидкости в круглых трубах.
29. Местные гидравлические сопротивления.
30. определение потерь давления при внезапном сужении и расширении трубопроводов.
31. Особые случаи движения жидкости.
32. Истечение жидкости через малые отверстия.
33. Истечение жидкости через насадки.
34. Истечение жидкости при переменном напоре.
35. Гидравлический расчёт трубопроводов.
36. Гидравлический расчёт сифона.
37. Функции жидкости в гидросистемах.

#### 4. Контрольные задания

Номера контрольных задач выбираются, согласно последней цифре шифра зачётной книжки студента (табл. 1), числовые значения указанных в задаче величин – по предпоследней цифре шифра зачётной книжки студента (табл. 2).

В условиях задач не всегда указываются все цифровые значения параметров, необходимые для решения (например, может быть не указана плотность, коэффициент вязкости или другой параметр). Тогда недостающие параметры выбирают из таблиц, помещенных в приложении. В исключительных случаях можно пользоваться также данными других справочников, в каждом случае указывая в своей контрольной работе название справочника, номер таблицы или графика.

Таблица 1– Номера задач в контрольных работах

Последняя цифра шифра зачетной книжки	Номера задач				
	1	2	3	4	5
1	1	5	11	15	21
2	2	7	12	16	18
3	3	6	14	17	22
4	4	8	12	15	20
5	3	9	13	16	22
6	2	10	13	17	19
7	4	5	12	15	20

8	1	7	14	16	19
9	3	10	12	17	21
0	1	8	11	15	18

## 5. Методические указания к выполнению контрольных заданий

**Задачи №1–4** составлены по теме «Основные свойства жидкостей». При решении задач используются известные формулы для определения коэффициентов объёмного сжатия и температурного расширения. При этом повышение давления в герметичном заполненном жидкостью сосуде не зависит от его объёма.

**Задачи №5 –10** составлены по теме «Гидростатика». Они связаны с определением силы давления жидкости на плоские и криволинейные стенки. Рассматриваются жидкости, находящиеся в абсолютном покое. При решении этих задач необходимо определять либо полную силу давления жидкости либо только её горизонтальную или вертикальную составляющую.

**Задачи №11–17** составлены по теме «Гидравлический расчёт трубопроводов к разделу гидравлически коротких трубопроводов. Их решают с помощью уравнения Бернулли. При этом учитывают и потери по длине и местные потери. При решении задач №16 и №17 использовать также формулы расхода жидкости при истечении через отверстия или насадки (тема «Истечение жидкости через отверстия и насадки»).

Можно считать, что коэффициенты расхода  $\mu$  не зависят от числа Рейнольдса, т.е. являются постоянными: для отверстия  $\mu = 0,62$ , для цилиндрического насадка  $\mu=0,8$ .

**Задачи №18–22** составлены по теме «Особые случаи движения жидкости». При решении этих задач необходимо использовать теорию гидравлического удара Н.Е. Жуковского

### Задачи

1. Определить каким должен быть объём недозаполнения герметичного резервуара с жидкостью, объёмом  $V$ , если возможно увеличение температуры от исходного значения  $t_1$  до  $t_2$ . Считать что давление в закрытом резервуаре увеличится от  $p_1 = 0$  до заданного  $p_2$ .

2. Определить изменение плотности жидкости  $\rho$  при сжатии её от  $p_1$  до  $p_2$ .

3. Автоклав объёмом 30 литров наполнен жидкостью и закрыт герметически. Определить повышение давления в автоклаве при увеличении температуры на величину  $t$ , если коэффициент температурного расширения жидкости  $\beta$  и её модуль упругости  $E$ . Объёмной деформацией автоклава пренебречь.

4. Определить изменение давления в закрытом резервуаре с нефтепродуктом с изменением температуры от  $20^\circ\text{C}$  до  $t_2^\circ\text{C}$ .

Указание: В решении задачи использовать формулу Менделеева для определения плотности нефтепродуктов.

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + \beta_t(t - 20)}$$

Коэффициент температурного расширения для нефтепродуктов принять  $\beta_t = 0,0006^\circ\text{C}^{-1}$ .

5. Определить величину и направление силы  $F$ , приложенной к штоку поршня для удержания его на месте. Справа от поршня находится воздух, слева от поршня и в резервуаре, куда опущен открытый конец трубы – жидкость Ж (рис. 1). Показание жидкостного манометра –  $p_m$ .

6. Шар диаметром  $D$  наполнен жидкостью Ж. Уровень жидкости в пьезометре, присоединённом к шару, установился на высоте  $H$  от оси шара. Определить силу давления на боковую половину внутренней поверхности шара (рис. 2).

