ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «МТП в АПК**»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.Б13 Гидрогазодинамика

Направление подготовки (специальность) 20.03.01 "Техносферная безопасность"

Профиль образовательной программы "Безопасность жизнедеятельности в техносфере"

Форма обучения *очная*

СОДЕРЖАНИЕ

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 неньютоновские 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, ✈ 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 индусы считали воду началом всех начал и затрачивали огромные усилия, чтобы получить воду.

Одним из первых научных трудов по механики 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 посве-щены 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 жидких, 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 основ¬ных 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 oC 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 oC.

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 1oC) 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 kр.

где VГ – объём растворённого газа при нормальных условиях,

Vж – объём жидкости,

P1 и P2 – начальное и конечное давление газа.

Коэффициент растворимости зависит от типа жидкости, газа и температуры.

При температуре 20 ºС и атмосферном давлении в воде содержится около 1,6% растворенного воздуха по объему (kр = 0,016). С увеличением температуры от 0 до 30 ºС 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 рнп 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 неньютоновские 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;

$\frac{du}{dy}$ – градиент скорости

μ – динамическим коэффициент вязкого трения.

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

Единицы измерения: ***[Н·с/м^2], [кГс·с/м^2], [Пз]{Пуазейль}, 1Пз=0,1Н·с/м^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: ***[м^2/с], [см^2/с], [Ст] {стокс}, [сСт] {сантистокс}, 1Ст=100сСт {1Ст=1 см^2/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 девствующие 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 девствующие 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*

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

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***:

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

где $\boldsymbol{F_{ин}}$ – 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, твердым 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* $p_{пов}$ *в жидкости. Величина этих напряжений определяется формулой*

.

$$p_{пов}=\frac{2\sigma}{r}$$

где ***σ*** - коэффициент поверхностного натяжения,

r - радиус сферической поверхности, которую принимает жидкость.

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

$$p_{ср}=\Delta P/\Delta S$$

Истинное давление Р в различных точках этой площадки *S* может быть различным; Р*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, выражающему истинное гидростатическое давление в точке:

$$p = \lim_{\Delta S \to 0} \left(\Delta P / \Delta S \right)$$

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

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.*

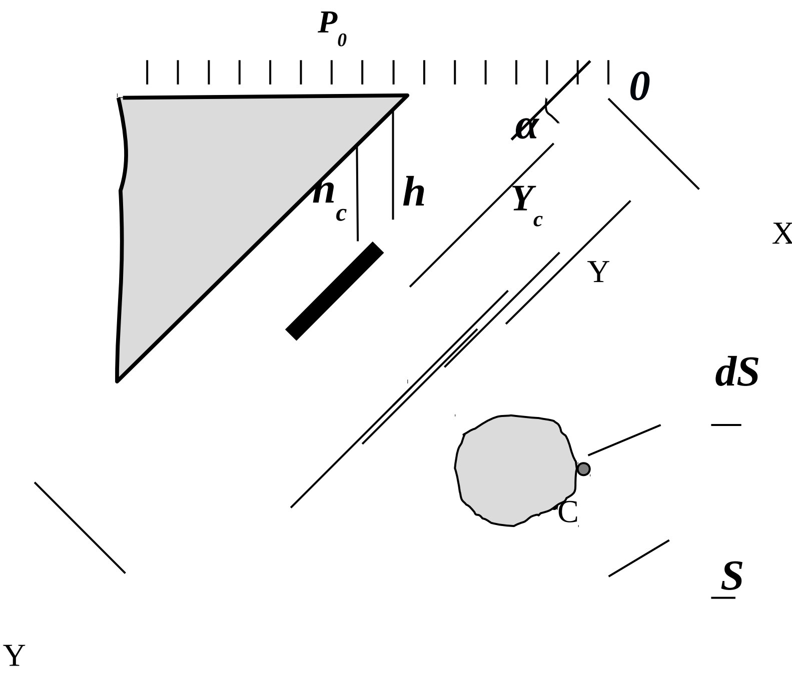
Второе свойство состоит в том, что в любой точке внутри жидкости давление по всем направлениям одинаково. Иначе это свойство давления звучит так: на любую площадку внутри объёма жидкости, независимо от её угла наклона, действует одинаковое давление.

