

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. А. Наумов

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки
20.03.02 Природообустройство и водопользование,
профиль «Инженерное обустройство и комплексное
использование водных ресурсов»

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО КГТУ
2025

УДК 532.5+533.6

Рецензент

кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой техносферной безопасности и природообустройства ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» Н.Р. Ахмедова

Наумов, В. А.

Гидрогазодинамика: учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по направлению подгот. 20.03.02 Природообустройство и водопользование (профиль «Инженерное обустройство и комплексное использование водных ресурсов») / В. А. Наумов. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2025. – 37 с.

Учебно-методическое пособие содержит методические материалы по изучению дисциплины, которые включают тематический план занятий, задания к практическим занятиям и методические рекомендации по их выполнению, рекомендуемую литературу. В пособии изложены методические рекомендации по изучению дисциплины, указаны оценочные средства и критерии оценивания.

Список лит. – 9 наименований

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института рыболовства и аквакультуры ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» «14» февраля 2025 г., протокол № 2

УДК 532.5+533.6

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2025 г.
© Наумов В.А., 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Тематический план	7
Тема 1. Введение. Составные части и основные закономерности гидрогазодинамики	7
Тема 2. Динамика капельной жидкости в одномерном приближении.	11
Тема 3. Динамика газов в одномерном приближении	22
Тема 4. Пространственная гидрогазодинамика	26
2. Методические рекомендации по изучению дисциплины	29
Список рекомендуемой литературы	30
Приложение А. Типовые тестовые задания	31
Приложение Б. Основные термины	35

Введение

Дисциплина *«Гидрогазодинамика»* входит в состав основной профессиональной образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 20.03.02 *Природообустройство и водопользование* (профиль *«Инженерное обустройство и комплексное использование водных ресурсов»*) и изучается студентами очной формы обучения в третьем семестре.

Целью изучения дисциплины является приобретение учащимся знаний, умений и формирование навыков, предусмотренных ООП.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **знать:** основные закономерности и теоремы гидрогазодинамики, необходимые для описания процессов в объектах природообустройства и водопользования; основные этапы научных исследований в области гидрогазодинамики и требования к их результатам;

- **уметь:** формулировать необходимые уравнения гидрогазодинамики и краевые условия к ним, описывающие процессы в объектах природообустройства и водопользования; формулировать научную проблему в области гидрогазодинамики и выбрать пути ее решения;

- **владеть:** навыками постановки и решения задач гидрогазодинамики в объектах природообустройства и водопользования; навыками подготовки обзора по теме исследования, формирования отчета и доклада по результатам НИР.

Дисциплина *«Гидрогазодинамика»* является базой для получения знаний, умений и навыков при изучении таких дисциплин (модулей) как *«Гидрометеорология»*, *«Природно-техногенные комплексы»*, *«Комплексное использование и охрана водных ресурсов»*, *«Мелиорация, рекультивация и охрана земель»*.

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства текущего контроля успеваемости;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:

- тестовые задания открытого и закрытого типов.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Гидрогазодинамика» проводится в форме экзамена.

К оценочным средствам для промежуточной аттестации относятся:

- экзаменационные задания по дисциплине, представленные в виде тестовых заданий закрытого и открытого типов (Приложение А).

В соответствии с учебным планом по дисциплине «Гидрогазодинамика» предусмотрено проведение практических занятий. Перед началом практических занятий обучающиеся изучают задание и после методических указаний преподавателя приступают к его выполнению.

Тестирование студентов проводится в системе ЭИОС (электронно-информационная образовательная среда) университета. Каждый вариант теста включает в себя не менее 20 заданий открытого и закрытого типов. Оценивание тестовых заданий закрытого типа осуществляется по системе зачтено/не зачтено («зачтено» – 41-100 % правильных ответов; «не зачтено» – менее 40 % правильных ответов) или пятибалльной системе (оценка «неудовлетворительно» – менее 40 % правильных ответов; оценка «удовлетворительно» – от 41 до 60 % правильных ответов; оценка «хорошо» – от 61 до 80% правильных ответов; оценка «отлично» – от 81 до 100 % правильных ответов).

Тестовые задания открытого типа оцениваются по системе «зачтено/ не зачтено». Оценивается верность ответа по существу вопроса, при этом не учитывается порядок слов в словосочетании, верность окончаний, падежи.

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100 – балльную/процентную систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (табл. 1).

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок / Критерий	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
2. Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задаче данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

К промежуточной аттестации допускаются студенты, выполнившие задания практических занятий в полном объеме.

1. Тематический план

Тема 1. Введение. Составные части и основные закономерности гидрогазодинамики

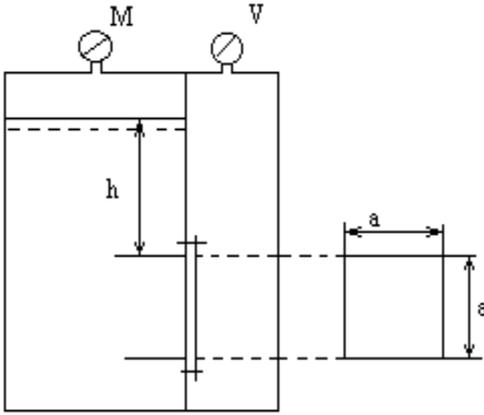
Ключевые вопросы темы

1. Цель и задачи дисциплины. Место дисциплины в структуре образовательной программы. Планируемые результаты освоения дисциплины.
2. Составные части гидрогазодинамики.
3. Свойства жидкостей и газов. Модель сплошной текучей среды.
4. Основные закономерности гидрогазодинамики.
5. Элементы гидростатики капельной жидкости.
6. Параметры газовых смесей.

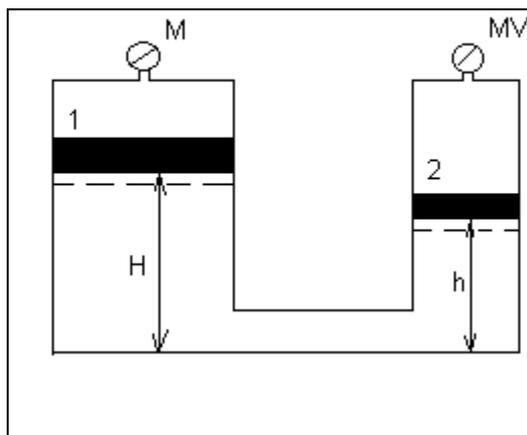
Предусмотрены лекции и практические занятия.

Практическое занятие 1. Силы давления капельной жидкости на плоскую поверхность

Задача № 1.1

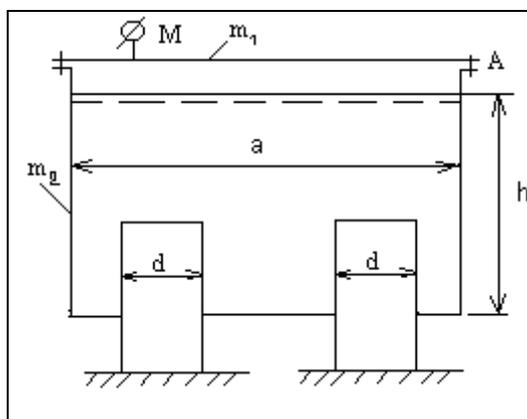
	<p>Закрытый резервуар разделен на две части плоской перегородкой, имеющей на глубине h квадратное отверстие со стороной a, закрытое крышкой. Давление над жидкостью в левой части резервуара определяется показанием манометра p_M, давление воздуха в правой части – показанием вакуумметра p_V. Определить величину силы гидростатического давления на крышку.</p>
---	--

Задача № 1.2



Гидравлический пресс заполнен жидкостью с плотностью ρ . Глубина слоев жидкости H и h . Массы поршней m_1 и m_2 , диаметры D и d . Давление воздуха над жидкостью в левой части прессы определяется показанием манометра p_M , в правой части – мановакуумметра p_{MV} . На правом поршне трение отсутствует. Определить силу трения левого поршня в состоянии равновесия.

