

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра «МТП в АПК»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.Б.13 Гидрогазодинамика

Направление подготовки (специальность) 20.03.01 "Техносферная безопасность"

Профиль образовательной программы "Безопасность жизнедеятельности в техносфере"

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ.....	3
1. 1 Лекция №1 (2 часа).....	3
Тема: «Предмет и задачи гидрогазодинамики. Свойства жидкостей и газов».....	3
1. 2 Лекция №2 (2 часа).....	6
Тема: «Общие законы и уравнения гидростатики.».....	6
1. 3 Лекция №3 (2 часа).....	13
Тема: «Характеристики потока. Режимы течения.».....	13
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ...	19
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	19
2.1 Лабораторная работа №1 (2 часа).....	19
Тема: «Свойства жидкости».....	19
Вода.....	20
2.2 Лабораторная работа №2 (2 часа).....	21
Тема: «Измерение гидростатического давления».....	21
2.3 Лабораторная работа №3 (2 часа).....	28
Тема: «Режимы течения жидкости».....	28
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	29
ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ.....	29
3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).....	29
Тема: «Относительный покой, давление на плоские стенки.».....	29
3.2 Практическое занятие №2 (2 часа).....	29
Тема: «Режимы течения.».....	29
3.3 Практическое занятие №3 (2 часа).....	30
Тема: «Гидравлический расчет трубопроводов.».....	30

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. 1 Лекция №1 (2 часа).

Тема: «Предмет и задачи гидрогазодинамики. Свойства жидкостей и газов»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Определение цели и задач ГГД, объекта и базы для ее изучения.
2. Жидкости и газы как объекты изучения в ГГД.
3. Отличительные свойства жидкостей и газов: текучесть, сжимаемость, вязкость.
4. Гипотеза Ньютона о молекулярном трении в жидкости, вязкостное (касательное) напряжение, динамическая и кинематическая вязкость. Ньютоновские и неニュтоновские жидкости.

1.1.2 Краткое содержание вопросов:

1. Определение цели и задач ГГД, объекта и базы для ее изучения.

Гидрогазодинамикой называют один из разделов механики жидкостей и газов.

Гидрогазодинамика (ГГД) изучает движение жидкостей и газов и взаимодействие их с обтекаемыми твердыми поверхностями.

В ГГД рассматриваются макроскопические движения, что позволяет отвлечься от молекулярной структуры жидкостей и газов и рассматривать их с точки зрения модели сплошной среды, масса которой непрерывно распределена по объему, занятому средой. Параметры, характеризующие состояния и движение среды (V , p , T , \mathbf{F} и т.д.), считаются при этом непрерывно изменяющимися по указанному объему, кроме, быть может, отдельных точек, линий и поверхностей, где могут существовать разрывы.

История развития теорий и вопросов, связанных с движением жидкости, в частности воды, берет свое начало в глубокой древности. Еще древние вавилоняне, египтяне и индуисты считали воду началом всех начал и затрачивали огромные усилия, чтобы получить воду.

Одним из первых научных трудов по механике жидкостей считается трактат Архимеда «О плавающих телах» (287—212 гг. до н. э.), в котором был впервые сформулирован закон о равновесии тела, погруженного в жидкость. Первыми крупными работами в этой области следует считать работы Леонардо да Винчи (1548-1620) - в области плавания тел, движения жидкостей по трубам и каналам. В работах Галилео Галилея (1564 - 1642) были сформулированы основные принципы равновесия и движения жидкости; работы Эванджелиста Торичелли (1604 - 1647) были посвящены решению задач по истечению жидкости из отверстий, а Блез Паскаль (1623 - 1727) исследовал вопросы по передаче давления в жидкости. Основополагающие и обобщающие работы в области механики физических тел, в том числе и жидкостей, принадлежат гениальному английскому физику Исааку Ньютону (1643 - 1727), который впервые сформулировал основные законы механики, закон всемирного тяготения и закон о внутреннем трении в жидкостях при их движении.

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

2. Жидкости и газы как объекты изучения в ГГД.

Передачу энергии в гидравлических системах обеспечивают рабочие жидкости, поэтому чтобы эффективно их применять, надо знать какими свойствами они обладают.

Жидкости, как и все вещества, имеют молекулярное строение. Они занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Это определяется величинами межмолекулярных сил и характером движений составляющих их молекул. В газах расстояния между молекулами больше, а силы межмолекулярного взаимодействия

меньше, чем в жидкостях и твердых телах, поэтому газы отличаются от жидкостей и твердых тел большей сжимаемостью. По сравнению с газами жидкости и твердые тела малосжимаемы.

Гипотеза сплошности. Рассматривать и математически описывать жидкость как совокупность огромного количества отдельных частиц, находящихся в постоянном непрогнозируемом движении, на современном уровне науки не представляется возможным. По этой причине жидкость рассматривается как некая сплошная деформируемая среда, имеющая возможность непрерывно заполнять пространство, в котором она заключена. Другими словами, под жидкостями понимают все тела, для которых характерно свойство текучести, основанное на явлении диффузии. Текучестью можно назвать способность тела как угодно сильно менять свой объём под действием сколь угодно малых сил. Таким образом, в гидравлике жидкость понимают как абстрактную среду – континуум, который является основой гипотезы сплошности.

Сплошная среда представляет собой модель, которая успешно используется при исследовании закономерностей покоя и движения жидкости. Правомерность применения такой модели жидкости подтверждена всей практикой гидравлики.

Изучение реальных жидкостей и газов связано со значительными трудностями, по этой причине для вывода основных уравнений движения жидкости приходится пользоваться некоторыми абстрактными моделями жидкостей и газов.

Идеальная жидкость - модель природной жидкости, характеризующаяся изотропностью всех физических свойств и, кроме того, характеризуется абсолютной несжимаемостью, абсолютной текучестью (отсутствие сил внутреннего трения), отсутствием процессов теплопроводности и теплопереноса.

Реальная жидкость - модель природной жидкости, характеризующаяся изотропностью всех физических свойств, но в отличие от идеальной модели, обладает внутренним трением при движении.

Идеальный газ - модель, характеризующаяся изотропностью всех физических свойств и абсолютной сжимаемостью.

Реальный газ - модель, при которой на сжимаемость газа при условиях близких к нормальным условиям существенно влияют силы взаимодействия между молекулами.

3. Отличительные свойства жидкостей и газов: текучесть, сжимаемость, вязкость.

Плотность жидкости , так же как любых других тел, представляет собой массу единицы объёма, и для бесконечно малого объёма жидкости dV массой dM может быть определена по формуле:

Единицы измерения: [кг/м³], [кг/дм³], [кг/л], [г/см³].

Плотность жидкости зависит от температуры и давления. Все жидкости, кроме воды, характеризуются уменьшением плотности с ростом температуры. Плотность воды имеет максимум при $t = 4$ оС и уменьшается при любых других температурах. В этом проявляется одно из аномальных свойств воды. Температура, при которой плотность воды максимальная, с увеличением давления уменьшается. Так, при давлении 14 МПа вода имеет максимальную плотность при 0,6 оС.

Плотность пресной воды равна 1000 кг/м³, солёной морской воды - 1020 ÷ 1030, нефти и нефтепродуктов – 650 ÷ 900 кг/м³, ртути – 13596 кг/м³.

Удельным весом жидкости - называется вес единицы её объёма. Эта величина выражается формулой для бесконечно малого объёма жидкости dV с весом dG :

Удельный вес жидкости и плотность связаны соотношением:

где g – ускорение свободного падения.

Единицы измерения: [Н/м³], [Н/дм³], [Н/л], [Н/см³], 1Н=1кг•м/с².

Сжимаемость жидкости это свойство жидкостей изменять свой объём при изменении давления.

Сжимаемость характеризуется коэффициентом объёмного сжатия (сжимаемости) βP , представляющим собой относительное изменение объёма жидкости V при изменении давления P на единицу.

Знак минус в формуле указывает, что при увеличении давления объём жидкости уменьшается.

Единицы измерения: Па-1 (Паскаль. 1Па=1Н/м²).

Температурное расширение жидкости состоит в том, что она может изменять свой объем при изменении температуры. Это свойство характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения, представляющим относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на единицу (на 1°C) и при постоянном давлении:

Растворение газов

Растворение газов - способность жидкости поглощать (растворять) газы, находящиеся в соприкосновении с ней. Все жидкости в той или иной степени поглощают и растворяют газы. Это свойство характеризуется коэффициентом растворимости k_p .

где V_G – объём растворённого газа при нормальных условиях,

V_J – объём жидкости,

P_1 и P_2 – начальное и конечное давление газа.

Коэффициент растворимости зависит от типа жидкости, газа и температуры.

При температуре 20 °C и атмосферном давлении в воде содержится около 1,6% растворенного воздуха по объему ($k_p = 0,016$). С увеличением температуры от 0 до 30 °C коэффициент растворимости воздуха в воде уменьшается.