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

$$P = f\left(x, y, z\right)$$

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:



$$dF = PdS = \left(P_0 + \rho gh\right)dS.$$

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

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

Из рисунка ясно, что в последнем выражении $h=Y\sin\alpha$. Подставив значение ***h*** в предыдущее выражение, будем иметь:

$$F=P_0S+\rho g\sin\alpha\int\limits_S YdS.$$

Из теоретической механики известно, что интеграл $\int\limits_S YdS$ 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

$$\int\limits_S YdS=Y_cS;$$

где $\boldsymbol{Y_c}$ – расстояние от оси ***X*** до центра тяжести площади ***S***.

Подставив формулу момента в выражение силы, получим:

$$F=P_0S+\overbrace{\rho g\underbrace{Y_c\sin\alpha}_{h_c}}^{P_{изб}}S.$$

Анализ второго слагаемого показывает, что произведение $Y_c\sin\alpha$ это глубина положения центра тяжести площадки, а $\rho gY_c\sin\alpha$ - избыточное давление жидкости в центре тяжести площадки. С учётом этого можно записать

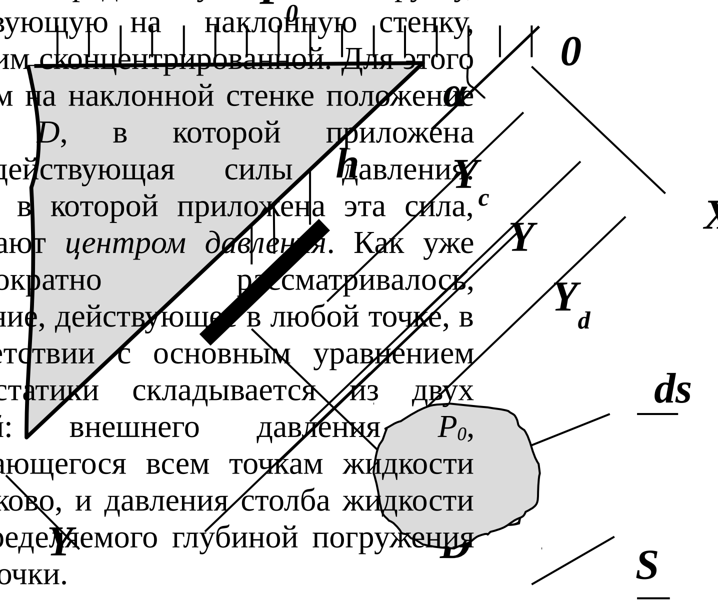
$$F=\underbrace{\left(P_0+\rho gh_c\right)}_{P_c}S.$$

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 нагрузку, действующую на наклонную стенку, заменим сконцентрированной. Для этого найдём на наклонной стенке положение точки ***D***, в которой приложена равнодействующая силы давления. 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.

$$F_{изб}Y_D=\int\limits_S YdF_{изб};$$

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

Y – текущая глубина.

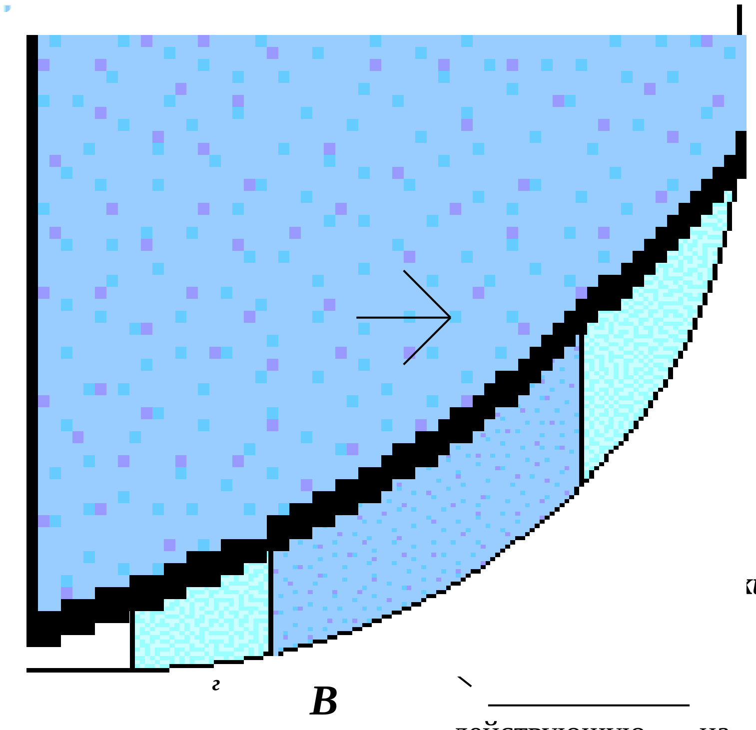
Заменив в этом выражении $F_{изб}$ и Y_D интегралом, в соответствии с упомянутым уравнением механики, будем иметь:

$$F_{изб} Y_D = \int_S Y dF_{изб} = \int_S Yd\left(\rho g \sin\alpha\, YS\right) = \rho g \sin\alpha \int_S Y^2 dS.$$

Отсюда выразим .

$$Y_D = \frac{J_{X0} + Y_C^2 S}{Y_c S} = Y_c + \frac{J_{X0}}{Y_c S}$$

Сила давления жидкости на криволинейную стенку



Чаще всего необходимо ***и AB*** определить силу, действующую на цилиндрическую поверхность, имеющую вертикальную ось симметрии. Возможны два варианта. Первый вариант - жидкость воздействует 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 $F_г$ и вертикальной $F_в$ составляющих.

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

$$F_в = P_0 S_г + G \quad ;$$

где P_0 – внешнее давление,

S$_г$ – 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***$_в$ поверхности ***AB***. С учётом частичного уравновешивания будем иметь условие равновесия сил в горизонтальном направлении в виде:

$$F_г = S_в \rho g h_c + P_0 S_в ;$$

где ***h***$_c$- глубина расположения центра тяжести поверхности ***AB***.

Зная ***F***$_г$ и ***F***$_в$ определим полную силу ***F***, действующую на цилиндрическую поверхность

$$F = \sqrt{F_г^2 + F_в^2} .$$

Во втором случае, когда жидкость воздействует 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***$_г$ и ***F***$_в$ 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

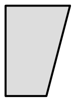
$$\sigma = \frac{F_R}{S_\delta} = \frac{PDl}{2l\sigma} = \frac{PD}{2\sigma} .$$

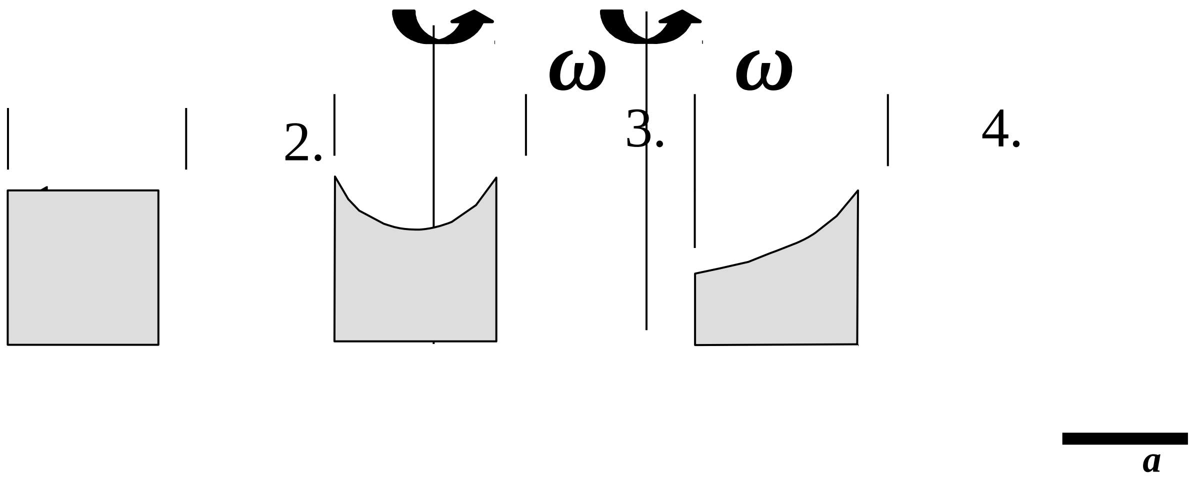
4. Дифференциальные уравнения Эйлера.

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

$$X-\frac{\partial P}{\partial x}\frac{1}{\rho}=0$$
$$Y-\frac{\partial P}{\partial y}\frac{1}{\rho}=0$$
$$Z-\frac{\partial P}{\partial z}\frac{1}{\rho}=0.$$

¿
|¿ |¿ ¿¿
¿





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

Первый вариант соответствует абсолютному покою 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

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

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. $p=f\left(x,y,z\right)$, в гидродинамике основными элементами, характеризующими движение жидкости, будут два: гидродинамическое давление и скорость движения (течения) жидкости.

