

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА
сборник учебно-методических материалов
для направления подготовки
20.03.01 – Техносферная безопасность

Благовещенск 2017

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
Университета*

Составитель: Верхотурова И.В.

Гидрогазодинамика: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 20.03.01.– Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

Рассмотрен на заседании кафедры физики 05.06.2017, протокол № 11

© Амурский государственный университет, 2017

© Кафедра физики, 2017

© Верхотурова И.В., составление

ВВЕДЕНИЕ

подавляющее большинство технологических процессов практически в любой отрасли современного производства в той или иной степени связаны с использованием жидкостей, газов или паров. Легкоподвижность жидкости обеспечивает не только успешное использование ее в существующих технологических процессах, но и повышать их эффективность, а также разрабатывать новые и весьма перспективные технологии, связанные с движением жидкостей и газов. По этой причине особое значение приобретают вопросы, связанные с изучением закономерностей течения жидкостей и газов, что является основным предметом изучения гидрогазодинамики.

Для формирования умений и навыков в учебной программе дисциплины предусмотрены лекции, практические занятия и лабораторные работы, а также самостоятельная работа студентов, роль которой в настоящее время в системе высшего образования значительно возросла и является формой самообразования.

В процессе обучения происходит закрепление и систематизация знаний, углубление теоретических знаний, развитие умений работать с различными источниками информации и как результат – освоения основных компетенций.

1 КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции

В высшем учебном заведении лекция является важной формой учебного процесса и представляет собой в основном устное систематическое и последовательное изложение материала по какой-либо проблеме, методу, теме вопроса и т. д.

Основные функции, которые осуществляет вузовская лекция – это информативная, ориентирующая и стимулирующая, методологическая, развивающая и воспитывающая, поскольку на лекции студенты получают глубокие и разносторонние знания, развивают свои творческие способности.

Лекции могут быть вводными, обзорными, тематическими (лекции по изучению нового материала), итоговыми.

Вводные лекции подготавливают студента к восприятию данной дисциплины или ее модуля. На вводной лекции излагаются цели и задачи дисциплины, ее актуальность, практическая значимость, методы научного исследования и т.д. для того, чтобы дать целостное представление о дисциплине и вызывать интерес к предмету.

Тематические лекции посвящены глубоко осмысленному и методически подготовленному систематическому изложению содержания курса (дисциплины).

Итоговая лекция содержит основные идеи и выводы по курсу, выводы о достижении поставленных учебных целей.

На обзорных лекциях рассматриваются наиболее сложные, проблемные вопросы курса или новейшие достижения в данной области, что позволит установить взаимосвязь учебного материала с производством и новейшими научными достижениями.

Подготовка к самостоятельной работе над лекционным материалом должна начинаться на самой лекции. На лекции студент должен совместить два момента:

внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную запись. И как бы внимательно студент не слушал лекцию, большая часть информации вскоре после восприятия будет забыта. Поэтому при изучении дисциплины студентам рекомендуется составлять подробный конспект лекций, так как это обеспечивает полноценную систематизацию и структурирование материала, подлежащего изучению. Конспект лекций должен отражать специфику данного курса, которая состоит в обобщении физической теории, рассматривающей процессы обмена энергией в макроскопических системах, на случай сложных, полифункциональных систем.

Очень важным является умение правильно конспектировать лекционный материал и работать с ним. Ниже приведены *рекомендации по конспектированию лекций и дальнейшей работе с записями*.

1. Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам. Возможно ее сочетание с записями по практическим занятиям, иллюстрирующим применение теоретических законов и соотношений в решении практических задач.

2. Конспект должен легко восприниматься зрительно (чтобы максимально использовать «зрительную» память), поэтому он должен быть аккуратным. Выделяйте заголовки, отделите один вопрос от другого, соблюдайте абзацы, подчеркните термины.

3. При прослушивании лекции обращайтесь внимание на интонацию лектора и вводные слова «таким образом», «итак», «необходимо отметить» и т.п., которыми он акцентирует наиболее важные моменты. Не забывайте пометать это при конспектировании.

4. Не пытайтесь записывать каждое слово лектора, иначе потеряете основную нить изложения и начнете писать автоматически, не вникая в смысл. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Техника прочтения лекций преподавателем такова, что он повторяет свою мысль два-три раза. Постарайтесь вначале понять ее, а затем записать, используя сокращения.

Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе: формулировки определений и законов, выводы основных уравнений и формул, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов.

Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Научитесь в процессе лекции разбивать текст на смысловые части и заменять их содержание короткими фразами и формулировками. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную.

5. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Используйте общепринятую в данном разделе физики аббревиатуру и систему сокращений. Придумайте собственную систему сокращений, аббревиатур и символов, удобную только вам (но не забудьте сделать словарь, иначе существует угроза не расшифровать текст). Однако при дальнейшей работе с конспектом символы лучше заменить обычными словами для быстрого зрительного восприятия текста.

6. Конспектируя лекцию, надо оставлять поля, на которых позднее, при самостоятельной работе с конспектом, можно сделать дополнительные записи, отметить непонятные места. Полезно после каждой лекции оставлять одну страницу свободной, она потребуется при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи, графики, схемы, и т.п.

7. После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Насколько эффективно студент это сделает, зависит и прочность усвоения знаний, и, соответственно, качество восприятия предстоящей лекции, так как он более целенаправленно будет её слушать. В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать опорные конспекты, учебники и учебные пособия.

1.2 Краткое содержание курса лекций

МОДУЛЬ 1.ГИДРОМЕХАНИКА.

ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

П л а н л е к ц и и :

1. Предмет гидрогазодинамики и его место в подготовке бакалавров. Краткая история развития науки.
2. Основные понятия и определения гидрогазодинамики. Жидкость. Модель сплошной среды.
3. Основные физические величины и физические свойства жидкостей.

Ц е л ь : изучить физические свойства жидкости и газа, используя знания, полученные при изучении раздела курса физики.

З а д а ч и :

- о з н а к о м и т с я с и с т о р и е й р а з в и т и я
г и д р о г а з о а э р о д и н а м и к и к а к н а у к и ;

- и з у ч и т ь о с н о в н ы е п о н я т и я и
о п р е д е л е н и я г и д р о г а з о д и н а м и к и ;

- и з у ч и т ь п о н я т и е « ж и д к о с т ь », е е
о с н о в н ы е ф и з и ч е с к и е с в о й с т в а .

1. Предмет гидрогазодинамики.

Гидрогазодинамика – прикладная часть механики жидкости (несжимаемой и сжимаемой), которая, совместно с технической термодинамикой, является научной основой проектирования турбомашин, компрессоров, трубопроводов и другого оборудования.

Разделы:

Гидростатика – изучающая законы равновесия жидкости;

Кинематика - описывающая основные элементы движущейся жидкости;

Динамика – изучающая основные законы движения жидкости и раскрывающая причины её движения.

2. Исторический обзор развития и достижений.

Большой практический интерес к изучению механики жидкости вызван рядом объективных факторов. Во - первых, наличие в природе значительных запасов жидкостей, которые легко доступны человеку. Во- вторых, жидкие тела обладают рядом полезных свойств, делающих их удобными рабочими агентами в практической деятельности человека.

Первым научным трудом по гидравлике следует считать трактат Архимеда «О плавающих телах» (250 г. до н. э.).

В последующую за этим эпоху возрождения в XVI-XVII веках началось бурное развитие человеческих знаний, науки, накопление практического опыта. Наравне с развитием других наук начала развиваться и наука об изучении взаимодействия жидких тел.

Первыми крупными работами в этой области следует считать работы Леонардо да Винчи (1548-1620 гг.) - в области плавания тел, движения жидкостей по трубам и каналам. В работах Галилео Галилея (1564 – 1642 гг.) были сформулированы основные принципы равновесия и движения жидкости. Работы Эванджелиста Торичелли (1604 – 1647 гг.) были посвящены решению задач по истечению жидкости из отверстий, а Блез Паскаль (1623 – 1727 гг.) исследовал вопросы по передаче давления в жидкости.

Основополагающие и обобщающие работы в области механики физических тел, в том числе и жидких, принадлежат гениальному английскому физику Исааку Ньютону (1643 – 1727 гг.), который впервые сформулировал основные законы механики, закон всемирного тяготения и закон о внутреннем трении в жидкостях при их движении.

Развитию гидромеханики (гидравлики) как самостоятельной науки в значительной степени способствовали труды русских учёных Даниила Бернулли (1700 – 1782 гг.), Леонарда Эйлера (1707 – 1783 гг.), М.В. Ломоносова (1711 – 1765 гг.).

Развитию гидрогазодинамики как прикладной науки и сближению методов изучения теоретических и практических вопросов используемых гидравликой и гидромеханикой способствовали работы французских учёных Дарси, Буссинэ и др., а также работы Н.Е. Жуковского. Дифференциальное уравнение Навье - Стокса позволило описать движение реальной жидкости как функцию параметров этой жидкости в зависимости от внешних условий.

Дальнейшие работы в области теоретической и прикладной гидромеханики были направлены на развитие методов решения практических задач, развитие

новых методов исследования, новых направлений: теория фильтрации, газо- и аэродинамика сверхзвуковая гидродинамика, геофизическая гидродинамика, магнитная гидродинамика, прикладная гидродинамика, реология и др.

3. Основные понятия и определения гидрогазодинамики.

Под термином «жидкость» подразумеваются капельные и упругие жидкости (газы и пары) благодаря их общему физическому свойству – текучести.

Виды жидкостей:

Идеальная жидкость – обладает абсолютной текучестью, абсолютно несжимаема и в ней полностью отсутствуют силы сцепления между частицами.

Реальная жидкость – обладает всеми указанными выше свойствами. Главные и основные свойства жидкости – текучесть и вязкость.

Легкотекучесть частиц жидкости обусловлена неспособностью ее воспринимать касательные напряжения в состоянии покоя.

По своим механическим свойствам жидкости разделяют на два класса:

1. Малосжимаемые (капельные).
2. Сжимаемые (газообразные).

Жидкость как всякое физическое тело имеет молекулярное строение. Поэтому жидкости и газы воспринимаются как сплошные среды, имея прерывистую структуру. Это обстоятельство позволяет ввести *гипотезу сплошности*, то есть применить модель, обладающую свойством непрерывности (гипотеза Даламбера – Эйлера). Согласно *гипотезе сплошности* масса среды распределена в объеме непрерывно и в общем неравномерно.

Общая постановка задачи.

- Область течения жидкости и ее свойства.
- Твердые тела, обтекаемые жидкостью, или канал, по которому она течет и энергетическое воздействие на жидкость.

- Значение параметров жидкости на границе области в начальный момент времени.

Определить пространственно-временные поля всех параметров текущей жидкости, т.е. скорости, плотности, давления и температуры:

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z, t); & \rho &= \rho(x, y, z, t); \\ v &= v(x, y, z, t); & p &= p(x, y, z, t); \\ w &= w(x, y, z, t); & T &= T(x, y, z, t). \end{aligned}$$

4. Основные физические величины и физические свойства жидкостей.

Основные характеристики

Основной динамической характеристикой среды является *плотность*:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}$$

Наряду с плотностью в технических расчетах применяется удельный вес.

Удельный вес и плотность жидкости связаны следующим соотношением:

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

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V} = \rho g$$

Давление – физическая величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно этой поверхности.

Температура – скалярная физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

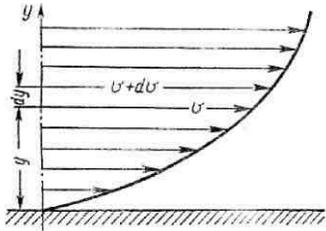
Основные физические свойства

1. *Сжимаемость* – свойство жидкости изменять свой объем под действием давления.

2. *Сопротивление растяжению*. Особыми физическими опытами было показано, что покоящаяся жидкость (в частности вода, ртуть) иногда способна сопротивляться очень большим растягивающим усилиям.

3. *Силы поверхностного натяжения* – эти силы стремятся придать сферическую форму жидкости.

4. *Вязкость жидкости* – свойство жидкости сопротивляться скольжению или сдвигу ее слоев. При течении вязкой жидкости вдоль твердой стенки происходит торможение потока, обусловленное вязкостью. Скорость уменьшается по мере уменьшения расстояния y от стенки. При этом при $y = 0$, скорость падает до нуля, а между слоями происходит проскальзывание, сопровождающееся возникновением касательных напряжений τ .



$$\tau = \pm \mu \frac{dU}{dy}$$

Ньютоновские жидкости – жидкости, которые полностью подчиняются закону Ньютона: напряжение сдвига не зависит от градиента скорости. Вязкость для них – постоянная и оценивается *динамическим коэффициентом вязкости*.

Отношение динамической вязкости к плотности называется *кинематической вязкостью жидкости*:

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

Неньютоновские жидкости – жидкости, которые не подчиняются закону Ньютона. Вязкость для них – величина переменная и зависит от напряжения сдвига. К таким жидкостям относятся коллоидные растворы, смазочные масла, нефтепродукты.

Вязкость жидкости зависит от температуры и от давления. При повышении температуры вязкость жидкости уменьшается и наоборот. У газов наблюдается обратное явление: с повышением температуры вязкость увеличивается, с понижением температуры – уменьшается.

В о п р о с ы д л я с а м о п р о в е р к и :

1. Перечислите основные физические свойства жидкостей.

2. Что подразумевается под жидкостью в гидрогазодинамике?

3. Что подразумевается под сплошностью среды?

4. Какая связь существует между плотностью и удельным весом жидкостей?

5. Какова размерность плотности и удельного веса?

6. В каких единицах измеряется плотность и удельный вес в системе СИ?

7. Что такое коэффициент объемного сжатия жидкости? Какова его размерность?

8. Что называется вязкостью жидкости?

9. Что такое коэффициент динамической вязкости? Какова его размерность?

10. Какая связь существует между коэффициентами динамической и кинематической вязкости?

11. В каких единицах измеряется динамическая и кинематическая вязкость в системе СИ?

12. Какие жидкости относятся к аномальным?

13. В чем отличие аномальных жидкостей от ньютоновских?

ТЕМА 2. ОСНОВЫ ГИДРОСТАТИКИ И КИНЕМАТИКИ.

П л а н л е к ц и и :

1. Гидростатическое давление и его свойства. Давление в покоящейся жидкости. Абсолютное и избыточное давление, манометрическое давление, вакуум. Приборы для измерения давления и вакуума.

2. Силы, действующие в жидкостях (массовые и поверхностные). Абсолютный и относительный покой жидкости. Дифференциальные уравнения жидкости. Поверхности равного давления.

3. Основное уравнение гидростатики. Законы Паскаля и Архимеда.

4. Эпюры давления. Давление жидкости на плоскую и криволинейную поверхности.

5. Способы описания движения жидкости. Уравнения баланса массы: Уравнение непрерывности. Движение жидкой частицы.

6. Вихревое движение жидкости. Безвихревое течение жидкости (потенциальное течение).

Ц е л ь : Изучить основные вопросы гидростатики и кинематики разделов гидромеханики, в которых изучаются: законы равновесия жидкости и ее воздействие на погруженные в неё тела; законы, определяющие поле скоростей жидкости.

З а д а ч и :

- изучить понятие давления жидкости, его виды и способы его определения;

- изучить силы, действующие со стороны покоящейся жидкости на погруженные в неё тела;

- изучить понятия относительного и абсолютного равновесия;

- изучить основное уравнение равновесия жидкости;

- уметь на основе законов гидростатики: определять форму поверхности жидкости в сосуде; рассчитывать распределение давления в жидкости; силы, действующие на плоские и криволинейные стенки;

- освоить основные понятия кинематики жидкости;
- знать основные свойства линий тока;
- уметь определять потенциал скорости, функцию тока и получать уравнение линии тока.

1. Давление жидкости. Силы, действующие на жидкий объем.

Гидростатическое давление - это сжимающее напряжение, которое возникает в жидкости находящейся в состоянии относительного покоя.

1 свойство: Гидростатическое давление действует нормально к площадке действия и является сжимающим, т.е. оно направлено внутрь того объема жидкости, который рассматриваем.

2 свойство: Гидростатическое давление в данной точке не зависит от направления, т.е. остается одинаковым по всем направлениям: $p_x = p_y = p_z = p_n$.

3 свойство: Гидростатическое давление в точке зависит от ее координат в пространстве: $p = p(x, y, z)$.

Напряжение сжатия σ_c , возникающее при этом, определяется как:

$$\sigma_c = p_{cp} = \frac{\Delta p}{\Delta \omega}$$

Гидростатическое давление в точке:

$$p = \lim_{\Delta \omega \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta \omega} = \frac{dp}{d\omega}$$

Внешние силы, действующие на рассматриваемый объем жидкости, разделяют на *массовые (объемные) и поверхностные*.

Массовые силы R_m (сила тяжести и силы инерции переносного движения, действующие на жидкость при относительном ее покое в ускоренно движущихся сосудах или при относительном движении жидкости в руслах).

Напряжение массовых сил:

$$J_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta R_m}{\Delta m} \quad \vec{J} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

Поверхностные силы R_s .

$$r = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta R_s}{\Delta S}$$

Напряжение поверхностных сил:

$$\sigma = - \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta R_{sn}}{\Delta S}$$

Поверхностную силу, действующую нормально к какой-либо площадке, называют силой давления.

$$\tau = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta R_{s\tau}}{\Delta S}$$

Поверхностная сила, действующая по касательной к площадке, является силой сопротивления.

2. Равновесие жидкости. Дифференциальное уравнение равновесия (уравнение Эйлера).

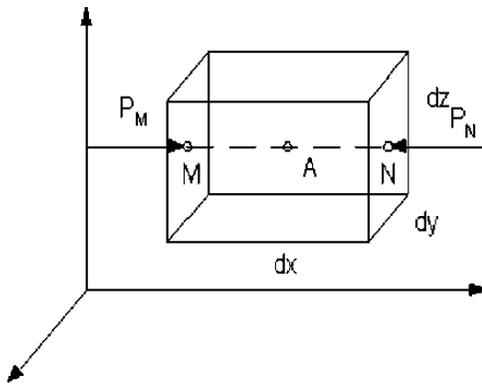
Условие равновесия жидкости: жидкость может сохранять свое равновесное состояние в том случае, если внешние силы, действующие в точках граничной поверхности, направлены только по внутренним нормальям к этой поверхности.

Виды равновесия жидкости.

Абсолютное равновесие (покой). Если жидкость находится в покое (скорость движения равна нулю) относительно системы координат, жестко связанной с Землей, такое равновесие называется абсолютным.

Относительное равновесие (покой). Если жидкость находится в покое (скорость движения равна нулю) относительно системы координат, которая движется относительно Земли, такое равновесие называется относительным.

Рассмотрим равновесие жидкости. В объеме жидкости произвольно проведем систему координат. Выделим некоторую точку А. Вокруг, которой проведем бесконечно малый параллелепипед.



Равновесие жидкости под действием внешних сил, действующих на этот параллелепипед описывается тремя дифференциальными уравнениями Эйлера :

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X &= 0; \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y &= 0; \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z &= 0. \end{aligned} \right\}$$

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz)$$

Это уравнение является *основным дифференциальным уравнением равновесия жидкости.*

Так как dp есть полный дифференциал, то для однородной жидкости (при $\rho = \text{const}$) и трехчлен $(Xdx + Ydy + Zdz)$ – тоже полный дифференциал некоторой функции $U(x,y,z)$.

Следовательно, $Xdx + Ydy + Zdz = dU(x, y, z)$

Рассматривая X, Y, Z не как проекции ускорения, а как проекции объемной силы, отнесенной к единице массы, назовем функцию $U = f(x, y, z)$ потенциальной, или силовой функцией, а силы, удовлетворяющие выше представленному условию – имеющие потенциал.

3. Абсолютное и избыточное давление, манометрическое давление, вакуум. Приборы для измерения давления и вакуума.

Давление, рассчитанное от абсолютного нуля, т. е. с учётом атмосферного давления, называется *абсолютным* $p_{абс}$. Абсолютное давление всегда положительная величина.

В жидкостях существует давление, обусловленное ее весом, которое называют *гидростатическим давлением*. Величина ρgh может быть названа *весовым давлением, или избыточным давлением жидкости*.

Сила давления на дно не зависит от формы сосуда и может быть как больше, так и меньше веса налитой жидкости – *гидростатический парадокс*.

Основное уравнение гидростатики. $p = p_0 + \rho gz$

По нему можно посчитать давление в любой точке покоящейся жидкости.

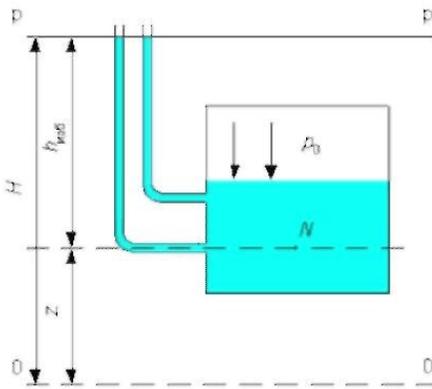
Поверхностное давление p_0 может быть равным атмосферному давлению, больше атмосферного или недостающим до атмосферного.

Если абсолютное давление больше атмосферного, то давление, превышающее атмосферное, называется *манометрическим, или избыточным (термины равнозначны)*. Давление, недостающее до атмосферного, называется *вакуумметрическим*:

Пьезометр (или пьезометрическая трубка). Это устройство является самым простым из всех известных устройств. Пьезометр представляет собой, как правило, открытую цилиндрическую стеклянную трубку, устанавливаемую вертикально, одним концом, которая соединена с сосудом, а другим - с атмосферой.

Пьезометрическая высота $h_{изб}$ - высота столба жидкости, уравнивающая давление в данной точке; представляет собой высоту столба данной жидкости, соответствующую данному давлению (абсолютному или избыточному):

$$h_{\text{изб}} = (p - p_a)/\rho g$$



Если у пьезометра верх будет закрыт, и воздух откачан, следовательно, давление на поверхность жидкости в трубке равно нулю. Высота, на которую поднимется жидкость в трубке $h_{\text{пр}}$ называется высотой давления, или *приведенной высотой*, она измеряет *абсолютное давление в точке присоединения*, выражая его

высотой столба жидкости:

$$h_{\text{пр}} = p/\rho g.$$

Удельной потенциальной энергией - называется энергия, отнесенная к единице веса

$$e = E/G = z + h_{\text{изб}} = H.$$

Потенциальный напор - удельная потенциальная энергия, т.е. энергия которой обладает единица веса жидкости

$$H_p = z + \frac{p}{\rho \cdot g}$$

4. Поверхности равного давления. Абсолютное равновесие несжимаемой жидкости. Закон Паскаля. Относительное равновесие жидкости при поступательном равноускоренном движении сосуда и во вращающемся сосуде.

Поверхностные силы проявляются на граничных поверхностях рассматриваемого жидкого тела.

Поверхность, точки которой имеют одинаковые значения данной функции, называется *поверхностью уровня*.

Закон Паскаля: давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости по всем направлениям одинаково.

Принимая $p = \text{const}$ ($dp = 0$) в основном дифференциальном уравнении равновесия жидкости, с учетом того, что для жидкости $\rho \neq 0$, получим:

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0$$

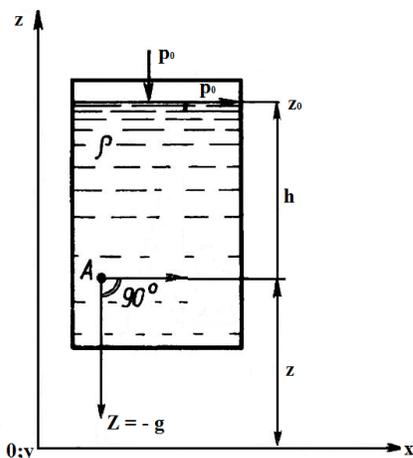
Это уравнение является *дифференциальным уравнением поверхности уровня*.

Таким образом, поверхностью уровня (поверхность равного давления) в однородной покоящейся жидкости будет любая горизонтальная плоскость, в том числе и *свободная поверхность*, независимо от формы сосуда или водоема. Горизонтальной плоскостью будет также граница раздела (свободная поверхность) несмешивающихся жидкостей.

Комбинация массовых сил, действующих на жидкость, может быть разной. Если жидкость покоится в сосуде, неподвижном относительно Земли, то такое равновесное состояние жидкости можно назвать «абсолютным» покоем (равновесием). При «абсолютном» покое жидкость находится под действием лишь одной массовой силы - силы тяжести.

Рассмотрим случай абсолютного равновесия.

Резервуар с жидкостью плотностью ρ находится в «абсолютном» покое .



Для произвольной точки в жидкости уравнение:

$$p = p_0 = \rho \cdot g \cdot (z_0 - z).$$

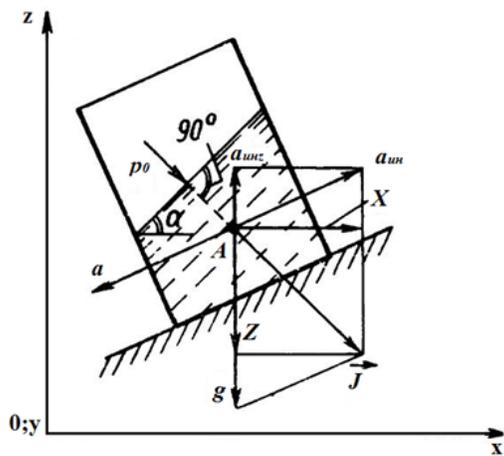
Это *основное уравнение гидростатики* для несжимаемой жидкости.

Дифференциальное уравнение поверхности уровня в случае «абсолютного» покоя примет вид

$$z = \text{const}.$$

Это *уравнение горизонтальной плоскости*, форму которой имеют все поверхности равного давления и свободная поверхность, когда на жидкость действует только сила тяжести.

Относительным равновесием жидкости называется такое состояние, при котором каждая ее частица сохраняет свое положение относительно твердой стенки движущегося сосуда, а относительно поверхности Земли испытывает движение.



Равноускоренное движение по горизонтали.

Жидкость находится в сосуде, который движется прямолинейно равноускорено.

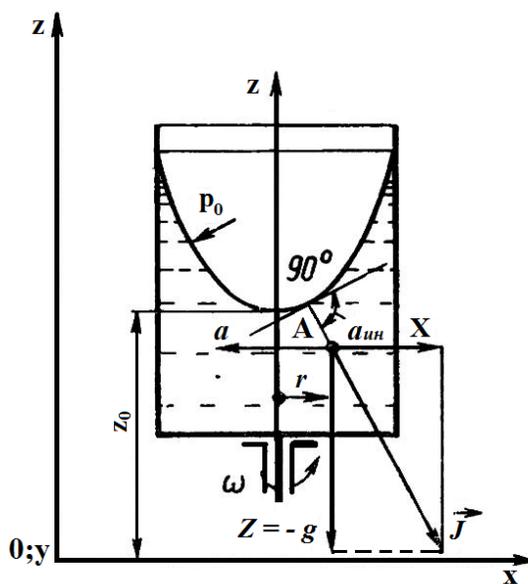
Закон распределения давления жидкости в производной точке А

$$p = p_0 + \rho(a_{уик} \cdot (x - x_0) + (a_{уиз} - g) \cdot (z - z_0)).$$

Дифференциальное уравнение поверхности уровня примет вид

$$a_{уик} \cdot (x - x_0) + (a_{уиз} - g) \cdot (z - z_0) = 0.$$

Вращательное движение относительно вертикальной оси.



Допустим, что жидкость в цилиндрическом сосуде вращается относительно оси z с постоянной угловой скоростью ω . Вращающиеся стенки

цилиндра приведут во вращательное движение ближайшие к стенкам слои жидкости, а затем, вследствие вязкости жидкости, и всю ее массу. По истечении какого-то времени все частицы жидкости будут вращаться примерно с одной и той же угловой скоростью ω .