7. Определить силу давления на торцевую стенку горизонтальной цилиндрической цистерны диаметром  $d$ , заполненную жидкостью Ж, если уровень жидкости в горловине находится на расстоянии  $H$  от дна. Цистерна герметично закрыта и над поверхностью жидкости находится газ под давлением  $p_{м(в)}$ . Определить точку приложения силы давления. (Рис. 3)

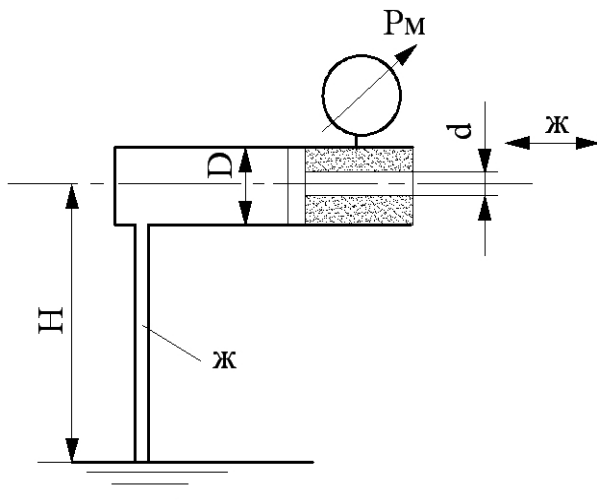


Рисунок 1

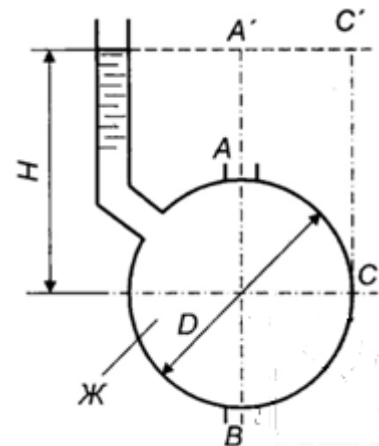


Рисунок 2

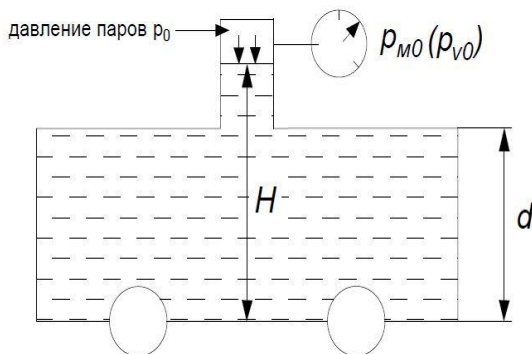


Рисунок 3

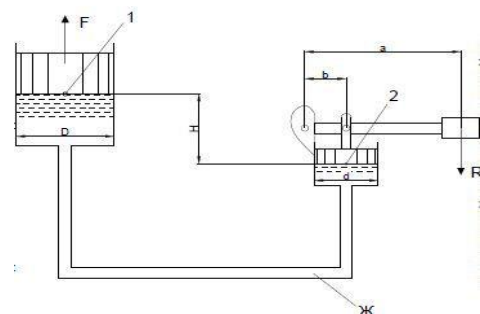


Рисунок 4

8. Определить силу прессования, развиваемую гидравлическим прессом. Диаметр большего плунжера равен  $D$ , а малого  $d$ . Большой плунжер

расположен выше меньшего на величину  $H$ , усилие, приложенное к рукоятке, равно  $R$ . Температура рабочей жидкости  $20^{\circ}\text{C}$ . (Рис. 4)

9. Определить силу прессования, развиваемую гидравлическим прессом. Диаметр большого плунжера равен  $D$ , а малого  $d$ . Поршни расположены на одном уровне, усилие, приложенное к рукоятке, равно  $R$ . Температура рабочей жидкости  $20^{\circ}\text{C}$ . (Рис. 4)

10. Определить усилие, срывающее заклёпки боковой стенки котла в месте прикрепления к цилиндрической части последнего. Внутреннее давление в котле  $p$ , диаметр цилиндрической части котла  $D$  (рис. 5).

11. Определить показание дифференциального ртутного манометра  $h$ , если расход воды, проходящей через водомер Вентури  $Q$ , больший и меньший диаметры водомерной трубы  $d_2$  и  $d_1$ , гидравлические потери между сечениями  $h_{\text{п}}$  (рис. 6).