В общем случае основные элементы движения жидкости р и и 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 Vo — объем некоторой массы жидкости, который она занимала в начальный момент времени t0. В момент времени t эта масса жидкости будет занимать объем Vt. Между точками t0 и t имеется взаимно-однозначное соответствие. Произвольная частица объема то, которая в момент t0 находилась в точке Ао, перешла в определенную точку А жидкого объема Vt. 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 t0. 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 А, декартовы координаты которой x, y, z. В разные моменты времени через эту точку А 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 .

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 QM - 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 QG - 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 Vср 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.

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

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.

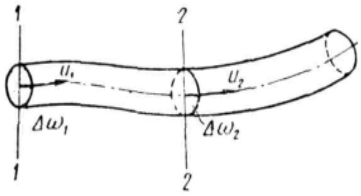


Рис. 3.

Пусть имеем элементарную струйку (рис. 3). Возьмем сечение 1-1 с площадью Δs_1 и скоростью движения частиц жидкости и1. 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 u1. 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 н единицу времени через сечения 1-1 и 2-2, должны быть одинаковы, т.е. $\Delta Q_1=\Delta Q_2$. Принимая во внимание, что сечения 1-1 и 2-2 приняты произвольно, можно в общем случае для элементарной струйки написать

$$\Delta Q_1=\Delta Q_2=\Delta Q_3=\ldots=\Delta Q_n=\Delta Q=const,$$

или

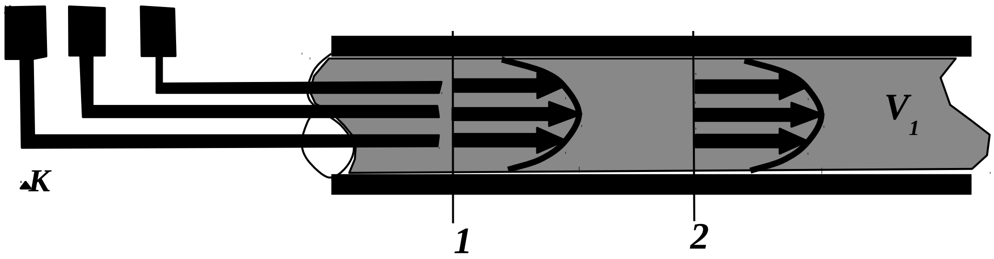
$$u_1\Delta s_1=u_2\Delta s_2=u_3\Delta s_3=\ldots=u_n\Delta s_n=\Delta Q=const.$$

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.

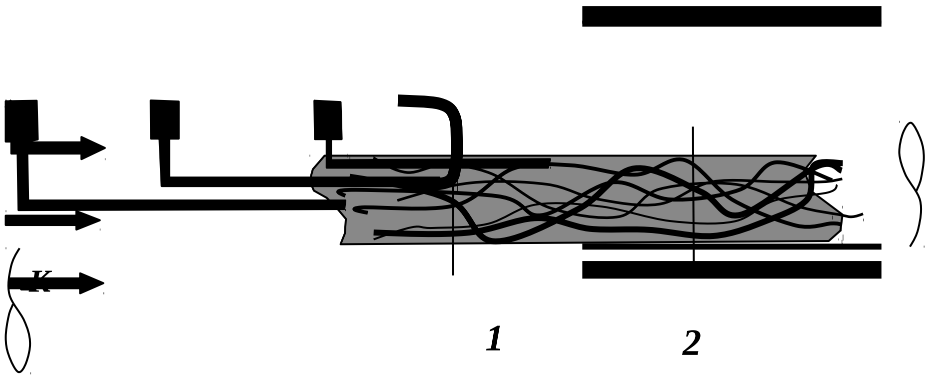
4 . Режимы течения.

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.

$$\mathrm{Re}_{кр} = \frac{V_{кр} d}{\nu}.$$

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

$$\mathrm{Re} \quad ,$$

$$¿¿¿_¿¿ = \frac{Vd}{\nu}¿$$

и сравнить его с критическим числом Reкр.

При этом, если Re Reкр, то режим движения ламинарный, если Re > Reкр, 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.