При этом свободная поверхность жидкости видоизменится; в центральной части уровень жидкости понизится, у стенок – повысится, и вся свободная поверхность жидкости станет некоторой поверхностью вращения – *параболоид*

вращения. Вся масса жидкости при этом находится в состоянии относительного покоя.

Закон распределения давления жидкости в произвольной точке А

$$\frac{p - p_0}{\rho \cdot g} + z = h_0 + \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2 \cdot g}$$

или

$$\frac{p_{изб}}{\rho \cdot g} + z = h_0 + \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2 \cdot g},$$

где h_0 – высота жидкости в покоящемся сосуде,

$p_{изб} = p - p_0$ – избыточное давление в жидкости.

Дифференциальное уравнение поверхности уровня

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2 \cdot g} = h,$$

где z_0 – координата вершины параболоида; h – глубина на расстоянии r от оси вращения.

6. Давление жидкости на плоскую и криволинейную поверхности.

Эпюры давления.

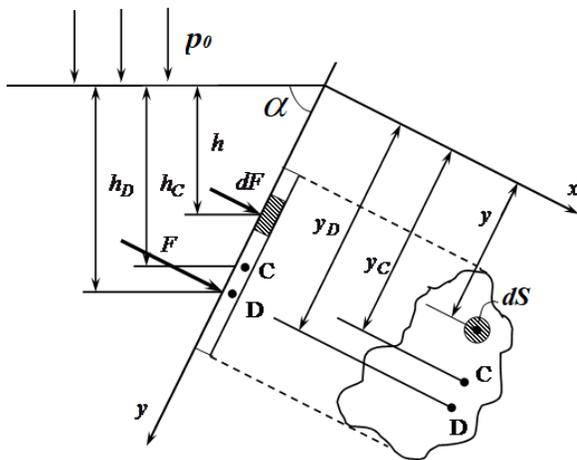
В практике гидравлических расчётов часто приходится определять величину и точку приложения силы давления жидкости на плоские стенки различной конфигурации.

Для определения **силы давления жидкости на плоские стенки** пользуются двумя методами - *аналитическим и графо-аналитическим*.

Аналитический метод применим для плоских стенок любой формы, *графоаналитический* - только для прямоугольных стенок.

1. Аналитический метод определения силы давления жидкости

Действие сил давления покоящейся жидкости на наклонную плоскую стенку сосуда.



Сила полного гидростатического давления:

$$F = \int_S p \cdot dS = \int_S (p_0 + \rho gh) \cdot dS = p_0 \cdot S + \underbrace{\rho g \cdot h_c \cdot S}_{F_{ж}} \cdot S$$

Таким образом, сила полного давления может быть представлена в виде двух составляющих: *силы внешнего, или поверхностного, давления F_0 и силы весового давления жидкости $F_{ж}$.*

Составляющая от весового давления жидкости $F_{ж}$ приложена в точке, называемой *центром давления*.

2. Графо-аналитический метод расчёта силы давления и центра давления на прямоугольные поверхности

Для определения расчёта силы давления воды и глубины погружения центра давления.

- определяется давление воды в расчетных точках;
- строится эпюра гидростатического давления воды: в любом выбранном масштабе по нормали к стенке откладывается величина давления воды.
- рассчитывается сила давления воды.
- определяется положение центра давления.

Равнодействующая давления воды определяется путём векторного сложения сил, действующих на плоскости.

Давление жидкости на криволинейную поверхность.

Примерами криволинейных поверхностей, испытывающих давление покоящейся жидкости, являются сферические и цилиндрические стенки резервуаров, секторные, сферические и цилиндрические затворы, клапаны насосов, поверхности трубопроводов и т. п.

Для таких поверхностей при определении силы давления жидкости достаточно двух составляющих горизонтальной и вертикальной:

$$F = \sqrt{F_G^2 + F_B^2}$$

Горизонтальная составляющая силы давления на криволинейную поверхность:

$$F_G = \rho g y_C S_B$$

Вертикальная составляющая:

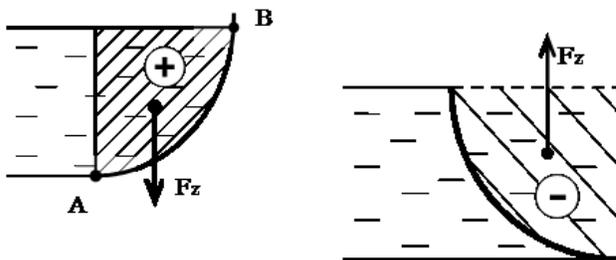
$$F_B = \rho g V_{ТД}$$

Тело давления - это криволинейный объём, ограниченный:

- а) самой криволинейной поверхностью;
- б) поверхностью, образованной вертикальными проектирующими линиями, проведёнными из контура криволинейной поверхности до свободной поверхности или её продолжения;
- в) горизонтальной проекцией криволинейной поверхности на свободную поверхность жидкости или её продолжение.

Различают два вида тела давления.

1. Реальное, действительное или положительное тело давления.
2. Фиктивное, мнимое или отрицательное тело давления.



7. Способы описания движения жидкости. Классификация движения жидкостей. Линии тока. Трубка тока. Струйная модель потока.

Кинематика – раздел механики капельных жидкостей, в котором рассматриваются виды и формы движения жидкости без выяснения природы и сил, вызывающих это движение.

В механике жидкости используются *два метода кинематики* - *Лагранжа и Эйлера*.

По методу Лагранжа изучается поведение отдельной частицы жидкости за время ее движения в пространстве.

Метод Эйлера не учитывает индивидуальных траекторий отдельных частиц. Метод основан на понятии местной скорости или скорости в точке в данный момент времени.

Классификация видов движения жидкости основана на ряде признаков.

1. *Неустановившееся движение жидкости* – движение, изменяющееся во времени, т.е. скорость и давление в данной точке изменяются с течением времени.

2. *Установившееся движение жидкости* – это такое, при котором в любой точке пространства скорость и давление не изменяются ни по направлению, ни по величине.

Установившееся движение может быть равномерным и неравномерным.

Равномерным движением называется такое, при котором скорости в сходственных точках двух смежных сечений равны между собой, а траектории частиц – прямолинейны и параллельны оси *ox*, т.е. поле скоростей не изменяется вниз по течению.

Неравномерное движение – это движение, не удовлетворяющее определению равномерного движения.

Свободная струя - поток не ограничен стенками.

Траектория - след движущейся частицы.

Линия тока - линия, в каждой точке которой вектор скорости направлен по касательной.

Дифференциальное уравнение линий тока

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w}$$

Трубкой тока называется трубчатая поверхность бесконечно малого поперечного сечения, образованная системой линий тока, проходящих через точки бесконечно малого замкнутого контура .

Жидкость, протекающая внутри этой трубки, называется *элементарной струйкой*.

Совокупность элементарных струек представляет собой *поток конечных размеров*.

Объем жидкости, проходящей в единицу времени через данное поперечное сечение струйки, называется *элементарным расходом*.

$$dQ = \frac{dW}{dt} = \frac{V dt d\omega}{dt} = V d\omega$$

Массовый расход $dG = dQ\rho = \rho V d\omega$

2. Уравнение неразрывности (уравнение баланса массы).

Уравнение неразрывности в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0$$

Вид уравнения неразрывности в частных случаях.

1. В случае несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$)

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0$$

2. Для несжимаемых жидкостей

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) = 0$$

По условию несжимаемости и по условию сплошности движения *условие неразрывности* имеет вид

$$dQ_1 = dQ_2 \text{ или } V_1 d\omega_1 = V_2 d\omega$$

$$Q = \omega V = \text{const}$$

Таким образом, при установившемся движении жидкости расход в любом сечении потока остается неизменным.

3. Движение жидкой частицы.

Движение жидкой частицы является более сложным, чем движение твердого тела. Особенностью жидкости и ее частиц, как уже неоднократно отмечалось, является легкая деформируемость. Поэтому помимо поступательного и вращательного, жидкая частица может участвовать и в деформационном движении. *Движение жидкой части более сложное чем движение твердого тела и может быть представлено следующими составляющими:*

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + [\vec{\omega}, \vec{r}] + v_D$$

Это положение и составляет суть так называемой первой теоремы Гельмгольца

Рассмотрим жидкую частицу в форме прямоугольного параллелепипеда. *Деформация* такой жидкой частицы может быть как *линейной* (ребра удлиняются и укорачиваются), так и *угловой* (границы скашиваются).

Линейные деформации частицы могут возникнуть в результате различия в скоростях, совпадающих с направлением ребер объемная деформация сводится к изменению первоначального объема параллелепипеда $dV = dx dy dz$ на величину $\delta V = \delta V_x + \delta V_y + \delta V_z$ за счет растяжения либо сжатия ребер

Скоростью относительной объемной деформации назовем отношение изменения объема к его первоначальному объему и скорости деформации, т.е

$$\frac{\delta V}{dV dt} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \vec{V}$$

Если $\text{div } \vec{V} = 0$ то это означает, что $\delta V = 0$, т.е. деформация жидкой частицы происходит без изменения ее объема. В этом и заключается гидромеханический смысл равенства нулю дивергенции.

Угловая деформация (скашивание) может возникнуть из-за разности скоростей, перпендикулярных ребрам. Здесь следует обратить внимание на одно весьма существенное обстоятельство: рассматриваемое перемещение ребер вызвано не только деформацией, но и вращением частицы. Следовательно, в общем случае движение элемента можно рассматривать как сумму деформационного и вращательного движений.

Чисто деформационное движение будем характеризовать углами $d\gamma$, а чисто вращательное - $d\epsilon$. Угловая скорость вращения жидкой частицы

$$\vec{\omega} = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k} \qquad \vec{\omega} = \frac{1}{2} \text{rot } \vec{v}$$

4. Вихревое движение жидкости. Теоремы о вихревом движении и следствия из них.

Вращательное движение жидких частиц характеризуется вихрем скорости. Движение, при котором величина вихря скорости не равна нулю, т.е. $\text{rot } \vec{V} \neq 0$ называют *вихревым*.

Если в данный момент времени можно провести геометрические линии, касательные к векторам угловых скоростей частиц, то эти линии будут называться *вихревыми*.

Дифференциальное уравнение вихревой линии

$$\frac{dx}{\omega_x} = \frac{dy}{\omega_y} = \frac{dz}{\omega_z}$$

Совокупность вихревых линий, проведенных через точки произвольного замкнутого контура, образует вихревую трубку. Объем жидкости, заключенный внутри вихревой трубки, называется *вихревым шнуром* (*вихревой нитью*).

Интенсивность вихревой трубки i определяется по выражению

$$i = \int_S \text{rot} \vec{V} \cdot \vec{n} d\Omega$$

Теорема Стокса утверждает, что циркуляция скорости по замкнутому контуру, расположенному на поверхности вихревой трубки и один раз ее опоясывающему, равна интенсивности вихревой трубки

$$\Gamma = \oint_L \vec{v} \cdot d\vec{r}$$

Следствия теоремы Стокса:

1. Если замкнутый контур охватывает несколько вихревых трубок, циркуляция по нему представляет собой алгебраическую сумму циркуляций по всем вихревым трубкам: $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \dots + \Gamma_n$

2. Когда циркуляция скорости по любому замкнутому контуру, произвольно проведенному в движущейся жидкости, равна нулю, можно судить об отсутствии вихревых трубок. Такое движение называется *безвихревым*: $\Gamma = 0$.

Теорема Томсона (закон сохранения циркуляции скорости): если силы, действующие в жидкости имеют потенциал, идеальная жидкость баротропна (ее плотность является функцией только от давления) и поле скоростей непрерывно,

$$\text{то } \frac{d\Gamma}{dt} = 0$$

Следствие теоремы Томсона (теорема Лагранжа): если во всей движущейся жидкости вихрь скорости в некоторый начальный момент был равен нулю, то движение останется безвихревым и в любой другой последующий момент времени.

5. Безвихревое течение жидкости (потенциальное течение).

В потенциальном поле циркуляция по замкнутому контуру равна нулю.

$$\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$$

Рассмотрим выражение $u dx + v dy + w dz$ при потенциальном движении данное выражение является полным дифференциалом какой-то функции ϕ , и

$$d\phi = u dx + v dy + w dz$$

Сопоставляя, получаем $\vec{V} = \text{grad } \phi$

По предложению Гельмгольца функцию ϕ называют *потенциалом скорости*.

Поверхности (либо линии для двумерных потоков), в каждой точке которых $\phi = \text{const}$, называются *эквипотенциальными*.

$$d\psi = v dy - u dx$$

где ψ носит название *функции тока*.

Следовательно, линии тока и эквипотенциальные линии образуют сетку взаимно ортогональных кривых, которая носит название гидродинамической сетки движения.

В о п р о с ы д л я с а м о п р о в е р к и :

1. Ч т о т а к о е г и д р о с т а т и ч е с к о е д а в л е н и е? Каковы его свойства?

Какие виды давления выделяют?

2. Какие внешние силы действуют на объем жидкости?

3. Каково условие равновесия жидкости? Какие бывают виды равновесия? Что называется поверхностью уровня жидкости?

4. Н а п и ш и т е о с н о в н о е у р а в н е н и е

р а в н о в е с и я ж и д к о с т и и г а з а .

5. Как производится построение эпюр давления. Как рассчитать силу давления на плоскую стенку? Какие существуют методы определения сил давления на плоскую стенку?
6. Как рассчитать силу давления на криволинейную поверхность? Как построить тело давления?
7. Что изучает кинематика жидкости?
8. Как описывается поле скоростей методом Лагранжа?
9. Как описывается поле скоростей методом Эйлера?
10. Каковы основные закономерности, описывающие процесс движения жидкой частицы?
11. Что представляет собой линия потока и траектория движения? В чем различие?

12. Что называется трубкой тока? Элементарной струйкой? Каковы их свойства?
13. Что называется потоком жидкости?
14. Что понимается под средней скоростью потока и расходом?
15. Напишите уравнение постоянства расхода. При каких условиях выполняется это уравнение?
16. Напишите уравнение неразрывности (сплошности) потока.
17. Приведите примеры равномерного и неравномерного, напорного безнапорного движения.
18. Какое движение называется вихревым? Определите основные понятия и законы, описывающие вихревое движение жидкости.
19. Каково условие безвихревого движения жидкости? Определите

О С Н О В Н Ы Е П О Н Я Т И Я Б Е З В И Х Р Е В О Г О
Д В И Ж Е Н И Я Ж И Д К О С Т И .

ТЕМА 3. ДИНАМИКА ВЯЗКОЙ И НЕВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ.

П л а н л е к ц и и :

1. Уравнение движения жидкости. Уравнение моментов количества движения.
2. Дифференциальное уравнение движения жидкости в напряжениях. Уравнение Навье-Стокса.
3. Динамика невязкой жидкости: дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости (уравнения Эйлера).
4. Уравнение Бернулли для установившегося движения несжимаемой жидкости, энергетическая интерпретация уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли для реальной вязкой жидкости.
5. Практическое применение уравнения Бернулли. Трубка Прандтля, Вентури, сопло. Диафрагма.
6. Уравнение Бернулли для реальных газов.
7. Интегральное и дифференциальное уравнения энергии.
8. Моделирование гидродинамических явлений. Теория подобия. Критерии гидродинамического подобия

Ц е л ь : И з у ч и т ь о с н о в н ы е в о п р о с ы

Г идродинамики раздела гидромеханики, в котором изучаются законы движения жидкостей в зависимости от приложенных к ним сил.

З а д а ч и :

- изучить уравнения движения и моментов количества движения.;
- изучить дифференциальное уравнение движения жидкости в напряжениях, уравнение Навье-Стокса и его частные случаи;
- изучить уравнение Бернулли в геометрической и энергетической интерпретации и его составляющие;
- уметь записывать уравнение Бернулли для идеальной и реальной жидкостей элементарной струйки, потока жидкости и реальных газов;
- понимать принцип построения пьезометрических графиков и диаграмм Бернулли;
- знать о практическом применении уравнения Бернулли;
- изучить интегральное и дифференциальное уравнения энергии жидкости;
- ознакомиться с критериями моделирования гидродинамических явлений.

1. Уравнение движения жидкости. Уравнение моментов количества движения (второе уравнение Эйлера).

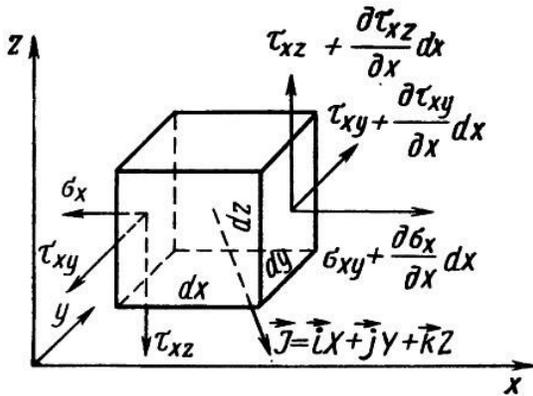
Интегральное уравнение движения для жидкого объема получается из обобщения второго закона Ньютона для всех жидких частиц, заключенных внутри жидкой поверхности в момент времени t :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot \vec{V} dV + \int_{S_{\text{ВЫХ}}} \rho \cdot v_{\Pi} \cdot \vec{V} dS - \int_{S_{\text{ВХ}}} \rho \cdot v_{\Pi} \cdot \vec{V} dS = \int_V \vec{J} \cdot \rho dV + \int_S \square$$

Уравнение моментов количества движения для жидкого объема устанавливает, что момент равнодействующей внешних сил относительно произвольной оси равен полной производной по времени от суммарного момента количества движения относительно той же оси, т. е

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho \vec{V} \times \vec{r}) \alpha v + \int_{S_{\text{ВЫХ}}} \rho v_{\Pi} (\vec{v} \times \vec{r}) \alpha \omega - \int_{S_{\text{ВХ}}} \rho v_{\Pi} (\vec{v} \times \vec{r}) \alpha \omega = \kappa_{\Sigma} \times \vec{r}$$

2. Дифференциальное уравнение движения в напряжениях



Данное уравнение позволяет определить искомое поле. Рассмотрим произвольно выбранный элементарный жидкий объем $dV = dx dy dz$ постоянной массы $dm = \rho dV = \rho dx dy dz$ и действующие на него напряжения массовых J и поверхностных сил (нормального и касательного давления).

Уравнения движения в напряжениях

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \right)$$

3. Гидродинамика вязкой жидкости. Модель вязкой жидкости.

Уравнение движения вязкой жидкости (уравнение Навье-Стокса).

Уравнения движения вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса)

$$\frac{du}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \vec{V}$$

$$\frac{dv}{dt} = Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial y} \operatorname{div} \vec{V}$$

$$\frac{dw}{dt} = Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial z} \operatorname{div} \vec{V}$$

$$\vec{a} = J - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{V} + \frac{2}{3} \nu \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{V})$$

Это уравнение отличается от уравнения движения идеальной жидкости дополнительными слагаемыми, учитывающими действие сил вязкого трения.

Целью гидродинамического расчета является нахождение полей скоростей и давлений. Принципиально это оказывается возможным, так как три уравнения Навье-Стокса (в проекциях) плюс уравнение неразрывности образуют замкнутую систему. Следует отметить, что до настоящего времени вследствие практически непреодолимых математических трудностей не получено ни одного общего решения уравнений Навье-Стокса в их полном виде, т.е. при сохранении всех конвективных членов и всех членов, учитывающих вязкость. Известны лишь отдельные частные решения.

Уравнение для несжимаемой вязкой жидкости:

$$\vec{a} = \mathbf{j} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{V}$$

Если жидкость идеальная несжимаемая $\nu=0$, то *дифференциальное уравнение Эйлера*:

$$\vec{a} = \mathbf{j} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p$$

4. Уравнение Бернулли для элементарной струйки. Энергетический смысл уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли в форме напоров.

Уравнение Бернулли устанавливает зависимость между средней скоростью течения и силами, действующими в потоке жидкости.

Физическая сущность уравнения Бернулли – закон сохранения энергии применительно к движущейся жидкости.

Формы представления уравнения:

- *для струйки идеальной жидкости* – не учитываются потери энергии и неравномерность скоростей по сечению;
- *для струйки реальной жидкости* – учитываются потери энергии;
- *для потока реальной жидкости* – учитываются потери энергии и неравномерность скоростей по сечению потока.

Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.

Под *идеальной жидкостью* понимается такая воображаемая (условная) жидкость, которая совершенно лишена вязкости

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g},$$

где z_1 и z_2 – высота расположения центров тяжести от плоскости сравнения соответствующих сечений струйки – геометрический напор; v_1, v_2 – скорости струйки в соответствующих сечениях; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения тела.

Полученное выражение и есть *уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости*.

Энергетический смысл уравнения Бернулли можно установить, представив ранее полученное выражение в другом виде, умножив все его члены на g :

$$z_1 \cdot g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 \cdot g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}.$$

Таким образом, для элементарной струйки идеальной жидкости удельная механическая энергия жидкости, являющаяся суммой удельных потенциальной и кинетической энергий, постоянна.

Уравнения Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости. При переходе от элементарной струйки идеальной жидкости к реальной (вязкой) жидкости, необходимо учесть *потери энергии (напора)*, что является следствием вязкости жидкости.

Исходя из описанных условий, *уравнение Бернулли для потока реальной жидкости* имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \sum h_{1-2},$$

где Σh_{1-2} – суммарная потеря полного напора на участке между рассматриваемыми сечениями.

Уравнения Бернулли для потока реальной жидкости. При переходе от элементарной струйки реальной жидкости к потоку, имеющему конечные размеры и ограниченному стенками, необходимо учесть, помимо потерь энергии (напора), *неравномерность распределения скоростей по сечению потока*, что также является следствием вязкости жидкости.

Неравномерность распределения скоростей по сечению потока учитывается коэффициентом Кориолиса:

$\alpha = 2$ – для ламинарного режима течения жидкости;

$\alpha = 1,05-1,13$ – для турбулентного режима течения жидкости.

Чем больше неравномерность местных скоростей в сечении потока, тем больше корректив кинетической энергии α . Для практических расчетов при турбулентном режиме принимается $\alpha=1$.

Исходя из описанных условий, уравнение Бернулли для потока реальной жидкости имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \cdot \frac{v_{1cp}^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \cdot \frac{v_{2cp}^2}{2 \cdot g} + \Sigma h_{1-2},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты Кориолиса для соответствующих сечений; Σh_{1-2} – суммарная потеря полного напора на участке между рассматриваемыми сечениями.

Важнейшие следствия из уравнения Бернулли.

1. Если в каком-либо сечении потока уменьшается кинетическая энергия, то потенциальная энергия в этом сечении возрастает и наоборот.

2. В горизонтальном трубопроводе при увеличении скорости движения уменьшается давление и наоборот.

3. В горизонтальном трубопроводе постоянного диаметра давление по направлению движения жидкости уменьшается вследствие наличия гидравлических сопротивлений; кинетическая энергия при этом постоянна.

4. По направлению движения жидкости полная энергия в сечениях потока всегда уменьшается, так как имеют место потери энергии на преодоление гидравлических сопротивлений, которые увеличиваются за счет роста поверхности контакта жидкости со стенкой и гидравлической арматурой. *Часть механической энергии при этом необратимо переходит в тепловую.*

5. Если между сечениями потока 1-1 и 2-2 имеется источник энергии (например, насос), энергия жидкости в месте установки насоса скачком возрастает и уравнение Бернулли имеет вид:

$$H_{\text{НАС}} + z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \cdot \frac{v_{1cp}^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \cdot \frac{v_{2cp}^2}{2 \cdot g} + \sum h_{1-2},$$

где $H_{\text{НАС}}$ - удельная энергия, которую насос забирает у приводного двигателя и передает жидкости (напор насоса). Данное уравнение представляет собой закон сохранения энергии для трубопровода с насосной подачей жидкости.

В трубе переменного сечения в соответствии с уравнением постоянства расхода $Q = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = const$ уменьшение сечения приводит к увеличению скорости, а увеличение скорости, по уравнению Бернулли, к уменьшению давления.

5. Интегральное уравнение энергии.

Пять основных уравнений гидрогазодинамики: уравнение состояния, уравнение неразрывности; три уравнения движения; содержат шесть искомых величин u, v, w, p, ρ, T .

Шестое уравнение – уравнение энергии для того, чтобы замкнуть систему основных уравнений.

Запишем исходно уравнение закона сохранения энергии для жидкого объема: $Q - L = E_{t+\Delta t} + E_t$

Q – внешнее тепло: $Q > 0$ -подводимое; $Q < 0$ – отводимое;

L – внешняя механическая работа:

$L > 0$ – работа совершается жидкостью и отводится во внешнюю среду (гидравлические, газовые турбины);

$L < 0$ – работа подводится к жидкому объему (когда жидкость протекает через насос или компрессор);

В уравнении энергии имеет значение не абсолютная величина полной энергии, а лишь разность ее значений для двух положений жидкого объема.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{dp}{dt} + \chi \Delta T + \frac{1}{C_p} \frac{dq_{тр}}{dt}$$

- Уравнение энергии в интегральной форме

6. Теория подобия и анализ размерностей.

Основные уравнения гидродинамики описывают явления переноса количества движения, данные уравнения не содержат никаких специальных ограничений относительно конкретных особенностей протекания тех или иных процессов. Следовательно, они применимы к любым процессам и явлениям в гидродинамике, протекающим либо произвольно в природе, либо в искусственных, созданных человеком, условиях. Поэтому, одной из важнейших практических задач теории гидромеханики является нахождение условий решения дифференциальных уравнений гидромеханики.

В частности, не всегда можно получить удовлетворительный результат и с помощью численных методов. Известны физический и математический методы моделирования. Эти законы называются *законами подобия*. Они устанавливают определенные соотношения между геометрическими размерами, кинематическими и динамическими характеристиками потоков в модели и натуре.

Гидродинамические критерии подобия

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{v\ell}{\nu}$$

Критерий Фруда

$$Fr = \frac{v^2}{g\ell}$$

Критерий Вебера

$$We = \frac{\rho v^2 \ell}{\sigma}$$

Критерий Коши

$$Ca = V^2 \rho / E_{\text{жс}},$$

Критерий Струхали

$$Sh = VVt,$$

Анализ размерностей. При организации экспериментов необходимо с самого начала установить наиболее целесообразную методику их проведения и порядок обработки результатов опытов. В практике гидравлических исследований метод анализа размерностей нашел широкое применение. Этот метод позволяет заранее определить основные критерии подобия, в которых следует обрабатывать результаты опытов, а также обобщать их и устанавливать закономерности, отражающие исследуемый процесс.

π -Теорема устанавливает, что если указанные n переменных выразить через эти основные единицы, то их можно сгруппировать в $n-m$ безразмерных π -членов:

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$$

где каждое число π представляет собой безразмерное произведение нескольких A , то есть число членов в физическом уравнении сокращается до $n - m$. Причем каждый такой π -член будет содержать $m + 1$ переменную величину. В гидродинамических задачах число таких переменных, входящих в π -члены, должно равняться четырем.

В о п р о с ы д л я с а м о п р о в е р к и :

1. Напишите систему уравнений Навье - Стокса. Назовите физический смысл слагаемых уравнения Навье - Стокса.

2. Напишите систему уравнений движения Эйлера для идеальной жидкости.

3. Напишите уравнение Бернулли для элементарной струйки невязкой жидкости и поясните величины, входящие в него.

4. Что такое пьезометрический и скоростной напор?

5. Что называется полным напором?

6. Что называется пьезометрическим и гидравлическим уклонами?

