

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра автоматизации производственных процессов

ГИДРАВЛИКА

Рабочая программа

Задания на контрольную работу

Факультет технологии и автоматизации управления в машиностроении

Специальность 120100 – технология машиностроения.

Санкт-Петербург

2004

ВВЕДЕНИЕ

Цель преподавания дисциплины. Курс «Гидравлика», относится к числу комплексных дисциплин и включает в себя фундаментальную дисциплину общетехнического цикла — «Гидравлику»

В гидравлике, или технической механике жидкости, излагаются общие вопросы законов равновесия и движения жидкостей и газов, а также методы применения этих законов для решения инженерных задач в конкретной области техники, в том числе и в гидропневмоприводе и гидропневмоавтоматике, используемых в станочном оборудовании (машиностроительный гидропневмопривод). В настоящее время такой вид приводов находит широкое применение в станках-автоматах, гибких производственных системах, роторных линиях.

Конечная цель преподавания дисциплины заключается в том, чтобы студенты получили знания основ гидравлики машиностроительного профиля, необходимы им в практической работе и при изучении других специальных дисциплин, включенных в учебный план специальностей 1201

Задачи изучения дисциплины. В результате изучения курса гидравлики,

- овладеть основами теории технической механики жидкости;
- овладеть методикой гидравлических расчетов напорных систем.

Место дисциплины в учебном процессе. Курс «Гидравлика», тесно связан со многими общетеоретическими, общеинженерными и специальными дисциплинами учебного плана специальностей 1201

Курс базируется на дисциплинах: «Высшая математика», «Физика», «Теоретическая и прикладная механика», «Начертательная геометрия», «Детали машин».

Знания, полученные студентами при изучении курса «Гидравлика», используются ими при изучении таких специальных дисциплин, как «Станочное оборудование автоматизированного производства», «Металлорежущие станки и промышленные роботы», «Автоматизация производственных процессов в машиностроении», «Технология автоматизированного производства».

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА (100 часов)

ВВЕДЕНИЕ (2 часа)

[1], с. ,1, 2, или [2], с. 4 . . . 6

Предмет и задачи изучения курса «Гидравлика», его место в системе подготовки инженера-механика по технологии машиностроения, металлообрабатывающим станкам и инструментам. Связь курса с общетеоретическими, общепрофессиональными и специальными дисциплинами учебного плана специальности 1201

Краткая история развития науки «Гидравлика». Гидравлика машиностроительного профиля и одно из ее практических приложений — гидропривод и гидропневмоавтоматика станочного оборудования.

Перспективы развития средств гидро- и пневмоавтоматики в машиностроении.

Методологические проблемы, затрагиваемые в курсе «Гидравлика, гидропневмопривод и гидропневмоавтоматика станочного оборудования.

1. Жидкость, ее механическая модель и свойства

[1], с. 5...11, или [2], с. 6... 19

Определение жидкости, ее отличительные особенности. Свойства упругости и текучести. Макроскопическая однородность и изотропность жидкости. Модель сплошной среды. Масса жидкости и плотность ее распределения в объеме. Зависимость плотности от давления и температуры. Коэффициенты объемного сжатия и температурного расширения. Объемный модуль упругости жидкости.

Вязкость жидкости. Закон Ньютона о внутреннем трении при плоскопараллельном движении жидкости. Динамический и кинематический коэффициенты вязкости жидкости и их зависимости от температуры. Понятие о неньютоновских жидкостях.

Силы и напряжения в сплошной среде. Классификация сил: внутренние и внешние, объемные и поверхностные. Выражение объемной силы по Ньютону, напряжение объемной

силы в точке объема, его размерность. Выражение объемной силы через ее напряжение. Поверхностные силы, нормальные и касательные напряжения поверхностных сил в точке поверхности. Нормальное напряжение и давление в жидкости, связь между ними. Градиент давления — напряжение си.ы давления в точке объема. Выражение силы давления через ее напряжение.

2. Гидростатика

[1], с. 11 ...,26, или [2], с. 20... 35

Определение, задачи и методы гидростатики. Гидростатическое давление и его свойства.

Дифференциальные уравнения гидростатики и их интегрирование для частных случаев полей объемных сил. Основное уравнение гидростатики. Гидростатический напор. Закон Паскаля. Манометрическое давление и вакуум. Пьезометрическая высота. Измерение давления.

Силы гидростатического давления на плоские и криволинейные поверхности. Давление на погруженное в жидкость тело. Закон Архимеда. Внутреннее давление в цилиндрических и сферических сосудах.

Относительный покой жидкости в равномерно вращающемся вокруг своей оси сосуде. Закон распределения давления. Уравнение свободной поверхности.

3. Теоретические основы динамики жидкости

[1]с27...34,и[2],с35..48

Определение, задачи и методы динамики жидкости. Элементы кинематики сплошной среды. Координаты и траектории движения частиц. Задание движения в переменных Лагранжа. Координаты точек пространства и скорости частиц в этих точках. Задание движения в переменных Эйлера. Поле скоростей и линии тока. Внешние течения. Ускорение частиц, локальная и конвективная составляющие ускорения, их физический смысл.

Установившееся и неустановившееся движения. Струйная модель течений. Трубка тока и струйка тока (элементарная струйка). Внутренние течения. Закон сохранения массы и неразрывность движения сплошной среды. Выражение массового и объемного расходов жидкости в элементарной

струи и условие неразрывности ее движения (баланс расхода).

Закон сохранения количества движения и дифференциальное уравнение динамики сплошной среды (без учета сил трения) в напряжениях. Преобразование уравнения к виду, удобному для интегрирования. Интегрирование дифференциального уравнения вдоль струйки тока при установившемся движении. Интеграл Бернулли, его физический смысл. Закон сохранения механической энергии (баланс энергии). Гидродинамический напор и гидродинамическое давление.

4. Основные уравнения гидравлики.

Гидравлические сопротивления

[1], с. 35 .. 42, 46...72, и [2], с.49 ...95

Поток жидкости и его одномерная гидравлическая модель. Напорное и безнапорное движение жидкости. Ламинарное и турбулентное течения жидкости, равномерное и неравномерное течения. Вторичные течения. Параметры потока: нормальное сечение, смоченный периметр, гидравлический радиус, эпюра местных скоростей, расход жидкости, средняя скорость, мощность потока, кинетическая энергия, коэффициент кинетической энергии, потенциальная энергия, количество движения, коэффициент количества движения.