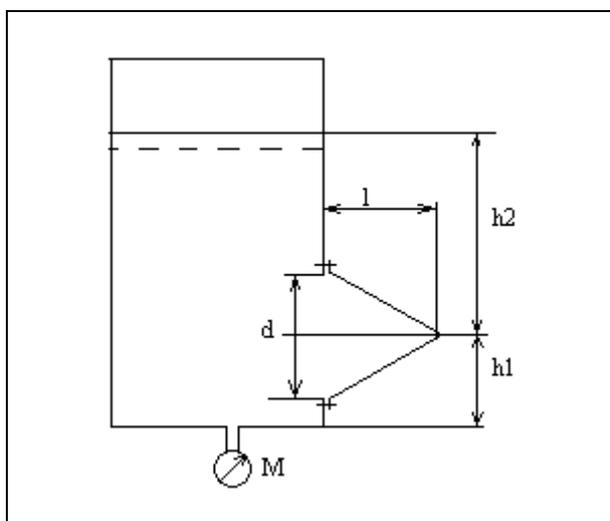
Задача № 1.3



Прямоугольный сосуд (а на b), заполненный жидкостью с плотностью ρ , опирается на два одинаковых плунжера диаметром d . Пренебрегая трением, определить показания манометра M в равновесии и нагрузку на болтовое соединение A , если масса верхней крышки m_1 , а самого сосуда m_2 . Глубина слоя жидкости h .

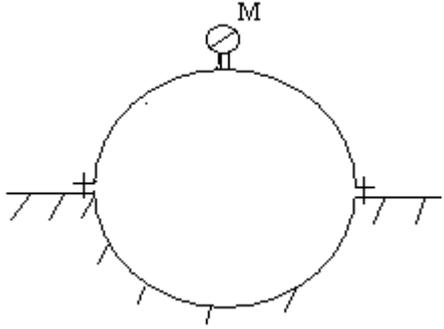
Практическое занятие 2. Силы давления капельной жидкости на криволинейную поверхность

Задача № 1.4



К днищу закрытого резервуара, наполненного водой, присоединен манометр, показание которого p_M . Определить давление воздуха, находящегося над свободной поверхностью жидкости, если высоты h_1 и h_2 известны, а также растягивающие $F_{\text{раст}}$ и срезающие $F_{\text{срез}}$ усилия болтов, крепящих к вертикальной стенке бака коническую крышку с размерами d и l . Масса крышки m .

Задача № 1.5

	<p>Сферический резервуар диаметром D доверху наполнен жидкостью с плотностью ρ. Полусферическая крышка имеет массу m и закреплена болтами. Давление в верхней точке резервуара определяется показанием манометра p_M. Определить величину усилия в болтовом соединении.</p>
---	--

Методические рекомендации по решению задач

В задачах на равновесие составляется алгебраическая сумма вертикальных проекций всех сил, действующих на твердое тело со стороны жидкости, плюс сила тяжести самого тела. Сумма приравняется к нулю.

При наличии манометра (с показанием p_M) или вакуумметра (p_V) абсолютное давление p_a рассчитывается по формулам, соответственно:

$$p_a = p_A + p_M, \quad p_a = p_A - p_V, \quad (1.1)$$

где p_A – атмосферное давление.

На горизонтальной плоскости, на глубине h давление в покоящейся жидкости остается неизменным, рассчитывается по формуле:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.2)$$

где p_0 – давление на поверхности жидкости.

Сила давления жидкости на горизонтальную плоскую крышку площадью S на глубине h равна:

$$P = p \cdot S = (p_0 + \rho gh) \cdot S, \quad (1.3)$$

Сила давления жидкости на наклонную плоскую крышку площадью S :

$$P = p_C \cdot S = (p_0 + \rho gh_C) \cdot S, \quad (1.4)$$

где p_C – давление в центре тяжести крышки.

Практическое занятие 3. Свойства смесей газов

Задача № 1.6

Имеется два баллона одинаковой емкостью V . В первом баллоне гелий (показание манометра p_{M1} , термометра t_1), во втором аргон (показание манометра p_{M2} , термометра t_2). Содержимое второго баллона закачали в первый; показание манометра стало p_{M3} . Найти показание термометра на первом баллоне.

Задача № 1.7

В баллоне емкостью V находился кислород, показание манометра было p_{M1} , термометра t_1 . В баллон добавили m_1 кг пропана C_3H_8 , и m_2 кг этилена C_2H_4 . После чего показание термометра стало t_2 . Найти объемные доли всех газовых компонент в смеси. Каким стало показание манометра p_{M2} ?

Задача № 1.8

В баллоне емкостью V находится m кг смеси трех газов: аргон, гелий, неон. Их массовые доли, соответственно, km_1 , km_2 , km_3 . Показание манометра на баллоне p_M . Найти газовую постоянную смеси, температуру смеси, коэффициенты динамической вязкости всех газовых компонент.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите составные части гидрогазодинамики.
2. Перечислите свойства жидкостей и газов.
3. Допущения модели сплошной текучей среды.
4. Сформулируйте основные закономерности гидрогазодинамики.
5. В каких единицах измеряется давление?
6. Как найти давление на некоторой глубине жидкости?
7. Как найти силу давления жидкости на плоскую наклонную стенку?
8. Запишите уравнение состояния совершенного газа.
9. Как найти плотность и газовую постоянную смеси газов?

Методические рекомендации по решению задач

Газ при сравнительно невысоких термодинамических температурах можно считать совершенным. Уравнение состояния совершенного газа:

$$p = \rho \cdot T \cdot R / M_c, \quad (1.5)$$

где R – универсальная газовая постоянная, ρ – плотность; M_c – молярная масса смеси; T – термодинамическая температура газа; p – давление.

Молярная масса и газовая постоянная смеси

$$M_c = \left(\sum_{i=1}^4 \frac{z_i}{M_{o_i}} \right)^{-1}; \quad R_c = \frac{R}{M_c}. \quad (1.6)$$

где z_i – массовые доли компонент газовой смеси; M_o – их молярные массы.

Показатель адиабаты смеси газов рассчитывается по формуле:

$$\gamma_{см} = 1 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{\gamma_i - 1} \right)^{-1}. \quad (1.7)$$

Скорость звука при термодинамической температуре T :

$$a = \sqrt{\gamma_c \cdot R_c \cdot T}. \quad (1.8)$$

Тема 2. Динамика капельной жидкости в одномерном приближении

Ключевые вопросы темы

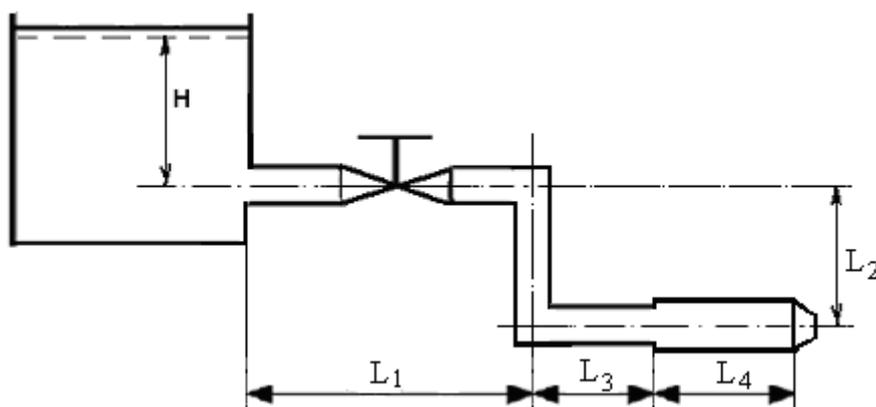
1. Теорема Бернулли для идеальной жидкости.
2. Уравнение Бернулли для реальной капельной жидкости.
3. Определение потерь напора в уравнении Бернулли.
4. Методы гидравлического расчета течений в простом трубопроводе.
5. Течения капельной жидкости в трубопроводе с ветвлением.
6. Напорные и безнапорные течения капельной жидкости.
7. Истечение жидкости через отверстия и насадки.
8. Рабочие характеристики центробежного насоса.
9. Определение рабочей точки насосной установки.

Предусмотрены лекции и практические занятия.

Практическое занятие 4. Прямая задача гидравлики простого трубопровода

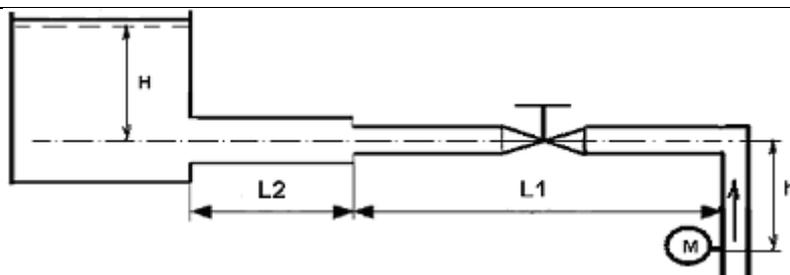
Задача № 2.1

Скорость истечения воды 20°C из сопла диаметром $d_c=5$ см равна $1,5$ м/с. Известны диаметры $d=10$ см, $D=15$ см; $L_1=20$ м, $L_2=3$ м, $L_3=7$ м, $L_4=25$ м; абсолютная шероховатость $\Delta=1,5$ мм; коэффициенты местных потерь вентиля и сопла: $\zeta_B = 3,5$; $\zeta_C = 0,2$. Найти величину H .