7. Чем отличается уравнение Бернулли для потока реальной жидкости от уравнения Бернулли для элементарной струйки?

8. На основе какой модели получен вывод уравнения Бернулли для потока реальной жидкости.

9. Поясните физический смысл коэффициента Кориолиса в уравнении Бернулли.

10. Поясните энергетический смысл уравнения Бернулли.

11. Что называется полной удельной энергией потока?

12. Приведите примеры практического применения уравнения Бернулли.

13. Раскройте сущность физического моделирования.

14. Какова роль математического моделирования?

15. Что называется законами механического подобия?

16. В чем заключается сущность геометрического, кинематического и динамического подобия?

17. Что такое коэффициенты подобия?

18. Что такое критерий Ньютона?

19. Каков физический смысл критерия Рейнольдса, критерия Фруда, критерия Вебера, критерия Сен-Венана (Ильюшина)?

ТЕМА 4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

П л а н л е к ц и и :

1. Виды сопротивлений. Основное уравнение равномерного движения.
2. Классификация потерь напора.
3. Потери напора при равномерном движении жидкости: ламинарный режим, турбулентный режим движения жидкости.
4. Потери напора при неравномерном движении жидкости (местные потери). Классификация гидравлических систем по сопротивлениям.
5. Истечение жидкостей через отверстия и насадки. Истечение газов из отверстий.

6. Гидравлический расчет трубопроводов. Гидравлические характеристики трубопроводов.

7. Гидравлический удар в трубах, формула Жуковского. Виды гидравлического удара.

Ц е л ь : Изучить процессы возникновения потерь энергии жидкости при равномерном и неравномерном течении жидкости через различные гидравлические системы. Ознакомится с явлением гидравлического удара.

З а д а ч и :

- ознакомиться с основными видами сопротивлений и уравнением равномерного движения;

- изучить причины возникновения потерь напора при равномерном и неравномерном движении жидкости;

- уметь определять и рассчитывать основные типы гидравлических сопротивлений;

- изучить процесс истечения жидкости и газов из отверстий;

- изучить процесс истечения жидкости под уровень, истечение из больших отверстий, истечение при переменном напоре, истечение через насадки;
- ознакомиться с методикой гидравлического расчета простых и сложных трубопроводов;
- ознакомиться с явлением гидравлического удара в трубах и законами его описывающими.

1. Виды сопротивлений. Основное уравнение равномерного движения.

В уравнении Бернулли для потока реальной жидкости величина Δh (или Σh_c) определяет потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений. Потери учитываются отдельно для прямых участков труб и каналов и отдельно для местных сопротивлений.

В случае прямолинейных участков потери проявляются равномерно по длине потока и называются *потерями по длине* $h_{ол}$ или *линейные потери напора*.

Местными сопротивлениями в трубах принято называть устройства, в которых *происходит резкая деформация потока, выражающаяся в изменении скорости или направления движения*. В этом случае потери напора называются *местные гидравлические сопротивления* h_m : вентили, всевозможные закругления, сужения, расширения и т.д.

Обычно в потоке возникают оба вида потерь напора: $\Sigma h_c = h_{ол} + h_m$.

Ламинарным называется слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсации скорости и давления.

Турбулентным называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений. Переход от

ламинарного режима к турбулентному наблюдается при определенной скорости

движения жидкости. Эта скорость называется *критической*: $v_{кр} = \frac{v}{d} k$

Критическое число Рейнольдса $Re_{кр} = \frac{v_{кр} d}{\nu}$

Как показывает опыт, для труб круглого сечения $Re_{кр} \approx 2300$.

При $Re < Re_{кр}$ течение является *ламинарным*, а при $Re > Re_{кр}$ течение является *турбулентным*.

Вполне *развитое турбулентное* течение в трубах устанавливается лишь при $Re \gg 4000$, а при $Re = 2300 \dots 4000$ имеет место *переходная, критическая область*.

2. Основное уравнение равномерного движения

$\tau = \rho g I_d R$ - *основное уравнение равномерного движения*.

Закон изменения касательного напряжения по сечению при ламинарном режиме течения жидкости

$$\tau = \tau_0 \frac{r}{r_0}$$

Касательные напряжения продольно внутреннего трения распределяются в трубе по линейному закону, наибольшее значение на стенке, а на оси трубы равны нулю.

Механизм турбулентного движения значительно сложнее ламинарного. Вследствие постоянного перемешивания скорость течения в отдельных точках турбулентного потока изменяется во времени как по величине, так и по направлению, сохраняя в среднем достаточно долгий промежуток времени постоянную величину и направление, т.е. происходят *пульсации скоростей*. Они влияют на значения касательных напряжений в турбулентном потоке и на соответствующие потери напора.

3. Потери напора на трение при равномерном движении жидкости: ламинарный режим, турбулентный режим движения жидкости

Коэффициент гидравлического трения можно определять экспериментальным и теоретическим путем.

1. *Определение теоретического значения коэффициента гидравлического трения.* Вопросу влияния различных факторов на значение коэффициента гидравлического трения λ посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ.

1. В области ламинарного режима ($Re < 2300$) коэффициент гидравлического трения λ зависит только от числа Рейнольдса Re и не зависит от шероховатости и определяется формулой:

$$\lambda_T = \frac{64}{Re}.$$

2. В области турбулентного режима ($Re > 2300$) коэффициент гидравлического трения λ зависит от двух параметров – числа Рейнольдса Re и эквивалентной шероховатости $\Delta_{\text{э}}$. В этой области режима возможны три случая:

а) При небольших скоростях движения жидкости бугорки шероховатости стенок трубопровода не выступают в турбулентное ядро потока, так как они покрыты ламинарным подслоем $\delta_L > \Delta_{\text{э}}$. Это зона *гидравлически гладких труб*.

В зоне *гидравлически гладких труб* коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda_T = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} \right)^{0,25} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}};$$

б) При увеличении скорости движения бугорки шероховатости начинают выступать в турбулентное ядро потока и эквивалентная шероховатость оказывает практически такое же влияние на коэффициент гидравлического трения, как и число Re . Это зона *гидравлически шероховатых труб*. В этой области коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda_T = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25};$$

в) При значительных скоростях движения толщина ламинарного слоя очень мала, все бугорки шероховатости находятся в турбулентном ядре, являются источниками образования вихрей и полностью определяют величину сопротивления трубопровода. В этом случае коэффициент гидравлического трения λ перестает зависеть от Re и полностью определяется шероховатостью стенок трубопровода. В этой области коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Шифринсона:

$$\lambda_T = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25}.$$

Зону абсолютно шероховатых труб часто называют зоной *квадратичных сопротивлений*, а зону гидравлически шероховатых труб – *доквадратичной*.

4. Местные гидравлические сопротивления.

Основные виды местных потерь напора можно условно разделить на следующие группы:

потери, связанные с изменением сечения потока. Сюда относятся случаи внезапного расширения, сужения, а также постепенного расширения и сужения потока;

потери, вызванные изменением направления потока. Сюда относятся различного рода колена, угольники, отводы, используемые на трубопроводах;

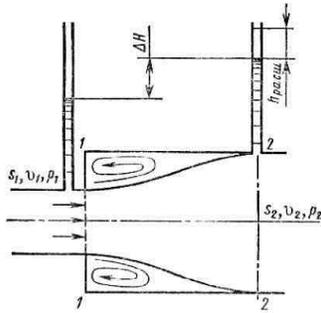
потери, связанные с протеканием жидкости через арматуру различного типа (вентили, краны, обратные клапаны, сетки, отборы, дроссель-клапаны и т. д.);

потери, связанные с отделением одной части потока от другой или слиянием двух потоков в один общий. Сюда относятся, например, тройники,

крестовины и отверстия в боковых стенках трубопроводов при наличии транзитного расхода.

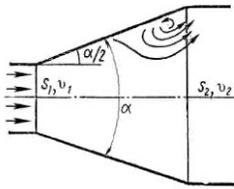
Рассмотрим простейшие местные сопротивления при турбулентном режиме течения в трубе.

1. *Внезапное расширение русла.* Потеря напора (энергии) при внезапном расширении русла расходуется на вихреобразование, связанное с отрывом потока от стенок, т.е. на поддержание вращательного непрерывного движения жидких масс с постоянным их обновлением.



$$h_{\text{расш}} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 \frac{v_2^2}{2g}$$

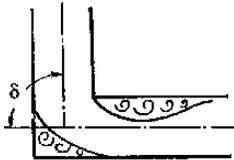
2. Постепенное расширение русла.



$$h_{\text{диф}} = \left[\frac{\lambda_T}{8 \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + k \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \right] \frac{v_1^2}{2g} = \xi_{\text{диф}} \frac{v_1^2}{2g}$$

4. Внезапный поворот трубы (колено).

$$h_{\text{кол}} = \xi_{\text{кол}} \frac{v^2}{2g}$$



5. Общая характеристика истечения. Истечение жидкости из отверстий различной конфигурации.

1. *Общая характеристика истечения. Истечение через малое незатопленное отверстие.*

Рассмотрим большой резервуар с жидкостью под давлением p_0 , имеющий малое круглое отверстие в стенке на достаточно большой глубине H_0 от свободной поверхности.

Когда боковые стенки и свободная поверхность не влияют на приток жидкости к отверстию, наблюдается *совершенное сжатие* струи, т.е. наибольшее сжатие в отличие от несовершенного.

Степень сжатия оценивается *коэффициентом сжатия*.

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_0} = \left(\frac{d_c}{d_0} \right)^2$$

Скорость истечения жидкости через такое отверстие получается

$$v = \varphi \sqrt{2gH}$$

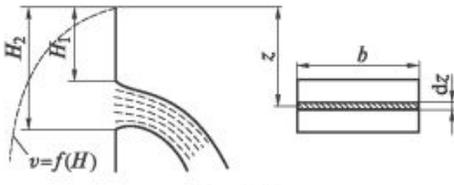
где H – напор жидкости, определяется как

$$H = H_0 + \frac{p_0 - p_1}{\rho g}$$

φ - коэффициент скорости $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}}$

При истечении струи в атмосферу из малого отверстия в тонкой стенке происходит изменение формы струи по ее длине, называемое *инверсией струи*.

2. Истечение из больших отверстий

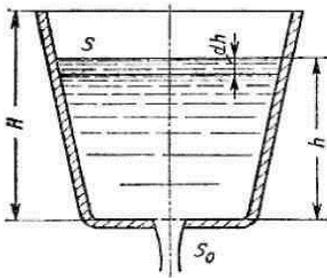


При определении расхода, вытекающего через прямоугольные отверстия больших размеров, встречающихся в плотинах, водозаборах, насосных станциях.

$$Q = \mu b \sqrt{2g} \int_{H_1}^{H_2} \sqrt{z} dz = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$$

3. Истечения при переменном напоре

Рассмотрим случай истечения из открытого в атмосферу сосуда при постоянно уменьшающемся напоре, при котором течение является неустановившемся.

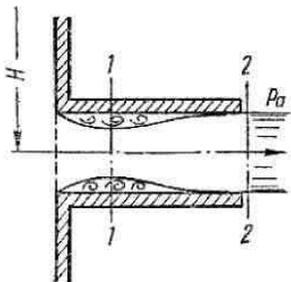


Отсюда время полного опорожнения сосуда высотой H

$$t = \frac{2SH}{S_0 \mu \sqrt{2gH}}$$

Из данного выражения следует, что время полного опорожнения призматического сосуда в два раза больше времени истечения того же объема жидкости при постоянном напоре, равном первоначальному.

6. Истечение жидкости через насадки.



Внешним цилиндрическим *насадком* называется короткая трубка длиной, равной нескольким диаметрам без закругления входной кромки. Истечение через такой насадок в газовую среду может происходить в двух режимах. Первый режим - *безотрывный режим*.

При некотором критическом напоре $H_{кр}$ абсолютное давление внутри насадка (сечение 1-1) становится равным нулю ($p_1 = 0$), и поэтому

$$H_{кр} \approx \frac{P_2}{0,75\rho g}$$

Следовательно, при $H > H_{кр}$ давление p_1 должно было бы стать отрицательным, но так как в жидкостях отрицательных давлений не бывает, то *первый режим движения становится невозможным*.

Поэтому при $H \approx H_{кр}$ происходит изменение режима истечения, переход от первого режима ко второму. Вторым режимом, *режим с отрывом*, характеризуется тем, что струя после сжатия уже не расширяется, а сохраняет цилиндрическую форму и перемещается внутри насадка, не соприкасаясь с его стенками.

При переходе от первого режима ко второму скорость возрастает, а расход уменьшается благодаря сжатию струи

7. Классификация трубопроводных систем и расходов.

В различных гидравлических системах жидкость передается по трубопроводам. При отсутствии энергетического обмена с внешней средой жидкость движется по трубопроводу вследствие того, что ее потенциальная энергия в начале трубопровода больше, чем в конце. Эта разность потенциальных энергий затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений между

рассматриваемыми сечениями трубопровода и, если изменяется его сечение, на изменение кинетической энергии жидкости.

Повышенная потенциальная энергия жидкости в начале трубопровода может создаваться за счет:

- 1) работы насоса — *насосная подача*;
- 2) повышенного давления газа на свободную поверхность жидкости в баке — *вытеснительная или баллонная подача*;
- 3) разности уровней жидкости — *самотечная подача*.

Назначение и классификация трубопроводов и расходов.

1. В зависимости от перекачиваемой жидкости
2. В зависимости от длины: короткие, длинные.
3. В зависимости от конфигурации: простые, сложные,

Выделяют следующие основные виды сложных трубопроводов: последовательное и параллельное соединения, разветвленные тупиковые сети, кольцевые сети, комбинированные сети.

При гидравлическом расчете сложной сети трубопроводов необходимо различать следующие *виды расходов*: сосредоточенный или узловой расход, транзитный расход, расчетный расход, путевой расход.

8. Гидравлический расчет трубопроводов.

Гидравлический расчет трубопроводов основан на следующих уравнениях, формулах и зависимостях:

– уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + \sum h_c = H = \text{const}$$

– уравнение неразрывности для установившегося потока жидкости (уравнение расхода)

$$Q = \nu \omega = \text{const}$$

– формула Дарси-Вейсбаха для учета потерь на трение (по длине трубопровода)

$$h_{\text{от}} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \text{или} \quad h_{\text{дл}} = i \ell$$

– формула для учета местных потерь

$$h_m = \xi_m \frac{v^2}{2g}$$

Вопросы для самопроверки:

1. Какие два режима движения жидкости вы знаете и каковы их характерные особенности?
2. Какие физические свойства жидкости и характеристики потока влияют на режимы движения жидкости?
3. Каким критерием оцениваются режимы движения жидкости?
4. Запишите и поясните критерий оценки для круглого сечения потока и потока произвольной формы.
5. Приведите примеры ламинарного и турбулентного режимов движения потока для жидкостей с различной вязкостью.
6. Как определяется граница между ламинарным и турбулентным режимами? Для каких целей введено критическое число Рейнольдса?
7. По какой формуле определяются потери напора по длине трубопровода и каков её физический смысл?
8. Что такое коэффициент гидравлического трения и по какой формуле он определяется при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости?
9. Какие трубы называются гидравлически гладкими и гидравлически шероховатыми?
10. По какой формуле определяются местные потери? Физический смысл потерь на местном сопротивлении?
11. Приведите пример местных сопротивлений.

12. В каких случаях применяется формула Борда для расчёта потерь на местных сопротивлениях?
13. Что понимается под тонкой стенкой, малым отверстием, большим отверстием?
14. Какие виды сжатия струи при истечении из отверстия в тонкой стенке вы знаете?
15. Какими коэффициентами характеризуется истечение жидкости из отверстий и какова между ними аналитическая связь?
16. Чем отличается формула расхода жидкости для незатопленного и затопленного отверстий?
17. Какие технические задачи решаются на основе гидравлического расчёта истечения жидкости?
18. По какой зависимости определяется коэффициент скорости опытным путём?
19. Какие поправочные коэффициенты применяются при расчёте φ и μ при несовершенном сжатии?
20. Какая задача решается при опорожнении ёмкостей и от каких факторов зависит её решение?
21. Что называется насадком и какие насадки вы знаете?
22. При каких условиях образуется сжатое сечение и на каком удалении от входа?
23. Что такое предельное (критическое) значение напора при истечении жидкости через насадки, и почему действительное значение меньше критического?
24. Назовите область применения цилиндрических и конических насадков и дайте им краткую характеристику.
25. Какова классификация трубопроводных систем?
26. Как производится расчет простых трубопроводных систем?

27. Как производится расчет сложных трубопроводных систем?
28. Что называется гидравлическим ударом? Каковы причины возникновения гидравлического удара?
29. Какие способы применяются при гашении гидравлического удара? Какие устройства используются в технике для этой цели? Приведите примеры.
30. Как влияет модуль упругости стенок трубопровода на давление гидравлического удара?
31. Напишите и поясните формулу повышения давления при прямом гидравлическом ударе?
32. Как влияет время закрытия задвижки на повышение давления при гидравлическом ударе?

ТЕМА 5. РУСЛОВАЯ ГИДРАВЛИКА. ВОДОСЛИВЫ. ОСНОВЫ ФИЛЬТРАЦИИ.

П л а н л е к ц и и :

- 1· У с т а н о в и в ш е е с я д в и ж е н и е ж и д к о с т и
в о т к р ы т ы х р у с л а х ·
- 2· В о д о с л и в ы ·
- 3· О с н о в ы ф и л ь т р а ц и и ·

Ц е л ь : И з у ч и т ь о с н о в ы д в и ж е н и я
ж и д к о с т и в о т к р ы т ы х р у с л а х и
в о д о с л и в а х · И з у ч и т ь о с н о в ы ф и л ь т р а ц и и
ж и д к о с т и ·

З а д а ч и :

- изучить установившееся движение жидкости в открытых руслах.;
- рассмотреть основные типы задач при расчете открытых каналов;
- изучить общие сведения о водосливах;
- изучить основы фильтрации.

1. Особенности равномерного движения жидкости в каналах.

Открытыми руслами являются потоки, имеющие свободную поверхность. В открытых руслах со свободной поверхностью, в трубопроводах, тоннелях, каналах замкнутого сечения с частичным заполнением сечения или при заполнении всего сечения, если давление на верхней образующей по длине трубопровода равно атмосферному, движение жидкости под действием составляющей силы тяжести является *безнапорным*.

По форме профиля поперечного сечения открытые русла подразделяются на русла правильной и неправильной формы.

По знаку продольного уклона дна русла открытые русла делятся на:

- русла с *прямым уклоном дна* ($i_0 > 0$), когда дно русла понижается в направлении потока;
- горизонтальные русла ($i_0 = 0$);
- *русла с обратным уклоном дна* ($i_0 < 0$), когда дно русла повышается в направлении движения жидкости.

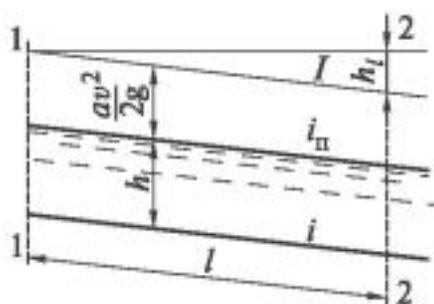
Канал – это искусственное русло (водовод) правильной формы с безнапорным движением воды, устроенное в грунте.

По назначению различают каналы судоходные (искусственные водные пути), энергетические (деривационные), оросительные (ирригационные), обводнительные, осушительные, водопроводные, лесосплавные, рыбоводные, комплексного назначения.

Форма канала зависят от его назначения, строительных свойств грунтов, условия производства земляных работ и др. *Наиболее распространённые формы сечений каналов, сооружаемых в мягких грунтах, – трапециевидальная и полигональная.*

Уклоны (заложения) откосов каналов устанавливают в зависимости от характера грунтов, с учетом угла естественного откоса и глубины выемки.

Рассмотрим поток в условиях равномерного движения в канале с уклоном i . Поверхность воли в канале имеет также уклон — пьезометрический уклон $i_{\text{п}}$. Для



равномерного движения эти уклоны равны, и, кроме того, они равны и гидравлическому уклону I .

Основной формулой для равномерного движения воды в каналах и руслах является *формула Шези:*

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}$$

$$V = C \sqrt{Ri}$$

2. Основные типы задач при расчете каналов.

При гидравлическом расчете каналов встречаются следующие основные типы задач.

Первый тип задач. Требуется определить пропускную способность Q канала (скорость протекания воды в нем V), если известны его размеры (b , h , m), коэффициент шероховатости n и уклон i .

Второй тип задач. Известными величинами являются b , h , m , i , необходимо определить глубину при заданном расходе Q_0 . Эта задача называется задачей о нормальной глубине.

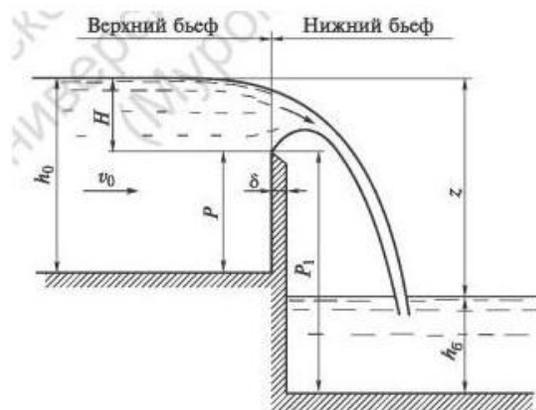
Третий тип задач. Требуется подобрать размеры поперечного сечения канала — ширину b и глубину h если известны Q , i и n .

3. Водосливы (общие сведения, водосливы с тонкой стенкой, с широким порогом, водосливы-водомеры).

Водослив, преграда (порог), через которую переливается поток воды; в гидротехнике водосливом называется водосброс со свободным переливом воды через его гребень.

Закономерности движения жидкости через водосливы имеют большое практическое значение. Гидравлический расчет плотин шлюзов, мостов, водопропускных труб ведется на основании теории водосливов.

Водосливы широко применяются в гидротехническом и дорожном строительстве (водосливные плотины, водосбросы, пороги водобойных колодцев и т.п.).



Часть потока, расположенная выше водослива, называется *верхним бьефом*, а ниже сооружения — *нижним бьефом*. Верхняя грань водослива, через которую происходит перелив жидкости из верхнего в нижний бьеф, называется *порогом, или гребнем водослива*.

P — высота порога водослива, представляющая возвышение порога над дном потока в верхнем бьефе сооружения;

b — ширина водослива (ширина водосливного отверстия);

δ — ширина порога (толщина стенки водослива);

B — ширина потока перед водосливом;

H — геометрический напор на пороге водослива, т.е. возвышение уровня воды верхнего бьефа над порогом;

h_0 – бытовая глубина (глубина уровня в нижнем бьефе);

z – перепад на водосливе, равный разности горизонтов воды в верхнем и нижнем бьефах;

Q – расход воды через водослив;

v_0 – средняя скорость движения воды при подходе к водосливу (подходная скорость):

$$v_0 = Q / [b(H + P)]$$

Классификация водосливов.

1. В зависимости от формы сливного порога, называемого гребнем водослива, различают следующие основные типы водосливов: водослив с тонкой стенкой, водослив с широким порогом, и водослив практического профиля.

2. По форме водосливного отверстия водосливы подразделяются на: прямоугольные, треугольные, трапецеидальные, криволинейные и др.

3. По условию работы водосливы рассматриваются с двух позиций: по характеру бокового сжатия потока и по характеру протекания воды в нижнем бьефе.

Расход через водослив можно рассчитать по формуле:

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}$$

Величина m_0 в этой формуле называется *коэффициентом расхода водослива с тонкой стенкой*. *Подходная скорость в формуле учитывается не полным напором H_0 , а коэффициентом расхода m_0 .*

4. Основы фильтрации.

Движение жидкости (воды, нефти) или газа (воздуха, природного газа) сквозь пористую среду в естественных пластах грунта под поверхностью земли называется *фильтрацией*. *Основной закон фильтрации, называемый законом*

Дарси, был установлен в 1852— 1855 гг. на основе опытов, проведенных с песчаным грунтом.

Учитывая взаимосвязь между скоростью и расходом, выражение для *скорости фильтрации*.

$$V = ki$$

Скорость фильтрации есть фиктивная скорость, так как при определении ее мы брали полную площадь сечения вместо площади твердых частиц.

Коэффициент фильтрации k , характеризующий водопроницаемость грунта, зависит от многих факторов: величины и формы частиц грунта, степени их однородности, температуры воды.

ТЕМА 5. ГИДРОМАШИНЫ И ГИДРОПРИВОДЫ

П л а н л е к ц и и :

1. Основные сведения о гидравлических машинах.
2. Гидроаппаратура.

Ц е л ь : Изучить основные сведения о гидромашинах и гидроприводах .

З а д а ч и :

- изучить основные сведения о гидравлических машинах;
- ознакомиться с характеристиками и принципами работы лопастных, вихревых и струйчатых насосов;
- ознакомиться с характеристиками и принципами работы поршневых насосов, роторных гидромашин, роторно-поршневых, винтовых гидродвигателей.
- изучить основные сведения о гидроприводе.

1. Гиромашины.

В различных отраслях промышленности большое значение имеет транспортирование жидких продуктов по трубопроводам. При перемещении жидкостей по горизонтальным трубопроводам и с низшего уровня на высшие применяют насосы и др. технические устройства.

Насосы – гидравлическая машина, преобразующая механическую энергию в энергию перемещаемой жидкости, повышая ее давление (создание напорного потока жидкости). Движущей силой при перемещении жидкостей в насосе и по трубопроводам является разность давлений.

По характеру силового воздействия, а следовательно, и по виду рабочей камеры все насосы подразделяются на две основные группы.

Объёмные насосы. В объёмном насосе силовое воздействие на жидкость происходит в рабочей камере, периодически изменяющей свой объём и попеременно сообщаемой с входом и выходом насоса. В соответствии с этим по форме движения рабочих органов насосы подразделяют на возвратно-поступательные (поршневые, плунжерные, диафрагменные) и вращательные, или роторные (шестерённые, винтовые и т.д.)

Динамические насосы. В динамическом насосе силовое воздействие на жидкость осуществляется в проточной камере, постоянно сообщаемой с входом и выходом насоса. Основной разновидностью динамических насосов являются лопастные и, в частности, центробежные насосы.

Насос и двигатель, соединенные друг с другом, называются *насосным агрегатом*. Насосный агрегат с трубопроводом и комплектующим оборудованием называется *насосной установкой*.

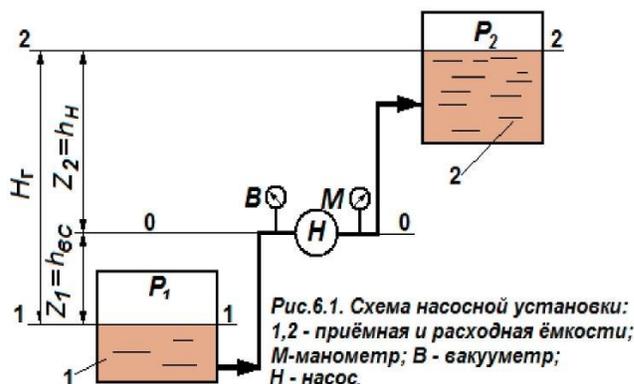


Рис.6.1. Схема насосной установки:
1,2 - приёмная и расходная ёмкости;
М - манометр; В - вакуумметр;
Н - насос.

Основные параметры насосов.