Кипение

Кипение – способность жидкости переходить в газообразное состояние. Иначе это свойство жидкостей называют испаряемостью.

Жидкость можно довести до кипения повышением температуры до значений, больших температуры кипения при данном давлении, или понижением давления до значений, меньших давления насыщенных паров p_{np} жидкости при данной температуре. Образование пузырьков при понижении давления до давления насыщенных паров называется холодным кипением.

Жидкость, из которой удален растворенный в ней газ, называется дегазированной. В такой жидкости, кипение не возникает и при температуре, большей температуры кипения при данном давлении.

4. Гипотеза Ньютона о молекулярном трении в жидкости, вязкостное (касательное) напряжение, динамическая и кинематическая вязкость. Ньютоновские и неニュтоновские жидкости.

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу ее слоев. Вязкость проявляется в том, что при относительном перемещении слоев жидкости на поверхностях их соприкосновения возникают силы сопротивления сдвигу, называемые силами внутреннего трения, или силами вязкости.

Силы внутреннего трения появляются вследствие наличия межмолекулярных связей между движущимися слоями.

Если между соседними слоями жидкости выделить некоторую площадку S , то согласно гипотезе Ньютона

$$F = \mu S \frac{du}{dy},$$

где F – силы вязкого трения;

S – площадь трения;

$$\frac{du}{dy} - \text{градиент скорости}$$

μ – динамическим коэффициентом вязкого трения.

Физический смысл коэффициента вязкого трения – число, равное силе трения, развивающейся на единичной поверхности при единичном градиенте скорости.

Единицы измерения: $[H \cdot c/m^2]$, $[kG \cdot c/m^2]$, $[Пз]$ {Пуазель}, $1Пз=0,1H \cdot c/m^2$.

На практике чаще используется **кинематический коэффициент вязкости**, названный так потому, что в его размерности отсутствует обозначение силы. Этот коэффициент представляет собой отношение динамического коэффициента вязкости жидкости к её плотности

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

Единицы измерения: $[m^2/c]$, $[cm^2/c]$, $[Cm]$ {стокс}, $[cCm]$ {сантистокс}, $1Cm=100cCm$ { $1Cm=1 \text{ см}^2/\text{с}$ }.

Для капельных жидкостей вязкость зависит от температуры t и давления P , однако последняя зависимость проявляется только при больших изменениях давления, порядка **нескольких десятков МПа**.

Вязкость жидкости – это свойство, проявляющееся только при движении жидкости, и не влияющее на покоящиеся жидкости. Вязкое трение в жидкостях подчиняется закону трения, принципиально отличному от закона трения твёрдых тел, т.к. зависит от площади трения и скорости движения жидкости.

Жидкости, которые подчиняются описанному закону жидкостного трения Ньютона, называются ньютоновскими жидкостями. Однако есть жидкости, трение в которых описывается другими закономерностями.

1. 2 Лекция №2 (2 часа).

Тема: «Общие законы и уравнения гидростатики.»

1.2.1 Вопросы лекции:

1. Силы действующие в жидкости.
2. Свойства гидростатического давления.
3. Сила давления на плоские и криволинейные стенки.
4. Дифференциальные уравнения Эйлера.

1.2.2 Краткое содержание вопросов:

1. Силы действующие в жидкости.

Массовые силы. Массовые силы это силы, пропорциональные массе жидкости. В случае однородной жидкости эти силы пропорциональны объёму. Прежде всего, к ним относится вес жидкости

$$G = mg = V\rho g = V\rho g \quad ,$$

где G – вес жидкости,

V – объём жидкости,
 m – масса жидкости,
 g – ускорение свободного падения,
 ρ – плотность жидкости,
 γ – удельный вес жидкости.

Как известно, масса является мерой инертности тела. Это свойство присуще и жидкостям, поэтому к массовым силам относятся и **силы инерции**:

$$F_{\text{ин}} = m \frac{dv}{dt} = \rho V \frac{dv}{dt} = ma;$$

где $F_{\text{ин}}$ – инерционная сила,
 v – скорость жидкости,
 t – время движения,
 a – ускорение движения.

Силы инерции, действующие в жидкости, так же как и для твёрдого тела, могут проецироваться на оси.

Поверхностные силы. Поверхностные силы – силы, величины которых пропорциональны площади. К ним относят два вида сил. Силы поверхностного натяжения и силы вязкого трения. Последние проявляются только при движении жидкости и не играют никакой роли, когда жидкость находится в покое. Эти силы, как свойство вязкости, были рассмотрены при изучении свойств жидкостей.

Силы поверхностного натяжения. Молекулы жидкости притягиваются друг к другу с определённой силой. Причём внутри жидкости силы, действующие на любую молекулу, уравновешиваются, т.к. со всех сторон от неё находятся одинаковые молекулы, расположенные на одинаковом расстоянии. Однако молекулы жидкости, находящиеся на границе (с газом, твёрдым телом или на границе двух несмешивающихся жидкостей) оказываются в неуравновешенном состоянии т.к. со стороны другого вещества действует притяжение других молекул, расположенных на других расстояниях. Возникает преобладание какой-то силы. Под влиянием этого воздействия поверхность жидкости стремится принять форму, соответствующую наименьшей площади. Если силы внутри жидкости больше наружных сил, то поверхность жидкости стремится к сферической форме. Например, малые массы жидкости в воздухе стремятся к шарообразной форме, образуя капли. Может иметь место и обратное явление, которое наблюдается как явление капиллярности. В трубах малого диаметра (капиллярах) наблюдается искривление свободной поверхности, граничащей с газом или с парами этой же жидкости. Если поверхность трубки смачивается, свободная поверхность жидкости в капилляре вогнутая. Если нет смачивания, свободная поверхность выпуклая, как при каплеобразовании. Во всех этих случаях силы поверхностного натяжения обусловливают дополнительные напряжения $p_{\text{пов}}$ в жидкости. Величина этих напряжений определяется формулой

$$p_{\text{пов}} = \frac{2\sigma}{r}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения,
 r – радиус сферической поверхности, которую принимает жидкость.

Силы давления. Давление – напряжение, возникающее в жидкости под действием сжимающих сил.

$$p_{\text{ср}} = \Delta P / \Delta S$$

Истинное давление P в различных точках этой площадки S может быть различным; $P_{\text{ср}}$ будет тем меньше отличаться от действительного в точке, чем меньше будет площадь S . Таким образом, если размер площадки S уменьшать, приближать к нулю, то отношение

P/S будет стремиться к некоторому пределу, выражющему истинное гидростатическое давление в точке:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} (\Delta P / \Delta S)$$

Гидростатическое давление P (Па) измеряют в единицах силы, деленных на единицу площади, оно характеризуется тремя основными свойствами. Если давление отсчитывается от нуля, оно называется **абсолютным** и обозначается P_{abs} , если от атмосферного, – **избыточным** и обозначается P_{rel} . **Атмосферное** давление обозначается P_{atm} .

Кроме того, различают давление **гидродинамическое** и **гидростатическое**. Гидродинамическое давление возникает в движущейся жидкости. Гидростатическое давление – давление в покоящейся жидкости.

2. Свойства гидростатического давления.

Первое свойство. Гидростатическое давление направлено всегда по внутренней нормали к поверхности, на которую оно действует.

Второе свойство состоит в том, что в любой точке внутри жидкости давление по всем направлениям одинаково. Иначе это свойство давления звучит так: на любую площадку внутри объема жидкости, независимо от её угла наклона, действует одинаковое давление.

Третье свойство. Гидростатическое давление в точке зависит только от ее координат в пространстве, т. е.

$$P = f(x, y, z)$$

3. Сила давления на плоские и криволинейные стенки.