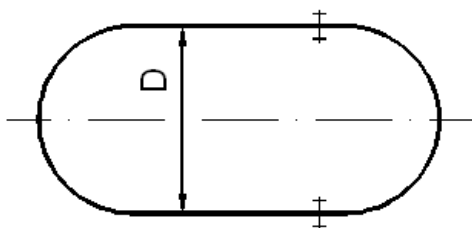


Рисунок 5

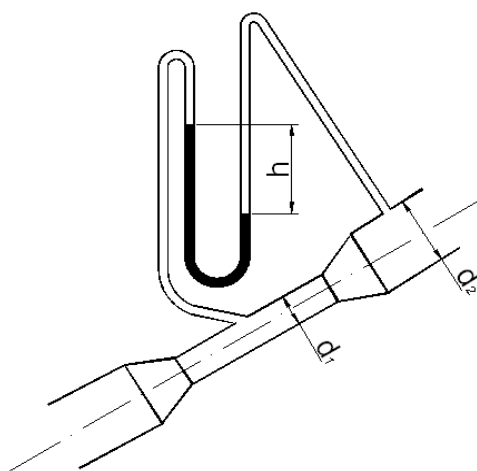


Рисунок 6

12. Для поддержания пластового давления при добыче нефти в нагнетательную скважину глубиной  $H$  по насосно-компрессорным трубам закачивается жидкость с расходом  $Q$   $\text{м}^3$  в сутки (рис. 7). Забойное давление равно  $p_{\text{заб}}$ . Определить показание устьевого манометра и полезную мощность, затрачиваемую при закачке. Температура воды  $t^{\circ}\text{C}$ . Местными потерями пренебречь. Указание: Полезная мощность определяется по формуле  $N_n = p_M Q$

13. Для поддержания пластового давления при добыче нефти в нагнетательную скважину глубиной  $H$  по насосно-компрессорным трубам закачивается жидкость (рис. 7). Забойное давление равно  $p_{\text{заб}}$ . Показание устьевого манометра  $p_{\text{м}}$ . Определить расход жидкости. Температура воды  $t^{\circ}\text{C}$ . Местными потерями пренебречь.

Указание: Задачу решить методом итераций (последовательных приближений), предполагая турбулентный режим движения.

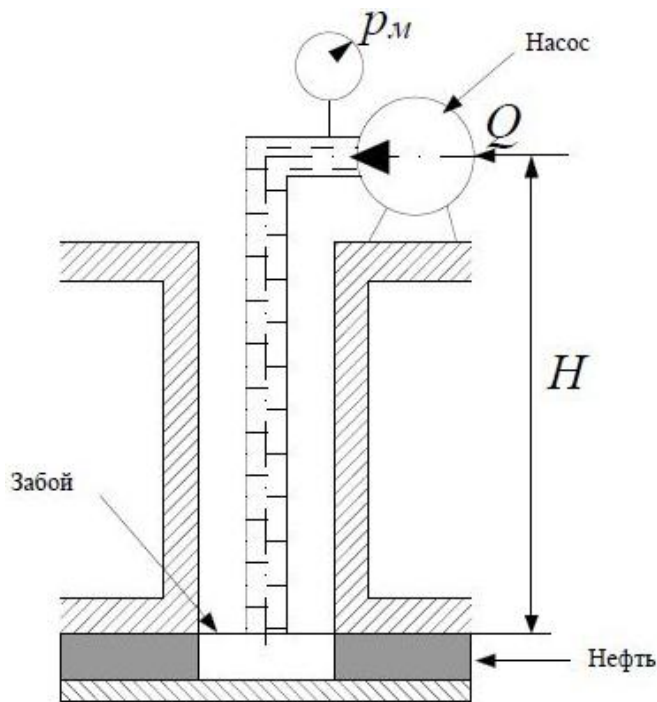


Рисунок 7

14. По системе горизонтально расположенных труб, имеющих длины  $l_1=8$  м и  $l_2=14$  м и внутренние диаметры  $d_1$  и  $d_2$  перекачивают дизельное топливо с расходом  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  и температурой  $t = 20^\circ \text{C}$ . Избыточное давление на выходе  $p_2$ . Трубы считать гидравлически гладкими. Местное сопротивление (внезапное сужение) указано на рисунке 8. Определить режим течения дизельного топлива в трубах и избыточное давление  $p_1$  в сечении 1-1. Построить в масштабе линии полного напора и пьезометрических высот на данном участке трубопровода.