Уравнение баланса расхода для потока.

Уравнение баланса энергии (уравнение Бернулли) для потока, диаграмма уравнения Бернулли, условия применения уравнения Бернулли.

Гидравлическое уравнение количества движения.

Основное уравнение равномерного движения.

Гидравлическое и гидродинамическое сопротивления и их оценка. Сопротивления по длине и местные. Потери напора, единицы измерения. Структура формулы Вейсбаха-Дарси потери напора по длине. Локальный и гидравлический коэффициенты трения. Функциональная зависимость коэффициента гидравлического трения от параметров течения и пограничной геометрии потока.

Основы гидродинамического подобия. Геометрическое, кинематическое и динамическое подобия. Критерии гидродинамического подобия: числа Ньютона, Эйлера,

Рейнольдса, Фруда, Струхала.

Режимы течения жидкости. Число Рейнольдса и его критические значения.

Ламинарное течение в круглой трубе. Эпюра местных

скоростей течения, расход, средняя скорость, коэффициент гидравлического трения.

Общий вид формулы для коэффициента гидравлического трения при ламинарном течении в трубах некруглого сечения.

Краткая характеристика турбулентного течения. Актуальные и осредненные параметры течения. Пульсации скорости и давления. Модель осредненного турбулентного течения. Турбулентная вязкость. Полуэмпирическая теория пристенной турбулентности Л. Прандтля.

Законы гидравлического сопротивления при турбулентном течении. График Никурадзе. Расчетный график для определения коэффициента гидравлического трения в трубах.

Местные гидравлические сопротивления. Характеристика течений на участках местных сопротивлений. Расчетная схема и формула Вейсбаха для местных потерь напора. Коэффициент местных потерь напора. Потери напора в расширяющихся и сужающихся потоках. Формула Борда. Местные потери напора при изменении направления потока, в трубопроводной арматуре и в случае других видов препятствий.

5. Гидравлические расчеты элементов напорных систем

[1], с. 73... 99

Гидравлические напорные системы; их классификация, составные части систем, задачи гидравлического расчета.

Гидравлический расчет трубопроводов. Трубопроводы простые и сложные, разветвленные, разомкнутые и кольцевые, с последовательным и параллельным соединением труб. Трубопроводы с подачей жидкости из резервуара и насосной подачей. Расчет простых трубопроводов. Характеристики трубопровода. Основные задачи на расчет простого трубопровода. Трубопровод с непрерывной раздачей жидкости. Методика расчета сложного трубопровода с использованием ЭВМ. Трубопровод с насосной подачей (насосная установка). Всасывающий и нагнетательный трубопровод. Методика расчета. Сифон, особенность его работы.

Расчет трубопроводов при неустановившемся движении. Неустановившееся напорное движение несжимаемой жидкости в жестких трубах. Уравнение одномерного неустановившегося движения. Инерционный напор и его выражение для потока в цилиндрической трубе.

Гидравлический удар. Волновой характер гидравлического удара. Определение ударного давления и скорости распространения упругих деформаций при гидравлическом ударе по формулам Н. Е. Жуковского. Полный и неполный гидравлический удар. Защита систем от гидравлического удара.

Расчет проходных отверстий для пропуска жидкости. Истечение из резервуара через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре. Сжатие струи. Определение скорости течения и расхода. Коэффициенты сопротивления и сжатия, скорости и расхода, их зависимость от числа Рейнольдса.

Истечение через насадки. Типы насадок и область их применения в технике. Особенности истечения через насадки при постоянном напоре.

Истечение при переменном напоре. Время опорожнения резервуара.

Определение расхода жидкости в проходных отверстиях гидравлических аппаратов.

Расчет ламинарных течений в зазорах и щелях сопрягаемых элементов с плоскими и цилиндрическими неподвижными и подвижными стенками. Облитерация щелей. Основы гидродинамической теории смазки.

Перечень лабораторных работ

1. Изучение диаграммы уравнения Бернулли и местных потерь напора при установившемся движении жидкости в трубопроводе.

2. Изучение потерь напора по длине при равномерном движении жидкости в трубе.

3. Исследование истечения жидкостей через отверстия и насадки при постоянном напоре.

Тематический план практических занятий.

1. Определение силы суммарного гидравлического давления на плоские и криволинейные цилиндрические поверхности

Применение уравнения Бернулли для расчёта гидравлического сопротивления напорных систем

2. Определение потерь энергии в прямой трубе постоянного и переменного сечения.
3. Определение численных значений коэффициента местного сопротивления.
4. Полный гидравлический расчёт напорных трубопроводов при установленном движении жидкости.

Литература

Основная:

1. Погорелов В. И., Тюшев В. С. Гидропривод и автоматика: Учеб. пособие. — Л.: СЗПИ, 1968.
2. Полубояринов В.А. Гидравлические системы в станочном оборудовании: Гидравлика (краткий курс): Учеб. пособие. — Л.: СЗПИ, 1991.

Дополнительная:

Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Под общ. ред. Б.Б. Некрасова. -Минск: Высшая школа, 1985.