1. 4 Лекция №4 (2 часа).

Тема: «Основные уравнения динамики»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Закон сохранения массы и уравнение неразрывности (сплошности) в интегральной и дифференциальной формах.

2. Частные случаи уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости и для установившегося течения сжимаемой жидкости.

3. Обобщенная гипотеза Ньютона о связи между напряжениями и скоростями деформаций (закон Стокса).

4. Уравнения движения Навье-Стокса.

1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1. Закон сохранения массы и уравнение неразрывности (сплошности) в интегральной и дифференциальной формах.

2. Частные случаи уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости и для установившегося течения сжимаемой жидкости.

3. Обобщенная гипотеза Ньютона о связи между напряжениями и скоростями деформаций (закон Стокса).

4. Уравнения движения Навье-Стокса.

1. 5 Лекция №5, 6, 7 (6 часа).

Тема: «Одномерные потоки жидкости»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Одномерная модель и приведение к ней плавно изменяющихся течений напорных и безнапорных потоков.

2. Обобщение уравнения Бернулли для потока вязкой жидкости.

3. Гидравлические сопротивления, их физическая природа и классификация.

4. Сопротивления по длине для напорных и безнапорных потоков.

5. Данные о гидравлическом коэффициенте трения. Зоны сопротивления. Наиболее употребительные формулы для гидравлического коэффициента трения.

6. Местные гидравлические сопротивления, основная формула. Зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса и геометрических параметров русла. Виды местных сопротивлений.

7.Истечение жидкости и газа через отверстия и насадки.

8. Гидроудар.

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

1. Одномерная модель и приведение к ней плавно изменяющихся течений напорных и безнапорных потоков.

Уравнение Бернулли для струйки идеальной жидкости имеет вид

.

$$z_1+\frac{P_1}{\rho g}+\frac{u_1^2}{2g}=z_2+\frac{P_2}{\rho g}+\frac{u_2^2}{2g}.$$

При этом сумма приведённых выше величин $z_i+\dfrac{P_i}{\rho g}+\dfrac{u_i^2}{2g}$, описывающих движение жидкости под действием сил давления и сил тяжести есть величина постоянная для элементарной струйки, т.е.

$$Z+\frac{P}{g\rho}+\frac{u^2}{2g}=\mathrm{const}\left(=H\right).$$

Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли. Положение любой частицы жидкости относительно некоторой произвольной линии нулевого уровня 0-0 определяется вертикальной координатой Z. Для реальных гидравлических систем это может быть уровень, ниже которого жидкость из данной гидросистемы вытечь не может. Например, уровень пола цеха для станка или уровень подвала дома для домашнего водопровода.

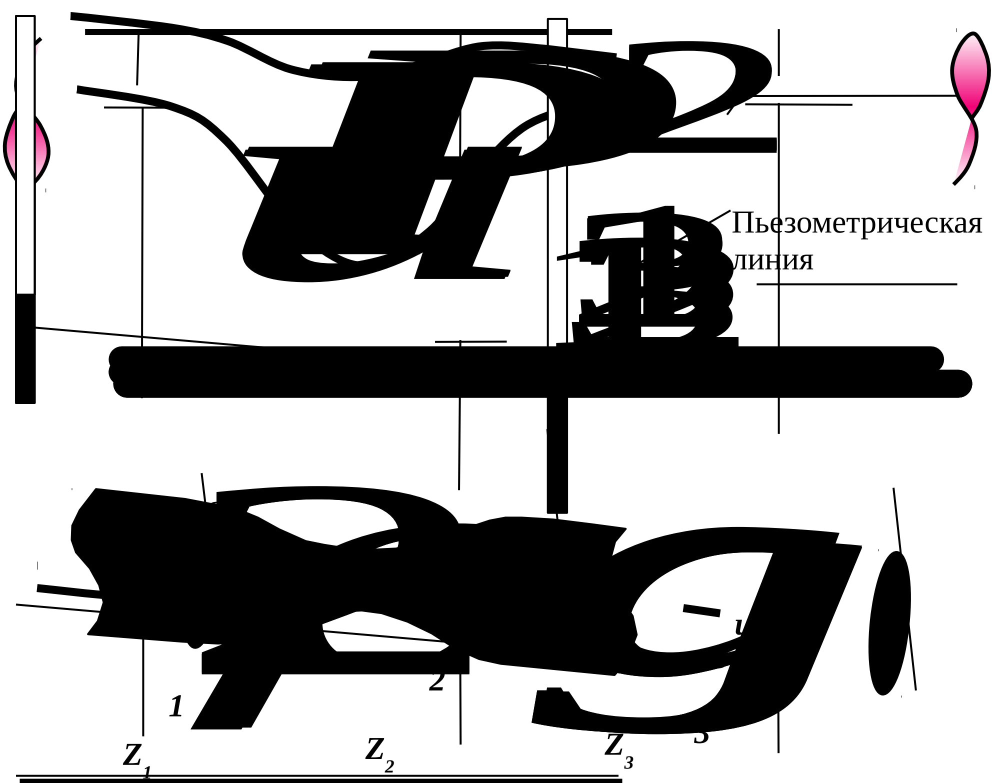
Как и в гидростатике, величину Z называют нивелирной высотой.