Задача № 2.2

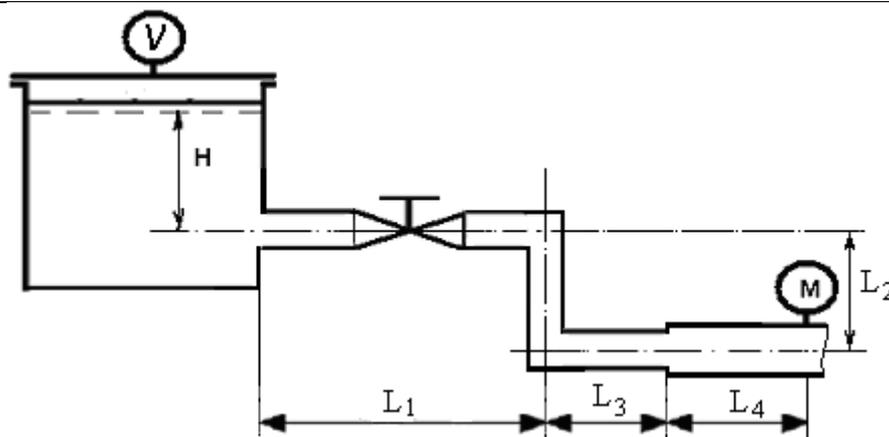
Вода при 5°C подается под давлением, определяемым манометром M , в открытый бак, в котором глубина составляет H . Заданы коэффициент гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}}$, длины труб L_1 , L_2 , h , их диаметры d_1 , d_2 . Абсолютная эквивалентная шероховатость всех труб Δ . Найти показание манометра, если расход воды в трубопроводе Q .



Практическое занятие 5. Обратная задача гидравлики простого трубопровода

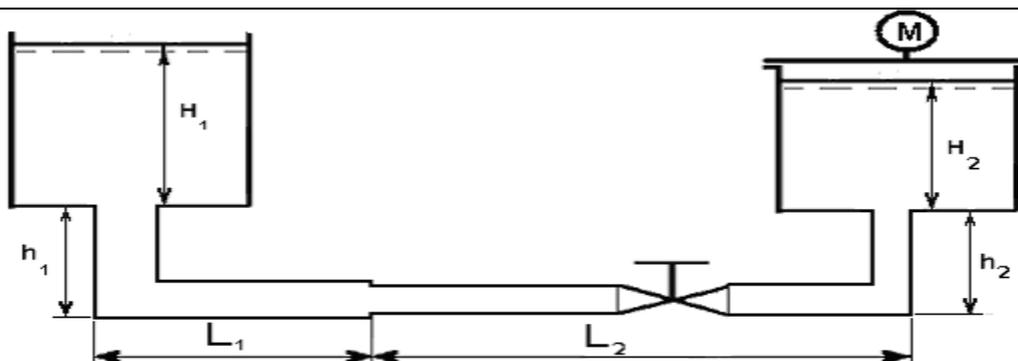
Задача № 2.3

Вода при 30°C подается в закрытый бак, давление в котором определяется вакуумметром. Заданы коэффициент гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}}$, длины труб $L_1, L_2, L_3 = L_4$, их диаметры $d_1 = d_2 = d_3, d_4$. Абсолютная эквивалентная шероховатость всех труб $\Delta_{\text{э}}$. Найти расход воды в трубопроводе.



Задача № 2.4

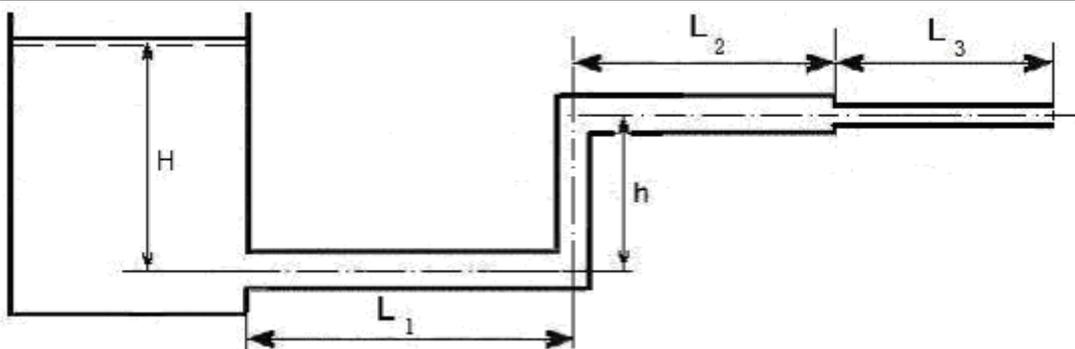
Бензин при 20°C подается из правого закрытого бака, давление в котором определяется манометром М в левый открытый бак. Глубина слоя бензина в баках составляет H_1 и H_2 , соответственно. Заданы коэффициент гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}}$, длины труб L_1, L_2, h_1, h_2 , их диаметры D_1, d_2 . Абсолютная эквивалентная шероховатость всех труб $\Delta_{\text{э}}$. Найти расход бензина в трубопроводе.



Практическое занятие 6. Гидравлический расчет простого трубопровода при ламинарном режиме

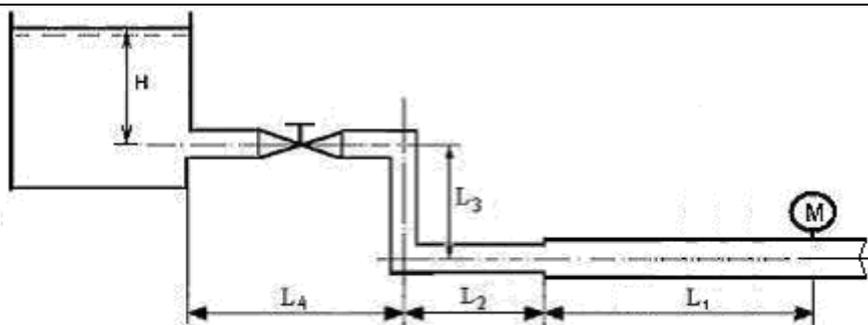
Задача № 2.5

Турбинное масло при 40°C подается по трубопроводу из открытой емкости и вытекает в атмосферу. Длины труб $L_1 = L_2 = 2\text{ м}$, $h = L_3 = 1\text{ м}$, диаметры $D = 5\text{ см}$; $d = 3\text{ см}$. Найти, при каких величинах H течение будет ламинарным.



Задача № 2.6

Веретенное масло при 20°C подается по трубопроводу в открытую емкость. Длины труб $L_1 = 1\text{ м}$, $L_2 = L_3 = L_4 = 0,5\text{ м}$, $H = 0,5\text{ м}$, диаметры $D = 2\text{ см}$; $d = 1\text{ см}$; $p_M = 0,07\text{ ат}$. Найти расход жидкости в трубопроводе.

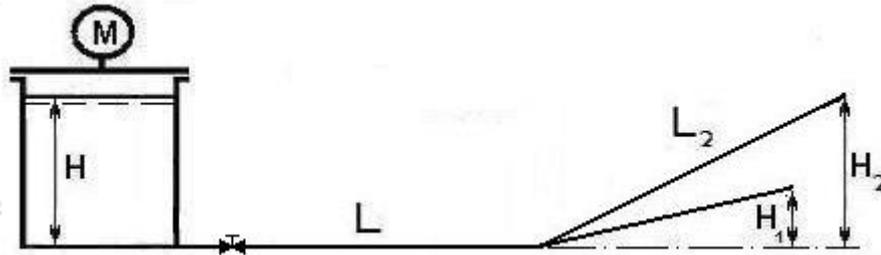


Практическое занятие 7. Гидравлический расчет трубопровода с ветвлением

Задача № 2.7

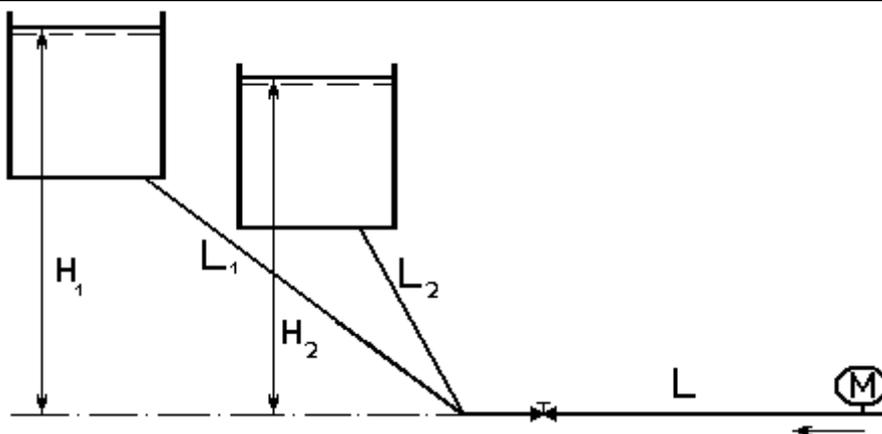
Вода при 30°C из закрытой емкости течет вначале по горизонтальной трубе длиной L , диаметром d . Затем поток разветвляется на две трубы, длины которых $L_1 = L/2$, $L_2 = L$, диаметры d_1 , d_2 . Давление в емкости

определяется манометром М. Задан расход воды в неразветвленной части трубопровода Q . Коэффициент гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}}$, гидравлическими потерями в остальных местных сопротивлениях можно пренебречь. Абсолютная эквивалентная шероховатость всех труб $\Delta_{\text{э}}$. Найти скорости истечения воды из каждой трубы в атмосферу и показание манометра p_M .