Тематический план лекций

1. Введение. Жидкость и ее свойства. Модель сплошной среды. Силы и напряжения в жидкости. Закон Ньютона о внутреннем трении в жидкости. Гидростатика. Гидростатическое давление. Дифференциальные уравнения гидростатики и их интегрирование. Основное уравнение гидростатики. Монометрическое давление и вакуум: Законы Паскаля и Архимеда. Расчет сил гидростатического давления . (2 часа)

2. Основы гидродинамики. Задание движения жидкости и условие его неразрывности. Струйная модель течения. Объемный расход. Дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости. (2 часа)

3. Интеграл Бернулли. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Энергетический смысл уравнения. Вывод уравнения Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение количества движения. (2 часа)

4. Гидравлические сопротивления и потери энергии. Два вида потерь энергии. Формулы Дарси и Вейсбаха. Классификация режимов течения жидкости. Ламинарное течение в трубе. Закон распределения скорости. Расход. Закон сопротивления. Турбулентное течение в трубах. Законы сопротивления при турбулентном течении. Местные гидравлические сопротивления. (2 часа)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Жидкость, ее механическая модель и свойства [1], с. 6—13, или [3], с. 7—26

Приступая к изучению механики жидкости, необходимо прежде всего ознакомиться с объектом изучения — жидкостью. Нужно знать определение жидкости и ее физическую модель, объяснить свойство текучести. Основываясь на общих свойствах так называемой нормальной жидкости — макроскопической однородности и изотропности — необходимо представить жидкость в виде модели сплошной текучей среды, т. е. как множество материальных точек с непрерывным распределением вещественных кинематических, динамических и других физических характеристик, обусловленных разнообразными видами движения материи и образующих поля физических величин (скалярные и векторные). Необходимо представлять характеристику объемной плотности. Необходимо представлять характеристику объемной плотности распределения физических величин. Например, распределение массы в сплошной среде определяется заданием скалярного поля плотности массы. Необходимо знать определение объемных и поверхностных сил, действующих на

жидкость. Нужно помнить, что в жидкости в общем случае действуют два вида напряжений: нормальные и касательные. Вектор нормальных напряжений обусловлен давлением, а градиент давления характеризует плотность распределения нормальных сил (сил давления). Касательные напряжения в жидкости связаны с поперечным градиентом скорости (скоростью деформации сдвига). Эта связь в модели так называемой ньютоновской жидкости—линейная (аналогично закону Гука для идеально упругих тел). Поэтому касательные напряжения в такой жидкости проявляются только при ее движении. Зависимость касательных: напряжений от скорости деформации сдвига в слоистом плоскопараллельном движении выражается законом Ньютона о внутреннем трении в жидкости. Эта зависимость определяет количественную сторону свойства текучести жидкой среды. Противоположным свойству текучести является вязкость, характеризующая динамическим и кинематическим коэффициентами вязкости. Вязкость жидкости зависит от температуры и слабо зависит от давления. Необходимо знать единицы измерения коэффициентов вязкости. Большой класс жидкостей (растворы, смолы, краски и др.) не удовлетворяют модели ньютоновской жидкости и называются неньютоновскими жидкостями.

Остановившись на нормальных напряжениях в жидкости, нужно пояснить свойство объемной упругости, знать размерность модуля упругости и скорость, с которой распространяются упругие деформации в жидкости.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение жидкости и поясните ее физическую модель.
Чем объясняется свойство текучести жидкости?
2. Что представляет модель сплошной среды? Для чего она вводится в механику жидкости?
3. Что называется плотностью распределения массы? Какова ее размерность?
4. Какие силы действуют на жидкость? Дайте их определения.
5. Что называется давлением жидкости? Укажите размерность давления. Как выражается плотность распределения нормальных сил?
6. Поясните действие касательных напряжений в жидкости и закон Ньютона о внутреннем трении.
8. Поясните свойство вязкости и, укажите размерность коэффициентов вязкости.

9. Поясните свойство упругости жидкости. Какое значение имеет модуль упругости воды?

10. С какой скоростью распространяются упругие деформации в жидкости?

2. Гидростатика

[1], с. 15—34

Гидростатика — раздел гидравлики, изучающий, законы равновесия жидкости. При отсутствии движения ньютоновской жидкости в ней нет касательных напряжений, а компоненты нормальных напряжений равны между собой и представляют гидростатическое давление (скалярная величина). Уравнения гидростатики выводятся из условия равновесия сил, действующих на выделенный элементарный объем жидкости, и могут быть представлены как в векторной, так и в аналитической форме. Студент должен знать вывод дифференциальных уравнений гидростатики и способы их интегрирования для некоторых частных случаев, например при равновесии жидкости в поле сил тяжести в отсутствие других массовых сил, а также при наличии центробежной силы инерции (относительный покой жидкости).

Необходимо знать основное уравнение гидростатики и его физическую сущность. Нужно изучить закон Паскаля, определение манометрического давлений и вакуума.

При расчете на прочность и устойчивость стенок, воспринимающих гидростатическое давление, необходимо знать способы определения гидростатических сил. Следует также знать простой вывод закона Архимеда с применением понятия «объем тела давления». Нужно уметь рассчитывать прочность стенок цилиндрических и сферических сосудов.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется гидростатическим давлением?
2. Приведите вывод уравнений гидростатики в дифференциальной форме.
3. Проинтегрируйте систему дифференциальных уравнений гидростатики при равновесии жидкости в случае отсутствия действия объемных сил, в поле сил тяжести и при

действию на жидкость центробежных сил и не райи.

4. Поясните физический смысл основного уравнения гидростатики. Приведите формулировку закона Паскаля.

5. Что называется манометрическим давлением и вакуумом? Чему равно предельное значение вакуума?

6. Как определяется сила суммарного гидростатического давления на плоские и криволинейные цилиндрические поверхности?

7. Приведите вывод закона Архимеда.

8. Как определяется величина растягивающих напряжений в стенках цилиндрических и сферических сосудов, содержащих жидкость под давлением?

3. Теоретические основы динамики жидкости

[1], с. 34—48

Гидродинамика — раздел гидравлики, изучающий законы движения жидкости. Изучение гидродинамики начинается с рассмотрения кинематических характеристик движущейся жидкости. Движение жидкости задается по Лагранжу — заданием координат движущихся частиц в функции времени, и по Эйлеру — заданием поля скоростей движущихся частиц в фиксированных точках пространства.

При рассмотрении модели течения жидкости в векторном поле скоростей вводятся векторные линии — линии тока, совпадающие в случае стационарного движения с траекториями частиц. Для внутренних течений рассматривается струйная модель потока как непрерывная совокупность струек тока (элементарных струек).

Необходимо запомнить определение линии тока, трубки тока и струйки тока, а также понятие объемного расхода жидкости к условию неразрывности движения струйки тока. Следует четко представлять себе модель равномерного течения, значение средней скорости и уравнение баланса расхода потока.