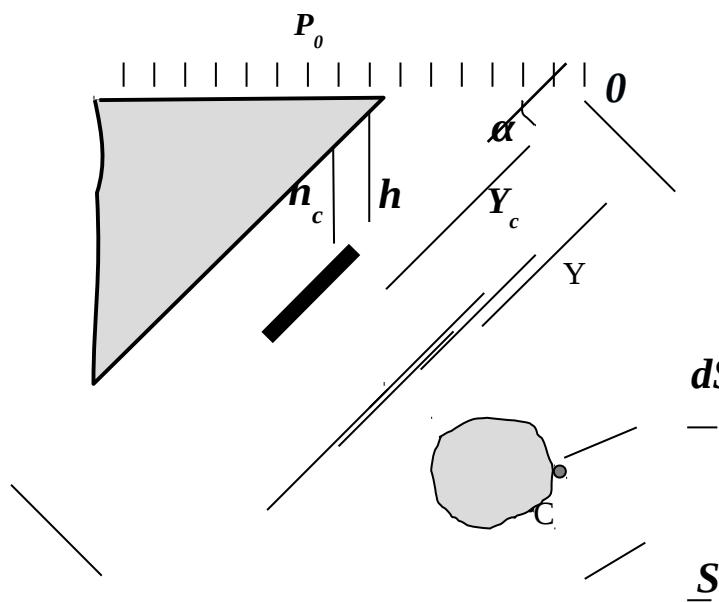
Рассмотрим произвольную площадку ds , расположенную на плоской наклонной стенке сосуда с жидкостью на расстоянии Y от оси X , и определим силы, действующие на эту площадку. Сила от давления, действующего на элементарную площадку ds , будет описываться формулой:

$$dF = P dS = (P_0 + \rho g h) dS.$$

Если проинтегрировать это выражение по площади, можно определить полную силу, действующую на всю площадь целиком

$$F = P_0 \int_S dS + \rho g \int_S h dS.$$

Y



Из рисунка ясно, что в последнем выражении предыдущее выражение, будем иметь:

$$F = P_0 S + \rho g \sin \alpha \int_S Y dS.$$

Из теоретической механики известно, что интеграл

Подставив значение $h = Y \sin \alpha$.

$$\int_S Y dS$$

есть ни что иное, как

статический момент площади S относительно оси $0X$. Он равен произведению этой площади на координату её центра тяжести, т.е. можно записать

$$\int_S Y dS = Y_c S;$$

где Y_c – расстояние от оси X до центра тяжести площади S .

Подставив формулу момента в выражение силы, получим:

$$F = P_0 S + \overbrace{\rho g Y_c \sin \alpha}^{P_{изб}} S.$$

Анализ второго слагаемого показывает, что произведение положения центра тяжести площадки, а

это глубина

$$\rho g Y_c \sin \alpha$$

- избыточное давление жидкости в

центре тяжести площадки. С учётом этого можно записать

$$F = \underbrace{(P_0 + \rho g h_c)}_{P_c} S.$$

Сумма в скобках в последнем выражении является абсолютным давлением в центре тяжести рассматриваемой произвольной площадки. Таким образом, можно сделать вывод: полная сила давления жидкости на плоскую стенку равна произведению её площади на величину гидростатического давления в центре тяжести этой стенки.

Однако необходимо учесть, что эта сила не сконцентрирована в точке, а распределена по площади. И распределение это неравномерно. По этой причине для расчётов, кроме величины силы действующей на наклонную площадку, необходимо знать точку приложения равнодействующей.

Центр давления

Распределённую P нагрузку, действующую на наклонную стенку, заменим сконцентрированной. Для этого найдём на наклонной стенке положение точки D , в которой приложена равнодействующая силы давления Y . Точку, в которой приложена эта сила, называют центром давления. Как уже неоднократно рассматривалось, давление, действующее в любой точке, в соответствии с основным уравнением гидростатики складывается из двух частей: внешнего давления P_0 , передающегося всем точкам жидкости одинаково, и давления столба жидкости P , определяемого глубиной погружения этой точки.

Для нахождения центра избыточного давления жидкости применим уравнение механики, согласно которому момент равнодействующей силы относительно оси $0X$ равен сумме моментов составляющих сил, т.е.

$$F_{изб} Y_D = \int_S Y dF_{изб};$$

где Y_D - координата точки приложения силы $F_{изб}$,

Y – текущая глубина.

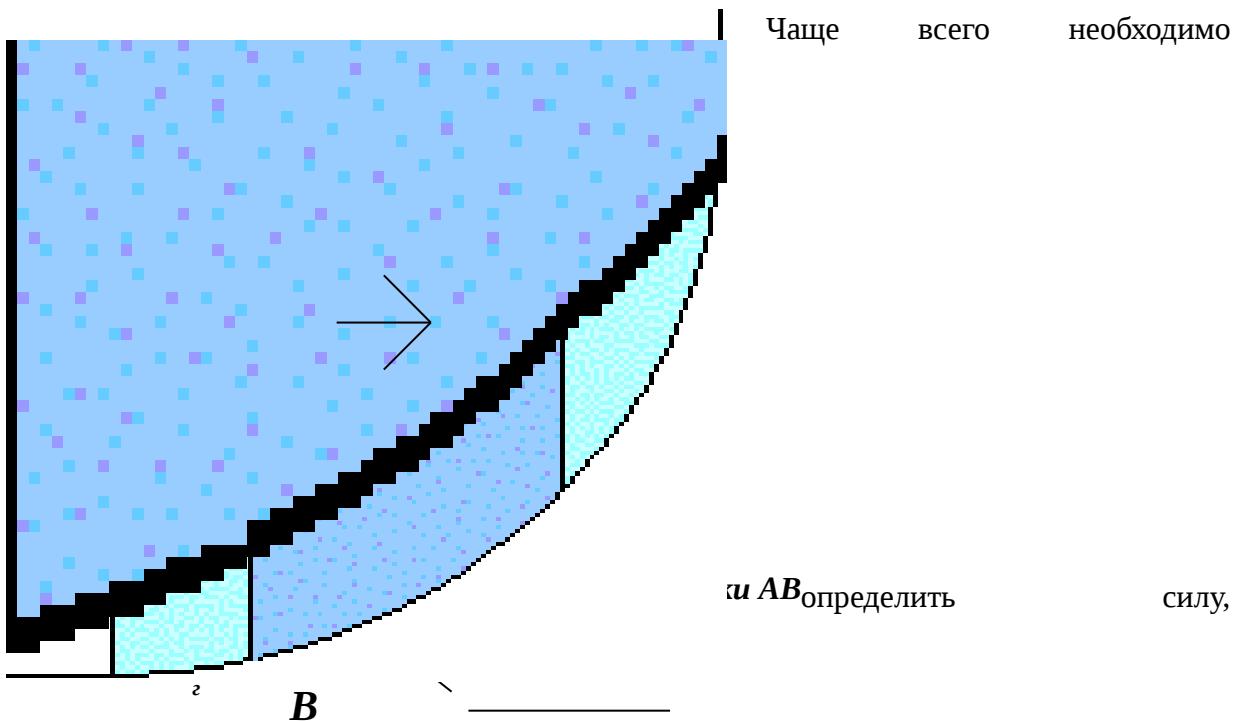
Заменив в этом выражении F_{uzb} и Y_D интегралом, в соответствии с упомянутым уравнением механики, будем иметь:

$$F_{uzb} Y_D = \int_S Y dF_{uzb} = \int_S Y d(\rho g \sin \alpha Y S) = \rho g \sin \alpha \int_S Y^2 dS.$$

Отсюда выражим

$$Y_D = \frac{J_{x0} + Y_C^2 S}{Y_c S} = Y_c + \frac{J_{x0}}{Y_c S}$$

Сила давления жидкости на криволинейную стенку



действующую на цилиндрическую поверхность, имеющую вертикальную ось симметрии. Возможны два варианта. Первый вариант - жидкость действует на стенку изнутри.

Во втором варианте жидкость действует на стенку снаружи. Рассмотрим оба этих варианта.

В первом случае выделим объём жидкости, ограниченный рассматриваемым участком цилиндрической поверхности AB , участком свободной поверхности CD , расположенным над участком AB , и двумя вертикальными поверхностями BC и CD , проходящими через точки A и B . Эти поверхности ограничивают объём $ABCD$, который находится в равновесии. Рассмотрим условия равновесия этого объёма в вертикальном и горизонтальном направлениях. Заметим, что, если жидкость действует на поверхность AB , с какой то силой F , то с такой же силой, но в обратном направлении, и поверхность действует на рассматриваемый объём жидкости. Эту силу, перпендикулярную поверхности AB , можно представить в виде горизонтальной F_z и вертикальной F_e составляющих.

Условие равновесия объёма $ABCD$ в вертикальном направлении выглядит, так:

$$F_e = P_0 S_e + G$$

где P_0 – внешнее давление,

S_e – площадь горизонтальной проекции поверхности AB ,

G – вес выделенного объёма жидкости.

Условие равновесия этого объёма в горизонтальной плоскости запишем с учётом того, что силы, действующие на одинаковые вертикальные поверхности AD и CE , взаимно уравновешиваются. Остаётся только сила давления на площадь BE , которая пропорциональна вертикальной проекции S_e поверхности AB . С учётом частичного уравновешивания будем иметь условие равновесия сил в горизонтальном направлении в виде:

$$F_e = S_e \rho g h_c + P_0 S_e;$$

где h_c – глубина расположения центра тяжести поверхности AB .

Зная F_e и F_v определим полную силу F , действующую на цилиндрическую поверхность

$$F = \sqrt{F_e^2 + F_v^2}.$$

Во втором случае, когда жидкость действует на цилиндрическую поверхность снаружи, величина гидростатического давления во всех точках поверхности AB имеет те же значения, что и в первом случае, т.к. определяется такой же глубиной. Силы, действующие на поверхность в горизонтальном и вертикальном направлениях, определяются по тем же формулам, но имеют противоположное направление. При этом под величиной G надо понимать тот же объём жидкости $ABCD$, несмотря на то, что на самом деле он, в данном случае и не заполнен жидкостью.