Задача № 2.8

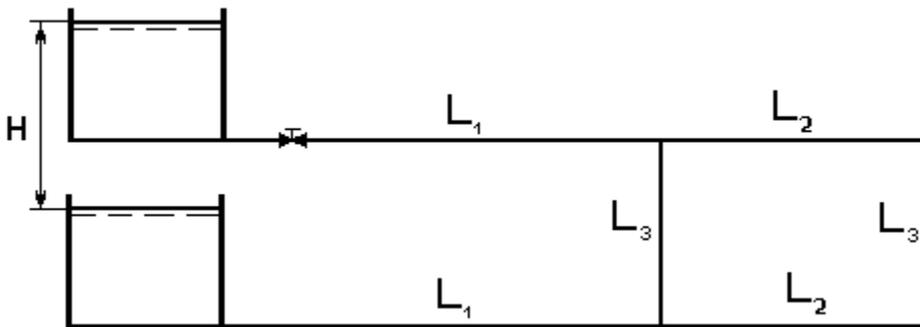
В две открытые емкости бензин при 40°C поступает по трубопроводу длиной L , диаметром d . Расход бензина в магистральном трубопроводе равен Q . Длины подводящих труб $L_1 = L/3$, $L_2 = L/4$, их диаметры $d_1 = d_2$. Задан коэффициент гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}}$, потерями напора в остальных местных сопротивлениях можно пренебречь. Абсолютная эквивалентная шероховатость всех труб $\Delta_{\text{э}}$. Найти показание манометра на входе трубопровода p_M .



Практическое занятие 8. Гидравлический расчет трубопровода с параллельными ветвями

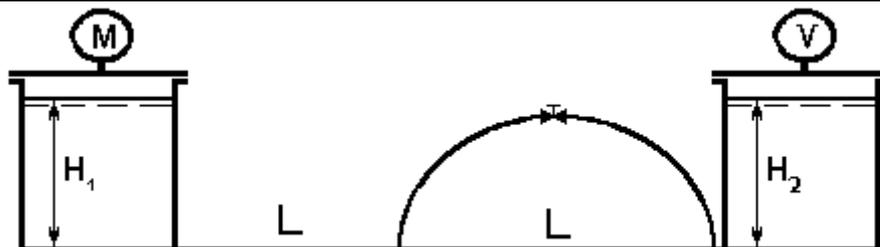
Задача № 2.9

Вода при 10°C подается из верхнего открытого бака в нижний. Задана величина H , коэффициент гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}}$ (потери в остальных местных сопротивлениях можно не учитывать), длины труб L_1 , L_2 , L_3 , их диаметры d_1 , $d_2 = d_3$. Абсолютная эквивалентная шероховатость всех труб $\Delta_{\text{э}}$. Найти расход воды во всех трубах.



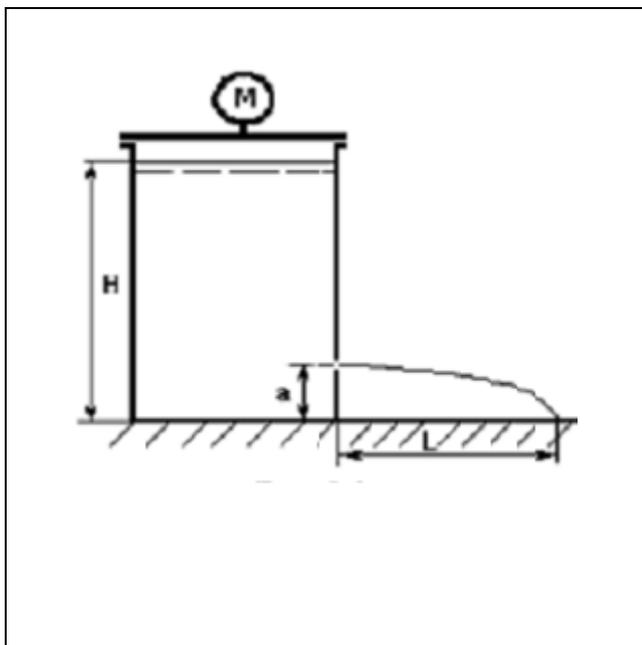
Задача № 2.10

Керосин при 40°C подается из первого закрытого бака во второй закрытый бак, давление в котором определяется вакуумметром V . Глубина керосина в баках составляет H_1 и H_2 , соответственно. Коэффициент гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}}$, потерями напора в остальных местных сопротивлениях можно пренебречь. Диаметр магистральной трубы d_1 . Труба, образующая полуокружность (в горизонтальной плоскости), имеет диаметр d_2 , $L_2 = 0,5\pi L$. Абсолютная эквивалентная шероховатость всех труб $\Delta_{\text{э}}$. Найти расход керосина во всех ветвях трубопровода.



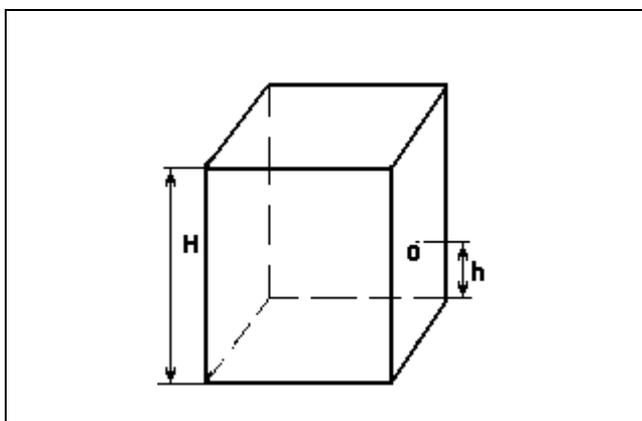
Практическое занятие 9. Расчет истечения жидкости через отверстия и насадки

Задача № 2.11



Вода при $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ вытекает из закрытого бака через малое отверстие диаметром d в тонкой стенке. Отверстие находится на высоте a от дна. В баке давление выше атмосферного и определяется манометром M . Пренебрегая сопротивлением воздуха, найти, на каком расстоянии L струя попадет на землю.

Задача № 2.12



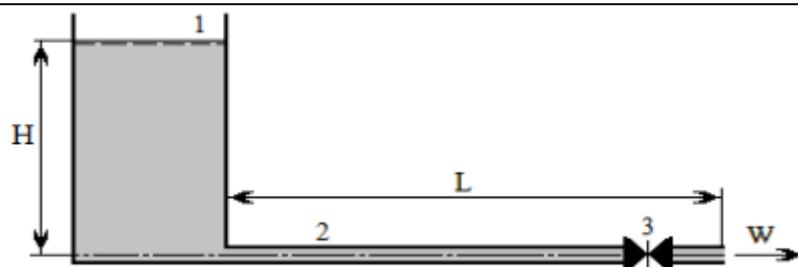
Открытая емкость с прямоугольным основанием (a на b), заполненная до краев водой при 10°C , имеет малое отверстие диаметром d в точке O тонкой боковой стенки. Какая часть воды выльется за некоторое время t ?

Практическое занятие 10. Расчет нестационарного течения жидкости в трубопроводе

Задача № 2.13

Рассматривается течение жидкости из открытого цилиндрического бака диаметром D в атмосферу через горизонтальный трубопровод постоянного диаметра d . Сначала задвижка была закрыта, жидкость неподвижна, уровень жидкости в баке равен H . После открытия задвижки жидкость начинает

движение, скорость жидкости растет. Составить уравнение Бернулли, учитывая нестационарный характер течения.