Производительность или подача - V (Q) ($\text{м}^3/\text{с}$ или $\text{м}^3/\text{ч}$)

определяется объемом жидкости, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод

Давление p , создаваемое насосом, определяется зависимостью

$$p = p_H - p_{BC} + \rho \frac{v_H^2 - v_{BC}^2}{2} + \rho g (z_H - z_{BC})$$

где p_H, p_{BC} - соответственно давления на выходе и на входе в насос;

v_H, v_{BC} - средние скорости движения жидкости на выходе и входе в насос;

z_H, z_{BC} - высота центров тяжести сечений на выходе и входе в насос.

Напор насоса H - разность удельных энергий при выходе из насоса и на входе в него, выраженная высотой столба перекачиваемой жидкости. Напор насоса связан с давлением насоса зависимостью

$$H = \frac{p}{\rho g}$$

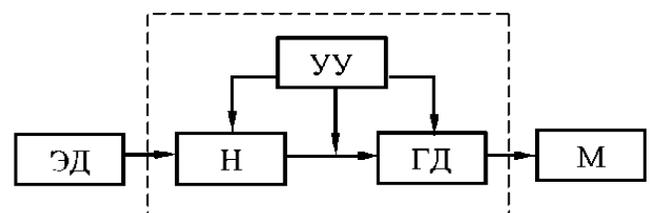
Полезная мощность - N_n - передаваемая жидкости насосом, равная удельной энергии (gH), умноженной на массовый расход жидкости $V\rho$.

$$N = V\rho gH$$

2. Гидроприводы

Гидравлический привод (гидропривод) - это совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством рабочей жидкости (гидравлической энергии).

Гидравлическая энергия генерируется насосом H и преобразуется гидродвигателем $ГД$ в механическую энергию. Устройства управления $УУ$ предназначены для изменения параметров потока в гидролиниях, а также в насосах и гидродвигателях. Гидропривод представляет собой «гидравлическую вставку» между приводным двигателем $ЭД$ (электродвигателем) и нагрузкой $М$ (машиной или механизмом) и выполняет те же функции, что и



механическая передача (ременная, цепная или зубчатая, редуктор, кривошипно-шатунный механизм).

В о п р о с ы д л я с а м о к о н т р о л я :

1. Что называется насосом?
2. Какие две группы насосов выделяют?
3. Что называется насосным агрегатом и насосной установкой?
4. Каковы основные параметры насосов?
5. Что называется гидроприводом? Каковы его основные параметры и характеристики?

МОДУЛЬ 2. ГАЗОДИНАМИКА.

ТЕМА 1. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА

П л а н л е к ц и и :

1. Исходные соотношения. Уравнение энергии. Критическая и максимальная скорости газа. Связь скорости газа с сечением потока.
2. Закон Обращения воздействия. Виды сопел реализующих сверхзвуковое течение газа. Сопло Лавалля. Режимы его работы.
3. Параметры изэнтропического торможения газа. Газодинамические функции. Истечение газа.
4. Одномерное течение газа с трением и энергообменом.
5. Диффузоры. Конфузоры. Эжекторы

Ц е л ь : Изучить процессы движения газов с различными скоростями и законы, описывающие это движение .

З а д а ч и :

- изучить основные понятия и характеристики, описывающие процесс течения газа по каналу;
- изучить уравнение энергии и уравнение связи скорости газа с сечением потока;
- изучить закон обращения воздействия;
- изучить виды сопел реализующих сверхзвуковое течение газа;
- уметь записывать закон обращения для каждого вида сопла;
- изучить процессы одномерного течения газа с трением и энергообменом.

1. Исходные соотношения.

Процессы в газовых потоках при больших скоростях течения, сравнимых со скоростью звука, приводят к изменению плотности газа. Движение газа с большими скоростями *изучается газовой динамикой*.

Как известно из курса термодинамики, основные параметры состояния идеального газа - давление p , плотность ρ и абсолютная температура T - связаны *уравнением состояния*

$$p/\rho = RT,$$

В большинстве задач, рассматриваемых газодинамикой, процессы изменения состояния газа можно считать *адиабатными*. При адиабатном процессе давление и плотность связаны соотношением

$$\frac{P}{\rho^k} = const, \text{ или } \frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^k,$$

где k - показатель адиабаты.

В задаче о движении газа в длинной трубе без теплоизоляции стенок процесс изменения состояния принимается *изотермическим*.

В трубе с абсолютно жесткими стенками скорость волны давления равна скорости распространения упругих колебаний (звука). Ее величина составляет для газа:

$$a = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}, \quad a = \sqrt{kRT}.$$

Скорость звука a - одна из важнейших механических характеристик газа. Законы его движения резко отличаются в зависимости от соотношения скорости газа w и скорости звука a . Отношение

$$M = \frac{w}{a}$$

называется *числом Маха*. Течения, в которых $w < a$ и $M < 1$, называются *дозвуковыми*. Если $w > a$ и $M > 1$, течение *сверхзвуковое*.

2. Уравнение энергии. Критическая и максимальная скорости газа.

Рассмотрим установившееся одномерное движение газа. Считаем, что газ не обменивается теплотой и работой с окружающими телами, трение отсутствует. В струйке одномерного течения скорость w и параметры газа p , ρ , T могут меняться по ее длине, оставаясь неизменными по сечению F . Уравнение энергии для одномерного течения газа в дифференциальной форме:

$$d\left(\frac{w^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} = 0.$$

Уравнение энергии в интегральной форме, или уравнение *Бернулли - Сен-Венана* :

$$\frac{w^2}{2} + \frac{kp}{\rho(k-1)} = const, \quad \frac{w^2}{2} + \frac{kRT}{k-1} = const.$$

Последнее равенство показывает, что при отсутствии теплообмена с внешней средой увеличение скорости вдоль струйки приводит к падению температуры газа, и наоборот. Температура максимальна в покоящемся газе (при $w = 0$); ее называют *температурой торможения* T^* .

Используя формулу для скорости звука, уравнение энергии можно также представить в виде

$$\frac{w^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = const,$$

откуда ясно, что скорость движения газа и скорость звука взаимосвязаны: увеличение скорости течения приводит к уменьшению скорости звука.

В покоящемся газе $w = 0$ и скорость звука уравнение энергии может быть представлено в виде

$$const = \frac{a_0^2}{k-1}, \quad \frac{w^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = \frac{a_0^2}{k-1}.$$

При ускорении газового потока и одновременном уменьшении скорости звука a наступает момент, когда они сравниваются; при этом достигается *критическая скорость* $a_{кр}$:

$$a_{кр} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k+1}} = \sqrt{\frac{2kRT^*}{k+1}}$$

С достижением критической скорости дозвуковой поток переходит в сверхзвуковой. Критическая скорость $a_{кр}$ в отличие от локальной скорости звука a остается постоянной вдоль струйки. Поэтому удобно измерять скорость течения в долях этой величины; так вводится безразмерная скорость газа иногда называемая также коэффициентом скорости.

$$\lambda = \frac{w}{a_{кр}},$$

При истечении газа в пустоту, когда $p \rightarrow 0$, его потенциальная энергия полностью переходит в кинетическую. В этом случае $T \rightarrow 0$, скорость становится максимальной:

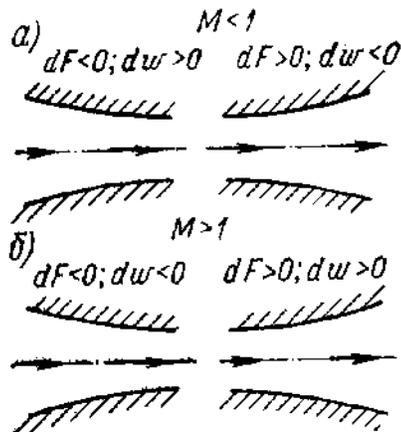
$$w_{max} = \sqrt{\frac{2kRT}{k-1}} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k-1}}$$

3. Связь скорости газа с сечением потока. Закон Обращения воздействия. Виды сопел реализующих сверхзвуковое течение газа.

Выясним зависимость скорости течения от площади F поперечного сечения потока.

$$\frac{dF}{F} = \frac{dw}{w} \left(\frac{w^2}{a^2} - 1 \right) = \frac{dw}{w} (M^2 - 1).$$

Из уравнения ясно, что изменение скорости при изменении сечения dF



происходит по-разному для дозвукового и сверхзвукового течения.

В дозвуковом потоке ($w < a$, $M < 1$) знаки dw и dF в противоположны: уменьшение сечения в сужающемся канале приводит к возрастанию скорости. Наоборот, в

расширяющемся канале скорость вниз по потоку уменьшается. При сверхзвуковом течении в сужающемся канале поток замедляется, в расширяющемся - ускоряется. Знаки dp и dw всегда противоположны: рост скорости приводит к уменьшению плотности.

Изменения условий течения газа, вызывающие соответствующие изменения параметров состояния потока, называются воздействиями. Существует пять видов воздействий:

1. Геометрическое воздействие изменение величины проходного сечения канала вдоль потока.
2. Расходное воздействие — изменение массового расхода газа в канале путем вдува (отсоса) дополнительной массы через боковую поверхность.
3. Механическое воздействие — обмен механической энергией в форме технической работы между потоком газа и окружающей средой.
4. Тепловое воздействие — подвод (отвод) тепла в поток.
5. Воздействие трением — учет влияния реально существующих сил вязкого трения в рамках модели идеального газа.

$$(M^2 - 1) \frac{d\omega}{\omega} = \frac{dF}{F} - \frac{dG}{G} - \frac{dL_{\text{тех}}}{a^2} - \frac{k-1}{a^2} dQ_{\text{вн}} - \frac{k}{a^2} dL_{\text{тр}},$$

Это состояние было установлено Вуллиссом Л.А. и получило название *условия обращения воздействия*.

где: $\frac{dF}{F}$ – геометрическое воздействие;

$\frac{dG}{G}$ – массовое воздействие;

$\frac{dL_{\text{тех}}}{a^2}$ – механическое воздействие;

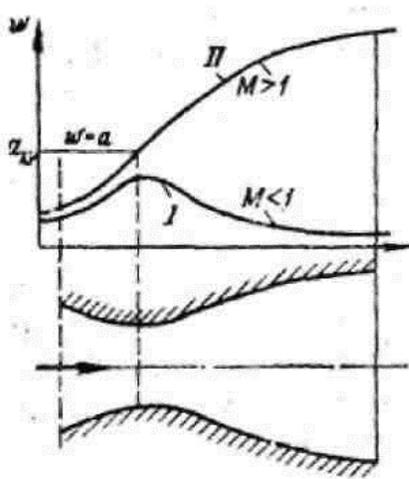
$\frac{k-1}{a^2} \cdot dQ_{\text{вн}}$ – тепловое воздействие;

$\frac{k}{a^2} dL_{\text{тр}}$ – влияние сил трения.

Особенность этого выражения заключается в том, что знак его левой части изменяется при переходе значения скорости через критическое ($M = 1$), поэтому характер влияния отдельных физических воздействий на газовое течение противоположен при дозвуковом и сверхзвуковом, режимах.

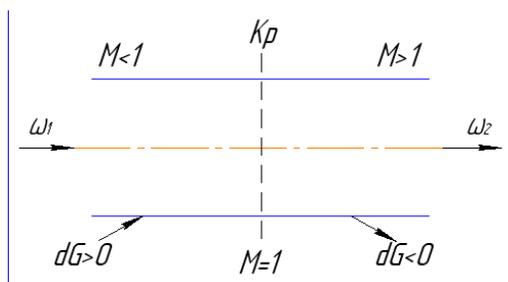
Аппарат, предназначенный для непрерывного увеличения скорости потока, называется *соплом*. В принципе, возможны четыре вида сопел, реализующих непрерывное ускорение газовых потоков с переходом через скорость звука за счет обращения соответствующих изолированных воздействий: геометрическое, расходное, механическое и тепловое.

Геометрическое сопло - *сопло Лавалья*, принцип действия которого ясен из приведенных рассуждений. В дозвуковом потоке, поступающем в сужающуюся часть сопла Лавалья, скорость увеличивается. Если в наименьшем сечении сопла



не достигается скорость, равная скорости звука, то в расширяющейся части происходит ее уменьшение; скорость по длине сопла изменяется по кривой *I*. Если перепад давления достаточно велик, чтобы в наименьшем сечении скорость течения сравнялась со скоростью звука, то при дальнейшем расширении поток переходит в сверхзвуковой, скорость его изменяется по кривой *II*.

Сопло Лавалья имеет широкое применение, являясь составной частью реактивных двигателей, сопловых аппаратов некоторых турбин (в которых рабочие лопатки обтекаются сверхзвуковым потоком), сверхзвуковых аэродинамических труб и т.д. Более полная теория сопла учитывает влияние

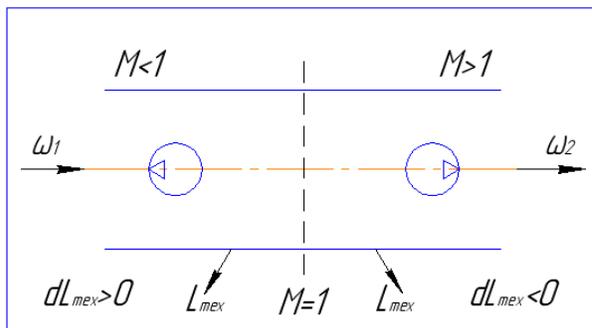


трения на стенках и волновых явлений на выходе потока.

В расходном сопле переход через скорость звука осуществляется за счёт изменения расхода газа в трубе постоянного сечения ($dF=0$) при отсутствии теплообмена с окружающей средой ($dQ_{\text{вн}}=0$), без совершения внешней работы ($dL_{\text{тех}}=0$) и без трения ($dL_{\text{тр}}=0$).

Ускорение газового потока в дозвуковой части канала достигается путём подвода дополнительной массы газа ($dG>0$) и отвода газа ($dG<0$) в сверхзвуковой части канала.

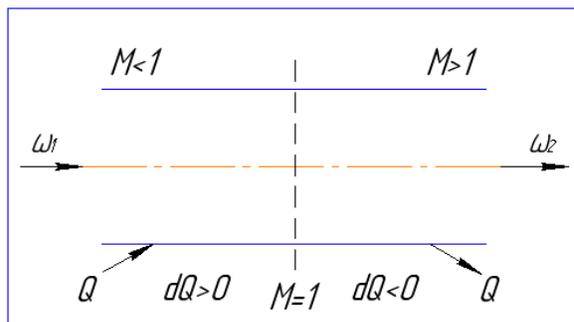
В механическом сопле перевод потока из дозвукового в сверхзвуковой осуществляется за счёт изменения технической работы ($dL_{\text{тех}} \neq 0$) при отсутствии других воздействий (т.е. $dF=0$, $dG=0$, $dQ_{\text{вн}}=0$, $dL_{\text{тр}}=0$).



Если газ совершает работу ($dL_{\text{тех}} > 0$), например на колесе турбины, то в дозвуковом режиме ($M<1$) он ускоряется ($d\omega>0$), а в сверхзвуковом ($M>1$) замедляется ($d\omega<0$). Таким образом сверхзвуковое механическое сопло должно

состоять из последовательно расположенных турбины (в области $M<1$) и компрессора (в области $M>1$) между которыми располагается критическое сечение.

В тепловом сопле переход газового потока через скорость звука осуществляется за счет теплового



воздействия при отсутствии всех прочих ($dF=0$, $dL_{\text{тех}}=0$, $dL_{\text{тр}}=0$, $dG=0$, $dQ \neq 0$).

Ускорение газового потока ($d\omega>0$) в дозвуковой части ($M<1$) можно обеспечить подводом теплоты ($dQ>0$), а в сверхзвуковой – отводом теплоты ($dQ<0$).

4. Параметры изоэнтропического торможения газа. Газодинамические функции

При торможении газа его кинетическая энергия переходит в потенциальную, при этом давление, плотность и температура возрастают. В случае полного торможения (остановки) потока, например в точке раздвоения струйки на передней поверхности обтекаемого тела, параметры p , ρ , T достигают максимальных для данного потока величин - *параметров торможения* p^* , ρ^* , T^* .

Переходя в формулах для параметров торможения газа от числа M к λ , получим соотношения:

$$\tau(\lambda) = \frac{T}{T^*} = \frac{1 - \lambda^2(k-1)}{k+1}; \quad \pi(\lambda) = \frac{p}{p^*} = \left[1 - \frac{\lambda^2(k-1)}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}}; \quad \varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho^*} = \left[1 - \frac{\lambda^2(k-1)}{k+1} \right]^{(k-1)}.$$

Эти формулы дают изменение параметров газа вдоль струйки в зависимости от скорости. Они носят название *газодинамических функций*.

5. Истечение газа

Исследуем истечение газа через сужающееся сопло из бака, где он находился под давлением p^* , в среду с противодавлением $p < p^*$.

Формула *Сен-Венана* и *Ванцеля* для скорости адиабатного истечения газа:

$$w = \sqrt{\frac{2kRT^*}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{2}} \right]}.$$

При постепенном уменьшении давления в среде, в которую вытекает газ, начиная от $p = p^*$, растет скорость истечения. Возрастание скорости в соответствии с уравнением энергии приводит к уменьшению местной скорости звука a .

Наконец, при достаточно малом давлении среды

$$p = p_{кр} = p^* \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

называемом *критическим давлением*, скорость истечения достигает максимума, она сравнивается с местной скоростью звука; устанавливается *критическая скорость* потока $a_{кр}$.

Вследствие потерь энергии на трение реальная скорость истечения газа немного меньше (на 1...3%), чем теоретическая. Массовый расход газа через сопло определяется соотношением

$$G = \mu \rho w F,$$

где μ - коэффициент расхода.

6. Одномерное течение газа с трением и энергообменом.

Изотермическое течение в трубах.

Этот вопрос важен для расчета длинных газопроводов, в которых температура перекачиваемого газа близка к температуре окружающей среды. Вдоль трубопровода давление и плотность уменьшаются, скорость возрастает.

Формула для *массового расхода газа при изотермическом течении*:

$$G = F \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{RT \frac{\lambda_w l}{D} + 2 \ln \frac{p_1}{p_2}}}.$$

Анализ показывает, что если во входном сечении трубы скорость газа дозвуковая ($M_1 < 1$), то в выходном сечении число M_2 возрастает и может достигнуть единицы. Если длина трубы равна критической, то при понижении давления в конце трубы расход не увеличивается.

Адиабатное течение в трубах.

В случае короткого трубопровода, когда газ не успевает обменяться теплотой со стенками, или при наличии тепловой изоляции полная энергия газа по длине трубы остается постоянной; работа, расходуемая на трение, полностью переходит в теплоту, идущую на нагрев газа. Понижение температуры по

сравнению с начальным сечением зависит только от скорости в данном сечении, и не зависит от сопротивления.

В дозвуковом потоке нагревание газа вследствие трения приводит к уменьшению плотности; из-за постоянства массового расхода скорость при этом возрастает. Это возрастание возможно вплоть до величины скорости звука $a_{кр}$, которая может иметь место в выходном сечении трубы при достаточно большой начальной скорости w_1 и достаточно малой длине трубы l . При этом в конце трубы наблюдается резкое падение давления.

Течение газа с энергообменом.

Во многих случаях течение газа сопровождается обменом механической энергией и теплотой с окружающими телами. Например, при подаче воздуха в газотурбинный двигатель к нему подводится техническая работа сжатия l_k в компрессоре и теплота сгорания топлива q в камере сгорания. Кроме того, выделяется теплота трения $l_{тр}$. При энергообмене газа уравнение энергии, выведенное для энергетически изолированного течения, необходимо дополнить соответствующими членами.

При подводе теплоты к дозвуковому потоку газа в трубе его скорость увеличивается вплоть до $M = 1$. Дальнейшее увеличение скорости за счет подвода теплоты невозможно. Однако сверхзвуковой поток ускоряется за счет отвода теплоты. Поэтому если в трубе за критическим сечением, где скорость течения звуковая, организовать отвод теплоты, то можно получить сверхзвуковую скорость. На этом принципе основано устройство «теплового сопла».

В о п р о с ы д л я с а м о к о н т р о л я :

2. Каковы основные соотношения, описывающие процессы в газовых потоках при больших скоростях течения?
3. Какая величина называется скоростью звука? Как она определяется через параметры газа?
4. Какая величина называется числом Маха?
5. Запишите уравнение энергии одномерного течения газа в дифференциальной и интегральной форме.
6. Какова связь скорости газа с сечением потока?
7. Запишите закон Обращения воздействия.
8. Какие существуют виды сопел реализующих сверхзвуковое течение газа?
9. Как записывается закон обращения воздействия для геометрического сопла? Как происходит процесс течения газа в нем? Какие процессы при этом происходят?
10. Как записывается закон обращения воздействия для механического сопла? Как происходит процесс течения газа в нем? Какие процессы при этом происходят?
11. Как записывается закон обращения воздействия для расходного сопла? Как происходит процесс течения газа в нем? Какие процессы при этом происходят?
12. Как записывается закон обращения воздействия для теплового сопла? Как происходит процесс течения газа в нем? Какие процессы при этом происходят?
13. Какие параметры газа называются параметрами торможения? Что такое газодинамические функции?

14. Какие процессы сопровождают истечение газа из резервуара в пустоту? Какими законами описывается этот процесс истечения?

15. Опишите процессы одномерного течения газа с трением и энергообменом.

ТЕМА 2. ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

П л а н л е к ц и и :

1. Волны разрежения.
2. Основные представления о скачках уплотнения.

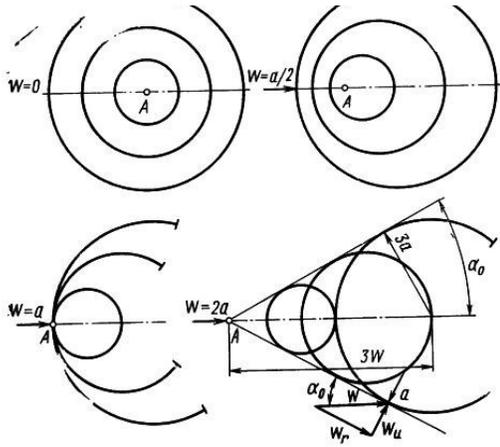
Ц е л ь : Изучить процессы в газах, связанные с возникновением волн разрежения и скачков уплотнения.

З а д а ч и :

- изучить процесс распространения звуковых волн в газах и условия возникновения волн разрежения;
- изучить течения Прандтля-Майера;
- ознакомиться с основными представлениями о скачках уплотнения;
- изучить основные соотношения для прямого скачка уплотнения;
- изучить процессы изменения параметров газа при переходе через скачки уплотнения.

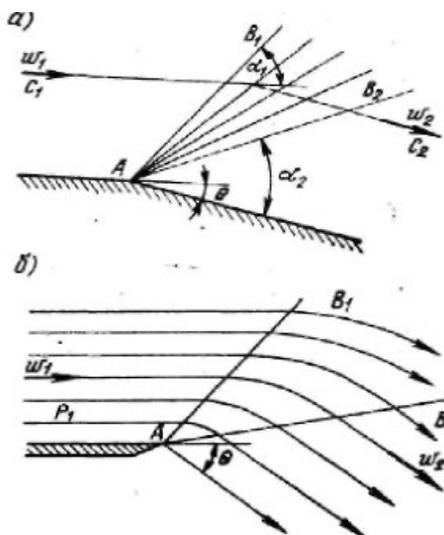
1. Волны разрежения

В неподвижном газе малые возмущения давления распространяются со скоростью звука. Сферические волны давления сносятся потоком от источника



возмущений. Относительно неподвижного обтекаемого тела возмущения распространяются вниз по потоку со скоростью $a + w$, а вверх - со скоростью $a - w$.

При дозвуковой скорости потока $w < a$ возмущения от препятствия распространяются во все стороны, в том числе и вверх по потоку. Волны давления, идущие вверх по течению, несут потоку информацию об источнике возмущений, «подготавливают» его к предстоящей встрече с препятствием. В сверхзвуковом потоке возмущения давления вверх по течению не распространяются. Последовательные возмущения от источника A сносятся вниз по потоку; сферические волны возмущений заполняют конус с вершиной в точке A , расходящийся вниз по течению. До встречи с этим конусом возмущений поток не получает информации о препятствии, линии тока не искривлены. Угол α при вершине конуса, называемый *углом возмущений* или *углом Маха*.



Слабые волны возмущения называют *характеристиками сверхзвукового потока*. В равномерном потоке характеристики прямолинейны, угол их наклона тем меньше, чем больше скорость.

Рассмотрим сверхзвуковое обтекание плоской стенки с внешним тупым углом. У точки A поток расширяется, поворачиваясь на

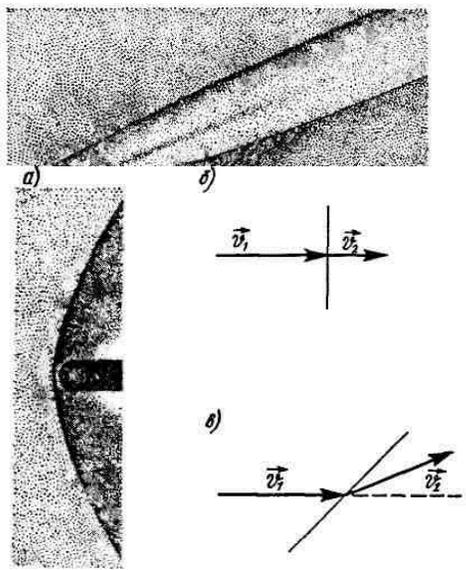
угол Θ . Скорость его увеличивается, давление, плотность, температура падают. Линия возмущения (характеристика) AB для набегающего потока расположена под углом α_1 . Для ускоренного и повернутого на угол Θ потока линия возмущения от вершины угла A - это характеристика AB_2

Внутри угла B_1AB_2 расположена волна разрежения, в которой линия тока C_1C_2 плавно поворачивает на угол Θ . Параметры потока непрерывно изменяются внутри волны разрежения. Вдоль любой характеристики AB в пучке, размещенном между линиями AB_1 и AB_2 , параметры газа остаются постоянными, независимыми от расстояния до вершины угла A . Такие течения называются *течениями Прадтля-Майера*. Подобная волна разрежения образуется и при сверхзвуковом истечении газа в среду с пониженным давлением $p_2 < p_1$.

2. Основные представления о скачках уплотнения

При достаточно сильном (конечном) повышении давления (при торможении сверхзвукового потока) в газовом потоке возникают поверхности, называемые *скачками уплотнения или ударными волнами*, на которых параметры газа меняются очень быстро на расстоянии порядка длины свободного пробега молекулы, т. е. при нормальных условиях - порядка микрометра. В скачке уплотнения сверхзвуковая скорость потока прерывно переводится в дозвуковую.

На рис. показаны скачки уплотнения, возникающие при обтекании остроносого тела сверхзвуковым потоком. В этом случае при определенных условиях скачок начинается на острой кромке тела и называется *присоединенным скачком уплотнения*.



Во многих случаях скачок уплотнения образуется на некотором расстоянии от носовой части обтекаемого тела и имеет криволинейную форму. Такой скачок уплотнения называется

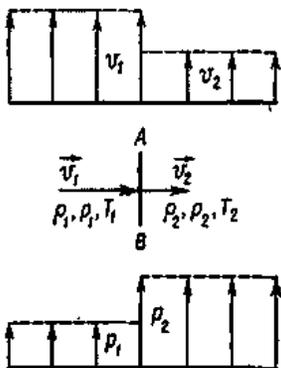
отсоединенным (отошедшим). Поверхности скачков уплотнения могут быть перпендикулярными направлению скорости набегающего потока, и не перпендикулярными ей.

В первом случае скачок уплотнения называется *прямым*, а во втором - *косым*. В прямом скачке уплотнения сверхзвуковой поток ($M > 1$) всегда переходит в дозвуковой ($M < 1$).