Переходя к изучению непосредственно гидродинамики, необходимо остановиться на наиболее простой модели движения — движении идеальной жидкости. Надо дать определение идеальной жидкости, отметить граничное условие на твердой стенке, знать отличие установившегося движения от неустановившегося.

При выводе дифференциальных уравнений движения идеальной жидкости (уравнений Эйлера) можно использо-

вать дифференциальные уравнения гидростатики с приложением принципа Д'Аламбера (о присоединении к силам; действующим на покоящуюся систему, силы инерции).

Интегрирование дифференциальных уравнений гидродинамики идеальной жидкости приводит к интегралу Бернулли, который дает выражение механической энергии жидкости в поле сил тяжести. Распространяя интеграл Бернулли на струйку тока, получают уравнение баланса удельной механической энергии для двух сечений струйки. Необходимо хорошо представлять физическую сущность этого уравнения, значения всех членов, ибо на его основе выводится уравнение Бернулли для потока реальной (вязкой) жидкости, являющееся фундаментальным уравнением гидравлики. Вывод этого уравнения следует делать в логической последовательности, с использованием струйной модели 'потока, учитывая при этом разные скорости струек и наличие необходимых энергии, расходуемой на работу сил трения, что приводит к уменьшению запаса энергии потока в направлении течения.

Уравнение Бернулли применяется во многих гидравлических расчетах при следующих ограничениях: движение жидкости должно быть изотермическим (при постоянной температуре, и вязкости жидкости), установившемся, а в окрестности расчетных сечений -параллельно-струйным или плавно-изменяющимся, что соответствует равномерному движению.

Раздел заканчивается рассмотрением уравнения количества движения, базирующегося на известной теореме механики. Необходимо знать, в каких задачах гидравлики это уравнение применяется.

Вопросы для самопроверки

1. Какие характеристики движения изучаются в кинематике жидкости?

2. Чем отличается задание' движения сплошной среды по Эйлеру от задания движения по Лагранжу?

3. Дайте определение линий тока и поясните струйную модель потока. Для какого класса течений применяется эта модель?

4. Что называется объемным расходом жидкости в сечении струйки тока? Как записывается условие неразрывности движения струйки тока?

5. Что представляет собой средняя скорость в сечении потока?

6. Какая жидкость называется идеальной? В чем заключается граничное условие на твердой стенке при ее движении?

7. Приведите вывод уравнений Эйлера движения идеальной жидкости и преобразуйте полученную систему уравнений Эйлера в форму удобную для интегрирования.

8. Приведите вывод уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Поясните физический смысл слагаемых уравнения Бернулли и постройте его диаграмму.

9. Как выводится уравнение Бернулли для потока реальной жидкости? Что означает коэффициент кинетической энергии?

10. При каких условиях применяется уравнение Бернулли?

11. Приведите вывод уравнения количества движения жидкости.

4. Основные уравнения гидравлики.

Гидравлические сопротивления

[1], с. 69—91, или [2], с. 42—63

Поток жидкости, как и всякая механическая система, обладает определенным запасом энергии и развивает определенную мощность. В гидравлике энергия потока жидкости как указывалось при рассмотрении уравнения Бернулли, выражается в виде удельной энергии (напора). Мощность в сечении потока равна произведению давления на объемный расход.

При движении жидкости часть ее механической энергии, затрачивается на работу сил трения и таким образом теряется. Потери энергии (или потери напора) могут быть по длине потока и местные. Необходимо твердо помнить расчетные формулы указанных видов потерь напора. Следует также хорошо представлять различные виды течений жидкости, знать отличительные черты ламинарного и турбулентного течений, число Рейнольдса. *

Изучая ламинарное течение в трубе, нужно обратить внимание на вывод Закона распределения скорости в сечении потока, формулы расхода, закона гидравлического сопротивления.

В турбулентном потоке скорость и другие параметры пульсируют около своего среднего значения. При исследовании турбулентного течения его разлагают на два вида движения: осредненное (по времени) и пульсационное. Законы турбулентного движения еще не достаточно изучены. Закономерности и расчетные формулы для многих задач носят чисто эмпирический либо полуэмпирический характер. Таковы, в частности, универсальный логарифмический закон распределения скорости в круглой трубе, законы гидравли-

ческого сопротивления «гладкой» и «шероховатой» стенок. Здесь следует обратить внимание на общий вид расчетного графика для определения коэффициента гидравлического трения и уметь его применять при расчетах. Раздел заканчивается рассмотрением местных гидравлических сопротивлений при изучении которых внимание обращается на природу таких сопротивлений и общий вид функциональной зависимости коэффициента местного сопротивления от пограничной геометрии проточного элемента и числа Рейнольдса для потока, отнесенного к недеформируемому участку течения.

Нужно знать значение коэффициента кинетической энергии для ламинарного и турбулентного течений.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под энергией, удельной энергией мощностью потока? Как они выражаются?
2. Назовите два вида потерь энергии и укажите формулы для их определения.
3. Поясните различные виды течения. Какое течение является ламинарным, а какое — турбулентным? Что означает число Рейнольдса?
4. Приведите вывод закона распределения скоростей в сечении ламинарного потока и формулу расхода.
5. Как записывается закон сопротивления при ламинарном течении?
6. Поясните модель осредненного турбулентного течения. Какую роль играет пристеночный слой?
7. Напишите законы сопротивления при турбулентном движении жидкости в общем виде.
8. Поясните график для определения коэффициента гидравлического трения.
9. Что называется местным гидравлическим сопротивлением? Какие местные сопротивления являются наиболее типичными?
10. Как определяется численное значение коэффициента местного сопротивления?

5. Истечение жидкости через отверстия и насадки

[1], с. 106—117, или [2], с. 90—99

Основное содержание данного раздела составляет вывод формул скорости истечения и расхода жидкости через малое

отверстие в тонкой стенке в условиях установившегося движения. Для определения скорости истечения используется уравнение Бернулли. Расход определяется из уравнения неразрывности течения. Полученные формулы необходимы для решения инженерных задач истечения жидкости через насадки (сопла) и проходные отверстия гидроаппаратуры. Численные значения коэффициентов скорости и расхода для различных типов отверстий и насадок имеются в справочной литературе.