Положение центра давления на цилиндрической стенке легко можно найти, если известны силы F_e и F_v и определены центр давления на вертикальной проекции стенки и центр тяжести рассматриваемого объёма $ABCD$. Задача упрощается, если рассматриваемая поверхность является круговой, т.к. равнодействующая сила при этом пересекает ось поверхности. Это происходит из-за того, что силы давления всегда перпендикулярны поверхности, а перпендикуляр к окружности всегда проходит через её центр.

Круглая труба под действием гидростатического давления

В гидравлических системах технологического назначения жидкость в основном передаётся по трубам круглого сечения. В водопроводах, канализационных и многих других трубопроводных системах, гидротехнических сооружениях широко используются трубы и различные резервуары круглого сечения. По этой причине задача определения нагрузки на трубу является весьма распространённой. В таких расчётах используется полученная ранее формула горизонтальной составляющей силы, действующей со стороны жидкости на криволинейную поверхность

$$\sigma = \frac{F_R}{S_\delta} = \frac{PDI}{2l\sigma} = \frac{PD}{2\sigma}.$$

4. Дифференциальные уравнения Эйлера.

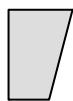
Дифференциальные уравнения равновесия покоящейся жидкости иначе называют **дифференциальными уравнениями Эйлера**.

$$X - \frac{\partial P}{\partial x} \frac{1}{\rho} = 0$$

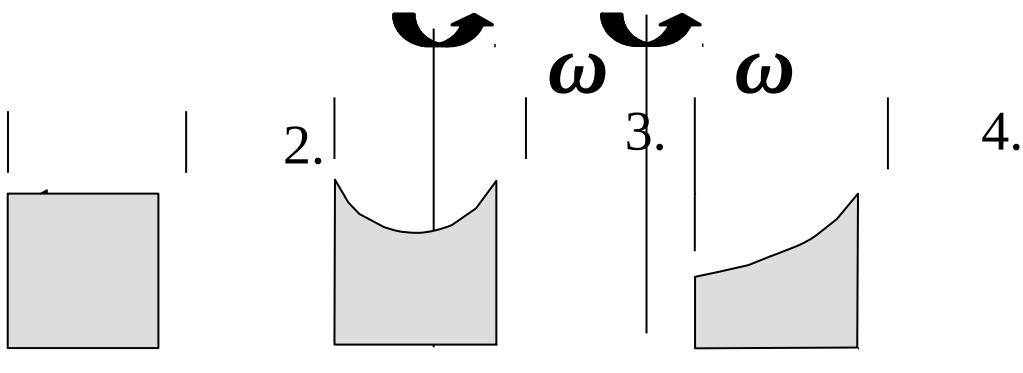
$$Y - \frac{\partial P}{\partial y} \frac{1}{\rho} = 0$$

$$Z - \frac{\partial P}{\partial z} \frac{1}{\rho} = 0.$$

|i|i|i|i



—



a

Они получены для общего случая относительного покоя жидкости. Возможны следующие варианты относительного покоя.

Первый вариант соответствует абсолютному покоя или равномерному движению сосуда с жидкостью. Такой вариант рассматривался при выводе основного уравнения гидростатики.

Второй вариант – вращение сосуда с жидкостью с постоянной угловой скоростью ω вокруг центральной оси. Несмотря на то, что вся масса жидкости вращается вместе с сосудом, частицы жидкости друг относительно друга не перемещаются, следовательно, весь объём жидкости, как и в первом случае, представляет собой как бы твёрдое тело. Давление в каждой точке жидкости не меняется во времени и зависит только от координат. По этим причинам жидкость подпадает под определение покоящейся.

Третий вариант аналогичен второму, только вращение осуществляется вокруг произвольно расположенной вертикальной оси. Во втором и третьем случае свободная

поверхность жидкости принимает новую форму, соответствующую новому равновесному положению жидкости.

В четвёртом варианте сосуд с жидкостью движется прямолинейно и равноускоренно. Такой случай проявляется, например, в процессе разгона или остановки автоцистерны с жидкостью. В этом случае жидкость занимает новое равновесное положение, свободная поверхность приобретает наклонное положение, которое сохраняется до изменения ускорения. Частицы жидкости друг относительно друга находятся в покое, и давление зависит только от координат.

Во всех перечисленных случаях на жидкость действуют, во-первых, силы веса, во-вторых, силы инерции, в-третьих, силы давления.

На практике, чтобы избавиться от частных производных, используют одно уравнение, заменяющее систему. Для этого первое уравнение умножают на dx , второе на dy , третье на dz и складывают их:

$$Xdx + Ydy + Zdz - \frac{1}{\rho} \underbrace{\left(\frac{\partial P}{\partial x} dx + \frac{\partial P}{\partial y} dy + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right)}_{dP} = 0.$$

В этой формуле сумма в скобках является полным дифференциалом давления, который в результате оказывается равным

$$dP = \rho (Xdx + Ydy + Zdz).$$

Полученное уравнение показывает, как изменяется давление при изменении координат внутри покоящейся жидкости для общего случая относительного покоя. Это уравнение впервые получил Леонард Эйлер в 1755

1. 3 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Характеристики потока. Режимы течения.»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Пространственно-временное поле скоростей, установившиеся и неустановившиеся течения.
2. Гидравлические характеристики потока.
3. Уравнение неразрывности потока.
4. Режимы течения.

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1. Пространственно-временное поле скоростей, установившиеся и неустановившиеся течения.

Причинами движения жидкости являются действующие на нее силы: объемные или массовые силы (сила тяжести, инерционные силы) и поверхностные силы (давление, трение). В отличие от гидростатики, где основной величиной, характеризующей состояние покоя жидкости, является гидростатическое давление, которое определяется только положением точки в пространстве, т.е.

$$p = f(x, y, z)$$

элементами, характеризующими движение жидкости, будут два: гидродинамическое давление и скорость движения (текения) жидкости.

В общем случае основные элементы движения жидкости p и v для данной точки зависят от ее положения в пространстве (координат точки) и могут изменяться во времени. Аналитически это положение гидродинамики записывается так:

$$p=f_1(x, y, z, t)$$

$$u=f_2(x, y, z, t)$$

Задачей гидродинамики и является определение основных элементов движения жидкости p и u , установление взаимосвязи между ними и законов изменения их при различных случаях движения жидкости.

Два метода описания движения жидкости. Существуют две точки зрения на изучение движения жидкости: точка зрения Лагранжа и точка зрения Эйлера. Соответственно используются два вида переменных — переменные Лагранжа и переменные Эйлера.

Существует два метода изучения движения жидкости: метод Ж. Лагранжа и метод Л. Эйлера.

Метод Лагранжа заключается в рассмотрении движения каждой частицы жидкости, т. е. траектории их движения. Из-за значительной трудоемкости этот метод не получил широкого распространения.

Точка зрения Лагранжа. Пусть V_0 — объем некоторой массы жидкости, который она занимала в начальный момент времени t_0 . В момент времени t эта масса жидкости будет занимать объем V_t . Между точками t_0 и t имеется взаимно-однозначное соответствие. Произвольная частица объема ΔV , которая в момент t_0 находилась в точке A_0 , перешла в определенную точку A жидкого объема V_t . Положение частицы определяется координатами x, y, z той точки пространства, в которой частица находится в момент времени t . Координаты частицы в момент t зависят от положения, которое частица занимала в начальный момент времени. Начальное положение частицы может быть задано ее декартовыми координатами a, b, c в момент времени t_0 . Таким образом, координаты частиц представляются в виде

$$x = x(a, b, c, t),$$

$$y = y(a, b, c, t),$$

$$z = z(a, b, c, t).$$

Соответственно гидродинамические величины записываются так же, как функции a, b, c, t :

$$v = v(a, b, c, t).$$

Переменные a, b, c, t носят название переменных Лагранжа.

Метод Эйлера заключается в рассмотрении всей картины движения жидкости в различных точках пространства в данный момент времени. Этот метод позволяет определить скорость движения жидкости в любой точке пространства в любой момент времени, т. е. характеризуется построением поля скоростей и поэтому широко применяется при изучении движения жидкости.

Точка зрения Эйлера. В пространстве выбирают некоторую точку A , декартовы координаты которой x, y, z . В разные моменты времени через эту точку A будут проходить различные частицы жидкости, имея свои значения гидродинамических величин. Представляет интерес изменение искомых гидродинамических величин в фиксированной точке пространства в зависимости от времени. Движение, с точки зрения Эйлера, считается известным, если известны функции

$$p = p(x, y, z, t),$$

$$v = v(x, y, z, t),$$

Переменные x, y, z, t носят название переменных Эйлера.