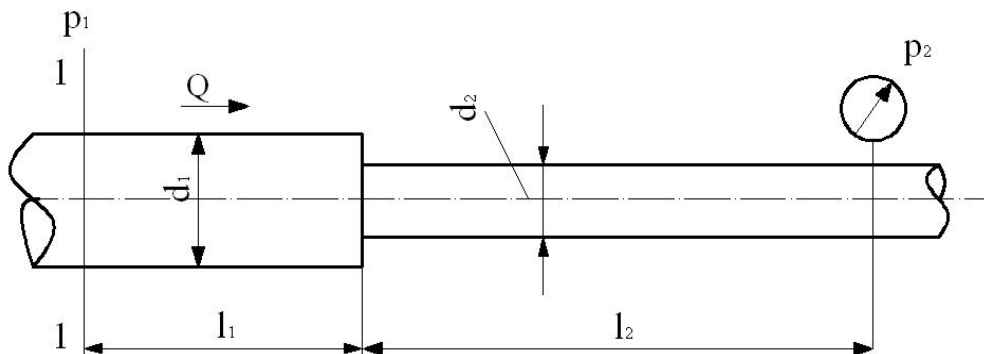


Рисунок 8

15. По трубопроводу диаметром  $d$  и длиной  $l$  движется жидкость Ж (рис. 9). Чему равен напор  $H$ , при котором происходит смена ламинарного режима движения турбулентным режимом? Местные потери напора не учитывать. Температура жидкости  $20^\circ \text{C}$ .

16. Определить длину трубы  $l$ , при которой расход жидкости из бака будет в два раза меньше, чем через отверстие того же диаметра  $d$ . Напор над отверстием равен  $H$ . Коэффициент гидравлического трения в трубе принять  $\lambda=0.025$  (рис. 10).



17. Определить длину трубы  $l$ , при которой опорожнение цилиндрического бака диаметром  $D$  на глубину  $H$  будет происходить в два раза медленнее, чем через отверстие того же диаметра  $d$ . Коэффициент гидравлического трения в трубе принять  $\lambda=0.025$  (рис. 10).

Указание. В формуле для определения времени опорожнения бака коэффициент расхода  $\mu$  выпускного устройства определяется его конструкцией. Для трубы

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi + \lambda \frac{l}{d}}}$$

где  $\xi$  – суммарный коэффициент местных сопротивлений.

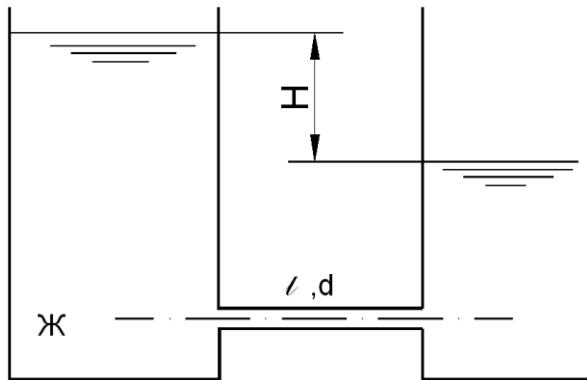


Рисунок 9

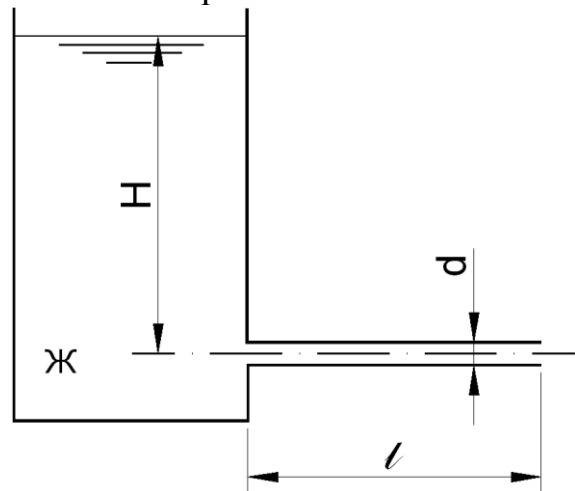


Рисунок 10

18. Вода в количестве  $Q$  перекачивается по чугунной трубе диаметром  $d$ , длиной  $l$  с толщиной стенки  $\delta$  (рис. 11). Свободный конец трубы снабжён затвором. Определить время закрытия затвора при условии, чтобы повышение давления в трубе вследствие гидравлического удара не превышало  $\Delta p=1$  МПа. Как повысится давление при мгновенном закрытии затвора?

19. Определить время закрытия задвижки, установленной на свободном конце стального водопровода диаметром  $d$  длиной  $l$  с толщиной стенки  $\delta$ , при условии, чтобы максимальное повышение давления в водопроводе было в три раза меньше, чем при мгновенном закрытии задвижки?