Напорные, гидравлические системы применяются во всех отраслях промышленного и транспортного машиностроения. К ним относятся системы охлаждения, смазки, подачи жидкого топлива, транспорта различных жидкостей; системы привода машин и механизмов и другие виды гидрооборудования. По своему составу гидравлические напорные системы отличаются большим разнообразием: от простых трубопроводов до сложных систем гидроавтоматики технологического оборудования. Обычно такие системы состоят из источника жидкости, трубопроводов, различной, гидроаппаратуры (распределительной, регулирующей, защитной и т.п.), гидравлических двигателей, резервуаров очистных устройств, и т. д. Движение жидкости в трубопроводах рассматривается, как правило, одномерным со средней скоростью в сечении потока. Гидравлическая характеристика трубопровода определяет, соотношение между расходом жидкости в сечении потока и напором (или давлением). Определение такой характеристики является основной задачей гидравлического расчета напорных систем. При расчете применяют гидравлическое уравнение Бернулли, уравнение баланса расхода, формулы потерь напора. В настоящем разделе изучаются способы гидравлического расчета отдельных элементов или участков напорных, гидравлических систем (трубопроводов, трубопроводов с резервуаром, система насосотрубопровод, отверстия, насадки, дросселирующие и клапанные устройства) при установившемся движении, а также, два вида неустановившегося напорного движения в трубах.

Учитывая практическую направленность излагаемого в разделе материала, следует наряду с подробным изучением его практиковаться и в решении отдельных задач, что, послужит хорошим подспорьем при выполнении контрольных работ.

По существу весь материал доходчиво изложен в учебниках [1], [2], указанных в списке литературы.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основную задачу гидравлического расчета напорной системы и применяемые при ее решении уравнения гидравлики.
2. Поясните схему гидравлического расчета трубопровода при последовательном и параллельном соединении труб.
3. Как рассчитываются напорные гидравлические системы резервуар — трубопровод, насос—трубопровод?
4. В чем состоит особенность расчета всасывающего трубопровода насоса?
5. Приведите вывод уравнения одноменного неустановившегося напорного движения в трубе. Поясните сущность инерционного напора
6. Что называется гидравлическим ударом? Поясните явление гидравлического удара.
7. Как определяется по формуле Жуковского величина ударного давления и скорость распространения упругих деформаций?
8. Какой гидравлический удар считается прямым? — какой косвенным? Какими способами ослабляется гидравлический удар?
9. Поясните вывод уравнений скорости и расхода в сечении струи, жидкости, вытекающей через отверстие в тонкой стенке резервуара. Какие гидравлические коэффициенты входят в эти уравнения?
10. Почему струя сжимается при выходе из отверстия?
11. В чем заключается особенность истечения жидкости через насадки (сопла)?
12. Почему расход через внешний цилиндрический насадок больше, чем через отверстие, хотя потери напора в насадке выше?

ЗАДАЧА 1

На рис. 1 дана схема напорной гидравлической системы. Насос 4 всасывает из бака 1 рабочую жидкость (минеральное масло плотностью $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ и вязкостью ν) по трубопроводу 3, снабженному фильтром 2, и подает ее по трубопроводу 6 в газогидравлический аккумулятор 8. Из аккумулятора рабочая жидкость по трубопроводу 10 через гидрораспределитель 12 поступает в нижнюю полость силового гидроцилиндра 13, поршень 14 которого, совершая рабочий ход, движется вверх, преодолевая приложенное к нему усилие F . При завершении рабочего хода происходит быстрое переключение гидрораспределителя, в результате чего поршень движется вниз. При этом рабочая жидкость из нижней полости гидроцилиндра по трубопроводу 15 идет на слив в бак 1. В момент переключения гидрораспределителя в трубопроводе 10 возникает гидравлический удар, который локализуется с помощью предохранительного клапана 11, открывающегося при повышенном давлении на высоту h , равную одной десятой от размера диаметра клапана.

Давление жидкости, развиваемое насосом 4, настраивается клапаном 5. Обратный клапан 7 предотвращает опорожнение пневмогидравлического аккумулятора при неработающем насосе.

Заданы следующие параметры гидравлической системы (табл. 1):

Длина l_1 и диаметр d_1 , всасывающего трубопровода 3:

Высота всасывания $Z_в$, коэффициент сопротивления фильтра $2 = \xi_{\phi}$;

диаметр поршня D , скорость рабочего хода поршня $v_{рх}$, приложенное усилие F , время закрытия гидрораспределителя.

$12-t_3$, диаметр переходного клапана 11— d_{k1} , диаметр клапана 5 — d_{k2} , жесткость пружины клапана 5— C , толщина стенки трубопровода 10— δ , кинематический коэффициент вязкости ν .

Остальные параметры гидравлической системы принять равными: длину трубопровода 6 — $l_2 = 4 \cdot l_1$, его диаметр $d_2 = 0,8 \cdot d_1$ длину трубопровода 10 — $l_3 = 5 \cdot l_1$, его диаметр $d_3 = 0,7 \cdot d_1$ длину трубопровода 15 — $l_4 = 6 \cdot l_1$, его диаметр $d_4 = d_1$. Скорость движения поршня вниз при холостом ходе $v_{хх} = 0,6 \cdot v_{рх}$.

Рис.2

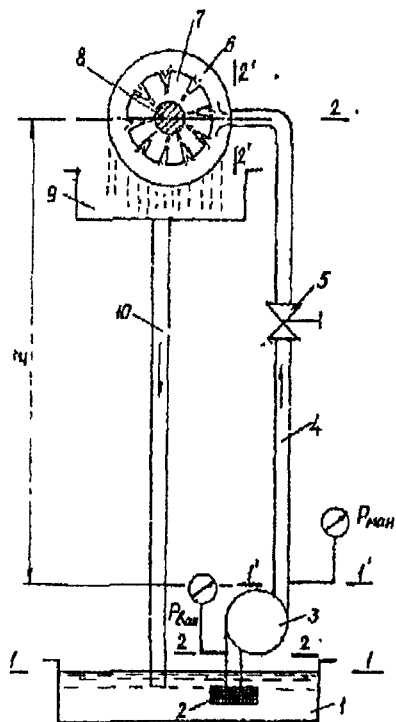


рис1.