В скачках уплотнения происходит торможение потока - скорость потока уменьшается ($V_2 < V_1$), давление, плотность, температура, энтальпия возрастают ($p_2 > p_1$, $\rho_2 > \rho_1$, $T_2 > T_1$, $i_2 > i_1$). При этом увеличивается и энтропия, так как в скачках уплотнения происходят необратимые переходы механической энергии в тепловую.

Поэтому для уменьшения потерь всегда стремятся заменить прямые скачки косыми. Например, крылья сверхзвуковых самолетов делают тонкими и заостренными спереди. Входные кромки турбинных лопаток, обтекаемых сверхзвуковым потоком, также заостряют. В этом случае прямые скачки заменяются косыми и потери энергии уменьшаются.

3. Основные соотношения для прямого и косого скачка уплотнения.



Рассмотрим основные свойства скачков уплотнения.

Параметры состояния газа до скачка p_1 , ρ_1 , T_1 и скорость V_1 , а после скачка — p_2 , ρ_2 , T_2 , V_2 . Характер изменения скорости и давления в прямом скачке уплотнения.

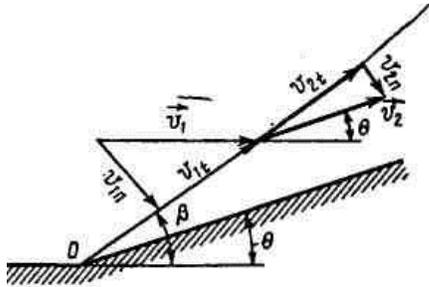
В скачке уплотнения $V_2 \neq V_1$. Формула для определения скорости потока за скачком уплотнения:

$$V_1 V_2 = \frac{k-1}{k+1} V_{max}^2 \text{ или } V_1 V_2 = a_{кр}^2$$

Выражение называется *формулой Прандтля*.

Обозначим приведенную скорость до скачка уплотнения λ_1 , за скачком — λ_2 . Тогда $\lambda_1 \cdot \lambda_2 = 1$

В полученных формулах скорость потока до скачка уплотнения сверхзвуковая. Поэтому скорость за скачком уплотнения всегда меньше скорости звука. Следовательно, при переходе через прямой скачок уплотнения сверхзвуковой поток становится дозвуковым.



Параметры потока за косым скачком уплотнения.

Косой скачок уплотнения - это скачок нормальной составляющей скорости.

Тогда для нормальной составляющей скорости за косым скачком уплотнения:

$$V_{1n}V_{2n} = a_{кр}^2 - \frac{k-1}{k+1}V_t^2$$

где

$$V_{1n} = V_1 \sin \beta \quad V_t = V_1 \cos \beta$$

Из выше представленной формулы следует, что значение нормальной составляющей скорости потока V_{2n} зависит от V_1 и угла наклона скачка уплотнения, причем $V_{2n} < a_2$. При сравнительно слабых косых скачках уплотнения (при малых углах β касательная составляющая скорости по величине мало отличается от V_1 . Поэтому скорость V_2 может быть больше скорости звука. При сильных косых скачках уплотнения с углом β близким к $\pi/2$, скорость потока за скачком уплотнения дозвуковая. Следовательно, в зависимости от угла β поток за косым скачком уплотнения может быть как сверхзвуковым, так и дозвуковым.

В о п р о с ы д л я с а м о к о н т р о л я :

1. Опишите процесс распространения волн давления при различных скоростях движения газа.

2. Какими параметрами описывается процесс сверхзвукового обтекания газом твердого тела?
3. Что называется характеристиками сверхзвукового потока? Как меняются параметры газа при переходе от одной характеристики к другой?
4. Какие течения газа называются течения называются течениями Прадтля-Майера?
5. Что называется скачком уплотнения? Какие бывают виды скачков уплотнения?
6. Как меняются параметры газа при переходе через прямые скачки уплотнения? Какие закономерности эти процессы описывают?
7. Как меняются параметры газа при переходе через косые скачки уплотнения? Какие закономерности эти процессы описывают?
8. Что такое ударная поляра?

ТЕМА 3. ТЕОРИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

П л а н л е к ц и и :

1. Понятие о пограничном слое.
2. Ламинарный, переходной и турбулентный режимы течения в пограничном слое.
3. Расчет пограничного слоя.
4. Пограничный слой при наличии продольного градиента давления. Отрыв потока.
5. Управление пограничным слоем.

Ц е л ь : О з н а к о м и т ь с я с п о н я т и е м
п о г р а н и ч н о г о с л о я и и з у ч и т ь з а к о н ы ,

описывающие процессы происходящие в пограничном слое.

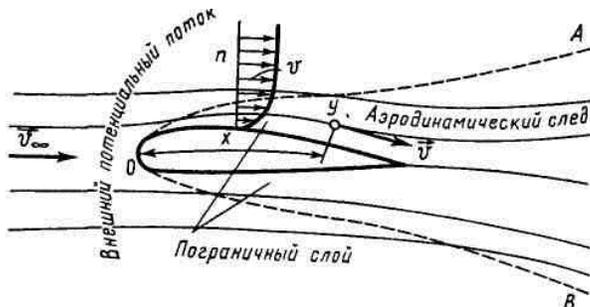
Задачи :

- изучить понятие о пограничном слое и его основные характеристики;
- ознакомиться с режимами течения в пограничном слое;
- изучить дифференциальные уравнения и интегральные соотношения пограничного слоя в несжимаемой и сжимаемой среде;
- ознакомиться с методами расчета пограничного слоя;
- ознакомиться с явлениями, происходящими в пограничном слое при наличии продольного градиента давления и условием отрыва потока;
- изучить методы управления пограничным слоем.

1. Понятие о пограничном слое

Решение задачи об обтекании какого-либо тела, сводящееся к решению дифференциальных уравнений Навье-Стокса при заданных граничных условиях, представляет трудности не только для случая вязкого газа, но и для несжимаемой вязкой жидкости. Существует ряд методов упрощения, однако они в основном применимы при малых значениях числа Рейнольдса. Другой метод упрощения уравнений Навье-стокса, принципиально отличающийся от этих методов, основан на понятии о пограничном слое. Как показано ниже, он позволяет построить приближенную теорию отекания тела, и в частности, определить силу сопротивления тела в потоке вязкой среды.

Непосредственные наблюдения показывают, что в тонком слое вблизи поверхности тела скорость потока резко нарастает — от значения $V = 0$ (на



поверхности тела) до величины порядка скорости набегающего

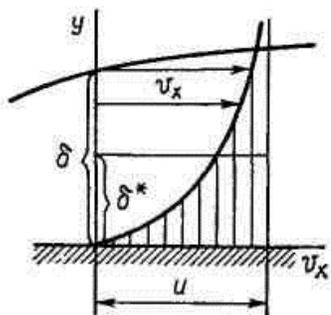
потока. Тонкий слой газа, прилегающий к поверхности обтекаемого тела и представляющий собой область больших значений градиентов скорости по нормали к телу, называют *пограничным слоем*.

Опыт показывает, что толщина пограничного слоя весьма мала по сравнению с размерами обтекаемого тела. Пространство, занятое потоком, можно условно разбить на три области. Первую область занимает пограничный слой, в котором скорость течения меняется от нуля на поверхности тела до скорости невозмущенного потока на границе слоя. Частицы газа в пограничном слое, пройдя вдоль поверхности обтекаемого тела, уносятся потоком. Скорости этих частиц, как правило, меньше скорости в окружающей среде. Заторможенные частицы образуют за телом область, называемую *аэродинамическим следом* - вторая область. Третья область - это остальное пространство, занятое потоком, в котором жидкость можно считать идеальной, а движение - происходящим без вращения частиц, т.е. потенциальным.

Внутри пограничного слоя среду следует рассматривать как вязкую и изучать ее движение с помощью уравнений движения вязкой среды.

2. Интегральные характеристики пограничного слоя.

Толщина пограничного слоя — величина условная. Обычно за толщину пограничного слоя δ в данной точке поверхности принимают расстояние от тела до такой точки, в которой действительная скорость потока отличается от скорости в невязком потоке на 1 %.



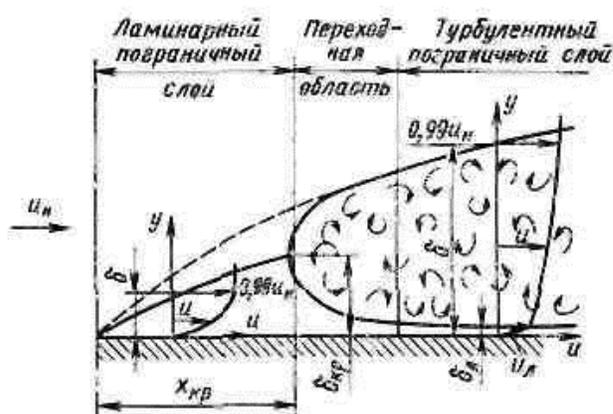
Величина δ^* представляет собой условную толщину некоторого слоя, сквозь сечение которого в единицу времени и при постоянной во всех точках сечения скорости u протекает количество жидкости, равное указанному выше уменьшению расхода. Эта величина получила название *толщины вытеснения*.

Толщина потери импульса δ^{**} . представляет собой условную толщину некоторого слоя, сквозь сечение которого в единицу времени с постоянной скоростью U переносится количество движения $\bar{\rho}U^2\delta^{**}$, равное указанному уменьшению импульса:

3. Ламинарный, переходной и турбулентный режимы течения в пограничном слое.

Течение в пограничном слое на стенке может быть ламинарным, переходным и турбулентным, независимо от режима течения невозмущенного потока. Имеется много общего между течениями в трубе и в пограничном слое на стенке.

Переход ламинарного течения в турбулентное будет также определяться критическим числом Рейнольдса $Re_{\delta_{кр}} = (2,8.. 30) 10^3$. Разница заключается в том, что вдоль достаточно длинной пластины режим течения в пограничном слое изменяется.



Слоистое, ламинарное течение жидкости в пограничном слое наблюдается лишь на начальном участке обтекаемой поверхности.

При увеличении толщины ламинарного пограничного слоя до критической величины при расстоянии $x_{кр}$ устойчивость ламинарного течения в пограничном слое нарушается и появляется участок переходного течения, где хаотически во времени сменяются ламинарный и турбулентный режимы течения. Существенное влияние на переход оказывает степень турбулентности набегающего потока, продольный градиент давления dp/dx и различные возмущения.

Критическая точка на поверхности тела, где начинается переход ламинарного течения внутри пограничного слоя в турбулентное, называется *точкой перехода*.

Механизм трения в турбулентном пограничном слое, как и в случае гидравлического сопротивления труб, зависит от величины числа Рейнольдса и шероховатости поверхности.

Факторы, влияющие на турбулизацию пограничного слоя. Увеличение интенсивности пульсаций во внешнем потоке способствует ранней турбулизации пограничного слоя. Повышение скорости вниз по течению в конфузоре канале угнетает развитие пограничного слоя и способствует его ламинизации, величина критического числа Рейнольдса возрастает. Наоборот, переход к диффузорному течению способствует ранней турбулизации пограничного слоя.

4. Расчет пограничного слоя

Решение задачи об обтекании плоской пластинки в теории сопротивления трения имеет большое значение. Задача расчета пограничного слоя в несжимаемом потоке сводится к определению закона изменения толщины пограничного слоя, т. е. к функции $\delta = \delta(x)$, и силы сопротивления трения.

Основные параметры пограничного слоя на плоской пластинке определяются наиболее просто. Решения для ламинарного пограничного слоя имеют вид:

$$\delta = \frac{4.90x}{\sqrt{Re_x}}; \tau = \frac{0.332}{\sqrt{Re_x}} \rho w_{\infty}^2,$$

где Re_x - местное число Рейнольдса.

Коэффициент сопротивления $C_{тр}$ для *ламинарного* пограничного слоя на пластинке

$$C_{тр.л} = \frac{1,328}{\sqrt{Re_l}}.$$

где Re_l - местное число Рейнольдса для $x = l$.

Для *турбулентного* пограничного слоя на плоской пластинке толщина слоя и касательное напряжение трения τ определяются формулами

$$\delta = \frac{0.37x}{\sqrt[5]{Re_x}}, \quad \tau = \frac{0.0578}{\sqrt[5]{Re_x}} \cdot \frac{\rho w_\infty^2}{2}.$$

Коэффициент сопротивления трения пластинки в случае турбулентного пограничного слоя выражается

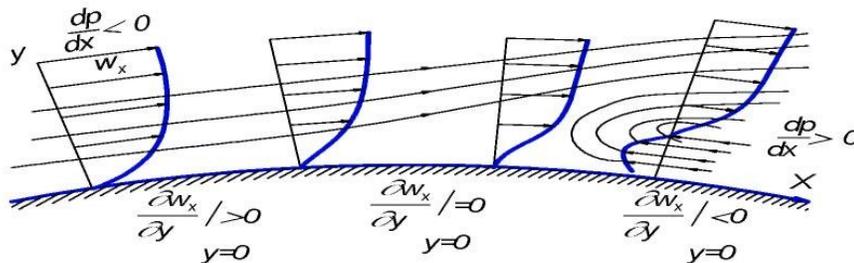
$$C_{тр \tau} = \frac{0.074}{\sqrt[5]{Re}}.$$

Однако в действительности пограничный слой вблизи передней кромки остается ламинарным и становится турбулентным только на некотором расстоянии от передней кромки. Такой слой принято называть *смешанным*.

5. Пограничный слой при наличии продольного градиента давления. Отрыв потока.

Давление в пограничном слое криволинейной поверхности также функция x . Так как на поверхности профиля скорость сначала возрастает, а затем убывает, то давление сначала уменьшается, а затем возрастает. Следовательно, частицы газа в пограничном слое около криволинейной поверхности движутся при наличии градиента давления dp/dx , как отрицательного, так и положительного по знаку.

В пограничном слое давление мало отличается от давления во внешнем потоке. Однако в непосредственной близости от поверхности тела из-за влияния вязкости скорость, а следовательно, и кинетическая энергия частиц малы.



В кормовой части тела кинетической энергии частиц вблизи поверхности может оказаться недостаточно для преодоления положительного градиента давления.

Жидкость в этой области движется против подтормаживающего действия перепада давления. В случае, когда жидкость вязкая, она теряет в пограничном слое свою механическую энергию на трение. Поэтому встречный перепад давления вызывает сначала остановку, а затем и *попятное* движение жидкости в пограничном слое (пограничный слой как бы выдавливается навстречу основному потоку). При встрече прямого и попятного течения (точка S) линии тока оттесняются от поверхности тела, толщина пограничного слоя резко увеличивается, а затем происходит его *отрыв* от поверхности тела. При этом масса газа, движущегося в пограничном слое против направления основного потока, образует вихрь.

Точка S , в которой $(dV_x/dy)_{y=0} = 0$, называется *точкой отрыва потока*. Положение точки отрыва зависит прежде всего от значения положительного градиента давления.

Отрыв пограничного слоя зависит также от режима течения газа. В случае турбулентного пограничного слоя отрыв потока затягивается, так как скорость частиц газа вблизи стенки в турбулентном пограничном слое оказывается больше, чем в ламинарном слое. Поэтому турбулентный пограничный слой может более успешно противостоять большим градиентам давления.

Отрыв пограничного слоя и образование зоны пониженного давления в вихревом следе за кормовой частью приводит к появлению силы лобового сопротивления, величина которой определяется шириной аэродинамического следа и степенью понижения давления в нем. Эти факторы существенно зависят от формы обтекаемого тела, поэтому сопротивление от разности давлений иногда называют *сопротивлением формы*.

Как показано выше, сопротивление давления из-за разности давлений в лобовой и кормовой частях появляется вследствие отрыва, т. е. опять-таки определяется характеристиками пограничного слоя. Поэтому проблема *управления*

пограничным слоем (УПС) является одной из основных проблем в теории силового взаимодействия потока с обтекаемым телом.

Наиболее перспективный путь решения задачи уменьшения полного лобового сопротивления - это уменьшение сопротивления давления. Задача решается приданием телу *удобообтекаемой* формы, при которой отрыва пограничного слоя нет или в крайнем случае сечение отрыва смещено по возможности ниже по потоку. Возможно управление пограничным слоем и другим способом. Искусственная ламинаризация пограничного слоя заключается в увеличении абсциссы точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный для уменьшения трения и тепло-, массообмена между поверхностью тела и потоком жидкости. Она заключается в уменьшении толщины пограничного слоя, интенсивности турбулентности набегающего потока, градиента давления $dp/dx > 0$ и высоты гребешков шероховатости.

Наиболее эффективными методами уменьшения толщины ламинарного пограничного слоя является охлаждение обтекаемой стенки (поверхности крыла топливом), удаление с поверхности тела наиболее заторможенных слоев пограничного слоя сдувом пограничного слоя перед ожидаемой точкой перехода его в турбулентный, а также уменьшением $dp/dx > 0$ за счет применения ламинаризованных профилей, в которых диффузорная часть отнесена к корме.

В о п р о с ы д л я с а м о к о н т р о л я :

1. Что называется пограничным слоем? Где он возникает и при каких условиях? Какую роль он играет при рассмотрении движения газа?
2. Какие характеристики используются для описания пограничного слоя?
3. Какие режимы течения наблюдаются в пограничном слое?
4. Какие изменения происходят в режимах течения в пограничном слое при изменении скорости набегающего потока?
5. Перечислите факторы, влияющие на турбулизацию пограничного слоя.

6. Как производится расчет пограничного слоя только при ламинарном режиме течения?
7. Как производится расчет пограничного слоя только при турбулентном и смешанном режимах течения?
8. Какие процессы наблюдаются в пограничном слое при наличии продольного градиента давления?
9. Как происходит отрыв потока?
10. Какие существуют способы управления пограничным слоем?

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

2.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы

Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадами, состоящими из 3-4 студентов. График выполнения лабораторных работ формируется преподавателем в начале каждого семестра и представляется студентам на первом аудиторном занятии лабораторного практикума. Выполнение лабораторных работ выполняется в два этапа – по модулям и предполагает значительную самостоятельную работу как на этапе предварительной подготовки к работе, так и при выполнении работы, оформлении отчета и подготовки к «защите» работы.

Подготовка к лабораторной работе осуществляется студентом *до аудиторных занятий*, в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 3.3).

Студент обязан приходить на занятие подготовленным. Наличие «заготовки» к лабораторной работе является обязательным условием допуска студента к выполнению лабораторной работы.

Студенты, не имеющие подготовки, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

2.2 Выполнение лабораторной работы в лаборатории

На выполнение каждой лабораторной работы отводится 2 часа аудиторного времени, в это время включается: получение допуска к работе, выполнение необходимых измерений и «защита» работы выполненной на предыдущем занятии.

Перед выполнением работы преподаватель проверяет степень подготовленности каждого студента. Для этого студент должен предоставить

«заготовку» отчета в индивидуальном лабораторном журнале ответить на следующие вопросы:

– Какова цель экспериментальной задачи? Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?

– Каков принцип работы экспериментальной установки? Перечислите основные этапы эксперимента.

Получив допуск к выполнению лабораторной работы, студент должен ознакомиться с измерительными приборами, используемыми в процессе выполнения работы, получить у лаборанта необходимое дополнительное оборудование, подготовить оборудование к проведению эксперимента согласно методическому руководству. После чего предъявить подготовленное к работе оборудование для проверки лаборанту или преподавателю. Только после получения разрешения от преподавателя или лаборанта можно приступить к выполнению измерений.

При выполнении работы следует соблюдать правила техники безопасности, обращаться с приборами и оборудованием следует бережно и аккуратно, применять приборы только в соответствии с их назначением.

Выполнив все измерения, выключить установку, предъявить преподавателю результаты измерений для проверки. Если при записи результатов или в ходе эксперимента была допущена ошибка, опыт повторяется вновь. Если результаты удовлетворительны, преподавателем делается отметка о выполнении студентом лабораторной работы (ставится подпись и дата в отчете студента).

Отчеты без подписи преподавателя в дальнейшем к «защите» не принимаются.

После подписи результатов преподавателем, студенту необходимо привести лабораторную установку в исходное состояние, сдать лаборанту выданное дополнительное оборудование и привести в порядок рабочее место.

2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы

Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы осуществляется студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 3.3). После оформления отчета студент готовится к «защите» лабораторной работы, изучая теоретические основы данной темы, ориентируясь на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях. Для получения зачета по лабораторной работе студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и «защищает» его в ходе последующего собеседования.

2.4 Наименование предлагаемых к выполнению лабораторных работ и методические указания к ним

Перечень рекомендуемых лабораторных работ.

Модуль 1. Гидромеханика

1. Исследование относительного покоя жидкости во вращающемся сосуде.
2. Определение критического значения числа Рейнольдса при течении жидкости в трубе круглого поперечного сечения.
3. Изучение закона сохранения энергии при течении жидкости по трубопроводу переменного сечения.
4. Определение потерь напора при внезапном расширении.
5. Определение коэффициента гидравлического трения.

Методические указания по выполнению выше перечисленных лабораторных работ представлены в пособии Гидрогазодинамика [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие по выполнению лаб. работ. Ч. 1. Гидромеханика / АмГУ, ИФФ ; сост.: И. В. Верхотурова, О. А. Агапьятова. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2017. - 82 с.

Режим доступа: http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/7766.pdf

В пособие включены общие сведения о лабораторных установках и пять лабораторных работ. Каждая работа содержит теоретический материал, методику эксперимента, указания по выполнению эксперимента и обработке результатов измерений, контрольные вопросы, а также список рекомендуемой учебной литературы.

Модуль 2. Газодинамика

1. Изучение приборов и методов определения давления.
2. Изучение метода определения расхода воздуха по изменению давления в отсеченном объеме.
3. Исследование потерь напора на местном сопротивлении – регулируемой задвижке (дресселе).
4. Изучение закона сохранения энергии при течении воздуха по трубопроводу переменного сечения.

Результаты выполнения заданий лабораторных работ

1. В результате выполнения работы «Изучение приборов и методов определения давления» обучающиеся должны:
 - знать виды давления, приборы и методы измерения давления;
 - уметь измерять статическое, динамическое и полное давление по показаниям датчика малого давления в зависимости от способа его подключения к напорной трубке Пито;
 - уметь работать с трубкой Пито и датчиком давления.
2. В результате выполнения работы «Изучение метода определения расхода воздуха по изменению давления в отсеченном объеме» обучающиеся должны:
 - знать виды расхода, приборы и методы измерения расхода;

- уметь измерять расход воздуха при его истечении из резервуара известного объема;

- получить навыки работы с дросселем, расходомером и датчиком давления.

3. В результате выполнения работы «Исследование потерь напора на местном сопротивлении – регулируемой задвижке (дросселе)» обучающиеся должны:

- знать определение дросселя, его виды и назначение;

- уметь экспериментально определять характеристики регулируемой заслонки.

4. В результате выполнения работы «Изучение закона сохранения энергии при течении воздуха по трубопроводу переменного сечения» обучающиеся должны:

- знать вид закона сохранения энергии для газа при его течении по трубопроводу переменного сечения;

- уметь выполнять построение напорной и пьезометрической линий при течении воздуха по трубопроводу переменного сечения;

- получить навыки определения коэффициентов сопротивления фасонных участков трубопровода.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

3.1 Общие рекомендации по подготовке к практическим занятиям

Практические занятия по решению задач существенно дополняют лекции по гидрогазодинамике. В процессе анализа и решения задач студенты расширяют и углубляют знания, полученные из лекционного курса и учебников, учатся глубже понимать гидрогазодинамические законы и формулы, разбираться в их особенностях, границах применения, приобретают умение применять общие закономерности к конкретным случаям.

В процессе решения задач вырабатываются навыки вычислений, работы со справочной литературой, таблицами. Решение задач не только способствует закреплению знаний и тренировке в применении изучаемых законов, но и формирует особый стиль умственной деятельности.

Когда студенты решают задачи по определённой теме, очень важно, чтобы в результате знакомства с конкретными задачами они усвоили принципиальный подход к познанию достаточно широкого класса явлений.

На практических занятиях используются несколько видов задач и планы их решения:

- 1) задачи-упражнения, помогающие студентам приобрести твёрдые навыки расчёта и вычислений;
- 2) задачи для демонстрации практического применения тех или иных законов;
- 3) задачи для закрепления и контроля знаний;
- 4) кейс-задания (ситуационные задачи).

Несмотря на различие в видах задач, их решение можно проводить по следующему общему плану (некоторые пункты плана могут выпадать в некоторых конкретных случаях), который надо продиктовать студентам:

- 1) прочесть внимательно условие задачи;
- 2) посмотреть, все ли термины в условиях задачи известны и понятны (если что-то неясно, следует обратиться к учебнику, просмотреть решения предыдущих задач, посоветоваться с преподавателем);
- 3) записать в сокращенном виде условие задачи (когда введены стандартные обозначения, легче вспоминать формулы, связывающие соответствующие величины, чётче видно, какие характеристики заданы, все ли они выражены в одной системе единиц и т.д.);
- 4) сделать чертёж, если это необходимо (делая чертёж, нужно стараться представить ситуацию в наиболее общем виде);
- 5) произвести анализ задачи, вскрыть её физический смысл (нужно чётко понимать, в чем будет заключаться решение задачи);
- 6) установить, какие законы и соотношения могут быть использованы при решении данной задачи;
- 7) составить уравнения, связывающие величины, которые характеризуют рассматриваемые явления с количественной стороны;
- 8) решить эти уравнения относительно неизвестных величин, получить ответ в общем виде. Прежде чем переходить к численным значениям, полезно провести анализ этого решения: он поможет вскрыть такие свойства рассматриваемого явления, которые не видны в численном ответе;
- 9) перевести количественные величины в общепринятую систему единиц (СИ), найти численный результат;
- 10) проанализировать полученный ответ, выяснить как изменяется искомая величина при изменении других величин, функцией которых она является, исследовать предельные случаи.

Приведенная последовательность действий при решении задач усваивается студентами, как правило, в ходе занятий, когда они на практике убеждаются в её целесообразности. Поэтому в конце занятия полезно подвести итог, сформулировать найденный алгоритм рассуждений. Заметим, впрочем, что не всегда может быть предложен алгоритм решения задачи.

Кейс-задания (ситуационные задачи). В основе *ситуационной задачи* – лежит конкретная ситуация с четкой постановкой задачи как с качественной, так и с количественной точки зрения. Кейс-задания проводятся на практических занятиях после изучения сопутствующего теоретического материала.

При выполнении ситуационной задачи, необходимо:

- провести анализ данной задачи;
- выполнить необходимые расчеты (математические, технические и др.);
- предоставить результаты решения в виде количественных показателей, графиков, формул и др.;
- возможно многовариантность решений.

Функциональные роли участников кейс-заданий.

Функции преподавателя:

1) разработка конкретной проблемной ситуации, которая сложилась в реальной жизнедеятельности субъекта, организации и др. Эта ситуация представляет собой пакет учебного материала - кейс (текст задачи объемом от 2-3 до 10 страниц). В тексте должно присутствовать противоречие (проблемная ситуация, конфликт) -предмет обсуждения;

2) определение места кейса в структуре всего учебного курса, а также его место в структуре учебного занятия (или нескольких занятий);

3) выбор ключевых вопросов, которые привлекут внимание слушателей к важным аспектам ситуационного задания, будут способствовать организации мысли, подтолкнут к активной совместной деятельности;

4) ознакомление слушателей с целью, условиями и правилами работы с кейсом (заданной ситуацией);

5) обеспечение главного направления дискуссии, поддержка общего контекста ситуационного упражнения, оказание помощи в развитии идей, побуждение к рассуждениям:

6) подведение обсуждения к определенным выводам.