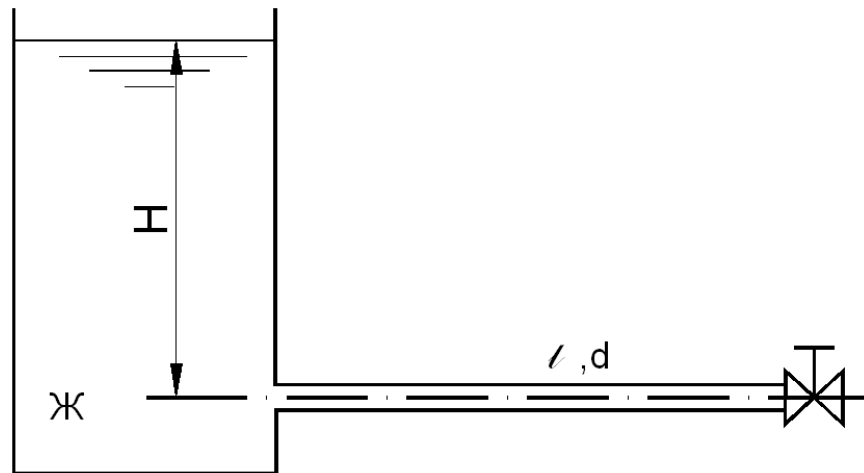


Рисунок 11

20. Напорный стальной трубопровод имеет длину  $l$ , диаметр  $d$  и толщину стенки  $\delta$ . Расход воды в трубопроводе  $Q$ . Определить скорость распространения ударной волны  $C$  и повышение давления у задвижки, расположенной в конце трубопровода  $\Delta p$  для случая мгновенного закрытия задвижки и сравнить его с повышением давления  $\Delta p_t$ , когда время закрытия составляет  $t = 10$  с.

21. Слабо сжимаемая маловязкая жидкость ( $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ) истекает из большого резервуара при постоянном напоре  $H$  через длинный трубопровод длиной  $l$  в открытую емкость. Оценить максимальное давление в конце трубопровода при закрытии крана, а также наибольшее время закрытия крана, при котором это давление будет принимать полученное значение. Считать трубопровод недеформируемым, модуль упругости жидкости  $K = 2 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

22. Определить силу давления на запорный диск задвижки, установленный на конце стального трубопровода диаметром  $d$  и длиной  $l$ , толщина стенки  $\delta$ , по которому движется жидкость Ж с расходом  $Q$ . Время закрытия задвижки  $t_3$ .

Таблица 2 – Численные значения величин

№ задач	Наименование исходных величин	Предпоследняя цифра шифра зачетной книжки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	Ж	керосин	бензин	нефть	масло	глицерин	нефть	спирт	бензин	вода	спирт
	$V, \text{ м}^3$	30	50	40	20	10	50	30	40	50	10
	$t_1, ^\circ\text{C}$	20	18	15	20	20	10	20	15	10	20
	$t_2, ^\circ\text{C}$	50	40	30	40	35	40	50	35	45	40
	$p_2, \text{ МПа}$	10	5	20	10	5	20	15	10	15	10
2	Ж	керосин	бензин	нефть	вода	глицерин	нефть	спирт	бензин	вода	керосин
	$p_1, \text{ МПа}$	0,1	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	0,3	0	0	0
	$p_2, \text{ МПа}$	1	2	3	20	2	10	15	1	15	1
3	$\beta, 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	649	832	698	351	956	735	187	536	150	653
	$E, 10^9 \text{ Па}$	1,58	1,95	1,67	2,08	1,48	1,72	24,6	4,08	2,06	1,75
	$T, ^\circ\text{C}$	40	11	39	45	20	32	6	21	40	33
4	Ж	нефть	керосин	диз. топливо	бензин	нефть	диз. топливо	керосин	бензин	бензин	керосин
	$t_2, ^\circ\text{C}$	40	40	50	40	30	40	60	50	30	70
5	Ж	вода	керосин	бензин	нефть	нефть	вода	глицерин	спирт	керосин	бензин
	$P_m, \text{ МПа}$	0,02(вак)	0,08(изб)	0,07(абс)	0,08(абс)	0,05(вак)	0,1(абс)	0,02(вак)	0,02(изб)	0,1(абс)	0,05(изб)
	$H$	5	6	7	8	6	5	5	8	7	6
	$D, \text{ мм}$	100	200	300	120	140	160	5	200	180	160
	$d, \text{ мм}$	50	100	160	60	70	50	180	100	90	80
6	Ж	вода	бензин	нефть	масло турб.	керосин	глицерин	керосин	бензин	Нефть	масло трансф.
	$H, \text{ м}$	6	3	5	4	5	5	5	6	4	4
	$D, \text{ мм}$	600	500	400	600	700	500	600	700	800	400