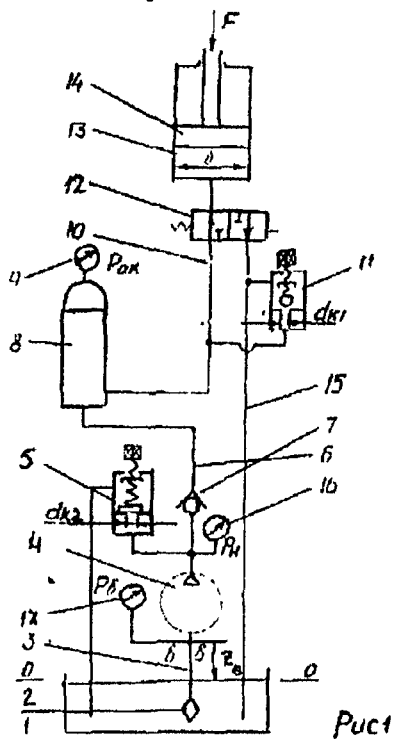


Таблица 1

Варианты и исходные данные										
параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l_j, м$	4,1	3,8	4,2	4,0	3,9	4,1	4,2	3,9	4,0	3,9
$d_1 \cdot 10^{-3}, м$	22	18	22	20	20	22	20	18	20	18
$z_{в2}, м$	0,85	1,25	1,1	0,95	0,90	1,15	1,1	0,95	0,85	1,0
ξ_{ϕ_i}	2,1	2,2	1,9	2,0	1,9	1,8	2,0	2,2	2,3	2,1
$d_{k1} \cdot 10^{-3}, м$	5	7	6	5	6	7	6	7	7	5
$d_{k2} \cdot 10^{-3}, м$	7	9	10	6	8	7	7	9	8	10
$c \cdot 10^{-3}, н/м$	3,1	3,2	3,5	3,0	3,2	3,1	3,2	3,5	3,4	3,6
$\delta_T \cdot 10^{-3}, м$	2	1,8	2,2	2,0	2,1	2,2	2,0	1,8	1,8	1,6
Предпоследняя цифра шифра										
$D \cdot 10^{-3}, м$	100	105	90	110	100	90	105	105	100	90
$v_{рх}, м/с$	0,09	0,08	0,10	0,08	0,10	0,15	0,08	0,08	0,09	0,15
$F, кН$	6,0	5,6	6,5	5,4	5,8	6,2	6,0	5,8	6,0	6,2
$t_3, с$	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
$V \cdot 10^{-5}, м^2/с$	3,0	3,5	3,6	3,1	3,5	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2

Требуется определить

1) при рабочем ходе поршня в условиях установившегося

движения жидкости в системе:

- а) расход рабочей жидкости Q , подаваемой в гидроцилиндр;
 - б) расчетное показание манометра 9 — $p_{\text{раб}}$ подключенного к гидравлическому аккумулятору, и расчетное показание манометра 16 — $p_{\text{н}}$ подключенного к трубопроводу 6 не посредственно за насосом;
 - в) расчетное показание вакуумметра 17 — $p_{\text{Вак}}$ подключенного к всасывающему трубопроводу перед насосом;
- 2) при обратном (холостом) ходе поршня:
- а) расход жидкости, поступающей из цилиндра на слив — $Q_{\text{сл}}$.
 - б) давление в нижней полости гидроцилиндра $p_{\text{ц}}$;
- 3) при переключении гидрораспределителя в условиях гидравлического удара:
- а) повышенное (ударное) давление в трубопроводе 10 — $p_{\text{вд}}$
 - б) расход жидкости, сбрасываемой клапаном 11 — $Q_{\text{кл}}$
- Определить также: толщину стенки гидроцилиндра, исходя из наибольшего давления внутри гидроцилиндра $p_{\text{ц}}$; настройку (начальный натяг пружины h_0) клапана 5, исходя из расчетного давления $p_{\text{н}}$.

Указания

При решении задачи следует руководствоваться одинаковыми для всех вариантов дополнительными исходными данными:

- Объемный модуль упругости жидкости $E_{\text{ж}} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$;
модуль упругости материала трубы $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$;
допустимое растягивающее напряжение $[\sigma]_{\text{р}} = 90 \text{ МПа}$;
перепад давления в обратном клапане $7 \Delta p_{\text{ок}} = 10^5 \text{ Н/м}^2$;
перепад давления в гидрораспределителе $12 \Delta p_{\text{рк}} = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Гидравлические потери в местных сопротивлениях составляют 10% от потерь по длине. Коэффициент гидравлического трения λ при ламинарном течении в трубопроводе вычислять по формуле $\lambda = 64 \cdot \text{Re}^{-1}$, при турбулентном течении $\lambda = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25}$ где Re — число Рейнольдса, определяемое по средней скорости течения:

$$\text{Re} = v \cdot d / \nu$$

Коэффициент кинетической энергии α принять равным при ламинарном течении $\alpha = 2$, при турбулентном тече-

нии $\alpha = 1,1$. В расчетах не учитывать высоту расположения расчетных сечений потока в напорных трубопроводах 6, 10 и 15.

Манометрическое давление на выходе предохранительного клапана 11 и клапана 5 принять равным нулю. Не учитывать силу трения в уплотнениях поршня со штоком.

Расчеты рекомендуется выполнять в такой последовательности:

а) при установившемся движении жидкости в системе во время рабочего хода поршня:

1) определяется по диаметру поршня D площадь сечения S , расход рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндр $Q = v_{px} \cdot S$ и давление в нижней полости гидроцилиндра $p_u = F/S$

2) По диаметру d определяется площадь поперечного сечения потока в напорном трубопроводе 10 S_3 , средняя скорость v_3 и число Рейнольдса Re_3 , по которому устанавливается режим движения в трубопроводе. Определяется численное значение коэффициента гидравлического трения λ_3 , потеря давления по длине трубопровода

$$\Delta p_{13} = \lambda \cdot l_3 \cdot \rho \cdot v_3^2 / d_3 \cdot 2$$

и расчетное показание манометра $p_{ак}$ (давление в пневмогидравлическом аккумуляторе):

$$p_{ак} = p_u + 1,1 \cdot p_{13} + \Delta p_{гк}$$

где в величине $1,1 \cdot p_{13}$, учтены потери по длине и местные гидравлические потери.