Недостаток метода Эйлера в том, что при рассмотрении поля скоростей не изучается траектория отдельных частиц жидкости.

2. Гидравлические характеристики потока.

В гидравлике различают следующие характеристики потока: живое сечение, смоченный периметр, гидравлический радиус, расход, средняя скорость.

Живым сечением потока называется поверхность (поперечное сечение), нормальная ко всем линиям тока, его пересекающим, и лежащая внутри потока жидкости. Площадь живого сечения обозначается буквой S . Для элементарной струйки жидкости используют понятие живого сечения элементарной струйки (сечение струйки, перпендикулярное линиям тока), площадь которого обозначают через dS .

Смоченный периметр потока – линия, по которой жидкость соприкасается с поверхностями русла в данном живом сечении. Длина этой линии обозначается буквой χ .

В напорных потоках смоченный периметр совпадает с геометрическим периметром, так как поток жидкости соприкасается со всеми твёрдыми стенками.

Гидравлическим радиусом R потока называется часто используемая в гидравлике величина, представляющая собой отношение площади живого сечения S к смоченному периметру :

$$R = \frac{S}{\chi}.$$

Расход потока жидкости (расход жидкости) – количество жидкости, протекающей в единицу времени через живое сечение потока.

Различают объёмный, массовый и весовой расходы жидкости.

Объёмный расход жидкости это объём жидкости, протекающей в единицу времени через живое сечение потока. Объёмный расход жидкости измеряется обычно в м³/с, дм³/с или л/с. Он вычисляется по формуле

$$Q = \frac{V}{t},$$

где Q - объёмный расход жидкости,

V - объём жидкости, протекающий через живое сечение потока,

t – время течения жидкости.

Массовый расход жидкости это масса жидкости, протекающей в единицу времени через живое сечение потока. Массовый расход измеряется обычно в кг/с, г/с или т/с и определяется по формуле

$$Q_M = \frac{M}{t};$$

где Q_M - массовый расход жидкости,

M - масса жидкости, протекающий через живое сечение потока,

t – время течения жидкости.

Весовой расход жидкости это вес жидкости, протекающей в единицу времени через живое сечение потока. Весовой расход измеряется обычно в Н/с, КН/с. Формула для его определения выглядит так:

$$Q_G = \frac{G}{t};$$

где Q_G - весовой расход жидкости,

G - вес жидкости, протекающий через живое сечение потока,

t – время течения жидкости.

Чаще всего используется объёмный расход потока жидкости. С учётом того, что поток складывается из элементарных струек, то и расход потока складывается из расходов элементарных струек жидкости dQ .

Средняя скорость потока жидкости V_{cp} в данном сечении это не существующая в действительности скорость потока, одинаковая для всех точек данного живого сечения, с которой должна была бы двигаться жидкость, что бы её расход был равен фактическому.

$$V_{cp} = \frac{\int u_S dS}{S} = \frac{Q}{S}.$$

3. Уравнение неразрывности потока.

При рассмотрении движения жидкости считают, что в потоке жидкость сплошь заполняет занимаемое ею пространство без образования пустот, т.е. движение жидкости происходит неразрывно. В этом случае справедливо уравнение неразрывности движения, выводимое на основе закона сохранения массы. Получим вначале уравнение неразрывности при установившемся движении жидкости для элементарной струйки.

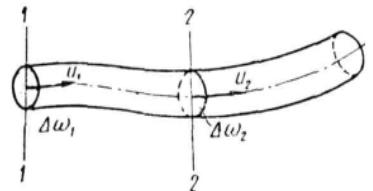


Рис. 3.

Пусть имеем элементарную струйку (рис. 3). Возьмем сечение 1-1 с площадью Δs_1 и скоростью движения частиц жидкости u_1 . Элементарный расход через сечение 1-1 равен

$$\Delta Q_1 = u_1 \Delta s_1$$

Затем возьмем сечение 2-2 в этой же струйке с площадью сечения Δs_2 и скоростью u_2 . Элементарный расход через сечение 2-2 равен

$$\Delta Q_2 = u_2 \Delta s_2$$

Но по свойству элементарной струйки приток и отток жидкости через ее боковую поверхность невозможен кроме того, в отсеке 12, который сохраняет неизменные размеры, не образуется пустот и не происходит переуплотнений; значит количества жидкости, протекающей в единицу времени через сечения 1-1 и 2-2, должны быть одинаковы, т.е.

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2$$

в общем случае для элементарной струйки написать

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q_3 = \dots = \Delta Q_n = \Delta Q = \text{const}$$

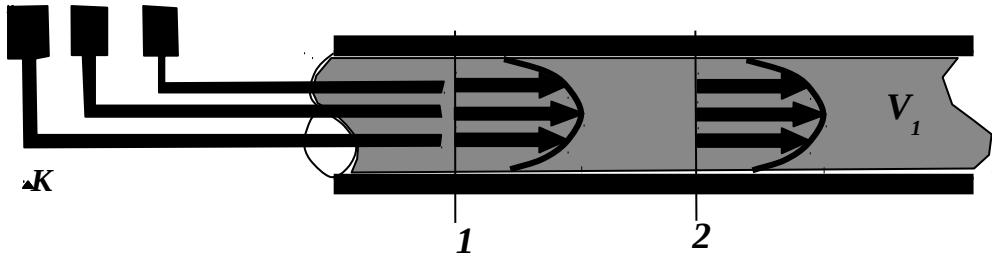
или

$u_1 \Delta s_1 = u_2 \Delta s_2 = u_3 \Delta s_3 = \dots = u_n \Delta s_n = \Delta Q = \text{const}$. Это и есть уравнение неразрывности (сплошности) для элементарной струйки, которое читается так: элементарный расход жидкости ΔQ при установившемся движении есть величина постоянная для всей элементарной струйки.

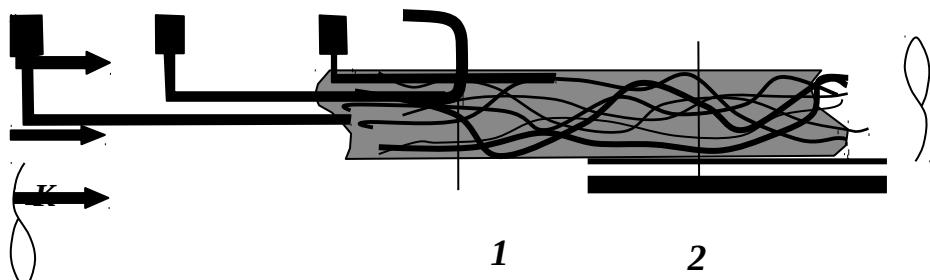
4 . Режимы течения.

Если наблюдать за движением жидкости, то можно ясно видеть, что при перемещении от сечения 1 к сечению 2 картина распределения скоростей будет оставаться постоянной, а движение жидкости будет слоистым, плавным, все струйки тока будут параллельны между собой. Такое движение носит название ламинарное (от латинского слова *lamina* - слой).

Однако до бесконечности увеличивать скорость при ламинарном режиме движения



потока невозможно. Обязательно наступит такой момент, когда характер движения



жидкости радикально изменится. Цветные струйки начнут сначала колебаться, затем размываться и интенсивно перемешиваться. Течение потока становится неспокойным, с постоянным вихреобразованием. Эпюра распределения скоростей по сечению потока приблизится к прямоугольной форме, а значения скоростей в разных сечениях потока станут практически равны средней скорости движения жидкости. Значение коэффициента кинетической энергии α приближается к 1. Такое течение жидкости называется турбулентным (от латинского слова *turbulentus* - возмущённый, беспорядочный). Если снова уменьшить скорость течения жидкости, восстановиться ламинарный режим движения. Переход от одного режима движения к другому будет происходить примерно при одном и том же числе Рейнольдса.

$$Re_{kp} = \frac{V_{kp} d}{\nu}.$$

Опытным путём установлено, что критическое число Рейнольдса для круглых труб - 2320 для круглых труб, а для других сечений 580.

Для определения режима движения в потоке надо найти фактическое число Рейнольдса Re , которое можно установить для любого потока по формуле

$$Re = \frac{V d}{\nu},$$

$$Re = \frac{V d}{\nu}$$

и сравнить его с критическим числом Re_{kp} .

При этом, если $Re < Re_{kp}$, то режим движения ламинарный, если $Re > Re_{kp}$, то режим движения турбулентный.

Физический смысл числа Рейнольдса заключается в смене режимов течения жидкости. В настоящее время не существует строгого научно доказанного объяснения этому явлению, однако наиболее достоверной гипотезой считается следующая: смена режимов движения жидкости определяется отношением сил инерции к силам вязкости в

потоке жидкости. Если преобладают первые, то режим движения турбулентный, если вторые - ламинарный. Турбулентные потоки возникают при высоких скоростях движения жидкости и малой вязкости, ламинарные потоки возникают в условиях медленного течения и в вязких жидкостях.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа №1 (2 часа).