Продолжение таблицы 2

Номера задач	Наименование исходных величин	Предпоследняя цифра шифра зачетной книжки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
7	H, м	3,0	2,0	4,0	2,5	3,5	3,2	3,5	4,5	3,0	2,8
	d, м	2,5	1,7	3,5	2,0	3,0	2,8	3,1	4,0	2,6	2,2
	p <sub>м</sub> , кПа	60	-	70	-	40	-	50	-	30	-
	p <sub>в</sub> , кПа	-	55	-	0	-	60	-	40	-	65
	жидкость	нефть	бензин	керосин	диз. топливо	нефть	бензин	керосин	диз. топливо	нефть	бензин
8	Ж	вода	глицерин	масло турб.	масло трансф.	масло турб.	глицерин	вода	масло трансф.	масло турб.	масло веретён.
	R, Н	100		100	200	50		50	200	250	150
	H, м	1	150	3	1,5	2	100	1	2	3	2
	D, мм	600	1,5	400	400	500	1,5	300	600	500	350
	d, мм	150	700	100	100	120	200	75	150	120	90
	a, мм	700	180	650	500	700	50	500	700	800	600
	h, мм	80	1000	60	60	70	400	50	80	70	60
9	Ж	вода	глицерин	масло турб.	масло трансф.	масло трансф.	масло турб.	масло веретён.	вода	масло турб.	глицерин
	R, Н	100		100	200	200	250	150	50	50	100
	D, мм	600	150	400	400	600	500	350	300	500	200
	d, мм	150	700	100	100	150	120	90	75	120	50
	a, мм	700	180	650	500	700	800	600	500	700	400
	h, мм	80	1000	60	60	80	70	60	50	70	50
10	p, кгс/см <sup>2</sup>	12	16	10	18	15	17	15	20	12	14
	D, м	2	2,6	1,8	2,4	2,2	2	1,8	2,2	1,9	2,4

Продолжение таблицы 2

Номера задач	Наименование исходных величин	Предпоследняя цифра шифра зачетной книжки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
11	Q, л/с	45	60	55	50	40	40	40	30	20	25
	d <sub>1</sub> , мм	100	95	90	86	80	75	80	70	60	50
	d <sub>2</sub> , мм	250	240	240	220	200	200	160	200	160	160
	h, м вод. ст.	0,17	0,35	0,40	0,40	0,40	0,5	0,3	0,40	0,3	0,35
12	H, м	2000	2500	1200	1400	1800	2600	2200	2100	2500	2600
	d, мм	62	76	80	90	70	86	104	60	72	100
	p <sub>заб</sub> , МПа	25	30	20	22	24	32	28	30	34	26
	Q, м <sup>3</sup> /сут	300	250	200	300	280	150	280	190	350	360
	Δ, мм	0,5	0,4	0,3	0,5	0,8	0,4	0,3	0,5	0,7	1,0
	t °С	20	30	35	25	15	10	15	25	20	30
13	H, м	2000	2500	1200	1400	1800	2600	2200	2100	2500	2600
	d, мм	62	76	80	90	70	86	104	60	72	100
	p <sub>заб</sub> , МПа	25	30	20	22	24	32	28	30	34	26
	p <sub>м</sub> , МПа	6,2	5,9	10	11	8	9	8	11	12	14
	Δ, мм	0,5	0,4	0,3	0,5	0,8	0,4	0,3	0,5	0,7	1,0
	t °С	20	30	35	25	15	10	15	25	20	30
14	Q, м <sup>3</sup> /с	0,01	0,002	0,005	0,01	0,005	0,001	0,003	0,005	0,08	0,0025
	P <sub>2</sub> , МПа	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
	d <sub>1</sub> , мм	160	56	50	140	140	40	100	150	156	160
	d <sub>2</sub> , мм	130	28	25	70	80	20	60	120	128	130
15	Ж	вода	бензин	керосин	масло турб.	масло трансф.	глицерин	нефть	керосин	масло турб.	бензин
	d, мм	20	50	10	60	30		40	30	80	20
	l, м	500	20	400	35	170	60 700	700	500	200	250

Продолжение таблицы 2

Номера задач	Наименование исходных величин	Предпоследняя цифра шифра зачетной книжки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
16	H, м	6	5	4	5	6	5	4	8	70	6
	d, мм	30	50	70	90	70	50	40	60	80	70
17	H, м	6	7	4	8	5	6	5	4	5	6
	d, мм	70	30	70	50	90	70	50	40	60	80
18	Q, л/с	0,352	1,41	3,18	5,66	8,35	12,7	8,85	5,66	3,18	1,41
	d, мм	50	100	150	200	250	300	250	200	250	100
	l, м	1200	1400	1600	2000	1500	1100	1300	1500	1700	1200
	δ, мм	7	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	11,5	10,5	9,5	8,5
19	d, мм	100	150	200	250	300	250	200	150	100	50
	l, м	1900	1700	1850	1750	1450	1900	1600	1800	1500	2000
	δ, мм	7	8	8	10	12	11	10	9	8	6
20	l, м	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
	d, мм	200	225	250	300	350	400	500	600	700	800
	δ, мм	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18
	Q, л/с	50	70	90	120	160	210	280	400	600	900
21	H, м	5	2	5	10	1	4	6	10	6	8
	l, м	1000	500	1500	2000	200	1200	1400	1500	1200	1600
22	Ж	бензин	вода	масло трансф	бензин	глицерин	керосин	нефть	масло трансф.	масло трансф.	вода
	Q, л/с	0,2	10	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,5	15
	d, мм	16	55	22	16	18	18	16	10	20	70
	l, м	20	1000	50	25	20	25	25	10	50	1500
	δ, мм	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3
	t <sub>зак</sub> , с	0,5	2,0	0,7	0,8	0,6	0,7	0,6	0,2	0,6	2,0