3) По диаметру d_2 определяется площадь поперечного сечения S_2 потока в напорном трубопроводе 6, средняя скорость v_2 и число Рейнольдса Re_1 , по которому устанавливается режим движения в трубопроводе. Определяется численное значение коэффициента гидравлического трения λ , потеря давления по длине трубопровода Δp_{11} , и расчетное показание манометра p_n :

$$p_n = p_{ак} + 1,1 \Delta p_{11} + \Delta p_{ок}$$

4) По диаметру d_1 определяется площадь поперечного сечения потока S_1 во всасывающем трубопроводе 3,

средняя скорость v_1 и число Рейнольдса Re_1 по которому устанавливается режим движения в трубопроводе. Определяются численные значения коэффициентов гидравлического трения λ и кинетической энергии α , потеря давления по длине трубопровода Δp_{11} и расчетное показание вакуумметра в соответствии с формулой, получаемой из уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли составляется для контрольных сечений $b-b$ и $b-b$ (рис. 1).

б) При установившемся течении во время обратного хода поршня:

5) определяется расход рабочей жидкости Q_u' , поступающей из цилиндра на слив.

По диаметру d_4 определяется площадь поперечного сечения потока в сливном трубопроводе 15, средняя скорость v_4 и число Рейнольдса Re_4 , по которому устанавливается режим движения в трубопроводе. Определяется численное значение коэффициента гидравлического трения λ_4 потеря напора по длине трубопровода Δp_{11} и величина давления в нижней полости гидроцилиндра

$$P_{14} = 1,1 \cdot \Delta p_{14} + \Delta p_{гр}$$

Результаты расчетов, выполненных по п. п. 2, 3, 4 и 6, представить в форме 1.

Форма 1

Трубопровод	Сечение потока	Средняя скорость	Число Рейнольдса	Кoeff. гидравлического трения	Потеря давления по длине	Общая потеря давления
	$S, 10^{-6}$	$v, \text{м/с}$	Re	λ	$\Delta p \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$	$\Delta p \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$
Всасывающий 3 Напорный 6 Напорный 10 Сливной 15						

в) В условиях гидравлического удара:

7) рассчитывается скорость распространения ударной волны

$$\alpha_{ув} = \frac{\sqrt{E_{жс} / \rho}}{\sqrt{1 + \frac{d}{\delta_T} \cdot \frac{E_{жс}}{E}}}$$

фаза гидравлического удара

$$t_{\phi} = \frac{2 \cdot l}{\alpha_{уд}}$$

и устанавливается характер гидравлического удара (полный или неполный).

Определяется величина ударного давления при полном гидравлическом ударе

$$P_{уд} = \rho \cdot v_3 \cdot \alpha_{уд}$$

Если гидравлический удар неполный, то

$$(P_{уд})_{нен} = P_{уд} \cdot t_{\phi} / t$$

8) Определяется расход $Q_{кл}$ сбрасываемый через предохранительный клапан 11

$$Q_{кл} = \mu_{кл} \cdot S_{кл} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{кл}}{\rho}}$$

где $S_{кл}$ — площадь проходного отверстия в клапане

$S_{кл} = \pi \cdot d_{r1} \cdot h$ Перепад давления в клапане $\Delta p_{кл} = (P_{ц} + \Delta p_{гр}) - P_{уд}$; $\mu_{кл}$ - коэффициент расхода клапана, $\mu_{кл} = 0,65$

Настройка клапана 5 (начальный натяг пружины h_0) определяется по расчетному давлению p_n

$$p_n \cdot \frac{\pi \cdot d_{к2}^2}{4} = c \cdot h_0$$

9) Толщина стенки $\delta_{ц}$ гидроцилиндра определяется по давлению $p_{ц}$

$$\delta_{ц} = \frac{p_{ц} \cdot D}{2 \cdot [\sigma]_p}$$

Задача 2

На рис.2 представлена схема установки для подачи смазывающе-охлаждающей жидкости /СОЖ/, в металлорежущем станке СОЖ плотностью $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$ и вязкостью $\nu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$. СОЖ помощью насоса 3 забирается из резервуара-отстойника 1 и по напорному трубопроводу 4 подается в коллектор 6 с шестью коническими сходящимися соплами 7, из которых жидкость разбрызгивается струями по поверхности обрабатываемой детали 8 (так называемое спрейное охлаждение). Отработанная СОЖ собирается в поддон 9 и по трубопроводу 10 сливается в резервуар-отстойник.

На трубопроводе 4 установлен вентиль 5, регулирующий расход подаваемой СОЖ, а на всасывающем патрубке насоса – сетчатый фильтр 2, предотвращающий попадание крупных твердых частиц в систему охлаждения

Заданы следующие параметры:

Скорость струй в соплах v_c , м/с

Диаметр сопел d_c , мм

Диаметр всасывающего патрубка d_b , мм

Диаметр d_n , мм l , м. напорного трубопровода 4

Расстояние по вертикали от насоса до центра коллектора z , м.

Коэффициент гидравлического сопротивления фильтра ξ_f , вентиля ξ_b , и коллектора ξ_k .

Требуется определить:

Расход подаваемой СОЖ Q , л/с;

потребный напор создаваемый насосом Н·м;

Затрачиваемую насосом мощность, кВт, с учётом его КПД

$\eta=0,75$;

Принять величину коэффициента скорости сопел $\varphi=0,96$, коэффициент кинетической энергии α в уравнении Бернулли $\alpha=2$ при ламинарном течении, $\alpha=1,1$ при турбулентном течении

Высоту всасывания не учитывать.