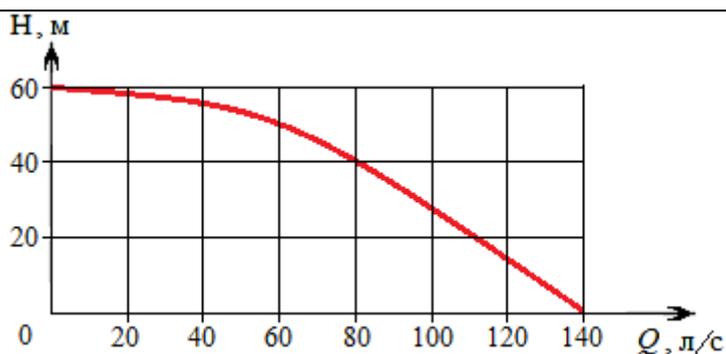
Задача № 2.14

Для условий задачи № 2.13 записать уравнение баланса воды в баке. Сформулировать задачу Коши и предложить метод ее решения.

Практическое занятие 11. Аппроксимация рабочих характеристик центробежного насоса

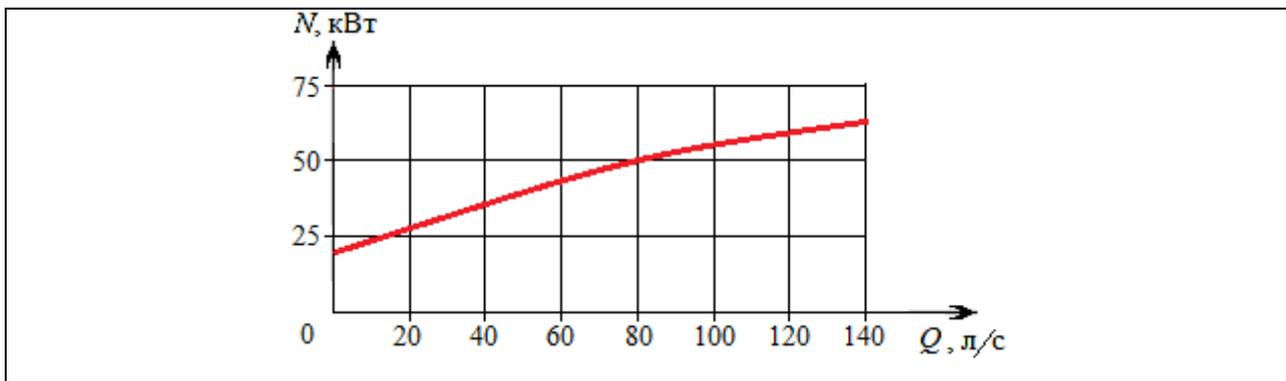
Задача № 2.15

Имеется график нагрузочной характеристики центробежного насоса. Найти коэффициенты многочлена второго порядка, аппроксимирующего эту характеристику: $H = H_0 + a_1 Q + a_2 Q^2$.



Задача № 2.16

Имеется график энергетической характеристики центробежного насоса. Найти коэффициенты многочлена второго порядка, аппроксимирующего эту характеристику: $N = N_0 + b_1 Q + b_2 Q^2$.



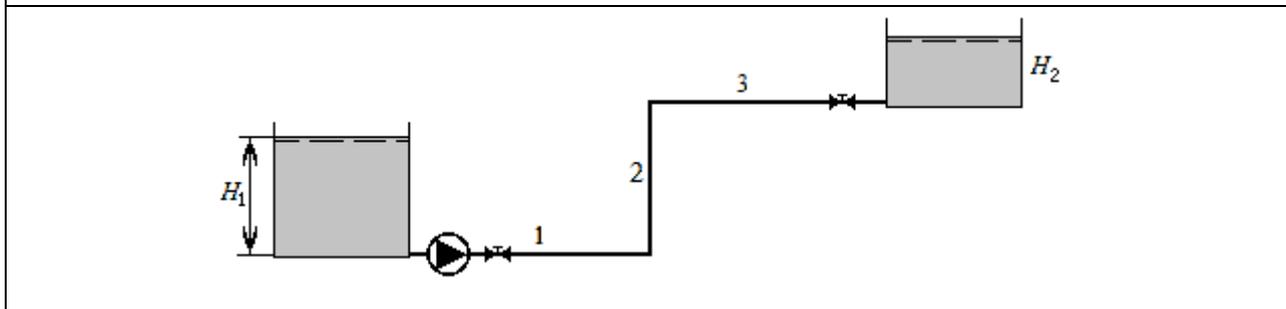
Задача № 2.18

По данным задач № 2.16 и № 2.17 найти гидравлический КПД центробежного насоса при $Q = 80$ л/с.

Практическое занятие 12. Аналитическое определение параметров в рабочей точке насосной установки

Задача № 2.19

Вода при 10°C подается с помощью центробежного насоса по трубопроводу диаметром d из левого открытого бака в правый. Известны значения H_1 и H_2 , длины труб L_1 , L_2 , L_3 ; коэффициент потерь каждого вентиля ζ , абсолютная шероховатость труб Δ . Составить характеристику трубопровода. Воспользовавшись нагрузочной характеристикой, найденной в задаче № 1 ПЗ-11, аналитически определить расход и напор в рабочей точке насосной установки.



Задача № 2.20

Для насосной установки из задачи № 2.19 аналитически найти затраченную мощность и гидравлический КПД в рабочей точке.

Воспользоваться аналитическим выражением зависимости затраченной мощности насоса от подачи, найденным в задаче № 2 ПЗ-11.

Вопросы для самоконтроля

1. Запишите уравнение Бернулли для реальной капельной жидкости.
2. Как определяют геометрический напор по гидравлической схеме?
3. Как найти потери напора по длине трубопровода?
4. От чего зависит коэффициент гидравлических потерь по длине трубопровода при турбулентном режиме течения?
5. Как определить, что область гидравлического сопротивления квадратичная?
6. Запишите формулу расчета коэффициента гидравлических потерь по длине трубопровода при ламинарном режиме течения.
7. Как найти потери напора в местных гидравлических сопротивлениях?
8. Что такое нагрузочная характеристика центробежного насоса?
9. Как найти подачу и напор в рабочей точке насосной установки?

Методические рекомендации по решению задач

При составлении уравнения Бернулли указывается начальное и конечное сечение. В качестве таковых удобно выбрать свободную поверхность жидкости в баке или сечение трубы (насадка) при истечении в атмосферу. Заметим, что конечное сечение выбирается обязательно ниже начального по течению. Уравнение Бернулли для капельной жидкости:

$$z_n + \frac{p_n}{\rho g} + \alpha_n \frac{v_n^2}{2g} = z_k + \frac{p_k}{\rho g} + \alpha_k \frac{v_k^2}{2g} + \sum h_\ell + \sum h_M, \quad (2.1)$$

где z_n, z_k – геометрический напор в начальном и конечном сечениях;

$\frac{p_n}{\rho g}, \frac{p_k}{\rho g}$ – пьезометрический напор в начальном и конечном сечениях;

$\alpha_n \frac{v_n^2}{2g}, \alpha_k \frac{v_k^2}{2g}$ – скоростной напор в начальном и конечном сечениях;

$\sum h_\ell$ – сумма гидравлических потерь на трение по длине трубопровода;

$\sum h_M$ – сумма гидравлических потерь в местных сопротивлениях.

Геометрический напор представляет собой вертикальную координату центра тяжести соответствующего сечения относительно горизонтальной оси сравнения. При турбулентном течении коэффициенты Кориолиса принимаются равными единице $\alpha_n = \alpha_k = 1$, при ламинарном – двум.

Потери напора на трение по длине трубопровода вычисляются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_\ell = \lambda \frac{L v^2}{d 2g}. \quad (2.2)$$

Коэффициент гидравлических потерь на трение при ламинарном режиме рассчитывается по формуле:

$$\lambda = 64 / Re, \quad Re = V \cdot d / \nu. \quad (2.3)$$

Коэффициент гидравлических потерь на трение при турбулентном режиме течения в трубопроводе рассчитывают по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (2.4)$$

где Δ – абсолютная эквивалентная шероховатость стенки трубы.