Функции студентов:

1) в установленные сроки студенты должны ознакомиться с материалами кейса, изучить материалы лекции, проработать первоисточники учебно-методической литературы;

2) принимать активное участие в обсуждении содержания текста, дополнять его новой информацией, примерами;

3) выделить проблемы, которые выходят на первый план, и обдумать их;

4) обсудить ситуационную модель;

5) записать свои предложения, привести полное решение, сделать пробные (предварительные) выводы по решению проблемной ситуации;

6) принимать активное участие в дискуссии, в выступлениях, обоснованно опираться на знания, опыт;

7) сотрудничая с другими студентами и преподавателем, выслушивать альтернативные точки зрения и аргументировано выдвигать свою собственную;

8) задумываться над тем, как в профессиональной деятельности можно использовать полученные знания и умения.

3.2 Примерные темы практических занятий

Модуль 1 «Гидромеханика».

Основы гидростатики и кинематики:

1. Гидростатическое давление в жидкости.

2. Сила давления жидкости на плоские поверхности.

3. Сила давления жидкости на криволинейные поверхности.

4. Кинематика жидкости.

Динамика вязкой и невязкой жидкости:

1. Режимы течения жидкости. Уравнение неразрывности.
2. Уравнение Бернулли.

Гидравлические сопротивления. Истечение жидкостей из отверстий и насадков:

1. Истечение жидкости через отверстия и насадки.
2. Расчет простых трубопроводных систем.
3. Расчет сложных трубопроводных систем.

Гидравлические машины и гидропривод.

Модуль 2 «Газодинамика».

Законы движения газа.

3.3 Примерные задачи по изучаемым темам

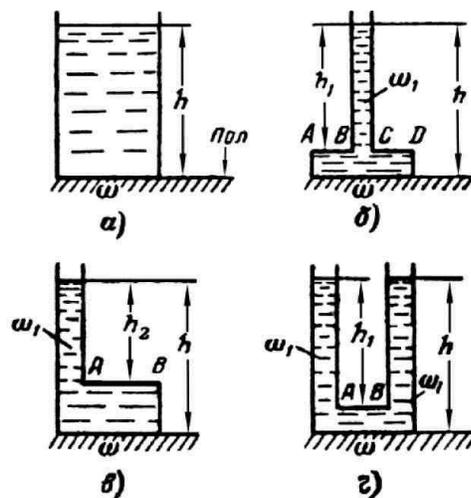
Модуль 1 «Гидромеханика».

Основы гидростатики и кинематики.

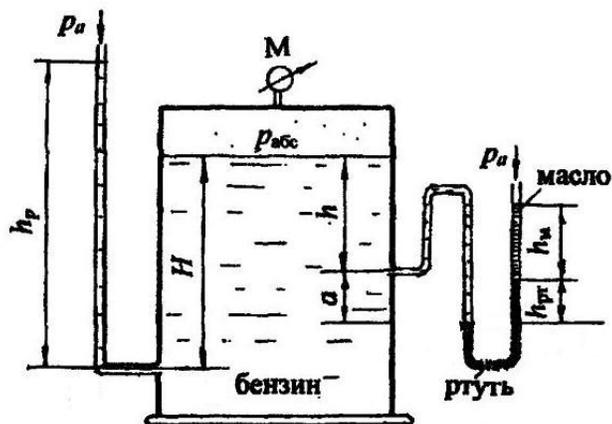
1. Гидростатическое давление в жидкости.

Задача 1. Определите силу манометрического давления p на дно сосудов а, б, в и г, наполненных водой. Высота столба $h = 60\text{см}$, а $h_1 = 50\text{см}$ и $h_2 = 40\text{см}$. Площадь дна сосудов $S = 1250\text{см}^2$, а площадь сечения $S_1 = 12,5\text{см}^2$.

Найдите силу G , передаваемую в каждом случае на пол, пренебрегая весом сосудов. Почему сила давления на дно не всегда совпадает с весом воды, заключенной в сосуде? Объясните гидростатический парадокс, определив силу манометрического давления РФ, воспринимаемому фасонной частью ABCD (схема б) или АВ (схемы в и г).

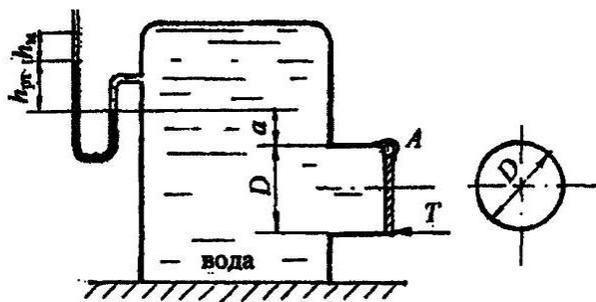


Задача 2. К резервуару, заполненному бензином плотностью $\rho_{\text{бенз}} = 700 \text{ кг/м}^3$, присоединён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт}} = 0,1 \text{ м}$; уровень масла над ртутью $h_{\text{м}} = 0,2 \text{ м}$. Определить абсолютное давление $p_{\text{абс}}$ паров на поверхности бензина и показание пружинного манометра, установленного на крышке резервуара, а также возможную высоту уровня бензина в пьезометре h_p при условии, что $h = 0,75 \text{ м}$; $a = 0,15 \text{ м}$; $H = 1,1 \text{ м}$; принять плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 820 \text{ кг/м}^3$.

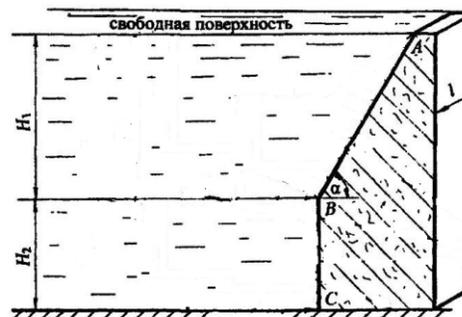


2. Сила давления жидкости на плоские поверхности.

Задача 1. Выход из резервуара, заполненного водой, представляет патрубок, который закрывается круглой крышкой диаметром $D = 600 \text{ мм}$. Крышка может поворачиваться вокруг шарнира A . Определить силу T для удержания крышки в закрытом положении, если показание ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 120 \text{ мм}$, высота уровня масла над ртутью $h_{\text{м}} = 50 \text{ мм}$. Принять $a = 500 \text{ мм}$, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13600 \text{ кг/м}^3$; плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 900 \text{ кг/м}^3$.



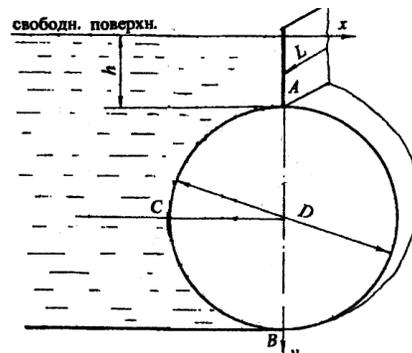
Задача _____ 2. Определить равнодействующую давления воды и положение центра давления на грани напорной плотины ABC , удерживающей напоры: $H_1 = 3,0 \text{ м}$; $H_2 = 2,0 \text{ м}$. Угол наклона наклонной грани плотины $\alpha = 60^\circ$. Длина



плотины в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $l = 10$ м. Решение выполнить графо-аналитическим методом.

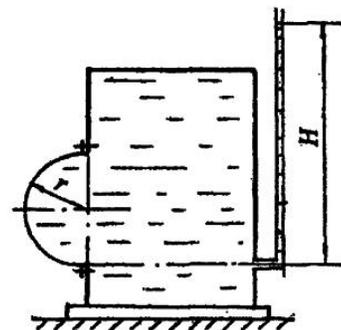
3. Сила давления жидкости на криволинейные поверхности.

Задача 1. Цилиндрический затвор диаметром $D = 0,6$ м перекрывает прямоугольное отверстие в вертикальной стенке, удерживающей напор воды. Высоты отверстия равна диаметру затвора, длина отверстия $L = 2,0$ м. Уровень воды над верхней кромкой затвора $h = 0,2$ м. Затвор может поворачиваться относительно горизонтальной оси и, перемещаясь, открывать отверстие.



Определить величину и угол наклона к горизонту силы давления воды на цилиндрический затвор.

Задача 2. Определить величину и угол наклона силы давления бензина на полусферическую крышку закрытого резервуара, если радиус полусферы $r = 0,2$ м, показание пьезометра, выведенного на уровне нижней кромки крышки $H = 0,8$ м, плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 800$ кг/м³.



4. Кинематика жидкости.

Задача 1. Движение жидкости задано следующими проекциями скоростей:

$$V_x(x,y,z,t) = t \cdot x; \quad V_y(x,y,z,t) = y/(t + 1); \quad V_z(x,y,z,t) = 0.$$

Требуется найти:

- 1) семейство линий тока и линию тока проходящую через точку В (2, 2, 0) в момент времени $t = 1$ с (координаты в метрах, время в секундах);

- 2) семейство траекторий частиц жидкости и траекторию частицы, которая в момент времени $t=1$ с находилась в точке В (2, 2, 0);
- 3) показать, что у траектории выходящей из точки В (2, 2, 0) в момент времени 1 с и у линии тока проходящей через точку В для этого момента в точке В общая касательная.

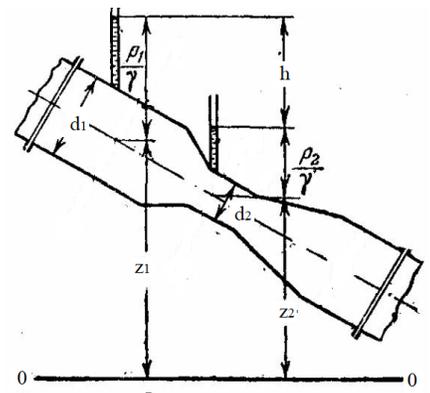
Динамика вязкой и невязкой жидкости.

1. Режимы течения жидкости. Уравнение неразрывности.

Задача 1. Определить режим движения воды в водопроводной трубе диаметром $d = 300$ мм, если протекающий по ней расход $Q = 0,136$ м³/с. Температура воды 10°C.

2. Уравнение Бернулли.

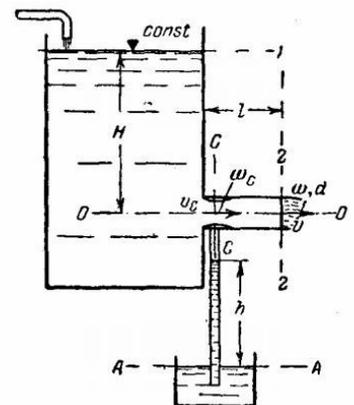
Задача 2. На трубопроводе установлен водомер Вентури. Определить расход воды, протекающий по трубопроводу, если разность показаний пьезометров $h = 20$ см, диаметр трубопровода $d_1 = 10$ см, а диаметр горловины $d_2 = 5,6$ см. При расчете потерями напора, а также сжатием струи в горловине пренебречь.



Гидравлические сопротивления. Истечение жидкостей из отверстий и насадков:

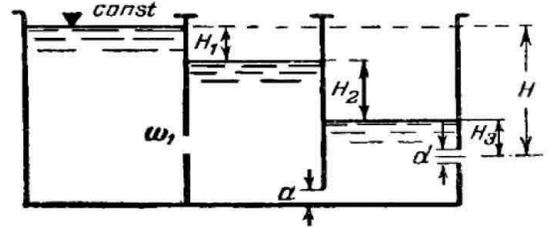
1. Истечение жидкости через отверстия и насадки.

Задача 1. Определить вакуум в цилиндрическом насадке длиной $l = 15$ см и диаметром $d = 4$ см. Напор над центром отверстия $H = 1$ м. При расчете скоростным напором в резервуаре пренебречь, коэффициент потерь на сжатие струи при входе, отнесенный к скорости в сечении С-С, принять $\zeta_{суж} =$



0,06. Потери по длине насадка не учитывать. Отношение площадей $S_c/S = 0,64$. На какую высоту h поднимается вода в трубке, присоединенной к насадку?

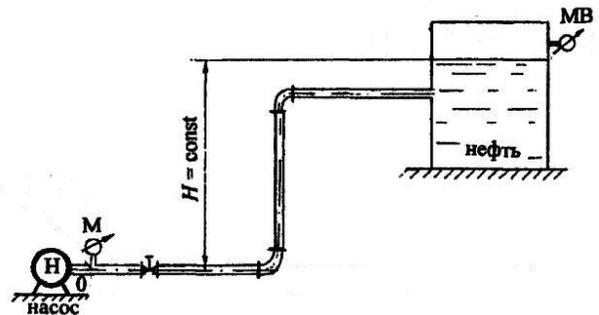
Задача 2. Резервуар разделен на три отсека перегородками, в которых имеются отверстия: в первой перегородке прямоугольное с площадью $\omega_1 = 8,5 \text{ см}^2$, во второй перегородке - квадратное, примыкающее одной стороной $a = 4 \text{ см}$ ко дну. В наружной стенке отверстие круглое $d = 3 \text{ см}$. Разность между отметкой уровня воды в левом отсеке и отметкой центра наружного отверстия $H = 3,1 \text{ м}$. Определите расход воды из резервуара Q и напоры H_1, H_2, H_3 при установившемся движении при истечении воды из наружного отверстия в атмосферу.



2. Расчет простых трубопроводных систем.

Задача 1. С помощью насоса по трубе диаметром $d = 50 \text{ мм}$ и длиной $l = 70 \text{ м}$ нефть подается в закрытый резервуар на высоту $H = 15 \text{ м}$. Считать $H = \text{const}$.

Определить показание мановакуумметра $p_{\text{МВ}}$, установленного на поверхности нефти в закрытом резервуаре, если показание манометра после насоса $p_{\text{МАН}} = 1,3 \text{ ат}$. Расход нефти $Q = 1,2 \text{ л/с}$, плотность нефти $\rho_n = 900 \text{ кг/м}^3$, относительная вязкость по Энглеру $^\circ E = 4,0$. В системе установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$ и два колена с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{суж}} = 0,8$.

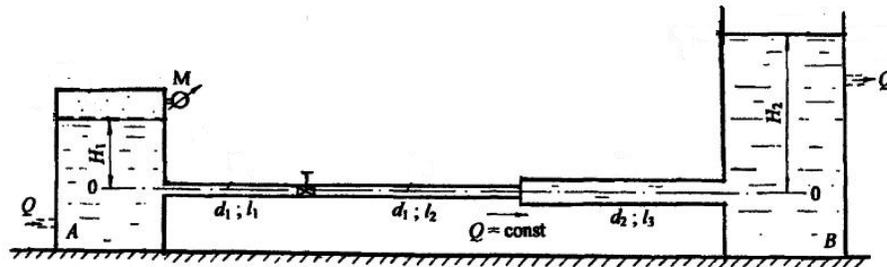


Задача 2. Вода из закрытого резервуара А поступает в открытый резервуар В при пропускной способности системы $Q = 15 \text{ л/с}$ по трубам: $d_1 = 75 \text{ мм}$; $l_1 = 8 \text{ м}$ и l_2

$= 12 \text{ м}$; $d_2 = 100 \text{ мм}$ и $l_3 = 15 \text{ м}$. Напоры воды в резервуарах постоянны относительно оси трубы: $H_1 = 1,5 \text{ м}$; $H_2 = 3,5 \text{ м}$

Определить показание манометра $p_{\text{МАН}}$ на поверхности воды в закрытом резервуаре, а также соответствующий манометрический напор ($H_{\text{МАН}}$).

Принять абсолютную шероховатость труб: $\Delta_1 = 0,5 \text{ мм}$; $\Delta_2 = 0,2 \text{ мм}$. Учесть местные сопротивления в системе: на входе в первую трубу; в пробковом кране при угле закрытия $\alpha = 30^\circ$; при внезапном расширении и на выходе из второй трубы.



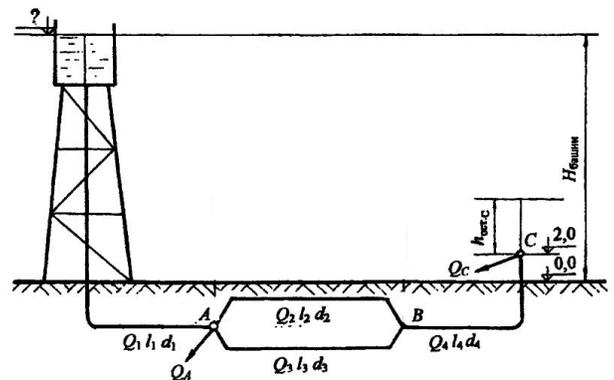
Движение воды считать установившимся, т.е. $Q = \text{const}$. Построить линию полного напора, пьезометрическую линию, показать эпюру потерь напора.

3. Расчет сложных трубопроводных систем.

Задача 1. Сложная система с водонапорной башней включает кольцевое соединение труб и доставляет воду двум потребителям.

Определить отметку уровня воды в водонапорной башне, питающей два потребителя: A с расходом $Q_A = 18 \text{ л/с}$ и C с расходом $Q_C = 32 \text{ л/с}$.

Система включает магистральный трубопровод $d_1 = 250 \text{ мм}$; $l_1 = 600 \text{ м}$; два параллельно проложенных трубопровода:

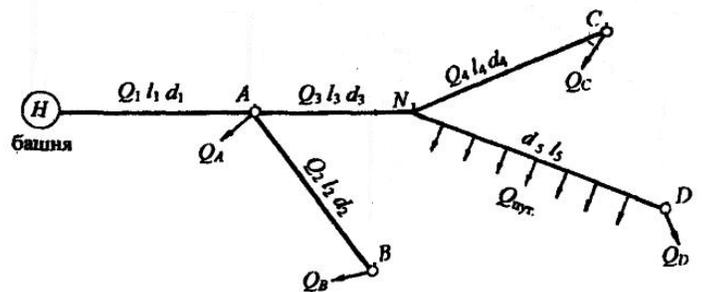


$d_2 = 150 \text{ мм}; l_2 = 550 \text{ м}; d_3 = 100 \text{ мм}; l_3 = 400 \text{ м}$ и трубопровод $d_4 = 200 \text{ мм}; l_4 = 720 \text{ м}$, подающий воду потребителю C . Остаточный напор у потребителя C должен быть не менее 10 м ($h_{остC} \geq 10 \text{ м}$).

Трубы водопроводные нормальные. Местные потери напора принять равными 10% от потерь по длине.

Задача 2. Тупиковая водопроводная система имеет пять участков труб, длины и диаметры которых $l_1 = 500 \text{ м}; l_3 = 450 \text{ м}; d_2 = 150 \text{ мм}; l_2 = 550 \text{ м}; d_4 = 125 \text{ мм}; l_4 = 600 \text{ м}; d_5 = 150 \text{ мм}; l_5 = 700 \text{ м}$. В системе четыре потребителя с расходами: $Q_A = 10 \text{ л/с}; Q_B = 18 \text{ л/с}; Q_C = 12 \text{ л/с}; Q_D = 8 \text{ л/с}$; на пятом участке равномерная раздача воды с путевым расходом $Q_{ПВТ} = 15 \text{ л/с}$.

Определить высоту водонапорной башни H , рассчитать диаметры труб на первом и третьем участках системы при условии, что эксплуатационная скорость $v_{ЭКС} \leq 1,4 \text{ м/с}$. Потери напора в местных сопротивлениях составляют 5% . Построить пьезометрическую линию.



Задача 3. Вертикальный цилиндрический сосуд диаметром $D = 1,5 \text{ м}$ наполнен фильтрующим материалом с диаметром частиц $d_c = 10^{-3} \text{ м}$. Толщина фильтрующего слоя $\delta = 1 \text{ м}$, пористость $p = 0,4$, высота столба жидкости над слоем фильтрующего материала $H = 2 \text{ м}$. Определить пропускную способность фильтра при фильтровании воды и минерального масла. Температура воды и масла 20°С . Плотность масла $\rho = 0,8 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент s для песков средней пористости принять равным $16 \cdot 10^{-4}$, коэффициент кинематической вязкости воды и масла при данной температуре $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно.

Модуль 2 «Газодинамика».

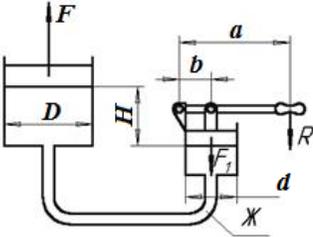
Законы движения газа.

Задача 1. Воздух течет из бака через короткое суживающееся сопло, соединенное с теплоизолированной трубой диаметром d . Безразмерная скорость на входе в трубу 0,5. Коэффициент трения 0,015.

Задача 2. Скорость потока воздуха перед прямым скачком уплотнения в 2 раза больше, чем за ним, $V_1=2V_2$. Найти числа Маха M_1 и M_2 после прямого скачка уплотнения.

3.4 Пример решения и оформления задачи

Задача. Определить силу преобразования F , развиваемую гидравлическим прессом, у которого диаметр большого плунжера $D = 500$ мм, меньшего $d = 50$ мм, высота $H = 1$ м. Рабочая жидкость с плотностью $\rho = 850$ кг/м³. К рычагу приложено усилие $R = 250$ Н. Отношение плеч рычага равно $a/b = 12$.

Дано:	Решение:
$D = 500$ мм $d = 50$ мм $H = 1$ м $\rho = 850$ кг/м ³ $R = 250$ Н $a/b = 12$.	
$F - ?$	

Силу прессования F определим по формуле: $F = pS$,

где p – давление в гидросистеме; S – площадь большого плунжера.

Площадь большого плунжера S равна:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

Давление p в гидросистеме определим по формуле:

$$p = \frac{F_1}{S_1},$$

где F_1 – усилие, приложенное к малому плунжеру; S_1 – площадь малого плунжера.

Площадь малого плунжера S_1 равна:

$$S_1 = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Усилие F_1 определим из условия равновесия сил, действующих на малый поршень

$$F_1 = R_1 - F_2,$$

где R_1 – усилие на малом плунжере в результате действия силы R ; F_2 – усилие на малом плунжере в результате действия столба жидкости \mathcal{J} .

Усилие R_1 на малом плунжере определим по формуле:

$$R_1 = \frac{a}{b} R.$$

Усилие F_2 на малом плунжере определим по формуле:

$$F_2 = \rho g H S_1$$

где g – ускорение свободного падения.

Выразим давление в гидросистеме

$$p = \frac{4F_1}{\pi d^2}$$

и усилие на малый плунжер

$$F_1 = \frac{a}{b} R - \rho g H S_1.$$

Откуда получаем, подставив величину площади малого поршня

$$F_1 = \frac{aR}{b} - \frac{\pi d^2 \rho g H}{4}$$

Окончательно, формула для определения давления p в гидросистеме принимает вид:

$$p = \frac{4}{\pi d^2} \left(\frac{aR}{b} - \frac{\pi d^2 \rho g H}{4} \right)$$

Таким образом, сила прессования F :

$$F = \left(\frac{D}{d} \right)^2 \left(\frac{aR}{b} - \frac{\pi d^2 \rho g H}{4} \right).$$

Вычислим величину силы прессования F :

$$F = \left(\frac{500}{50} \right)^2 \left(250 \cdot 12 - \frac{\pi (50 \times 10^{-3})^2 \cdot 850 \cdot 9,81 \cdot 1}{4} \right) = 298,4 \text{ кН}.$$

Ответ: $F = 298,4 \text{ кН}$.

Методические рекомендации к проведению расчетов

При решении задач на определение давления в некоторой точке покоящейся жидкости следует:

- 1) выбрать поверхность равного давления – любая горизонтальная плоскость на произвольной глубине;
- 2) рассмотреть на этой плоскости любые две точки и записать выражение для определения абсолютного давления в этих точках, используя основное уравнение гидростатики. При этом, необходимо обратить внимание на знак перед вторым членом правой части уравнения: знак «+» ставится в случае увеличения глубины (давление возрастает), «-» – при подъеме (давление уменьшается);
- 3) записать уравнение равенства давлений в точках, приравняв правые части записанных выражений;
- 4) из полученного уравнения выразить неизвестную величину.

При решении задач, в которых даны поршни или система поршней, следует:

- 1) составить уравнение сил, приложенных к поршню;

- 2) записать формулы для нахождения каждой из сил, действующих на тело. При этом, давление со стороны жидкости нужно определить, используя основное уравнение гидростатики;
- 3) подставить полученные зависимости в уравнение равновесия сил и выразить неизвестную величину.

Задача. Горизонтальная труба диаметром $d = 5 \text{ см}$ соединяет резервуары с водой, в которых поддерживаются постоянные уровни $H_1 = 4,5 \text{ м}$ и $H_2 = 2,5 \text{ м}$. Для регулирования расхода на трубопроводе установлен вентиль. Определить коэффициент сопротивления вентиля и потерю напора в нем, если расход воды $Q = 12,5 \text{ л/с}$, а избыточное давление на поверхности воды в напорном баке $p_{\text{изб}} = 25 \text{ кПа}$. Другими потерями напора пренебречь.

Дано:	Решение:
$d = 5 \text{ см}$ $H_1 = 4,5 \text{ м}$ $H_2 = 2,5 \text{ м}$ $Q = 12,5 \text{ л/с}$ $p_{\text{изб}} = 25 \text{ кПа}$	
$\zeta - ?$	

Перед записью уравнения Бернулли выбираем два сечения.

В качестве начального сечения принимаем открытую поверхность жидкости в напорном баке и обозначаем его 1-1. В пределах этого сечения скорость жидкости мала $V_1 \approx 0$, абсолютное давление $p_1 = p_a + p_{\text{изб}}$. Конечное сечение выбираем на поверхности жидкости в сливном баке 2-2. В пределах этого сечения скорость $V_2 \approx 0$, абсолютное давление $p_2 = p_a$.

В качестве произвольной горизонтальной плоскости для отсчета нивелирных высот (сечение 0-0) выбираем плоскость, совпадающую с осью трубопровода. Тогда $z_1 = H_1$, а $z_2 = H_2$.

В соответствии с условием задачи учитываем только местные потери напора на вентиле h_B , тогда уравнение Бернулли принимает вид:

$$H_1 + \frac{p_1}{\rho g} = H_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_B .$$

Выразим потери напора на вентиле

$$h_B = H_1 - H_2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} .$$

С другой стороны, потери напора можно определить по формуле Вейсбаха

$$h_B = \zeta \frac{v^2}{\rho g} .$$

Скорость движения жидкости выразим из уравнения неразрывности потока

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

Подставив в формулу и выразив коэффициент сопротивления, окончательно получаем:

$$h_B = \zeta \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} .$$

Следовательно,

$$\zeta = \frac{h_B g \pi^2 d^4}{8Q^2} = \frac{4,5 \cdot 9,8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^4}{8 \cdot 0,0125^2} = 2,2$$

Ответ: $\zeta = 2,2$.

Методические рекомендации к проведению расчетов

Для решения задачи с применением уравнения Бернулли следует:

1) выбрать два сечения, для которых записывается уравнение. В качестве сечений *рекомендуется* брать:

- выход в атмосферу, где $p_{\text{абс}} = p_a$;
- свободную поверхность в резервуаре, где скорость $v = 0$
- сечение, в котором присоединен прибор для измерения давления (манометр, вакуумметр, пьезометр и др.).

2) записать уравнение Бернулли в общем виде;

3) переписать уравнение для заданных сечений с заменой его членов заданными буквенными величинами и исключить члены, равные нулю.

При этом *необходимо помнить*:

- уравнение Бернулли записывается по течению жидкости;
- вертикальная ордината z всегда отсчитывается от произвольной горизонтальной плоскости вверх;

- давление p , входящее в правую и левую части уравнения, должно быть задано в одной системе отсчета (абсолютной или избыточной);

- коэффициент Кориолиса в задачах на движение потока реальной жидкости следует учитывать только при ламинарном режиме течения $\alpha = 2$, для турбулентных потоков можно принимать $\alpha = 1$;

- суммарная потеря напора h_{Σ} записывается в правой части уравнения со знаком «+» и складывается из местных потерь, которые определяются формулой Вейсбаха, и потерь на трение по длине, определяемых формулой Дарси.