### Список литературы

1. Артемьева Т.В. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод /Т.В. Артемьева, Т.М. Лысенко, А.Н. Румянцева, С.П. Стесин.–М.: Издательский центр «Академия», 2008.–336 с.
2. Кудинов А.А. Техническая гидромеханика: учеб. пособ. М.: Машиностроение, 2008, 368 с.
3. Лепёшкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропривод; под ред. А.А. Шейпака: учебник. – М.: МГИУ, 2005.–352 с.
4. Юрьев А.С. Справочник по расчётам гидравлических и вентиляционных систем. 3-е изд., доп. и перераб. – Спб.: НПО Профессионал, 2006. – 1154 с.
5. Ухин Б.В., Гусев А.А. Гидравлика. – М.: Инфра –М, 2008.– 432 с.
6. Штеренлихт Д.В. Гидравлика.– М.: Колосс, 2008.– 656 с.
7. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Академия, 2010.– 272 с.
8. Беленков Ю.А., Лепёшкин А.В. и др. Гидравлика и гидропневмопривод; под ред. Ю.А. Беленкова: задачник.– М.: Экзамен, 2009.– 286 с.
9. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями.– М.: высшая школа, 2008.– 192 с.

Приложение А  
(справочное)

**Основные условные обозначения**

Наименование величины	Обозначение	Размерность величины в системе СИ
Вес жидкости удельный	$\gamma$	Н/м <sup>3</sup>
Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>
Высота	$h$	м
Давление	$p$	Па
Диаметры поперечного сечения	$D, d$	м
Длина участка	$l$	м
Коэффициент вязкости кинематический	$\nu$	м <sup>2</sup> /с
Коэффициент вязкости динамический	$\mu$	Па·с
Коэффициент кинетической энергии	$\alpha$	—
Коэффициент местного гидравлического сопротивления	$\zeta$	—
Коэффициент гидравлического трения	$\lambda$	—
Коэффициент расхода	$\mu$	—
Коэффициент скорости	$\varphi$	—
Коэффициент сжатия струи	$\varepsilon$	—
Напор полный	$H$	м
Напряжение трения	$\tau$	Н/м <sup>2</sup>
Объём жидкости	$V$	м <sup>3</sup>
Объёмный расход жидкости	$Q$	м <sup>3</sup> /с
Площадь «живого» сечения	$s$	м <sup>2</sup>
Потери напора по длине (на трение) и местные потери	$h_l, h_m$	м
Радиус гидравлический	$R$	м
Расход жидкости весовой	$G$	Н/с
Расход жидкости массовый		кг/с



Приложение Б  
(справочное)

**Единицы, временно допускаемые к применению**

Величина	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Сила	килограмм-сила	кгс	9,806 Н
Давление	миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,3 Па
Динамическая вязкость	пуаз	П	0,1 Па·с
Кинематическая вязкость	стокс	Ст	$10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
Объём	литр	л	$10^{-3} \text{ м}^3$

Приложение В  
(справочное)

Средние значения изотермического модуля упругости некоторых жидкостей

Жидкость	К, $10^9$ Па	Жидкость	К, $10^9$ Па
Вода	2,06	Керосин	1,37
Бензин	1,09	Спирт	0,98
Нефть	1,28	Масло минеральное	1,5
Глицерин	4,46	Ртуть	32,4
Бензин авиационный	1,35	Масло турбинное	1,717

Приложение Г

Переводные коэффициенты единиц измерения давления

Единицы давления	Па	бар	кГ/м <sup>2</sup>	кГ/см <sup>2</sup>	мм рт. ст.	м вод. ст.
Па	1,0	0,00001	0,102	0,0000102	0,00749	0,000102
бар	100000	1	10102	1,02	749	10,2
кГ/м <sup>2</sup>	9,81	0,0000981	1	0,0001	0,0735	0,001
кГ/см <sup>2</sup>	98100	0,981	10000	1	735,56	10000
мм рт. ст.	133,5	0,001335	13,6	0,00136	1	0,0136
м вод. ст.	9,81	0,0000981	1,0	0,0001	73,556	0,001