Для проверки гипотезы о квадратичной области сопротивления вычисляют числа Рейнольдса по величине абсолютной шероховатости труб

$$Re_\Delta = \frac{V \cdot \Delta}{\nu} > 500. \quad (2.5)$$

Потери напора в местных гидравлических сопротивлениях (МГС) рассчитывают при турбулентном режиме течения по формуле:

$$h_M = \zeta_M \frac{V^2}{2g}, \quad (2.6)$$

где ζ_M – коэффициент МГС, зависит от безразмерных параметров, например, при внезапном расширении и внезапном сужении трубопровода, соответственно:

$$\zeta_{BP} = \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right)^2, \quad \zeta_{BC} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right). \quad (2.7)$$

Заметим, если величина скорости до и после МГС разная, то в формулу (2.6) подставляется большая из скоростей

Тема 3. Динамика газов в одномерном приближении

Ключевые вопросы темы

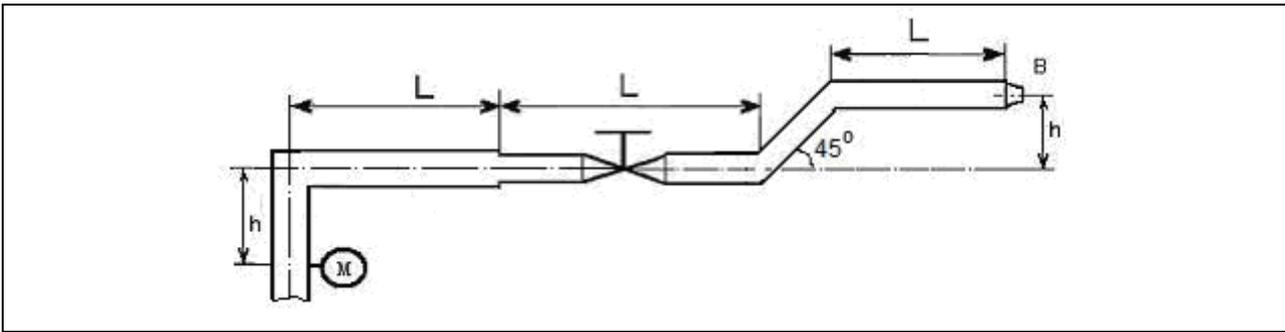
1. Уравнение Бернулли газа при незначительном изменении плотности.
2. Скорость распространения малых возмущений в газе. Число Маха.
3. Сверхзвуковое сопло Лавалья.
4. Адиабатическое течение газа с большой скоростью.
5. Течения газа с большой скоростью в трубе постоянного течения.

Предусмотрены лекции и практические занятия.

Практическое занятие 13. Расчет течения газа в трубопроводе при малом изменении плотности.

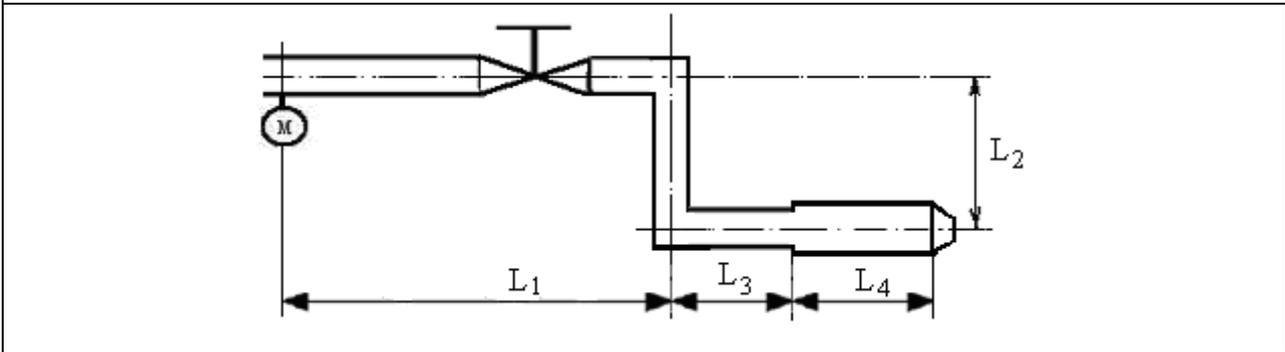
Задача № 3.1

Кислород при 40°C подается по новому пластмассовому трубопроводу и истекает в атмосферу через сопло В, диаметр сопла на выходе $d_c = 0,08$ м. Давление на входе в систему определяется манометром М. Заданы коэффициенты гидравлических потерь вентиля $\zeta_{\text{вент}} = 3,5$ и сопла $\zeta_c = 0,03$, длины труб $L = 20$ м, $h = 12$ м, их диаметры $D = 0,18$ м, $d = 0,12$ м. Скорость газа на выходе из сопла $v_c = 10$ м/с. Найти показание манометра. Течение считать изотермическим.



Задача № 3.2

Углекислый газ CO_2 подается по новому стальному трубопроводу и истекает в атмосферу. Показание манометра 0,5 ат; диаметр сопла $d_c=3$ см, $d=8$ см, $D=12$ см; $L_1=25$ м, $L_2=8$ м, $L_3=15$ м, $L_4=30$ м; коэффициенты местных потерь вентиля и сопла: $\zeta_B = 3,5$; $\zeta_C = 0,2$. Найти скорость истечения газа.



Практическое занятие 14. Расчет течения газа с большой скоростью в трубе постоянного течения

Задача № 3.3

Компрессор подает воздух с термодинамической температурой T_1 при давлении p_1 трубопровод. Трубопровод теплоизолированный, длина трубопровода L ; внутренний диаметр D , абсолютная эквивалентная шероховатость Δ . Давление на выходе из трубопровода – атмосферное. Течение воздуха дозвуковое. Найти массовый расход воздуха.

Задача № 3.4

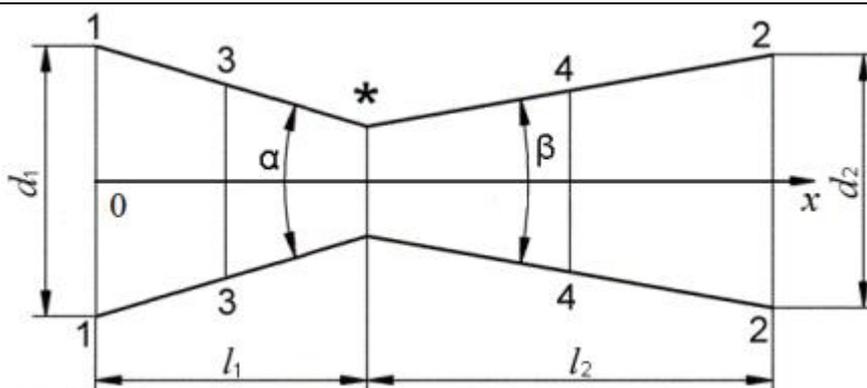
Какое давление p_1 должен обеспечить компрессор на входе трубопровода, чтобы расход азота был равен G ? Температура азота T_1 на входе задана. Трубопровод теплоизолированный, длина трубопровода L ;

внутренний диаметр D , абсолютная эквивалентная шероховатость Δ . Давление на выходе из трубопровода – атмосферное. Течение азота дозвуковое.

Практическое занятие 15. Расчет течения газа с большой скоростью в сопле Лавалья

Задача № 3.5

Считая воздух совершенным газом, течение – адиабатическим, найти параметры в критическом сечении сопла Лавалья (давление, температура, скорость, плотность воздуха) при следующих исходных данных: массовый расход воздуха 12,5 кг/с; абсолютное давление на входе 23 ат, давление на выходе 0,8 ат; температура торможения 1120 К; относительная длина конфузурной части 2,0; угол конфузуратора $\alpha=26^\circ$; угол диффузора $\beta=11^\circ$.



Задача № 3.6

В условиях задачи № 3.5 выполнить расчет параметров течения воздуха (температура, скорость, число Маха, плотность воздуха) на входе в сопло Лавалья (сечение 1-1).

Задача № 3.7

В условиях задачи № 3.5 выполнить расчет параметров течения воздуха (температура, скорость, число Маха, плотность воздуха) на выходе из сопла Лавалья (сечение 2-2).

Вопросы для самоконтроля

1. При каких условиях можно рассчитывать течение газа в трубе с помощью уравнения Бернулли?
2. В чем особенности уравнения Бернулли, применяемого для гидравлического расчета течений газа в трубопроводе?
3. В чем заключается отличие изменения давления вдоль оси трубы при течении с большой скоростью газа и жидкости?
4. Может ли истечение из трубы постоянного диаметра быть сверхзвуковым?
5. Запишите уравнение сохранения расхода при течении сжимаемого газа по каналу переменного сечения.
6. Назовите составные части сопла Лаваля.
7. Как изменяется скорость при течении газа в соплах Лаваля с большим перепадом давления?
8. Как найти скорость звука в газе?
9. Что такое число Маха?
10. Для чего используют компрессоры?

Методические рекомендации по решению задач

При небольших перепадах давления в трубопроводе можно пренебречь сжимаемостью газа и выполнять гидравлический расчет с помощью уравнения Бернулли. Рассчитывают относительный перепад давления:

$$\varepsilon = 100 \cdot \Delta p / p_n = 100 \cdot (p_n - p_k) / p_n. \quad (3.1)$$

Если $\varepsilon < 5\%$, можно считать плотность газа $\rho \approx \text{const}$ и пользоваться уравнением Бернулли в такой форме:

$$p_n + \alpha_n \frac{\rho V_n^2}{2} = p_k + \alpha_k \frac{\rho V_k^2}{2} + \Sigma \Delta p_\ell + \Sigma \Delta p_m. \quad (3.2)$$

где p_n, p_k – давление в начальном и конечном сечениях, V_n, V_k – скорости в начальном и конечном сечениях, $\Sigma \Delta p_\ell$ – сумма потерь давления на трение по

длине трубопровода, $\Sigma\Delta p_m$ – сумма потерь давления в местных сопротивлениях.