Тема: «Свойства жидкости»

2.1.1 Цель работы: Освоение техники измерения плотности, теплового расширения, вязкости и поверхностного натяжения жидкостей и приобретение навыков по измерению гидростатического давления жидкостными приборами.

2.1.2 Задачи работы:

Уяснить:

- понятие плотности жидкости;
- понятие теплового расширения;
- понятие вязкости;
- понятие поверхностного натяжения жидкостей;
- принцип работы жидкостных приборов.

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Лабораторная установка «Капелька»
2. Методическое пособие «Изучение физических свойств жидкости».

2.1.4 Описание (ход) работы:

Определение коэффициента теплового расширения жидкости

Термометр 1 имеет стеклянный баллон с капилляром, заполненные термометрической жидкостью, и шкалу. Принцип его действия основан на тепловом расширении жидкостей. Варьирование температуры окружающей среды приводит к соответствующему изменению объема термометрической жидкости и ее уровня в капилляре. Уровень указывает на шкале значение температуры.

Коэффициент теплового расширения термометрической жидкости определяется в следующем порядке на основе мысленного эксперимента, т.е. предполагается, что температура окружающей среды повысилась от нижнего (нулевого) до верхнего предельных значений термометра и уровень жидкости в капилляре возрос на величину l .

1. Подсчитать общее число градусных делений T в шкале термометра и измерить расстояние l между крайними штрихами шкалы.

2. Вычислить приращение объема термометрической жидкости $V = r^2l$, где r - радиус капилляра термометра.

3. С учетом начального (при 0°C) объема термометрической жидкости V найти значение коэффициента теплового расширения $\alpha = (V/V) / T$ и сравнить его со справочным значением α_0 (табл. 1.1). Значения используемых величин занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Вид жидкости	r , см	V , cm^3	$T, ^{\circ}\text{C}$	l , см	V , cm^3	$\alpha, ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\alpha_0, ^{\circ}\text{C}^{-1}$
Спирт							

Измерение плотности жидкости ареометром

Ареометр 2 служит для определения плотности жидкости поплавковым методом. Он представляет собой пустотелый цилиндр с миллиметровой шкалой и грузом в нижней

части. Благодаря грузу ареометр плавает в исследуемой жидкости в вертикальном положении. Глубина погружения ареометра является мерой плотности жидкости и считывается со шкалой по верхнему краю мениска жидкости вокруг ареометра. В обычных ареометрах шкала отградуирована сразу по плотности.

В ходе работы выполнить следующие операции.

1. Измерить глубину погружения h ареометра по миллиметровой шкале на нем.
2. Вычислить плотность жидкости по формуле $\rho = 4m/(d^2h)$, где m и d – масса и диаметр ареометра. Эта формула получена путем приравнивания силы тяжести ареометра $G=mg$ и выталкивающей (архимедовой) силы $P_A=gV$, где объем погруженной части ареометра $V=(d^2/4)h$.
3. Сравнить опытное значение плотности со справочным значением * (см. табл.1.1). Значения используемых величин свести в таблицу 3.

Таблица 1.3

Вид жидкости	m , г	d , см	h , см	ρ , $\text{г}/\text{см}^3$	ρ^* , $\text{г}/\text{см}^3$
Вода					

Определение вязкости вискозиметром Стокса

Вискозиметр Стокса 3 достаточно прост, содержит цилиндрическую емкость, заполненную исследуемой жидкостью, и шарик. Прибор позволяет определить вязкость жидкости по времени падения шарика в ней следующим образом.

1. Повернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на 180° и зафиксировать секундомером время t прохождения шариком расстояния l между двумя метками в приборе.
3. Шарик должен падать по оси емкости без соприкосновения со стенками. Опыт выполнить три раза, а затем определить среднеарифметическое значение времени t .
2. Вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости жидкости $\eta = g d^2 t (\rho_w / -1) / [18l + 43.2l (d/D)]$, где g – ускорение свободного падения; d , D – диаметры шарика и цилиндрической емкости; ρ_w – плотности жидкости и материала шарика.
3. Сравнить опытное значение коэффициента вязкости с табличным значением * (см. табл.1.1). Значения используемых величин свести в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

Вид жидкости	ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	t , сек	l , м	d , м	D , м	ρ_w , $\text{кг}/\text{м}^3$	η , $\text{м}^2/\text{с}$	η^* , $\text{м}^2/\text{с}$
M-10					0,02			

Измерение вязкости капиллярным вискозиметром

Капиллярный вискозиметр 4 включает емкость с капилляром. Вязкость определяется по времени истечения жидкости из емкости через капилляр.

1. Перевернуть устройство № 1 (см. рис. 1.1) в вертикальной плоскости и определить секундомером время t истечения через капилляр объема жидкости между метками (высотой S) из емкости вискозиметра 4 и температуру T по термометру 1.
2. Вычислить значение кинематического коэффициента вязкости $\eta = M t$ (M – постоянная прибора) и сравнить его с табличным значением * (см. табл. 1.1). Данные свести в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Вид жидкости	M , $\text{м}^2/\text{с}^2$	t , с	η , $\text{м}^2/\text{с}$	T , $^\circ\text{C}$	η^* , $\text{м}^2/\text{с}$
M-10					

Измерение поверхностного натяжения сталагмометром

Сталагмометр 5 служит для определения поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель и содержит емкость с капилляром, расширенным на конце для накопления жидкости в виде капли. Сила поверхностного натяжения в момент отрыва

капли равна ее весу (силе тяжести) и поэтому определяется по плотности жидкости и числу капель, полученному при опорожнении емкости с заданным объемом.

1. Перевернуть устройство № 1 и подсчитать число капель, полученных в сталагмометре 5 из объема высотой S между двумя метками. Опыт повторить три раза и вычислить среднее арифметическое значение числа капель n .

2. Найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения $= K/n$ (K - постоянная сталагмометра) и сравнить его с табличным значением * (см. табл.1.1). Данные свести в таблицу 1.6.

Таблица 6

Вид жидкости	$K, \text{м}^3/\text{с}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	n	, $\text{Н}/\text{м}$	$*, \text{Н}/\text{м}$
М-10					

2.2 Лабораторная работа №2 (2 часа).

Тема: «Измерение гидростатического давления»

2.2.1 Цель работы: Освоить методику определения давления внутри жидкости с помощью жидкостных и пружинных приборов и приобретение навыков по измерению гидростатического давления жидкостными приборами.

2.2.2 Задачи работы:

- ознакомиться с классификацией и основными характеристиками приборов;
 - понять смысл основного уравнения гидростатики и его следствий;
 - разобраться с устройством пружинного манометра и методикой измерения давления с его помощью;
- ознакомиться с принципом действия других видов приборов для измерения давления;
- понять методику поверки приборов;
 - измерение гидростатического давления.

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Лабораторная установка «Капелька»

2. Методическое пособие «Измерение гидростатического давления».

2.2.4 Описание (ход) работы:

Классификация приборов для измерения давления

В зависимости от назначения приборы для измерения давления делятся на следующие основные группы:

Манометры – для измерения избыточного давления.

Вакуумметры – для измерения вакуумметрического давления (вакуума).

Мановакуумметры – для измерения вакуумметрического и избыточного давлений.

Барометры – для измерения атмосферного давления.

Баровакуумметры – для измерения абсолютного давления.

Дифференциальные манометры – для измерения разности давлений.

По принципу действия все приборы для измерения давления можно разделить на жидкостные, пружинные, грузопоршневые и с дистанционной передачей показаний.

Приборы, в которых измеряемое давление уравновешивается весом столба жидкости, а изменение уровня жидкости в сообщающихся сосудах служит мерой давления, называются жидкостными. К этой группе относятся чашечные и U-образные манометры, дифманометры и др.

Пружинными приборами называются приборы, в которых измеряемое давление уравновешивается силами упругости пружины, деформация которой служит мерой давления. К этой группе относятся разнообразные приборы, отличающиеся по виду пружин (мембранные, сильфоны, манометрические трубы). Благодаря простоте конструкции и удобству пользования пружинные приборы получили широкое применение в технике.

Грузопоршневыми приборами называются приборы, в которых измеряемое давление уравновешивается усилием, создаваемым калиброванными грузами, воздействующими на свободно передвигающийся в цилиндре поршень.

К приборам с дистанционной передачей показаний относятся приборы, в которых используются изменения тех или иных электрических свойств вещества (электрического сопротивления проводников, электрической емкости, возникновение электрических зарядов на поверхности кристаллических минералов и др.) под действием измеряемого давления. К таким приборам относятся манганиновые манометры сопротивления, пьезоэлектрические манометры с применением кристаллов кварца, турмалина или сегнетовой соли, емкостные манометры, ионизационные манометры и др.