Второе слагаемое - $\dfrac{p}{g\rho}$ носит название пьезометрическая высота. Эта величина соответствует высоте, на которую поднимется жидкость в пьезометре, если его установить в рассматриваемом сечении, под действием давления P.

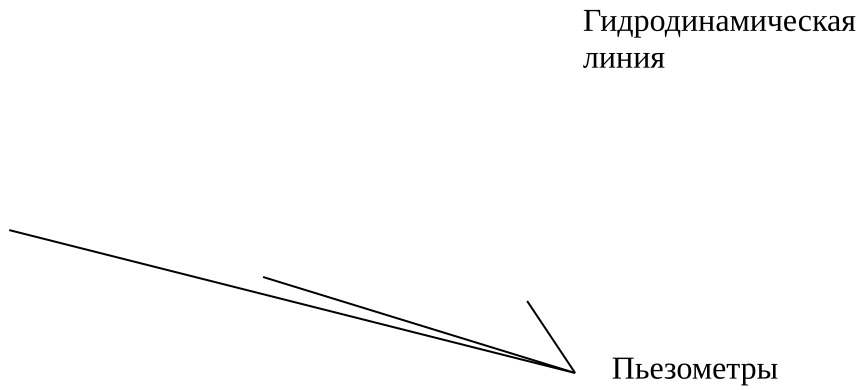
Сумма первых двух членов уравнения $Z+\dfrac{p}{g\rho}$ гидростатический напор.

Третье слагаемое в уравнения Бернулли $\dfrac{u^2}{2g}$ называется скоростной высотой или скоростным напором. Данную величину можно представить как высоту, на которую поднимется жидкость, начавшая двигаться вертикально со скорость u при отсутствии сопротивления движению.

Сумму всех трёх членов (высот) называют гидродинамическим или полным напором и, как уже было сказано, обозначают буквой H.



Все слагаемые уравнения Бернулли имеют размерность длины и их можно изобразить графически.



Геометрическое место точек, высоты которых равны $z+\frac{P}{g\rho}$, называется пьезометрической линией. Если к этим высотам добавить скоростные высоты, равные $\frac{u^2}{2g}$, то получится другая линия, которая называется гидродинамической или напорной линией.

Из уравнения Бернулли для струйки невязкой жидкости (и графика) следует, что гидродинамический напор по длине струйки постоянен.

Энергетическая интерпретация уравнения Бернулли. Выше было получено уравнение Бернулли с использованием энергетических характеристик жидкости. Суммарной энергетической характеристикой жидкости является её гидродинамический напор.

С физической точки зрения это отношение величины механической энергии к величине веса жидкости, которая этой энергией обладает. Таким образом, гидродинамический напор нужно понимать как энергию единицы веса жидкости. И для идеальной жидкости эта величина постоянна по длине. Таким образом, физический смысл уравнения Бернулли это закон сохранения энергии для движущейся жидкости.

z — удельная потенциальная энергия положения на единицу веса жидкости;

$\frac{p}{g\rho}$ — удельная потенциальная энергия давления на единицу веса жидкости