При турбулентном течении коэффициенты Кориолиса принимаются $\alpha_n = \alpha_k = 1$

При больших перепадах давления (сопло Лавалея) необходимо учитывать сжимаемость газа. В наименьшем по размеру сечении сопла (между сужающейся и расширяющейся частями) по условию происходит переход от дозвукового режима течения к сверхзвуковому. При этом параметры потока, а также само сечение называются критическими. Далее в тексте их обозначения помечаются нижним индексом звездочка «*».

Используя свойство критических параметров, их значения можно определить непосредственно по исходным данным:

$$a_* = a_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\gamma+1}} = \sqrt{\frac{2\gamma \cdot R_g}{\gamma+1} \cdot T_0}, \quad T_* = \frac{2 \cdot T_0}{\gamma+1}, \quad \rho_* = \rho_0 \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}, \quad p_* = p_0 \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (3.3)$$

Индекс «0» – параметры в покоящейся газе, в частности, скорость звука

$$a_0 = \sqrt{\gamma \cdot R_g \cdot T_0}. \quad (3.4)$$

Массовый расход газа в сопле Лавалея рассчитывается по формуле

$$G = \rho \cdot V \cdot S = B \cdot S_* \cdot \frac{p_0}{\sqrt{T_0}}, \quad B = \sqrt{\frac{\gamma}{R_g}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{2} \frac{\gamma+1}{\gamma-1}}. \quad (3.5)$$

Тема 4. Пространственная гидрогазодинамика

Ключевые вопросы темы

1. Вывод уравнений Навье-Стокса.
2. Приведение уравнений Навье-Стокса к безразмерной форме.
3. Основные понятия гидромеханического подобия.
4. Пи-теорема размерности.
5. Частные случаи уравнений Навье-Стокса.
6. Понятие о неньютоновских жидкостях

Предусмотрены лекции и практическое занятие.

Пи-теорема размерности

Задача № 4.1

Привести к безразмерной форме уравнение неразрывности капельной жидкости без источников:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

где x, y, z – прямоугольные декартовы координаты, м; u, v, w – проекции скорости жидкости на указанные оси, м/с.

Задача № 4.2

Привести к безразмерной форме уравнение неразрывности газа с источниками в объеме течения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w) = J,$$

где x, y, z – прямоугольные декартовы координаты, м; u, v, w – проекции скорости жидкости на указанные оси, м/с; ρ – плотность газа, кг/м³;

J – интенсивность газо- или парообразования (фазового перехода), кг/(с·м³).

Задача № 4.3

Расход Q , проходящий через водослив, зависит от напора H , ширины водослива b , ускорения свободного падения g и плотности жидкости ρ . Поэтому $Q = f(b, \rho, g, H)$ или $\varphi(Q, b, \rho, g, H) = 0$. С помощью Пи-теоремы размерности привести последнее уравнение к безразмерной форме.

Вопросы для самоконтроля

1. На основе каких теорем механики выводят уравнения Навье-Стокса?
2. Назовите аргументы и искомые функции уравнений Навье-Стокса капельной жидкости.
3. Чем отличаются уравнения Навье-Стокса для стационарных течений?
4. Запишите уравнение неразрывности капельной жидкости.

5. Назовите числа подобия в безразмерных уравнениях Навье-Стокса.
6. Необходимые и достаточные условия гидродинамического подобия двух течений.
7. Назовите основные единицы измерения системы СИ, используемые в гидрогазодинамике.
8. Что такое вспомогательные единицы измерения? Приведите примеры из гидрогазодинамики.
9. Сформулируйте Пи-теорему размерности.
10. Запишите формулы для расчета чисел Рейнольдса и Фруда.

Методические рекомендации по решению задач

Практическое значение Пи-теоремы при решении задач заключается в том, что с ее помощью можно уменьшить число рассматриваемых величин. Тем самым упрощается решение задачи.

При решении задач используют Пи-теорему размерности в следующей формулировке: Пусть имеется некоторое уравнение, описывающее какой-либо физический процесс и содержащее n размерных переменных:

$$F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0. \quad (4.1)$$

Размерное уравнение (4.1) можно преобразовать в такую форму

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) = 0. \quad (4.2)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ – безразмерные комплексы, составленные из $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, причем выполняется равенство:

$$m = n - k, \quad (4.3)$$

где k – количество основных единиц размерности ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$). Например, если (м, кг, с), то $k = 3$.

Чтобы привести размерное уравнение к безразмерной форме, нужно размерные величины выразить через безразмерные (относительные).

Методические рекомендации по изучению дисциплины

Изучение дисциплины начинается с вводной лекции, на которой преподаватель озвучивает цель и результаты освоения дисциплины, порядок проведения текущей и промежуточной аттестации и список рекомендуемой литературы. На вводной лекции дается общее представление о том, что такое гидрогазодинамика, ее составные части и роль в изучении водных ресурсов. Таким образом, обеспечивается мотивация к изучению данной дисциплины как базовой, необходимой в дальнейшем для освоения профессиональных компетенций.

Учебным планом дисциплины предусмотрены лекции и практические занятия. Все лекции проводятся с использованием демонстрационного комплекса, практические занятия – в лабораториях кафедры техносферной безопасности и природообустройства, а также в аудиториях, оснащенных компьютерами с выходом в сеть Интернет, с возможностью использовать профессиональные справочные системы и системы автоматизированного проектирования (графические редакторы).

Студентам рекомендуется конспектировать материалы лекций. Самостоятельная работа студентов является обязательной частью образовательного процесса. Перед практическими занятиями следует изучить теоретический материал по конспекту лекций, а при необходимости – по рекомендуемым учебникам и учебным пособиям. После проработки теоретического материала нужно ответить на вопросы для самоконтроля. Ответы должны быть развернутыми, с примерами. Необходимо разобрать задачи, предназначенные для самостоятельного решения, опираясь на примеры, разобранные на практическом занятии.

При освоении данной дисциплины студент должен пройти тестирование. Тестирование проводится в системе ЭИОС. Для подготовки к тестированию следует изучить рекомендуемую литературу (см. список рекомендуемой литературы), основные термины/определения (приложение Б).

Список рекомендуемой литературы

1. Кузнецов, В.А. Гидрогазодинамика: учебное пособие для вузов / В.А. Кузнецов. – Москва: Изд-во Юрайт, 2024. – 120 с.
2. Зезин, В.Г. Гидрогазодинамика: учебное пособие / В.Г. Зезин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 132 с.
3. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник / Л.Г. Лойцянский. – Москва: Изд-во «Дрофа», 2003. – 840 с.
4. Моргунов, К. П. Механика жидкости и газа: учебное пособие / К. П. Моргунов. – Санкт–Петербург: Изд-во «Лань», 2018. – 208 с.
5. Наумов, В.А. Основы механики жидкости и газа: учебно-методическое пособие / В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. – 49 с.
6. Карпов, К. А. Прикладная гидрогазодинамика: учебное пособие / К. А. Карпов, Р. О. Олехнович. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 100 с.
7. Купреенко, А. И. Гидрогазодинамика. Примеры решения задач: методические указания / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, С. М. Михайличенко. – Брянск: Брянский ГАУ, 2020. – 48 с.
8. Доманский, И. В. Механика жидкости и газа / И. В. Доманский, В. А. Некрасов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 140 с.
9. Моргунов, К. П. Механика жидкости и газа / К. П. Моргунов. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 208 с.

Приложение А

Типовые тестовые задания

Задания открытой формы

1. Если скорость течения в данной точке изменяется по времени, то такое течение называется _____.

Ответ: нестационарным

2. Если касательное напряжение в жидкости прямо пропорционально сдвигу скорости, то такую жидкость называют _____.

Ответ: ньютоновской

3. Коэффициент неравномерности профиля скорости α (коэффициент Кориолиса) в уравнении Бернулли при ламинарном течении в трубе равен _____.

Ответ: 2

4. Массовый расход газа в трубе 0,9 кг/с, плотность газа 1,5 кг/м³. Площадь поперечного сечения трубы 0,03 м². Средняя скорость равна _____ м/с.

Ответ: 20

5. Если молярная масса смеси газов увеличивается, то газовая постоянная _____.

Ответ: уменьшается

6. В модели идеальной жидкости касательное напряжение равно _____.