Приложение Д  
(справочное)

Значения коэффициента температурного расширения  $\beta_t$  некоторых жидкостей

Жидкость	Коэффициент температурного расширения $\beta_t$
Вода	0,00015

Алкоголь	0,00110
Глицерин	0,0005
Нефть	0,00060
Ртуть	0,00018
Масло сурепное	0,00090

Приложение Е  
(справочное)  
**Средние значения коэффициента объемного расширения**

Жидкость		Жидкость	
Вода	0,000208	Масло трансформаторное	0,0007
Керосин	0,001	Масло веретенное	0,0007
Глицерин	0,0005	Дизельное топливо	0,0008
Нефть	0,0007	Бензин	0,001
Масло турбинное	0,0009	Масло АМГ	0,0007
Спирт	0,0011		

Приложение Ж  
(справочное)  
**Модуль упругости некоторых твердых тел К**

Твердые тела	Модуль упругости Е, $10^9$ Па
Сталь углеродистая	206
Сталь легированная	216
Чугун белый	152
Чугун черный	134
Дюралюминий	70
Латунь, бронза	118

Приложение И  
(справочное)  
**Кинематическая вязкость некоторых жидкостей,  $\nu \cdot 10^2$**

Жидкость	Температура, $t$ , °С				
	10	20	30	40	50
Вода	1,3	1,0	0,8	0,66	0,56
Бензин	0,68	0,62	0,56	0,52	0,48
Керосин	3,3	3,0	2,3	2,0	0,18
Глицерин 100 %	-	9,7	-	3,3	-

Масло АМГ	45	27	18	13	11
Нефть	25	14	11	8	6,2
Спирт	1,83	1,51	1,29	1,09	0,92
Масло трансформаторное	-	88	21	13	11
Масло турбинное	-	97	66	38	27
Масло веретенное	-	50	34	19	9
Дизельное топливо	-	28	-	13	-
Ртуть	-	0,16	-	14	-

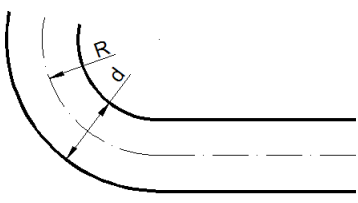

Приложение К  
(справочное)

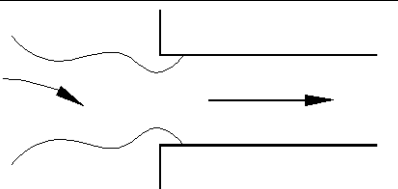
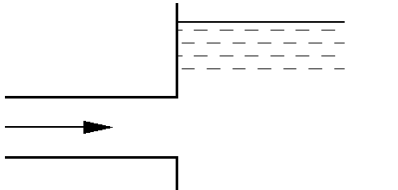
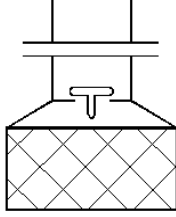
**Давление насыщенного пара воды при ее температуре**

Температура $t$ , °С	Давление пара $p$ , кПа	Давление пара $\frac{p}{\rho g}$ , м
5	0,88	0,00
10	1,17	0,12
20	2,35	0,24
30	4,21	0,43
40	7,35	0,75
50	12,3	1,25
60	19,6	2,00
70	31,1	3,17
80	47,1	4,8
90	69,7	7,1
100	101,3	10,3

Приложение Л  
(справочное)

**Коэффициент местных сопротивлений**

Наименование сопротивления	Вид сопротивления	Значение
Плавный поворот трубы (90°)		 $\zeta_{\text{пв}} = \zeta_{\text{зб}} + \frac{A}{R}$ $\zeta_{\text{зб}} = 0,2 \frac{A}{R}$

Вход в трубу из резервуара		$\zeta_{\text{вх}} = \zeta_{\text{гб}} + \frac{A}{Re}$ $\zeta_{\text{гб}} = 0,5 \quad A = 3x$
Выход из трубы в резервуар		$\zeta_{\text{вых}} = \zeta_{\text{гб}} + \frac{A}{Re}$ $\zeta_{\text{гб}} = 1,0 \quad A = 3x$
Клапан с сеткой		$\zeta = 5 \dots 10$

### Коэффициент местного сопротивления для задвижки

Степень закрытия задвижки	0	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8
Коэффициент сопротивления	0,00	0,07	0,26	0,81	2,06	5,52	17	97,8

### Коэффициенты местного сопротивления для внезапного сужения и расширения потока

$\frac{S_2}{S_1}$	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
Коэффициент сопротивления, $\xi$	0,5	0,45	0,4	0,3	0,2	0,1

$$\xi_{\text{суж}} = 0,5 \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right).$$