Задания величин приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметр	Варианты и исходные данные									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Последняя цифра шифра									
v_c , м/с	8	8,5	7,5	7	8	8,5	7,5	7	8,5	8
d_c , мм	5	5	4	4	5	5	4	5	4	5
d_b , мм	20	18	18	18	20	20	20	18	20	18
d_n , мм	15	14	14	15	16	15	15	14	15	16
	Предпоследняя цифра шифра									
l , м	1,6	1,7	1,7	1,6	1,8	1,6	1,6	1,8	1,7	1,6
z , м	1,4	1,5	1,6	1,4	1,6	1,4	1,4	1,6	1,5	1,4
ξ_f	2,5	2,0	2,1	2,1	2,5	2,2	2,2	2,0	2,3	2,2
ξ_b	3,2	3,3	3,0	3,2	3,1	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3
ξ_k	1,2	1,2	1,3	1,2	1,1	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3

Методические указания

Наибольший расход СОЖ при полном открытии вентиля определяется по заданной скорости струи v_c и поперечному сечению сопел, с учетом шести сопел Q_{\max} равен

$$Q = v_c \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot 6 \text{ м}^3/\text{с}$$

Размерности величин v_c и d_c берутся в системе СИ. Величина потребного напора H определяется по величинам манометрического давления $P_{\text{ман}}$ в зоне нагнетания, и вакуума $P_{\text{вак}}$ в зоне всасывания насоса /рис. 2 /.

$$H = \frac{P_{\text{ман}} + P_{\text{вак}}}{\rho \cdot g}, \text{ м}$$

В формуле $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, величины $P_{\text{ман}}$ и $P_{\text{вак}}$ указаны в Паскалях следует. Для определения $P_{\text{ман}}$ и $P_{\text{вак}}$ воспользоваться уравнением Бернулли, соединив этим уравнением сечение потока 1-1; 2-2; 1'-1'; 2'-2' (рис. 2).

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + d \cdot \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \alpha \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_{f1-2} \quad (1)$$

$$z'_1 + \frac{P'_1}{\rho \cdot g} + d \cdot \frac{v'^1_1}{2g} = z'_2 + \frac{P'_2}{\rho \cdot g} + \alpha \cdot \frac{v'^2_2}{2g} + h_{f1'-2'} \quad (2)$$

В уравнениях / 1 / и / 4 / z - геометрические высоты расположения сечений относительно выбранной плоскости сравнения; P - давление в указанных сечениях потока; v - средняя скорость потока в сечении; h_f - потеря напора на участке потока между сечениями; α - коэффициент кинетической энергии.

Потери напора определяются по величине скоростного напора $v^2/2g$ и коэффициенту гидравлического сопротивления участка потока ξ_f .

$$h_f = \xi_f \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Средние скорости в сечениях потока определяются по вычисленному расходу Q и площадям сечений потока.

В уравнении / 1 / плоскость сравнения намечается в плоскости Сечения 1-1 По условию задачи разность высот $z_1 - z_2$, не учитывается, давление P_1 равно атмосферному, а скорость $v_1=0$. Отсюда величина вакуума $P_{\text{вак}} = P_{\text{атм}} - P_2$ согласно уравнению /1/

$$P_{\text{вак}} = (\alpha + \xi_{f1-2}) \cdot \frac{\rho v_2^2}{2}$$

Коэффициентом гидравлического, сопротивления- $\xi_{f1-2} = \xi_f$. учитываются потери только в фильтре. В уравнении / 2 / плоскость сравнения намечается по сечению 1' -1'. При этом $z'=0$, $z_2=z$. Скорости v_1' и v_2' равны, так как площади сечений 1-1 и 2-2 одинаковы. Потеря напора $h_{f1'-2'}$ включает в себя потери по длине трубы h_l и местную потерю в вентиле h_b :

$h_{f1'-2'} = h_l + h_b$. Обе потери определяются по величине скоростного напора, равного $v^2/2g$,

Средняя скорость

$$v = \frac{Q}{\pi d_n^2 / 4}, \text{ м/с}$$

Согласно формуле Дарси и Вейсбаха имеем:

$$h_{f1'-2'} = \lambda \cdot \frac{l v^2}{d_n 2g} + \xi_e \cdot \frac{v^2}{2g} = (\lambda \cdot \frac{l}{d} + \xi_e) \cdot \frac{v^2}{2g}, \text{ м.}$$

где λ - коэффициент гидравлического трения, опре. в зависимости от режима течения.

При ламинарном течении /при числе Рейнольдса $Re < 2300$ / по формуле Стокса

$$\lambda = 64 \cdot Re^{-1}$$

При турбулентном течении $Re \geq 2300$

$$\lambda = 0.316 \cdot Re^{-0.25}$$

действию на жидкость центробежных сил и не райи.

4. Поясните физический смысл основного уравнения гидростатики. Приведите формулировку закона Паскаля.

5. Что называется манометрическим давлением и вакуумом? Чему равно предельное значение вакуума?

6. Как определяется сила суммарного гидростатического давления на плоские и криволинейные цилиндрические поверхности?

7. Приведите вывод закона Архимеда.

8. Как определяется величина растягивающих напряжений в стенках цилиндрических и сферических сосудов, содержащих жидкость под давлением?

3. Теоретические основы динамики жидкости

[1], с. 34—48

Гидродинамика — раздел гидравлики, изучающий законы движения жидкости. Изучение гидродинамики начинается с рассмотрения кинематических характеристик движущейся жидкости. Движение жидкости задается по Лагранжу — заданием координат движущихся частиц в функции времени, и по Эйлеру — заданием поля скоростей движущихся частиц в фиксированных точках пространства.

При рассмотрении модели течения жидкости в векторном поле скоростей вводятся векторные линии — линии тока, совпадающие в случае стационарного движения с траекториями частиц. Для внутренних течений рассматривается струйная модель потока как непрерывная совокупность струек тока (элементарных струек).

Необходимо запомнить определение линии тока, трубки тока и струйки тока, а также понятие объемного расхода жидкости к условию неразрывности движения струйки тока. Следует четко представлять себе модель равномерного течения, значение средней скорости и уравнение баланса расхода потока.

Переходя к изучению непосредственно гидродинамики, необходимо остановиться на наиболее простой модели движения — движении идеальной жидкости. Надо дать определение идеальной жидкости, отметить граничное условие на твердой стенке, знать отличие установившегося движения от неустановившегося.

При выводе дифференциальных уравнений движения идеальной жидкости (уравнений Эйлера) можно использо-