Ответ: нулю

7. Отношение скорости газа к скорости звука в данной точке это _____.

Ответ: число Маха

8. Коэффициент динамической вязкости газа с увеличением температуры _____.

Ответ: увеличивается

9. Скорость газа в трубе 20 м/с, плотность 1,5 кг/м³, площадь поперечного сечения трубы 0,02 м². Массовый расход газа равен _____ кг/с. Ответ дать с точностью до десятых.

Ответ: 0,6

10. Максимальный напор центробежного насос первоначально составлял 50 м, после увеличения частоты вращения рабочего колеса на 20 % максимальный напор стал равен _____ м. Ответ дать с точностью до целых.

Ответ: 72

10. Коэффициент гидравлических потерь внезапного сужения трубопровода при уменьшении диаметра в 2 раза равен _____. Ответ дать с точностью до тысячных.

Ответ: 0,375

11. Если при изотермическом процессе уменьшить объем газа в 2 раза, то давление _____.

Ответ: увеличится в 2 раза

12. Траектория движения жидкого элемента совпадает с линией тока в _____ течениях.

Ответ: стационарных

13. Скорость воды в трубе 0,8 м/с, внутренний диаметр 40 мм, температура воды 20,5°C. Число Рейнольдса равно _____.

Ответ: 32000

14. Если число Рейнольдса при движении жидкости в трубе 400, то ее коэффициент гидравлических потерь на трение λ равен _____. Ответ дать с точностью до сотых.

Ответ: 0,16

15. Вода из трубы 1 и трубы 2 поступает в трубу 3. Известны площади поперечного сечения труб: $\omega_1=0,1 \text{ м}^2$; $\omega_2=0,2 \text{ м}^2$ и скорости $V_1= 1 \text{ м/с}$; $V_2= 0,4 \text{ м/с}$. Расход воды в 3-й трубе ____ м³/с. Ответ дать с точностью до сотых.

Ответ: 0,18

16. Расход воды в трубе 10 л/с. Площадь поперечного сечения 0,025 м². Средняя скорость равна ____ м/с. Ответ дать с точностью до десятых.

Ответ: 0,4

17. При течении воды в трубе диаметром $d=0,1 \text{ м}$, скоростной напор 2,5 м, коэффициент потерь напора на терние $\lambda=0,02$. Потери напора в трубе длиной 40 м составят ____ м.

Ответ: 20

18. Напор центробежного насоса растет прямо пропорционально относительному увеличению частоты вращения рабочего колеса в степени _____.

Ответ: 2

18. Наилучшую энергетическую эффективность дает регулирование работы насосной установки с помощью _____.

Ответ: изменения частоты вращения рабочего колеса

19. С увеличением вязкости жидкости подача центробежного насоса _____.

Ответ: уменьшается

20. Кинематическая вязкость воды с увеличением температуры _____.

Ответ: уменьшается

21. Абсолютное давление на дне водоема глубиной 5 м составит _____. Ответ дать в МПа с точностью до сотых.

Ответ: 0,15

22. Малая твердая частица погрузилась на глубину 1,8 м за 1,5 мин. Ее гидравлическая крупность равна _____. Ответ дать в системе СИ с точностью до сотых.

Ответ: 0,02 м/с

Задания закрытой формы.

Выбрать правильные ответы

23. Число Рейнольдса используется в гидрогазодинамике для _____

- 1) определения вязкости жидкости
- 2) определения режима течения
- 3) расчета коэффициента гидравлических потерь по длине трубопровода
- 4) расчета скорости по расходу жидкости

24. Коэффициент гидравлических потерь на трение по длине трубопровода λ в общем случае зависит от _____

- 1) относительной шероховатости
- 2) показателя адиабаты
- 3) числа Рейнольдса
- 4) числа Фруда

25. Единицы измерения коэффициента кинематической вязкости _____

- 1) Па
- 2) м/с
- 3) Стокс
- 4) м²/с

26. В уравнение Бернулли входит напор:

- 1) геометрический
- 2) пьезометрический
- 3) скоростной
- 4) молекулярный

Установить соответствие

27. Установить соответствие жидкостей:

1	ньютоновская жидкость	а	вода
2	неньютоновская жидкость	б	бензин
		в	плавленый сыр
		г	бетонная смесь

Ответ: 1 а, б; 2 в, г

28. Установить соответствие физических величин и их единиц измерения

1	динамическая вязкость	а	Па·с
2	кинематическая вязкость	б	м ² /с
3	давление	в	Па
4	плотность жидкости	г	кг/м ³
5	напор водяного столба	д	м
6	газовая постоянная	е	Дж/(кг·К)

Ответ: 1 а, 2 б, 3 в; 4 г, 5 д, 6 е

29. Установить соответствие насосов их видам:

1	динамические насосы	а	центробежные
2	объемные насосы	б	осевые
		в	вихревые
		г	шестеренные
		д	винтовые
		е	поршневые

Ответ: 1 а, б, в; 2 г, д, е

Установить последовательность

30. Установить последовательность определения табличным методом параметров рабочей точки трубопроводной системы с заданным центробежным насосом:

1	записать значения подачи насоса от нуля до максимального значения с некоторым интервалом
2	по напорной характеристике насоса определить напоры, соответствующие записанным значениям подачи
3	рассчитать сумму гидравлических потерь в трубопроводе при каждом из значений подачи
4	рассчитать характеристику трубопровода (к сумме гидравлических потерь прибавить статический напор)
5	определить интервал, в котором значение характеристики трубопровода окажется больше напора насоса
6	уточнить значение подачи, при которой характеристика трубопровода равна напору насоса
7	по найденной подаче определить затраченную мощность и КПД в рабочей точке

Ответ: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Приложение Б

Основные термины и определения

Газодинамика – раздел МЖГ, в котором изучают динамику газов с учетом их сжимаемости, как правило, при движении с большими скоростями.

Геометрический напор – потенциальная энергия сил тяжести элемента жидкости, отнесенная к его весу.

Гидравлика – раздел МЖГ, в котором внутренние задачи течения капельной жидкости решаются в одномерном приближении с помощью уравнения Бернулли.

Гидродинамика – раздел МЖГ, в котором изучают динамику капельных жидкостей, практически, несжимаемых.

Гидромеханика – раздел МЖГ, в котором изучаются закономерности движения и равновесия капельных жидкостей.

Гидростатика – раздел МЖГ, в котором изучают силы, действующие в жидкости, в частности, состояние равновесия жидкости.

Давление вакууметрическое – разность между атмосферным давлением и давлением в некоторой точке, когда последнее ниже атмосферного.

Давление избыточное – разность между давлением в некоторой точке и атмосферным давлением.

Жидкость идеальная – модель несуществующей жидкости, в которой отсутствуют касательные напряжения.

Жидкость ньютоновская – жидкость, в которой коэффициент динамической вязкости не зависит от сдвига скорости.

Жидкость неньютоновская – жидкость, в которой коэффициент динамической вязкости зависит от сдвига скорости.

Коэффициент динамической вязкости – числовая характеристика вязкости жидкости, равная касательному напряжению при сдвиге скорости 1 с^{-1} .

Коэффициент кинематической вязкости – числовая характеристика вязкости жидкости, равная коэффициенту динамической вязкости, деленному на плотность.

Модель текучей сплошной среды – модель, используемая при изучении жидкостей и газов, постулирует текучесть (легкую подвижность) и сплошность (сплошное заполнение объема течения.)

Нагрузочная характеристика насоса – зависимость напора насоса от его подачи при фиксированной частоте вращения рабочего колеса

Пьезометрический напор – потенциальная энергия сил давления элемента жидкости, отнесенная к его весу.

Рабочая точка насосной установки – точка пересечения нагрузочной характеристики насоса и характеристики трубопровода.

Скоростной напор – кинетическая энергия элемента жидкости, отнесенная к его весу.

Совершенный газ – модель, описывающая газ как ансамбль материальных точек.

Сопло Лавалья – канал переменного сечения, в котором сначала идет конфузорная часть (сужающаяся), а потом диффузорная часть (расширяющаяся); используется для получения сверхзвукового истечения газа.

Уравнение Бернулли – уравнение баланса механической энергии жидкости, отнесенной к ее весу.

Характеристика трубопровода – зависимость перепада напора трубопровода от расхода жидкости; включает статический напор и гидравлические потери напора.

Число Маха – отношение локальной скорости газа к скорости звука (малых возмущений) в данной точке.

Число Рейнольдса – безразмерный комплекс, характеризующий отношение сил инерции к силам вязкости в жидкости: $Re = V \cdot d / \nu$.

Локальный электронный методический материал

Владимир Аркадьевич Наумов

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА

Редактор И. Голубева

Уч.-изд. л.1,9. Печ. л. 2,3.

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1