3.5 Методические указания к выполнению задач реконструктивного уровня

Задача №1 «Гидравлический расчёт разветвлённого трубопровода».

Необходимо провести гидравлический расчёт разветвлённого трубопровода, построить пьезометрический график, проанализировать полученные результаты и сформулировать вывод.

Для гидравлического расчета трубопровода необходимо:

- рассчитать и подобрать характеристики труб магистрали и ответвления,
- рассчитать потери на трение в основной магистрали и в ответвлениях,
- рассчитать разность давлений в основной магистрали и ответвлении и на основании полученных данных установить необходимость установки запорной арматуры на ответвлении,
- подобрать необходимую марку насоса для обеспечения требуемого напора в сети.

Методические указания по выполнению задачи.

Трубопроводы применяются для транспортировки жидкостей, газов и других текучих сред. Трубопроводы подразделяются на простые и сложные.

Сложные трубопроводы имеют разветвления и состоят из соединенных последовательно или параллельно простых трубопроводов. Сложный трубопровод имеет магистраль и ответвления в различных точках, которые называют узловыми (рисунок 1).

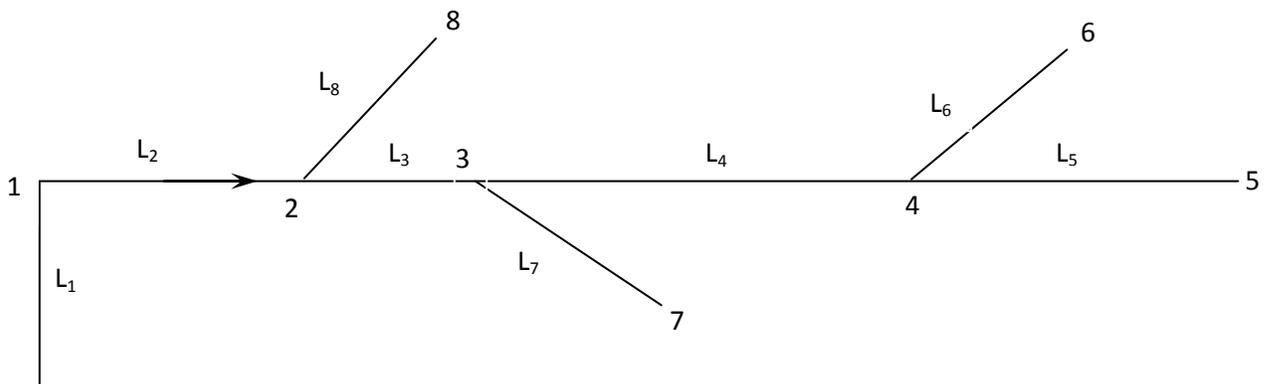


Рис. 1 Схема разветвлённого трубопровода

1. Расчет и подбор диаметров труб магистрали.

Выбрать основную магистраль. Определить расход воды на отдельных участках трубопровода с учетом подсоединения участков, используя следующее правило: расход на участке складывается из расходов на участках, расположенных ниже по течению.

Например, $q_{3-4} = q_{4-5} + q_{4-6}$.

Определить расход на участках трубопровода. Результаты расчетов занести в таблицу 4.

С учётом значения оптимальной скорости течения воды V_{opt} , определить теоретические диаметры труб основной магистрали по формуле, вытекающей из уравнения неразрывности:

$$d_i = \sqrt{\frac{4q_i}{V_{opt} \cdot \pi}},$$

где q_i – расход воды на рассчитываемом участке, м³/с;

V_{opt} – оптимальная скорость, м/с.

Выбрать к рассчитанным теоретическим значениям диаметров труб ближайшие наибольшие стандартные значения для главной магистрали, используя данные их таблицы «Расходные характеристики для труб различных диаметров». Полученные значения диаметров труб магистрали занести в таблицу результатов.

2. *Расчёт потерь на трение в основной магистрали.* Потери на трение (по длине) определяются по формуле:

$$h_{mpi} = \frac{q_i^2}{K_i^2} \cdot L_i$$

где q_i – расход воды на рассчитываемом участке, м³/с;

K_i – расходная характеристика трубы на рассчитываемом участке, м³/с;

L – длина участка, м;

Расходная характеристика для труб магистрали на рассчитываемом участке определяется по таблице «Расходные характеристики для труб различных диаметров». Полученные значения потерь на трение в магистрали занести в таблицу результатов.

Определить суммарные потери на трение $h_{\Sigma mp}$ по основной магистрали.

3. *Расчёт ответвлений.* Особенность расчета ответвления заключается в том, что при расчете диаметров трубопроводов на первое место ставится равенство напоров в узле со стороны основной магистрали и ответвления. В противном случае нарушается гидравлический режим работы сети. При расчете потерь необходимо учитывать соединение участков.

При расчетах также необходимо учитывать разность давлений в основной магистрали и ответвлении. Суть компенсаций невязки заключается в следующем: по разности теоретического и действительного напоров в ответвлении подбирают коэффициент местного сопротивления запорной арматуры (тип запорной арматуры – задвижка), при котором напоры выравниваются.

Например, рассмотрим полный расчет ответвления 4-6.

Так как участки 4-6 и 4-5 соединены между собой параллельно, то теоретические потери на участке 4-6: $h_{4-6T} = h_{4-5}$.

Из формулы $h_{4-6T} = \frac{q_{4-6}^2}{K_{4-6T}^2} \cdot L_{4-6}$ определяется теоретическое значение расходной

характеристики трубы на участке 4-6 по формуле:

$$K_{4-6T} = \sqrt{\frac{q_{4-6}^2}{h_{4-6T}} \cdot L_{4-6}}$$

где q_{4-6} – расход воды на участке 4-6, м³/с;

h_{4-6T} – теоретические потери на участке 4-6, м;

L_{4-6} – длина участка 4-6, м.

Используя таблицу «Расходные характеристики для труб различных диаметров» определяется ближайшее стандартное значение расходной характеристики трубы K_{4-6} и по нему находится диаметр трубы участка 4-6. Полученный результат диаметра занести в таблицу результатов.

Действительные потери на трение в ответвлении 4-6 определяются по формуле:

$$h_{4-6} = \frac{q_{4-6}^2}{K_{4-6}^2} \cdot L_{4-6}$$

Полученный результат действительных потерь на трение занести в таблицу результатов.

Для установления необходимости в запорной арматуре на ответвлении необходимо рассчитать разность давлений в основной магистрали и ответвлении.

На основании полученных данных разность давлений в основной магистрали и ответвлении 4-6 в узле 4 определяется по формуле:

$$\Delta_{4-6} = h_{4-6Г} - h_{4-6}$$

Если $\frac{\Delta_{4-6}}{h_{4-6Г}} \cdot 100\%$ превышает 5 %, то для погашения разности давлений необходимо поставить запорную арматуру – задвижку.

Степень открытия задвижки h/d определяется по коэффициенту местного сопротивления участка с использованием таблицы «Степень открытия задвижки в зависимости от коэффициента местного сопротивления».

Для определения коэффициента местного сопротивления необходимо значение скорости движения жидкости в ответвлении 4-6, которая определяется по формуле:

$$V_{4-6} = \frac{4q_{4-6}}{\pi d_{4-6}^2}$$

Коэффициент местного сопротивления находится по формуле:

$$\xi_{4-6} = \frac{\Delta_{4-6} \cdot 2g}{V_{4-6}^2}$$

Аналогичным рассчитываются и другие ответвления.

4. *Выбор насоса.* Насос устанавливается в начале участка 1 и должен обеспечить такой запас энергии перекачиваемой жидкости, чтобы ее хватило на геометрическую высоту подъёма и движение на разветвленном участке

трубопровода с учетом потерь. Выбор насоса производится по напору и по расходу на начальном участке.

Напор – энергия, сообщаемая насосом перекачиваемой среде, отнесенная к единице массы перекачиваемой среды. Обозначается буквой H и имеет размерность метры.

Стоит уточнить, что напор не является геометрической характеристикой и не может отождествляться с высотой, на которую необходимо поднять перекачиваемую жидкость. Необходимое значение напора складывается из нескольких слагаемых, каждое из которых имеет свой физический смысл.

Общая формула расчета напора (диаметры всасывающего и нагнетающего патрубком приняты одинаковыми):

$$H = h_{\Sigma mp} + H_{\Gamma} + \alpha \frac{V_{opt}^2}{2g}$$

H – напор, м;

V_{opt} – оптимальная скорость, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H_{Γ} – геометрическая высота подъема перекачиваемой среды, м;

$h_{\Sigma mp}$ – суммарные потери напора на основной магистрали, м.

Первое слагаемое характеризует суммарное снижение создаваемого напора в магистрали, зависящее от характеристик трубопровода, по которому перекачивается среда. Реальные трубопроводы неизбежно будут оказывать сопротивление току жидкости, на преодоление которого необходимо иметь запас величины напора.

Второе слагаемое отражает геометрическую высоту, на которую необходимо поднять перекачиваемую жидкость. Важно отметить, что при определении этой величины не учитывается геометрия напорного трубопровода, который может

иметь несколько подъемов и спусков и соответственно возникающие потери на нем.

Третье из слагаемых формулы расчета напора представляет собой скоростной напор, создаваемый насосом, который будет уходить на поднятие жидкости на определенную высоту и преодоление сопротивлений в процессе перекачивания жидкости.

По полученному значению напора и расхода на участке 1-2 используя, например, основные технические характеристики насосов в каталоге насосов по ссылке <http://energoprom.su/catalog/cat/>, определить марку подходящего насоса (напор и расход).

5. *Построение пьезометрического графика.* Построение графика выполнить на миллиметровой бумаге.

6. *Проанализировать полученные данные и сформулировать выводы.*

Внимание! Таблица с исходными данными (по вариантам), таблица «Расходные характеристики для труб различных диаметров» и таблица «Степень открытия задвижки в зависимости от коэффициента местного сопротивления» выдается преподавателем на занятии. Исходные данные для решения выбираются по последней цифре зачетной книжки.

Таблица – Результаты расчетов

Длина трубопровода, L_i , м		Расход жидкости на участке трубопровода q_i , л/с		Диаметры участков трубопровода, d_i , мм		Потери на трение участков трубопровода, h_i , м	
L_2		q_{1-2}		d_{1-2}		h_{1-2}	
L_3		q_{2-3}		d_{2-3}		h_{2-3}	
L_4		q_{3-4}		d_{3-4}		h_{3-4}	
L_5		q_{4-5}		d_{4-5}		h_{4-5}	
L_6		q_{4-6}		d_{4-6}		h_{4-6}	
L_7		q_{3-7}		d_{3-7}		h_{3-7}	
L_8		q_{2-8}		d_{2-8}		h_{2-8}	

Задача №2 «Газодинамический расчёт сопла Лавалья». Необходимо провести газодинамический расчёт сопла Лавалья, обеспечивающего на расчётном режиме заданный расход газа.

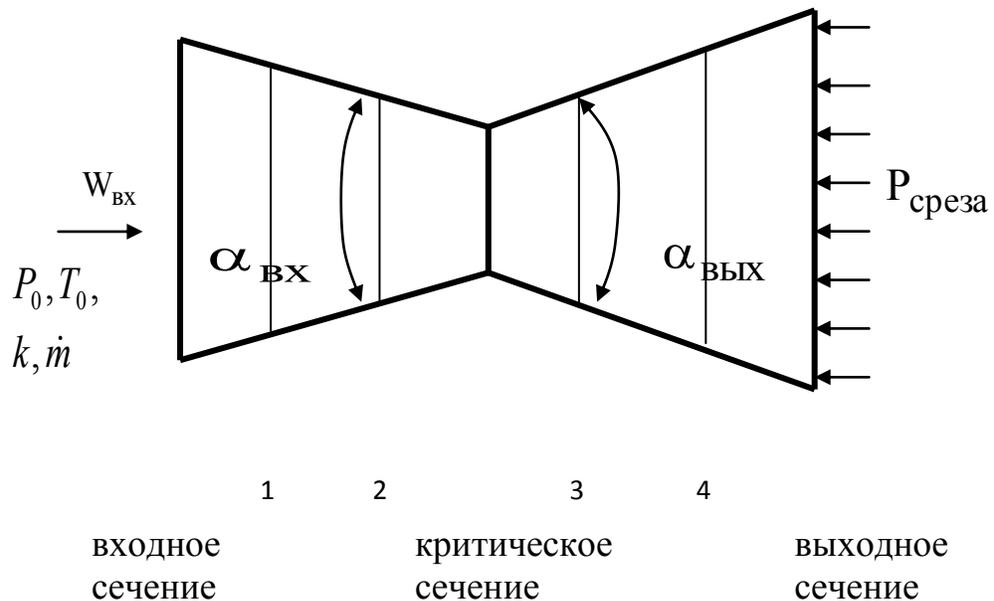


Рис. 2 Сопло Лавалья

Для этого нужно провести расчёт параметров газа во входном, в критическом, в выходном и в дополнительных сечениях (1,2,3,4), определить профиль сопла и обобщить полученные результаты.

Внимание! Исходные данные для решения задачи выбираются по последней цифре зачетной книжки из таблиц «Исходные данные».

Методические указания по выполнению задачи.

1. Провести расчёт параметров газа в критическом сечении.

Находим газовую постоянную для газа:

$$R = \frac{R_0}{\mu}$$

где μ – молярная масса газа;

R_0 – универсальная газовая постоянная.

Из уравнения Менделеева - Клайперона найти плотность газа при полной остановке:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}.$$

Найти скорость звука при полной остановке газа:

$$a_0 = \sqrt{kRT_0}$$

где k – показатель адиабаты газа.

Определить скорость звука в критическом сечении:

$$a_{кр} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k+1}}.$$

Определите максимальную скорость газового потока по формуле:

$$W_{max} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k-1}}$$

В критическом сечении $W_{кр} = a_{кр}$ число Маха $M_{кр}=1$ и коэффициент скорости

$\lambda_{кр} = \frac{W_{кр}}{a_{кр}} = 1$, откуда находим скорость газового потока в критическом сечении.

Найти в критическом сечении:

- температуру газа

$$T_{кр} = T_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{кр}^2 \right)$$

- давление газа

$$P_{кр} = P_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{кр}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

- плотность газа

$$\rho_{кр} = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{кр}^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

Из уравнения неразрывности потока найти площадь критического сечения:

$$F_{кр} = \frac{m}{\rho_{кр} \cdot W_{кр}}$$

Найти диаметр критического сечения:

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{кр}}{\pi}}$$

2. Провести расчёт параметров газа во входном сечении.

Найти коэффициент скорости во входном сечении:

$$\lambda_{вх} = \frac{W_{вх}}{a_{кр}};$$

Найти во входном сечении:

- температуру газа

$$T_{вх} = T_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{вх}^2 \right)$$

- давление газа

$$P_{вх} = P_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{вх}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

- плотность газа

$$\rho_{вх} = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{вх}^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

Найти площадь входного сечения:

$$F_{вх} = \frac{Q_m}{\rho_{вх} \cdot W_{вх}}$$

Найти диаметр входного сечения:

$$d_{вх} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{вх}}{\pi}}$$

Вычислить скорость звука во входном сечении:

$$a_{вх} = \sqrt{kRT_{вх}}$$

Определить число Маха во входном сечении:

$$M_{вх} = \frac{W_{вх}}{a_{вх}};$$

3. Провести расчёт параметров газа в выходном сечении, задаваясь условием, что давление газа в выходном сечении $P_{\text{ВЫХ}}$ равно давлению на срезе сопла $P_{\text{ср}}$: $P_{\text{ВЫХ}}=P_{\text{ср}}$.

Методика расчета основных параметров аналогично как в предыдущем пункте.

Найти коэффициент скорости в выходном сечении $\lambda_{\text{ВЫХ}}$.

$$\lambda_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)};$$

Найти температуру газа в выходном сечении, плотность газа в выходном сечении, скорость газового потока в выходном сечении.

Из уравнения неразрывности потока найти площадь выходного сечения, диаметр выходного сечения.

Вычислить скорость звука в выходном сечении. Определить число Маха в выходном сечении.

4. Определить геометрический профиль сопла.

Для того необходимо:

- определить длину суживающейся (дозвуковой) части сопла:

$$l_1 = \frac{d_{\text{ВХ}} - d_{\text{КР}}}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2} \text{ м};$$

- определить длину расширяющейся (сверхзвуковой) части сопла:

$$l_2 = \frac{d_{\text{ВЫХ}} - d_{\text{КР}}}{2 \cdot \operatorname{tg} \beta / 2} \text{ м};$$

- вычислить общую длину сопла:

$$l = l_1 + l_2$$

На рисунке изобразить геометрический профиль сопла.

5. Провести расчёт дополнительных сечений.

Методика расчета основных параметров дополнительных сечений аналогично как в пункте 3.

Сечения 1 и 2 выбрать между входным и критическим сечением.

Сечение 1:

Взять скорость в 1 сечении $W_{\text{вх}} < W_1 < W_2 < W_{\text{кр}}$

Найти коэффициент скорости в сечении 1: $\lambda_1 = \frac{W_1}{a_{\text{кр}}}$. Найти в сечении 1

температуру газа, давление газа, плотность газа. Из уравнения неразрывности потока найти площадь сечения 1. Найти диаметр сечения 1.

Определить расстояние между сечением 1 и критическим сечением, учитывая, что угол $\alpha_1 <$ угла раствора дозвуковой части $\alpha: l_1 = \frac{d_1 - d_{\text{кр}}}{2 \cdot \text{tg } \alpha_1 / 2}$.

Вычислить скорость звука в сечении 1. Определить число Маха в сечении 1

Сечение 2:

Взять скорость во 2 сечении $W_1 < W_2 < W_{\text{кр}}$. Методика расчета аналогична как для сечения 1. При вычислении расстояния между сечением 2 и критическим сечением, учитывать, что угол $\alpha_2 =$ углу раствора дозвуковой части α .

Сечения 3 и 4 выбрать между критическим и выходным сечением. Методика расчета аналогична как для сечения 1.

Сечение 3:

Взять скорость в 3 сечении $W_{\text{кр}} < W_3 < W_4 < W_{\text{вых}}$

При вычислении расстояния между сечением 3 и критическим сечением, учитывать, что угол $\beta_3 =$ углу раствора сверхзвуковой части β .

Сечение 4:

Взять скорость в 4 сечении $W_3 < W_4 < W_{\text{вых}}$. При вычислении расстояния между сечением 4 и критическим сечением, учитывать, что угол $\beta_4 >$ угла раствора сверхзвуковой части $\beta <$ угла раствора дозвуковой части α .

6. Результаты расчетов свести в таблицу.

Параметры сечения		$P \cdot 10^{-6}$, Па	λ	ρ , кг/м ³	W , м/с	F , м ²	T , К	a , м/с	M
1	входное								
2	1 доп.								
3	2 доп.								
4	критическое								
5	3 доп.								
6	4 доп.								
7	выходное								

7. С помощью основных (входного, критического и выходного) и дополнительных сечений 1, 2, 3, 4 строим графики изменения параметров P , T , W , a , ρ по длине сопла.

8. Сформулировать выводы.

3.6 Наименование предлагаемых к выполнению кейс-заданий (ситуационные задачи) и методические указания к ним

В процессе анализа и решения задач студенты расширяют и углубляют знания, полученные из лекционного курса и учебников, учатся глубже понимать гидрогазодинамические законы и формулы, разбираться в их особенностях, границах применения, приобретают умение применять общие закономерности к конкретным случаям.

В процессе решения задач вырабатываются навыки вычислений, работы со справочной литературой, таблицами. Решение задач не только способствует закреплению знаний и тренировке в применении изучаемых законов, но и формирует особый стиль умственной деятельности.

Для закрепления знаний, умений и навыков, необходимых при решении часто встречающихся на практике гидрогазодинамических задач, а также для развития практических навыков по дисциплине студентам предлагается выполнение кейс-заданий (ситуационные задачи).

В основе *ситуационной задачи* – лежит конкретная ситуация с четкой постановкой задачи как с качественной, так и с количественной точки зрения.

Кейс-задания проводятся на практических занятиях после изучения сопутствующего теоретического материала.

При выполнении ситуационной задачи, необходимо:

- провести анализ данной задачи;
- выполнить необходимые расчеты (математические, технические и др.);
- предоставить результаты решения в виде количественных показателей, графиков, формул и др.;
- возможно многовариантность решений.

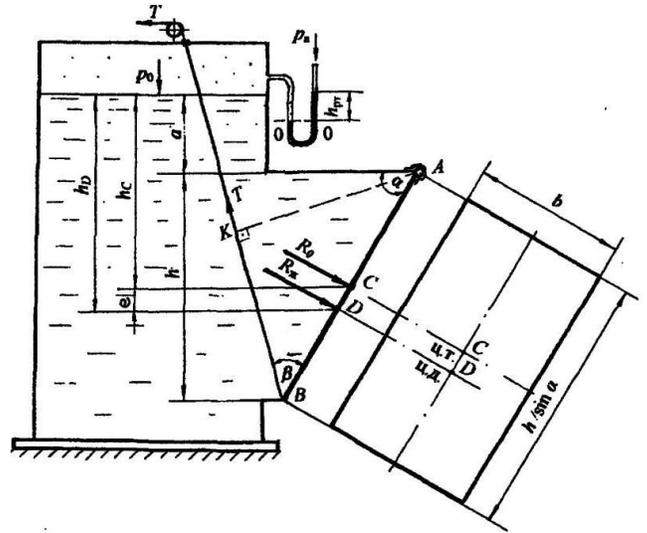
Ситуационная задача №1. Тема «Основы гидростатики и кинематики»

Ситуация. На некотором предприятии произошел пожар в рабочем цехе. При этом были серьезно повреждены помещения и технологическая аппаратура. При расследовании было установлено, что причиной инцидента стали нарушения технологического режима. В частности, произошло короткое замыкание в розетках (с подключёнными к ним электрооборудованием) из-за попадания в них воды. Установлено, что вода вылилась из резервуара, расположенного в помещении этажом выше, просочилась по щелям и стекая по стенам, попала в розетки.

Сотрудник цеха, в котором установлен резервуар с водой, утверждал, что по окончании работы, проверил степень закрытия патрубка в резервуаре с водой. С его слов значение силы натяжения троса для удержания крышки патрубка в закрытом положении составляло 3 кН.

Установить при заданных геометрических параметрах крышки и резервуара, а также показаниям манометра необходимое значение силы натяжения троса T для удержания крышки патрубка в закрытом положении. Установить нарушил ли рабочий технологические правила эксплуатации резервуара с жидкостью.

Условия. Прямоугольная крышка АВ, расположенная под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, перекрывает патрубок закрытого резервуара с водой. Высота патрубка $h = 600$ мм, ширина $b = 400$ мм (см. рис.). Крышка может поворачиваться вокруг шарнира А. Высота уровня воды над шарниром $a = 200$ мм. Давление на поверхности воды соответствует показанию U-образного ртутного манометра $h_{рт} = 80$ мм. Угол натяжения троса $\beta = 45^\circ$. Принять плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³.



Методические указания по выполнению задачи

Расчет силы давления включает следующую последовательность:

- рассчитывается сила давления жидкости и сила внешнего давления, при этом на чертеже обозначаются центральные оси плоской стенки и глубина погружения центра тяжести стенки от свободной поверхности;
- определяются точки приложения сил, на чертеже обозначается точка приложения давления жидкости и глубина погружения центра давления;
- показывается направление действия сил.

Ситуационная задача №2. «Определение режима работы лопастного насоса».

Лопастные насосы (центробежные насосы) относятся к группе динамических насосов. Эта группа насосов является самой многочисленной из всех. Они обладают большой универсальностью, могут быть в разных исполнениях, более надежны в эксплуатации, обладают равномерной подачей и т.д. В них достаточно просто осуществляется регулирование производительности. В центробежных насосах всасывание и нагнетание жидкости происходит

равномерно и непрерывно под действием центробежной силы, возникающей при вращении рабочего колеса с лопатками, заключенного в улиткообразном корпусе.

В ходе выполнения данной задачи предлагается определить:

- параметры рабочего режима лопастного насоса (расход и напор насоса; мощность, потребляемую насосом в рабочем режиме; допустимую геометрическую высоту всасывания $H_{Г\text{ВС доп}}$;

- определить, как изменится рабочий режим насоса, если изменить скорость вращения рабочего колеса насоса;

- определить, как изменится рабочий режим насоса, если произвести одновременное параллельное или последовательное включение двух одинаковых насосов.

Имеется насосная установка (рис. 3), перекачивающая воду с температурой t из некоего резервуара на высоту H . Трубопроводная сеть состоит из трех участков, включенных последовательно.

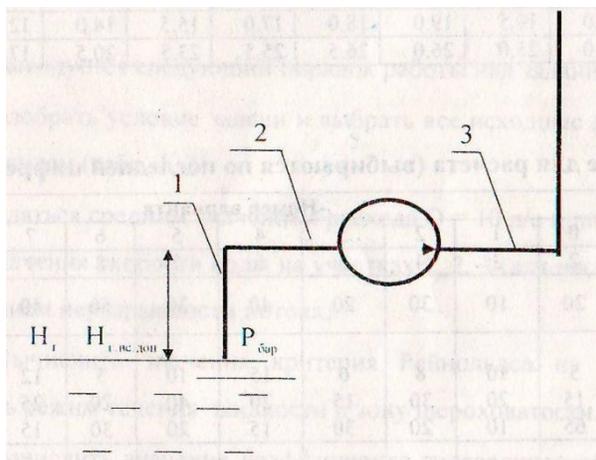


Рис. 3 Насосная установка

Участок 1 - всасывающая линия сети, а участки 2 и 3 относятся к нагнетательной линии. Каждый участок имеет известный диаметр d , длину l и сумму коэффициентов местных сопротивлений ζ , (параметры, относящиеся к каждому участку, обозначаются соответственно индексами 1, 2 и 3).

Внимание! Исходные данные для решения задачи выбираются по последней и предпоследней цифре зачетной книжки из таблиц «Характеристики насоса» и «Исходные данные» соответственно.

Гидравлическая (напорная) характеристика насоса и значение коэффициента полезного действия (КПД) приведены в таблице «Характеристики насоса» (по вариантам).

Исходные данные приведены в таблице по вариантам.

Физические параметры воды выбираются по таблице «Физические характеристики воды» в зависимости от заданной температуры.

Шероховатость труб на всех участках одинакова, значения эквивалентной шероховатости для различных типов труб приведены в таблице «Значения Δ_{Σ} для различных труб».

Барометрическое давление принимается равным 101,3 кПа.

Все расчеты рекомендуется выполнять в международной системе единиц. Графическую часть работы выполнять только на миллиметровой бумаге формата А4.

Методические указания по выполнению задачи

1. Задаваясь средним значением расхода $Q = 10$ л/с и используя уравнение неразрывности потока вычислить значение скорости воды на участках 1, 2, 3.

$$Q = v_{cp} \cdot \omega, \quad \text{откуда } v_{cp} = \frac{Q}{\omega} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_i^2},$$

где Q – заданное значение расхода, $м^3/с$;

ω – площадь живого сечения трубопровода;

d_i – диаметр соответствующего участка трубопровода, $м$;

v_{cp} – средняя скорость на соответствующем участка трубопровода, $м/с$.

Диаметры участков трубопровода выбрать из таблицы «Исходные данные» в соответствие со своим вариантом.

2. Вычислить значение критерия Рейнольдса на участках 1, 2, 3 и определить режим течения жидкости.

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re_i = \frac{v_{cp_i} \cdot d_i}{\nu},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости m^2/c .