По метрологическому назначению измерительные приборы делятся на образцовые и рабочие.

Образцовыми измерительными приборами называются приборы, предназначенные для поверки других измерительных приборов. Образцовые манометры имеют следующие классы точности: 0,05; 0,2 — грузопоршневые манометры; 0,16; 0,25; 0,4 — пружинные манометры.

Рабочими измерительными приборами называются все измерительные приборы, служащие для непосредственных измерений. Рабочие манометры имеют классы точности 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

Основные характеристики приборов

1. Диапазон измеряемых давлений — P_{\max} .
2. Класс точности

$$k = \frac{\Delta P_{\max}}{P_{\max}} \cdot 100$$

3. Чувствительность прибора

$$S = \frac{\Delta P_{\text{прибора}}}{\Delta P_{\text{величины}}}$$

4. Цена деления прибора

$$C = \frac{1}{S}$$

5. Линейность прибора

$$k_{\text{л}} = \left(1 - \frac{P_{\text{лин.}}}{P_{\text{прибора}}}\right) \cdot 100$$

6. Быстродействие (число измерений в секунду).

Жидкостные приборы для измерения давления

1. Диапазон измеряемых давлений до 400 кПа.

2. Класс точности до 0,05

3. Чувствительность - 1

4. Линейность - 100%

5. Быстродействие - 1...2 измерения в минуту.

В основу принципа действия жидкостных приборов положено, основное уравнение гидростатики

$$p = p_0 + \rho gh,$$

где p - давление в точке внутри жидкости, Па;

p_0 - давление на каком-либо уровне Па;

h - глубина погружения частицы жидкости под уровнем с давлением P_0 , м;

ρ - плотность жидкости, кг/м³;

g - ускорение свободного падения, м/с².

Следствие из уравнения: Для одной и той же жидкости замкнутого объема давление одинаково во всех точках расположенных на одинаковом уровне (глубине h).

Пьезометры (рис. 2.1) обычно представляют собой открытую сверху прямую стеклянную трубку диаметром не менее 6 - 8 мм помещенную на измерительной шкале. Для измерения гидростатического давления на уровне 1 - 1 в отверстии А стенки сосуда установлен пьезометр. Поскольку оба конца трубы открыты, жидкость в ней поднимется под действием гидростатического давления до уровня 2 - 2.

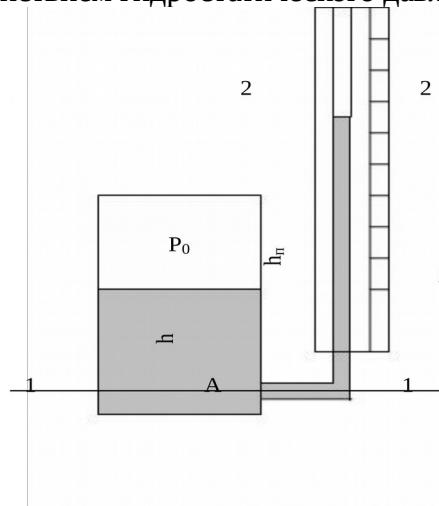


Рис 2.1 Пьезометр
1- стеклянная трубка, 2 – измерительная шкала.

Высота столба жидкости в трубке между уровнями 1 - 1 и 2 - 2 соответствует пьезометрической высоте h_n (в точке А), которая может быть определена аналитически из уравнения равновесия жидкости относительно плоскости 1 - 1:

$$p_0 + \rho gh = p_{am} + \rho gh_n$$

откуда

$$h_n = (p_0 - p_{am}) / \rho g + h$$

Если пьезометр установлен в открытом сосуде, то уравнение примет вид

$$h_n = h,$$

т. е. пьезометрическая высота будет равна глубине погружения точки А в жидкость.

Для измерения гидростатического давления применяют так же жидкостные манометры, которые отличаются от пьезометров тем, что в них используется жидкость большей плотности, например ртуть, плотность которой равен $\rho_{pr} = 13 600$ кг/м³.

Простейшим типом жидкостного манометра является У-образный ртутный манометр (рис. 2.2), в котором один конец трубы присоединяется к сосуду с жидкостью в той точке, где необходимо определить избыточное давление.

Избыточное гидростатическое давление на уровне 1—1 (в точке А) будет измеряться пьезометрической высотой h_n , а в закрытом сосуде на уровне 2 - 2 (точка Б)

будет: $p = \rho_{pm} g (h_n - \Delta h)$, где Δh - глубина понижения уровня ртути в левом колене

$$p = \rho_{pm} g (h_n - \Delta h)$$

трубки

Вакуумметры служат для измерения давления, меньшего, чем атмосферное. Однако вакуумметры обычно измеряют не непосредственно давление, а вакуум, т. е. недостаток давления до атмосферного. Вакуумметр представляет собой изогнутую трубку со шкалой (рис. 2.3) и открытым сосудом, наполненным ртутью. Один конец трубки присоединен к закрытому сосуду, давление в котором $p < p_{at}$, а другой конец опущен в открытый сосуд.

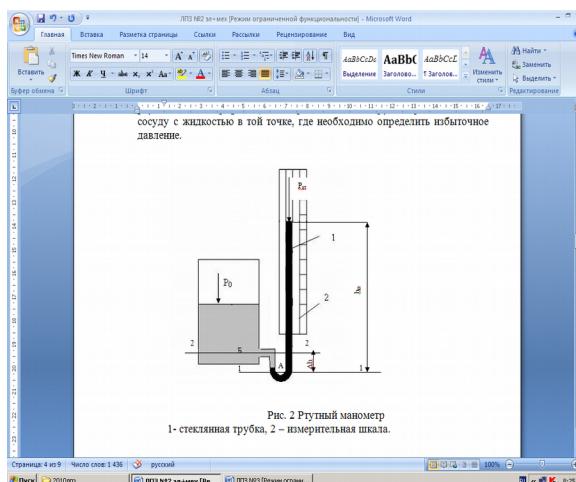


Рис. 2.2 Ртутный манометр
1- стеклянная трубка, 2 – измерительная шкала.

Для измерения давления газа в сосуде можно воспользоваться формулой

$$p_{am} = p + \rho g h_{vac}$$

откуда

$$p = p_{am} - \rho g h_{vac}$$

Высота столба ртути (вакуумметрическая высота), соответствующая вакууму, будет:

$$h_{vac} = (p_{am} - p) / \rho g$$

Применение рассмотренных приборов жидкостного типа ограничивается областью сравнительно небольших давлений.

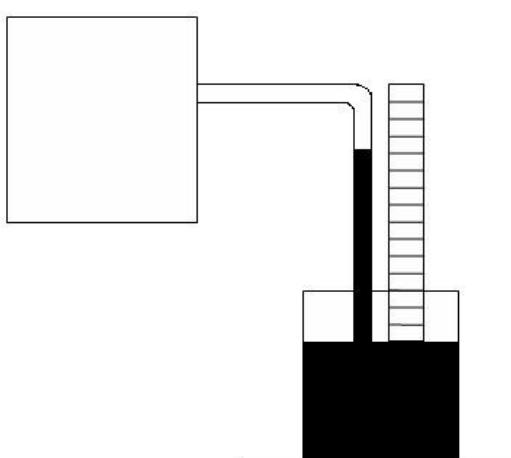


Рис. 2.3 Ртутный вакуумметр

1- стеклянная трубка, 2 – измерительная шкала, 3 – открытый сосуд, 4 – закрытый сосуд.

Механические манометры (пружинные и мембранные) используются для измерения больших давлений. В качестве примера рассмотрим пружинный манометр (рис. 2.4), состоящий из корпуса, шкалы, латунной трубы –

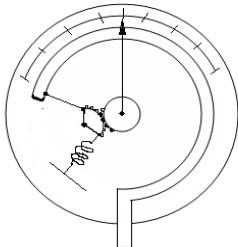


Рис. 2.4 Механический манометр

1- корпус, 2 – измерительная шкала, 3 – трубка Бурдона, 4 – стрелка, 5 – передаточный механизм.

пружины эллиптического сечения, стрелки и передаточного механизма.

Манометр свободным концом трубы присоединяется к жидкости в точке, где измеряется давление. Манометры снабжены проградуированной шкалой, показывающей давление в атмосферах.

Диапазон измеряемых величин до 500 МПа.

Класс точности до 0,25

Чувствительность в пределах цены деления

Линейность в соответствие с классом точности

Быстродействие 1...10 измерений в секунду

Правило считывания показаний манометра. Если стрелка манометра находится между делениями шкалы прибора, то считывание показаний производить по значению ближайшего деления этой шкалы. Дробить цену деления нельзя, так как цена деления шкалы устанавливается в соответствие с классом точности прибора.

Проверка приборов производится в специальных лабораториях стандартизации, на что выдается соответствующий акт о соответствии прибора своему классу точности.