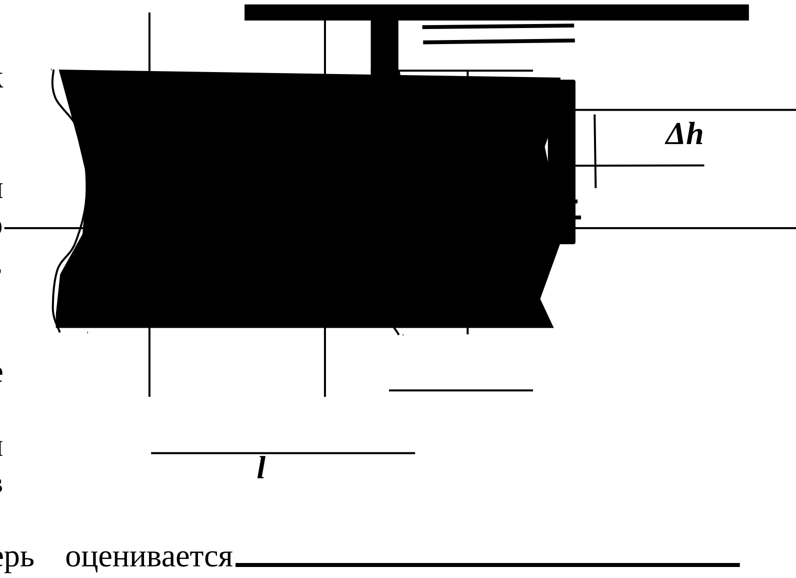
$\frac{u^2}{2g}$ — удельная кинетическая энергия на единицу веса жидкости.

2. Обобщение уравнения Бернулли для потока вязкой жидкости.

3. Гидравлические сопротивления, их физическая природа и классификация.

Гидравлическая жидкость в гидросистемах технологического оборудования, как уже обсуждалось ранее, играет роль рабочего тела. Она обеспечивает перенос энергии от источника гидравлической энергии к потребителю (в большинстве случаев, к гидродвигателю). Для такого переноса используются напорные потоки.

Естественно, что твёрдые стенки препятствуют свободному движению жидкости. Поэтому при относительном движении жидкости и твердых поверхностей неизбежно возникают (развиваются) гидравлические сопротивления. На преодоление возникающих сопротивлений затрачивается часть энергии потока. Эту потерянную энергию называют гидравлическими потерями удельной энергии или потерями напора. Гидравлические потери главным образом связаны с преодолением сил трения в потоке и о твёрдые стенки и зависят от ряда факторов, основными из которых являются:



геометрическая форма потока,

размеры потока,

шероховатость твёрдых стенок потока,

скорость течения жидкости,

режим движения жидкости (который связан со скоростью, но учитывает её не только количественно, но и качественно),

вязкость жидкости,

некоторые другие эксплуатационные свойства жидкости.

Но гидравлические потери практически не зависят от давления в жидкости.

Величина гидравлических потерь оценивается энергией, потерянной каждой весовой единицей жидкости. Из уравнения Бернулли, составленного для двух сечений потока, обозначенных индексами 1 и 2 потери энергии потока жидкости Δh можно представить как

$$\Delta h = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right).$$

Если учесть, что труба в обоих сечениях 1 и 2 имеет одинаковые площади поперечных сечений, жидкость является несжимаемой и выполняется условие сплошности (неразрывности) потока, то, несмотря на гидравлические сопротивления и потери напора, кинетическая энергия в обоих сечениях будет одинаковой. Учтя это, а также то, что при больших давлениях в напорных потоках и небольшой (практически нулевой) разнице нивелирных высот Z1 и Z2, потери удельной энергии можно представить в виде

$$\Delta h = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}.$$

Опыты показывают, что во многих случаях потери энергии прямо пропорциональны квадрату скорости течения жидкости, поэтому в гидравлике принято выражать потерянную энергию в долях от кинетической энергии, отнесённой к единице веса жидкости

$$\Delta h = \xi \frac{V^2}{2g},$$

где ξ - коэффициент сопротивления.

Таким образом, коэффициент сопротивления можно определить как отношение потерянного напора к скоростному напору.

Гидравлические потери в потоке жидкости разделяют на 2 вида:

потери по длине,

местные потери.

4. Сопротивления по длине для напорных и безнапорных потоков.

Гидравлические потери по длине .Потери напора по длине, иначе их называют потерями напора на трение $h_{тр}$, в чистом виде, т.е. так, что нет никаких других потерь, возникают в гладких прямых трубах с постоянным сечением при равномерном течении. Такие потери обусловлены внутренним трением в жидкости и поэтому происходят и в шероховатых трубах, и в гладких. Величина этих потерь выражается зависимостью

$$h_{тр} = \xi_{тр} \frac{V^2}{2g},$$

где $\xi_{тр}$ - коэффициент сопротивления, обусловленный трением по длине.