Кинематический коэффициент вязкости определяется по таблице «Физические характеристики воды» исходя из заданной температуры воды, выбираемой из таблицы «Исходные данные» в соответствие со своим вариантом.

Определить режим течения жидкости из сравнения числа Рейнольдса с критическим значением числа Рейнольдса $Re_{кр} \approx 2300$.

При $Re < Re_{кр}$ режим течения является *ламинарным*, а при $Re > Re_{кр}$ режим течения является *турбулентным*.

3. Вычислить значение коэффициентов гидравлического трения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ по определенной формуле в зависимости от режима течения и зоны шероховатости.

В области ламинарного режима коэффициент гидравлического трения λ определяется формулой

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

В области турбулентного режима возможны три случая определения коэффициент гидравлического трения λ :

а) зона гидравлически гладких труб существует в диапазоне $2300 < Re < 20 \cdot d/\Delta_3$. В этой зоне коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} \right)^{0,25} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}};$$

б) зона гидравлически шероховатых труб существует в диапазоне $20 \cdot d/\Delta_{\text{э}} < Re < 500 \cdot d/\Delta_{\text{э}}$. В этой зоне коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25};$$

в) зона абсолютно шероховатых труб существует в диапазоне $Re > 500 \cdot d/\Delta_{\text{э}}$. В этой зоне коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25}.$$

Значения эквивалентной шероховатости $\Delta_{\text{э}}$ стенок трубопровода для определения зоны шероховатости выбирать из таблицы «Значения $\Delta_{\text{э}}$ для различных труб» в зависимости от типа трубы, указанного в таблице «Исходные данные» в соответствие со своим вариантом.

4. Вычислить значения характеристики сопротивления A для участков 1, 2, 3 по формуле:

$$A_i = \frac{8 \cdot \left(\frac{\lambda_i \cdot l_i}{d_i} + \sum \zeta_i \right)}{g \cdot \pi^2 \cdot d_i^4};$$

где $\sum \zeta_i$ – суммарный коэффициент местного сопротивления (КМС) на соответствующем участке;

d_i – диаметр соответствующего участка трубопровода, м;

l_i – длина соответствующего участка трубопровода, м.

g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

Суммарный коэффициент местного сопротивления и длины участков трубопровода выбрать из таблицы «Исходные данные» в соответствие со своим вариантом.

Вычислить суммарный коэффициент сопротивления сети:

$$A_{\Sigma} = A_1 + A_2 + A_3 .$$

5. Вычислить затраты напора в сети, используя формулу

$$H_{icetu} = A_{\Sigma} \cdot Q_i^2 + H_{\Gamma}$$

где H_{Γ} – перепад отметок, м.

Перепад отметок выбирается из таблицы «Исходные данные» в соответствии со своим вариантом.

Расход выбирается из таблицы «Характеристики насоса».

Результаты расчетов представить в таблице.

Расход $Q_i, \text{м}^3/\text{с}$	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016
Затраты напора в сети $H_{icetu}, \text{м}$									

6. По результатам вычислений в одной координатной сетке Q-H построить характеристику сети $H_{icetu}(Q)$ и напорную характеристику насоса $H_{нас}(Q)$. Напорную характеристику насоса $H_{нас}$ выбрать из таблицы «Характеристики насоса» в соответствии со своим вариантом.

7. Используя метод наложения характеристик, определить фактический рабочий режим лопастного насоса. Для этого по графику определить точку пересечения характеристик, а проекции этой точки на координатные оси определяют рабочие параметры насоса:

$$Q_{\phi 1} = \text{м}^3/\text{с}; H_{\phi 1} = \text{м}.$$

8. Построить график зависимости КПД от расхода $\eta(Q)$. Для фактического расхода $Q_{\phi 1}$ определить КПД насоса: $\eta =$.

9. Используя формулу

$$N = \frac{Q_{\phi} \cdot \rho \cdot g \cdot H_{\phi}}{\eta}$$

вычислить мощность, потребляемую насосом при рабочих

параметрах.

где ρ – плотность жидкости $\text{кг}/\text{м}^3$;

Плотность жидкости определяется по таблице «Физические характеристики воды» исходя из заданной температуры воды.

10. Вычислить потери напора во всасывающей линии для фактического расхода:

$$h_{BC} = \left(\frac{\lambda \cdot l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{v_{cp}^2}{2 \cdot g},$$

учитывая $A_1 = \frac{8 \cdot \left(\frac{\lambda_1 \cdot l_1}{d_1} + \sum \zeta_1 \right)}{g \cdot \pi^2 \cdot d_1^4}$, $Q = v_{cp} \cdot \omega$ и $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow$

$$h_{BC} = \frac{A_1 \cdot \pi^2 \cdot d_1^4 \cdot v_{cp}^2}{16} = \frac{A_1 \cdot \pi^2 \cdot d_1^4 \cdot Q^2 \cdot 16}{16 \cdot \pi^2 \cdot d_1^4} = A_1 \cdot Q^2,$$

где $Q = Q_{\phi 1}$.

11. Вычислить значение допустимой геометрической высоты всасывания:

$$H_{Г BC \text{ доп}} = \frac{P_{BAR} - P_{НП}}{\rho \cdot g} - h_{BC} - 12 \left(\frac{n \sqrt{Q_{\phi 1}}}{C} \right)^{\frac{4}{3}};$$

где P_{BAR} – барометрическое давление, Па;

$P_{НП}$ – давление насыщенных паров, Па;

n – скорость вращения рабочего колеса, об/с;

C – коэффициент кавитационной быстроходности.

Скорость вращения рабочего колеса и коэффициент кавитационной быстроходности выбрать из таблицы «Исходные данные» в соответствии со своим вариантом. Давление насыщенных паров выбрать по таблице «Исходные данные» исходя из заданной температуры воды. Барометрическое давление P_{BAR} принимается равным 101,3 кПа.

12. Используя формулы подобия произвести пересчет характеристик насоса при увеличении или уменьшении скорости вращения рабочего колеса на 20 %:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \Rightarrow H_2 = H_1 \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2};$$

где n_1 – исходная скорость вращения рабочего колеса, *об/с*;

n_2 – скорость вращения рабочего колеса после изменения (увеличения или уменьшения), *об/с*;

$H_{1нас}$ – исходная напорная характеристика насоса, *м*;

$H_{2нас}$ – напорная характеристика насоса после изменения скорости вращения рабочего колеса (увеличения или уменьшения), *м*;

Q_1 – исходный расход, *м³/с*;

Q_2 – расход после изменения скорости вращения рабочего колеса (увеличения или уменьшения), *м³/с*;

Результаты расчета представить в таблице.

Расход $Q_1, м^3/с$	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016
Расход $Q_2, м^3/с$									
$H_{1нас}, м$									
$H_{2нас}, м$									

13. К ранее построенным характеристикам $H_{icetu}(Q)$ и $H_{нас}(Q)$ в той же координатной сетке Q-H построить новую напорную характеристику насоса $H_{2нас}(Q_2)$.

14. По новой построенной зависимости определить точку пересечения характеристик $H_{icetu}(Q)$ и $H_{2нас}(Q_2)$. Проекция этой точки на координатные оси определит новые рабочие параметры насоса при измененной скорости вращения рабочего колеса:

$$Q_{\Phi 2} = м^3/с; \quad H_{\Phi 2} = м.$$

Сравнить новые рабочие параметры насоса с первоначальными. Сделать вывод.

15. Произвести перерасчет характеристик насоса при последовательном или параллельном включении двух одинаковых насосов. Обозначим характеристики (H и Q) для первого насоса $H_{1нас}$ и Q_1 , а для второго – $H_{2нас}$ и Q_2 . Так как насосы одинаковые, то числовые значения их характеристик совпадают. Значения $H_{1нас}$ и Q_1 выбрать из таблицы «Характеристики насоса».

Для перерасчета характеристик насоса при последовательном или параллельном включении двух одинаковых насосов использовать соотношения:

- при последовательном включении двух одинаковых насосов, напорные характеристики суммируются, а расход не изменяется, т.е.:

$$H_{1нас} + H_{2нас} = 2 H_{1нас} = H_{1-2нас} \text{ (т.к. } H_{1нас} = H_{2нас}); Q_1 = Q_2 = Q_{1-2}.$$

- при параллельном включении двух одинаковых насосов, напорные характеристики не изменяются, а расход суммируется, т.е.:

$$H_{1нас} = H_{2нас} = H_{1-2нас}; Q_1 + Q_2 = 2 Q_1 = Q_{1-2} \text{ (т.к. } Q_1 = Q_2).$$

Результаты расчета представить в таблице.

$H_{1нас}, м$									
$H_{1-2нас}, м$									
$Q_1, м^3/с$	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016
$Q_{1-2}, м^3/с$									

16. К ранее построенным характеристикам $H_{исети}(Q)$, $H_{нас}(Q)$ и $H_{2нас}(Q_2)$ в той же координатной сетке Q-H построить новую напорную характеристику насоса $H_{1-2нас}(Q_{1-2})$.

17. По новой построенной зависимости определить точку пересечения характеристик $H_{исети}(Q)$ и $H_{1-2нас}(Q_{1-2})$. Проекция этой точки на координатные оси определит новые рабочие параметры насоса при последовательном или параллельном включении двух одинаковых насосов:

$$Q_{фз} = м^3/с; H_{фз} = м.$$

Сравнить новые рабочие параметры насоса с первоначальными.

18. Проанализировать полученные данные и сформулировать выводы.

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

4.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

Самостоятельная работа – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

При организации самостоятельной работы следует взять за правило:

- учиться ежедневно, начиная с первого дня семестра, пропущенные дни будут потеряны безвозвратно;
- чтобы выполнить весь объем самостоятельной работы, необходимо заниматься по 3–5 часов ежедневно;
- начиная работу, надо выбрать что-нибудь среднее по трудности, затем перейти к более трудной работе, и напоследок оставить легкую часть, требующую не столько больших интеллектуальных усилий, сколько определенных моторных действий.

Виды заданий для внеаудиторной самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференциальный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности студента.

Ниже представлены рекомендации по организации работы по основным видам самостоятельной внеаудиторной деятельности студентов по дисциплине «Гидрогазодинамика».

4.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки по всем типам занятий является работа с литературой. Умение работать с литературой означает научиться осмысленно пользоваться учебно-методическим и другим информационным обеспечением дисциплины.

Для изучения дисциплины вся рекомендуемая литература подразделяется на основную и дополнительную и приводится в п. 10 рабочей программы дисциплины.

К основной литературе относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия).

Поскольку в учебной литературе (учебниках) зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражение новые документы, события, явления, научные открытия последних лет, то рекомендуется для более углубленного изучения программного материала дополнительная литература.

Прежде чем приступить к чтению, необходимо запомнить или записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания, название интересующих глав.

Содержание (оглавление) дает представление о системе изложения ключевых положений всей публикации и помогает найти нужные сведения.

Предисловие или введение книги поможет установить, на кого рассчитана данная публикация, какие задачи ставил перед собой автор, содержится краткая информация о содержании глав работы. Иногда полезно после этого посмотреть послесловие или заключение. Это помогает составить представление о степени достоверности или научности данной книги.

Изучение научной учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей. Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект. Такие записи удлиняют процесс проработки, изучения книги, но способствуют ее лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал. При изучении литературы особое внимание следует обращать на новые термины и понятия. Записи позволяют восстановить в памяти ранее прочитанное без дополнительного обращения к самой книге.

Процесс изучения дисциплины предполагает также активное использование информационных технологий при организации своей познавательной деятельности.

Наличие огромного количества материалов в Сети и специализированных поисковых машин делает Интернет незаменимым средством при поиске информации в процессе обучения.

Однако при использовании интернет-ресурсов следует учитывать следующие рекомендации:

- необходимо критически относиться к информации;
- следует научиться обрабатывать большие объемы информации, представленные в источниках, уметь видеть сильные и слабые стороны, выделять из представленного материала наиболее существенную часть;
- необходимо избегать плагиата, поэтому, если текст источника остается без изменения, необходимо сделать ссылки на автора работы.

4.3 Подготовка к лабораторным работам

Подготовка к лабораторным работам осуществляется студентом во внеаудиторное время в часы, отведенные на самостоятельную работу. Подготовка требует немало времени, поэтому целесообразно планировать ее заранее за

несколько дней до занятия и целесообразно проводить в следующей последовательности.

1. Внимательно ознакомьтесь с описанием соответствующей лабораторной работы руководствуясь методическими указаниями к выполнению лабораторной работе, уясните цель и задачи эксперимента.

2. Используя конспект лекций и рекомендованную в описании лабораторной работы учебную литературу, изучите теоретические вопросы, относящиеся к лабораторному эксперименту. Выясните теоретические положения, знание которых необходимо для выполнения работы и понимания полученных результатов.

3. Изучите принципиальную схему лабораторной установки, приведенную в описании работы. Ознакомьтесь с применяемым оборудованием, контрольно-измерительными приборами, принципом их действия, правилами эксплуатации.

4. Ознакомьтесь с порядком выполнения работы, усвойте методику измерения физических величин в лабораторном эксперименте, последовательность операций и форму представления полученных результатов.

5. В индивидуальном лабораторном журнале подготовьте «заготовку отчета», который должен быть отражением работы по систематизации приобретенных знаний, опорным планом для проведения эксперимента.

«Заготовку отчета» рекомендуется выполнять по следующей схеме:

- номер, название и цель работы;
- оборудование, приборы и материалы, применяемые в процессе измерений;
- краткий конспект теоретических положений по теме исследования – анализ физических основ метода и описание методики эксперимента, который включает:
 - физическое явление, изучаемое в работе, связь между величинами, его описывающими;
 - объект исследования, его особенности;

- физическое явление, положенное в основу метода измерений;
- зависимость, которая может быть экспериментально проверена;
- условия, позволяющие осуществить такую проверку;
- и поясняющие теоретический материал рисунки;
- принципиальная схема установки;
- описание метода измерения;
- заготовки таблиц, в которых будут представлены результаты измерений и расчетов (примеры таблиц даются в методическом указании к работе);
- расчетные формулы искомых величин.

6. Проверьте степень подготовленности к лабораторному занятию по контрольным вопросам, приводимым в описании работы.

Окончательное оформление работы, обработка результатов эксперимента и подготовка к защите по контрольным вопросам проводится студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу.

К следующему (после выполнения очередной лабораторной работы) занятию каждый студент должен представить окончательный отчет о выполненной лабораторной работе, в который входит «заготовка отчета» дополненная следующими пунктами:

- результаты измерений и вычислений в виде таблиц (или ином виде, согласно методическим рекомендациям к данной лабораторной работе);
- расчетные формулы, по которым производились вычисления с примером вычисления по каждой формуле, что позволяет при необходимости быстро проверить правильность расчета;
- систематизированные результаты эксперимента – схемы, графики, диаграммы и т.п., в соответствии с заданием на лабораторную работу и требованиям, предъявляемым к их оформлению;

- оценка надежности и достоверности результатов (примеры вычислений величин, измеряемых косвенно, и погрешностей для прямых и косвенных измерений);
- основные выводы по результатам работы, вытекающие из экспериментальных данных или на основании сравнения полученных результатов с теоретическими данными, если это возможно с объяснением расхождения.

4.4 Подготовка к практическим занятиям

Практическое занятие – вид учебных занятий, направленное на приобретение первоначальных практических навыков в решении различного вида задач в рамках изучаемой темы. А умение решать задачи – важный критерий усвоения теоретического материала.

Целью практических занятий является закрепление, расширение, углубление теоретических знаний, полученных на лекциях и в ходе самостоятельной работы, развитие познавательных способностей и формирование у студентов умений продуктивной учебной деятельности путем – решения задач различного вида; выполнения расчетно-графических работ (домашних заданий) и устного опроса по теме практического занятия.

При подготовке к практическому занятию студент должен проработать теоретический материал, относящийся к теме занятия. Следует изучить конспект лекции, а также конспект материала самостоятельного изучения темы или дополнительные рекомендованные преподавателем материалы. При этом необходимо выяснить физический смысл всех величин, встречающихся в конспекте лекций по данному вопросу.

Решение задач требует четкого знания формулировок законов, условий применения этих законов при решении практических задач, правильного написания формул, системы единиц физических величин.

Если в процессе самостоятельной работы при решении задач у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

Для практических занятий по дисциплине «Гидрогазодинамика» у студента должна быть отдельная тетрадь. Студенту рекомендуется при подготовке к практическому занятию выписать:

- основные законы, условия их выполнения;
- пояснить физический смысл величин, входящих в закон, обозначить единицы измерения;
- графические иллюстрации, поясняющие физический смысл величин, входящих в закон;
- численные значения постоянных, входящих в математическую формулу закона;
- кратко перечислить практические случаи применения закона.

Такая подготовка способствует успешному ответу в ходе *письменного опроса*, который проводится преподавателем для закрепления изучаемого материала, а также при решении задач на практическом занятии.

Подготовка к выполнению заданий индивидуальной работы.

Для успешного решения задач индивидуальной работы необходимо просмотреть записи решений задач, выполненных в аудитории. Приступая к решению любой задачи, следует выполнять определенные правила.

При выполнении заданий индивидуальной работы рекомендуется иметь отдельную тетрадь, которая находится у студента. Отчет о выполнении заданий индивидуальной работы для проверки преподавателем выполняется на отдельных листах формата А4. На одном листе пишется полностью условие задачи, краткое

условие, решение; чертежи выполняются аккуратно с использованием чертежных инструментов. Все численные данные переводятся в систему СИ. В конце пишется ответ.

4.5 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем

Для подготовки конспекта рекомендуется использовать основную и дополнительную литературу.

При написании конспекта придерживайтесь следующих рекомендаций.

1. Прежде чем приступить к чтению, необходимо записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания.
2. Внимательно прочитайте текст.
3. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.
4. Выделите главное, составьте план.
5. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.
6. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана.

При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты, учитывайте лаконичность, значимость мысли. В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения.

4.6 Подготовка к текущему и промежуточному контролю

Подготовка к тестированию. В современном образовательном процессе тестирование как новая форма оценки знаний занимает важное место.

Цель тестирований в ходе учебного процесса студентов состоит не только в систематическом контроле знаний, но и способствует повышению эффективности обучения учащихся, позволяет выявить уровень усвоения теоретического материала, выявить уровень практических умений и аналитических способностей

студентов. А на основе этого идет коррекция процесса обучения и планируются последующие этапы учебного процесса.

При подготовке к тесту следует, прежде всего, просмотреть конспект лекций и практических занятий и отметить в них имеющиеся темы и практические задания, относящиеся к тематике теста. Особо следует уделить внимание содержанию тем заданных на самостоятельное изучение, так как часть вопросов в тестах может относиться именно к этим темам. Если какие – то лекционные вопросы и практические задания на определенные темы не были разобраны на занятиях (или решения которых оказались не понятными), следует обратиться к учебной литературе, рекомендованной преподавателем. Полезно самостоятельно решить несколько типичных заданий по соответствующему разделу.

При подготовке к тесту не следует просто заучивать, необходимо понять логику изложенного материала. Этому немало способствует составление развернутого плана, таблиц, схем. Как и любая другая форма подготовки к контролю знаний, тестирование имеет ряд особенностей, знание которых помогает успешно выполнить тест.

Можно дать следующие методические рекомендации:

- прежде всего, следует внимательно изучить структуру теста, оценить объем времени, выделяемого на данный тест, увидеть, какого типа задания в нем содержатся, что поможет настроиться на работу;
- лучше начинать отвечать на те вопросы, в правильности решения которых нет сомнений, пока не останавливаясь на тех, которые могут вызвать долгие раздумья, что позволит успокоиться и сосредоточиться на выполнении более трудных вопросов;
- очень важно всегда внимательно читать задания до конца, не пытайтесь понять условия «по первым словам» или выполнив подобные задания в

предыдущих тестированиях, так как такая спешка нередко приводит к досадным ошибкам в самых легких вопросах;

- если Вы не знаете ответа на вопрос или не уверены в правильности, следует пропустить его и отметить, чтобы потом к нему вернуться;
- думайте только о текущем задании, необходимо концентрироваться на данном вопросе и находить решения, подходящие именно к нему;
- многие задания можно быстрее решить, если не искать сразу правильный вариант ответа, а последовательно исключать те, которые явно не подходят, что позволяет в итоге сконцентрировать внимание на одном-двух вероятных вариантах;
- рассчитывать выполнение заданий нужно всегда так, чтобы осталось время на проверку и доработку (примерно 1/3-1/4 запланированного времени), что позволит свести к минимуму вероятность опусок и сэкономить время, чтобы набрать максимум баллов на легких заданиях и сосредоточиться на решении более трудных, которые вначале пришлось пропустить;
- процесс угадывания правильных ответов желательно свести к минимуму, так как это чревато тем, что Вы забудете о главном: умении использовать имеющиеся накопленные в учебном процессе знания, и будете надеяться на удачу.

Подготовка к промежуточной аттестации. Формами промежуточной аттестации (контроля) являются экзамен и зачет. Экзамен (зачет) может проводиться в виде письменного опроса с последующим собеседованием или с применением тестирования.

Экзамен (зачет) – форма проверки полученных теоретических и практических знаний, их прочность, развитие творческого мышления, приобретение навыков самостоятельной работы, умения синтезировать полученные знания.

Основная цель подготовки к экзамену (зачету) – достичь понимания физических законов и явлений, а не только механически заучить материал.

Рекомендации по подготовке к экзаменационному (зачетному) тесту представлены выше.

Подготовка к устной сдаче экзамена (зачета) включает в себя несколько основных этапов:

- просмотр программы учебного курса;
- определение необходимых для подготовки источников (учебников, дополнительной литературы и т.д.) и их изучение;
- использование конспектов лекций, материалов практических занятий;
- консультирование у преподавателя.

Для успешной сдачи экзамена рекомендуется соблюдать несколько правил.

1. Подготовка к экзамену (зачету) начинается с первого занятия по дисциплине, на котором аспиранты получают общую установку преподавателя и перечень основных требований к текущей и промежуточной аттестации. При этом важно с самого начала планомерно осваивать материал, руководствуясь, прежде всего перечнем вопросов к экзамену, конспектировать важные для решения учебных задач источники.

2. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до экзамена (зачета). В течение этого времени нужно успеть повторить и систематизировать изученный материал.

3. За несколько дней перед экзаменом (зачетом) распределите вопросы равномерно на все дни подготовки, возможно, выделив последний день на краткий повтор всего курса.

4. Каждый вопрос следует проработать по конспекту лекций, по учебнику или учебному пособию. В процессе подготовки к экзамену (зачету) при изучении того или иного физического закона, кроме формулировки и математической записи

закона, следует обратить внимание на опыты, которые обнаруживают этот закон и подтверждают его справедливость, границы и условия его применимости.

Для лучшего запоминания материала целесообразно работать с карандашом в руках, записывая выводимые формулы, изображая рисунки, схемы и диаграммы в отдельной тетради или на листах бумаги.

5. После повтора каждого вопроса нужно, закрыв конспект и учебники, самостоятельно вывести формулы, воспроизвести иллюстративный материал с последующей самопроверкой.

6. Все трудные и не полностью понятые вопросы следует выписывать на отдельный лист бумаги, с последующим уточнением ответов на них у преподавателя на консультации.

7. При ответе на вопросы билета студент должен продемонстрировать знание теоретического материала и умение применить при анализе качественных и количественных задач. Изложение материала должно быть четким, кратким и аргументированным.

4.7 Подготовка к другим видам работ

Выполнение кейс-заданий. Умение решать задачи – важный критерий усвоения теоретического материала. Целью выполнения *кейс-заданий* является закрепление, расширение, углубление теоретических знаний, полученных на лекциях и в ходе самостоятельной работы, развитие познавательных способностей и формирование у студентов умений продуктивной учебной деятельности путем – решения задач различного вида; выполнения расчетно-графических работ (домашних заданий) и устного опроса по теме практического занятия.

При подготовке к выполнению данных заданий студент должен проработать теоретический материал, относящийся к теме задания. Следует изучить конспект лекции, а также конспект материала самостоятельного изучения темы или дополнительные рекомендованные преподавателем материалы. При этом

необходимо выяснить физический смысл всех величин, встречающихся в конспекте лекций по данному вопросу.

Решение кейс-задач и проектной работы требует четкого знания формулировок законов, условий применения этих законов при решении практических задач, правильного написания формул, системы единиц физических величин.

Если в процессе самостоятельной работы при решении задач у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е.М. Емышева [и др.].– Москва: Изд-во РГТУ, 2013.– 125 с. – Режим доступа:

<https://www.rsuh.ru/upload/iblock/c70/c70c10002f5932ab48798aae10f5a351.do>

2 Методические рекомендации при подготовке к занятиям по физике (лекциям практике, решения задач, лабораторным работам) [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Е. А. Попкова.– Рыбинск: ООО Изд-во «РМП», 2009. – 54 с. – Режим доступа: <http://www.rsatu.ru/sites/physics/?doc=1491334469>

3 Кесаманлы, Ф.П. Физика. Как правильно организовать самостоятельную работу при выполнении учебных экспериментов [Электронный ресурс]: метод. пособие / Ф.П. Кесаманлы, В.М. Коликова. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.– 56 с.– Режим доступа:

http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/048/37048/14061?p_page=2

4 Лызь, Н.А. Тенденции развития высшего образования [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Н.А Лызь, А.Е. Лызь. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 48 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/2332317/>

5 Глаголев С.Н. Проблемы инженерного образования в области техники и технологий [Электронный ресурс]: учебное пособие / С.Н. Глаголев, Т.А. Дуюн, Н.С. Севрюгина. – Электрон. текстовые данные.– Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013. – 109 с. – 978-5-361-00098-2. – Режим доступа:

<http://www.iprbookshop.ru/28387.html>

6. Новикова, А.М. Механика жидкости и газа [Электронный ресурс]: учеб. пособие/ А.М. Новикова, А.В. Кудрявцев, И.И. Иваненко. – Электрон. текстовые данные. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2014. – 140 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/58534.html>. – ЭБС «IPRbooks»

7 Жулина, Е.Г. Сборник заданий и задач по гидравлике [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие/ Жулина Е.Г., Китов А.Г. - Н.Новгород: ВГИПУ, 2010. - 78 с. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5581980/>

8 Кузнецов В.А. Основы гидрогазодинамики [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Кузнецов. — Электрон. текстовые данные. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2012. — 108 с. — 978-5-361-00168-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28374.html>

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Краткий конспект лекций	4
1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции	4
1.2 Краткое содержание курса лекций	7
2 Методические рекомендации к лабораторным работам	84
2.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы	84
2.2 Выполнение лабораторной работы в лаборатории	84
2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы	86
2.4 Наименование предлагаемых к выполнению лабораторных работ и методические указания к ним	86
3 Методические рекомендации к практическим занятиям	89
3.1 Общие рекомендации по подготовке к практическим занятиям	89
3.2 Примерные темы практических занятий	92
3.3 Примерные задачи по изучаемым темам	93
3.4 Пример решения и оформления задачи	100
3.5 Методические указания к выполнению задач реконструктивного уровня	105
3.6 Наименование предлагаемых к выполнению кейс-заданий (ситуационные задачи) и методические указания к ним	117
4 Методические рекомендации к самостоятельной работе	128
4.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы	128
4.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением	129
4.3 Подготовка к лабораторным работам	130
4.4 Подготовка к практическим занятиям	133
4.5 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем	135

4.6 Подготовка к текущему и промежуточному контролю	135
4.7 Подготовка к другим видам работ	139
Библиографический список	141

Верхотурова Ирина Владимировна,
доцент кафедры Физики АмГУ, канд. физ. – мат. наук