Порядок поверки. Проверяемый прибор нагружается через определенные равномерные интервалы и его показания сверяются с показаниями образцового прибора, затем выдержка при p_{max} и нагрузка снижается через такие же интервалы давления.

Производится вычисление абсолютной погрешности и устанавливается соответствие прибора классу точности.

Измерение гидростатического давления

a) $p_o > p_a$

б) $p_o < p_a$

в) $p_o < p_a$

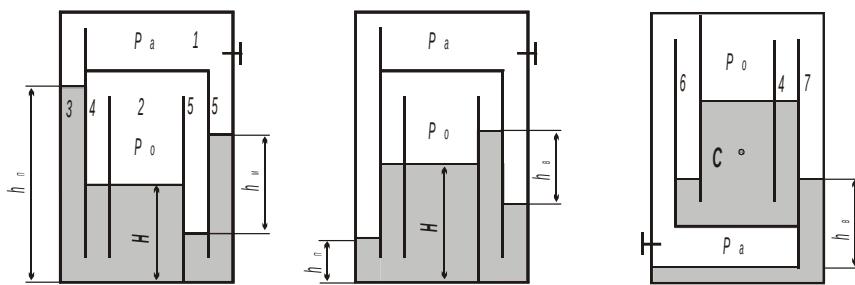


Рис. 2.5 Схема устройства

1 - полость с атмосферным давлением; 2 – опытный резервуар; 3 - пьезометр; 4 - уровнемер; 5 – мановакуумметр; 6 – пьезометр; 7 – вакуумметр

Порядок выполнения работы

1. В резервуаре 2 над жидкостью создать давление выше атмосферного ($p_0 p_a$), о чем свидетельствуют превышение уровня жидкости в пьезометре 3 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуумметре 5 (рис. 2.5 а). Для этого устройство поставить на правую сторону, а затем поворотом его против часовой стрелки отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 5 в резервуар 2.
2. Снять показания пьезометра h_n , уровнемера H и мановакуумметра h_m .
3. Вычислить абсолютное давление на дне резервуара через показания пьезометра, а затем - через величины, измеренные уровнемером и мановакуумметром. Для оценки сопоставимости результатов определения давления на дне резервуара двумя путями найти относительную погрешность p .
4. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 создать вакуум ($p_0 < p_a$), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 5 появляется обратный перепад h_e (рис.2.5 б). Для этого поставить устройство на левую сторону, а затем наклоном вправо отлить часть жидкости из резервуара 2 в левое колено мановакуумметра 5. Далее выполнить операции по п.п. 2 и 3.
5. Перевернуть устройство против часовой стрелки

(рис 2.5 в) и определить манометрическое или вакуумметрическое давление в заданной преподавателем точке **C** через показания пьезометра 6, а затем с целью проверки найти его через показания обратного пьезометра 7 и уровнемера 4.

В процессе проведения опытов и обработки экспериментальных данных
заполнить таблицу 2.1.

Примечание. Принять атмосферное давление $p_a = 100000 \text{ Па}$, плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 2.1

№ №	Наименование величин	Обозначения, формулы	Условия опыта	
			$P_0 P_a$	$P_0 P_a$
1	Пьезометрическая высота, м	h_n		

2	Уровень жидкости в резервуаре, м	H		
3	Манометрическая высота, м	h_m		-
4	Вакуумметрическая высота, м	h_e	-	
5	Абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра, Па	$p = p_a + \rho g h_n$		
6	Абсолютное давление в резервуаре над жидкостью, Па	$p_o = p_a + \rho g h_m$		-
		$p_o = p_a - \rho g h_e$	-	
7	Абсолютное давление на дне резервуара через показания мановакуумметра и уровнемера, Па	$p^* = p_o + \rho g H$		
8	Относительная погрешность результатов определения давления на дне резервуара, %	$p = 100(p - p^*) / p$		

2.3 Лабораторная работа №3 (2 часа).

Тема: «Режимы течения жидкости»

2.3.1 Цель работы: Воспроизвести ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости и уловить моменты перехода одного режима в другой. Определить верхнее и нижнее критические числа Рейнольдса.

2.3.2 Задачи работы:

Уяснить явление существования режимов движения жидкости, кинематику и динамику частиц жидкости при этих режимах.

Уяснить значимость критерия Рейнольдса для определения течения жидкости.

Уяснить различие законов потерь энергии на перемещение жидкости.

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Лабораторная установка «Установка Рейнольдса»

2. Методическое пособие «Определение режимов движения жидкости».

2.3.4 Описание (ход) работы:

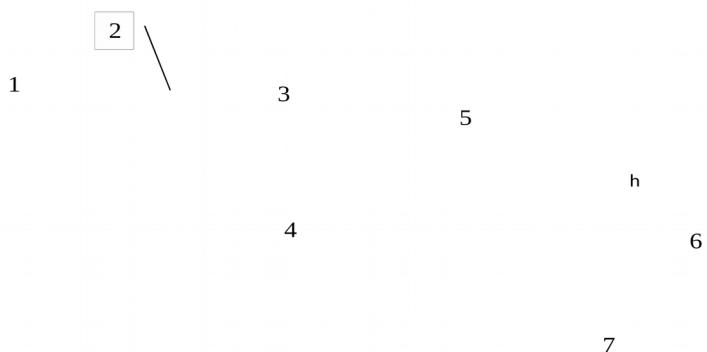


Рис. 3.1 Схема установки Рейнольдса

1 – бак с жидкостью, 2 – бак с подкрашенной жидкостью, 3 – вентиль 4 – стеклянная труба, 5 – пьезометры, 6 – вентиль, 7 – мерное ведро.

Порядок выполнения.

1 – открыть вентиль 3, а затем, плавно открывая вентиль 6 установить ламинарное движение жидкости. При этом необходимо, чтобы был максимальный расход жидкости, при ламинарном движении.

2 – снять показания пьезометров.

3 – замерить расход.

4 – установить момент перехода режима с ламинарного на турбулентный и повторить пункты 2,3.

5 – установить турбулентный режим увеличив расход жидкости и выполнить действие пунктов 2,3.

6 – установить момент перехода режима с турбулентного на ламинарный и повторить пункты 2,3.

7 – произвести расчеты и заполнить таблицу. Для одного опыта расчеты записать подробно.

8 - построить графики зависимости $h = f(v)$.

9 – записать выводы.

Таблица 3.1

№	Режим течения жидкости	Диаметр d , м	Площадь S , m^2	Измерительный объем (V), m^3	Время, t с	Q , m^3/c	T , $^{\circ}C$	ν , m^2/c	v , m/c	Re
1	ламинарный									
2	момент перехода									
3	турбулентный									
4	момент перехода									

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

Тема: «Относительный покой, давление на плоские стенки.»

3.1.1 Задание для работы:

1. Задачи с прямолинейным движением сосудов
2. Задачи с вращательным движением сосудов
3. Задача на определения сил давления на плоские стенки

3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия каждому учащемуся выдается карта индивидуального задания с условием задачи. Необходимо в течение занятия решить задачу и сдать на проверку преподавателю. В процессе решения задачи обсуждаются все вопросы, связанные с ее решением.

3.1.3 Результаты и выводы:

Результатом занятия является решенная задача, сданная на проверку преподавателю. Выводы делаются после проверки правильности решения задачи. На основании результатов проверки выполняется совместный анализ допущенных ошибок и их исправление учащимся.

3.2 Практическое занятие №2 (2 часа).

Тема: «Режимы течения.»

3.2.1 Задание для работы:

1. Задача с учетом режима течения жидкости.

3.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия каждому учащемуся выдается карта индивидуального задания с условием задачи. Необходимо в течение занятия решить задачу и сдать на проверку

преподавателю. В процессе решения задачи обсуждаются все вопросы, связанные с ее решением.

3.2.3 Результаты и выводы:

Результатом занятия является решенная задача, сданная на проверку преподавателю. Выводы делаются после проверки правильности решения задачи. На основании результатов проверки выполняется совместный анализ допущенных ошибок и их исправление учащимся.

3.3 Практическое занятие №3 (2 часа).

Тема: «Гидравлический расчет трубопроводов.»

3.3.1 Задание для работы:

1. Задача с определением диаметра трубы и гидравлических потерь.
2. Задача с расчетом трубы на прочность.
3. Задача с насосной подачи жидкости в трубу.

3.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия каждому учащемуся выдается карта индивидуального задания с условием задачи. Необходимо в течение занятия решить задачу и сдать на проверку преподавателю. В процессе решения задачи обсуждаются все вопросы, связанные с ее решением.

3.3.3 Результаты и выводы:

Результатом занятия является решенная задача, сданная на проверку преподавателю. Выводы делаются после проверки правильности решения задачи. На основании результатов проверки выполняется совместный анализ допущенных ошибок и их исправление учащимся.