При равномерном движении жидкости на участке трубопровода постоянного диаметра d длиной l этот коэффициент сопротивления прямо пропорционален длине и обратно пропорционален диаметру трубы

$$\xi_{тр} = \lambda \frac{l}{d},$$

где – коэффициент гидравлического трения (иначе его называют коэффициент потерь на трение или коэффициент сопротивления трения).

Из этого выражения нетрудно видеть, что значение - коэффициент трения участка круглой трубы, длина которого равна её диаметру.

С учетом последнего выражения для коэффициента сопротивления потери напора по длине выражаются формулой Дарси

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}.$$

5. Данные о гидравлическом коэффициенте трения. Зоны сопротивления. Наиболее употребительные формулы для гидравлического коэффициента трения.

Течение в гладких трубах . Гладкие или точнее технически гладкие трубы это такие, шероховатость внутренних поверхностей которых настолько мала, что практически не влияет на потери энергии на трение. К таким трубам относят

цельнотянутые трубы из цветных металлов,

трубы из алюминиевых сплавов,

стальные высококачественные бесшовные трубы,

новые высококачественные чугунные трубы,

новые не оцинкованные трубы.

В основном трубы, используемые в гидросистемах технологического оборудования можно отнести к технически гладким.

Потери напора как уже отмечалось ранее, могут быть определены по формуле Дарси. Коэффициент гидравлического трения для ламинарного режима определяется по следующей формуле $\lambda_л = \frac{64}{\mathrm{Re}}$.

Наиболее применимыми формулами для определения коэффициента гидравлического трения являются следующие эмпирические и полуэмпирические зависимости

$$\lambda_T = \frac{1}{(1{,}8 \lg \mathrm{Re} - 1{,}5)^2},$$

применяемая для чисел Рейнольдса в пределах 4000 $\div$ несколько миллионов, или

Рис.9

$$\lambda_T = \frac{0{,}3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}},$$

Рис.9

используемая в интервале 4000 $\div$ 100000.

Течение в шероховатых трубах .Исследование течения жидкости в шероховатых трубах практически полностью основываются на экспериментальных исследованиях. На их результатах основаны зависимости и расчётные формулы, применяющиеся для определения потерь энергии в подобных условиях. Основная формула для определения потерь напора – формула Дарси. Отличие заключается только в коэффициенте потерь на трение.

В отличие от турбулентных потоков в гладких трубах, где коэффициент на трение полностью определяется числом Рейнольдса Re, для потоков в трубах имеющих шероховатые внутренние поверхности λ_T зависит ещё и от размеров этой шероховатости. Установлено, что решающее значение имеет не абсолютная высота неровностей (абсолютная шероховатость) k, а отношение высоты этих неровностей к радиусу трубы. Коэффициент потерь на трение в этом случае описывается функцией

$$\lambda_T = f(\mathrm{Re}, \frac{k}{r_0}).$$

1 – зона ламинарного течения, коэффициент $\lambda_л$ вычисляется по формуле

$$\lambda_л = \frac{64}{\mathrm{Re}};$$

2 – зона турбулентного гладко стенного течения, коэффициент λ_T вычисляется по формуле

$$\lambda_T = \frac{1}{(1{,}8\lg \mathrm{Re} - 1{,}5)^2}$$

или

$$\lambda_T = \frac{0{,}3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}};$$

3 – зона, так называемого, доквадратичного течения, коэффициент λ_T вычисляется по формуле

$$\lambda_T = 0{,}11\left(\frac{K_Э}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0,25};$$

4 – зона квадратичного сопротивления, коэффициент λ_T вычисляется по формуле

$$\lambda_T = 0{,}11\left(\frac{K_Э}{d}\right)^{0,25}.$$

6. Местные гидравлические сопротивления, основная формула. Зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса и геометрических параметров русла. Виды местных сопротивлений.

Местными гидравлическими сопротивлениями называются любые участки гидравлической системы, где имеются повороты, преграды на пути потока рабочей жидкости, расширения или сужения, вызывающие внезапное изменение формы потока, скорости или направления ее движения. В этих местах интенсивно теряется напор. Примерами местных сопротивлений могут быть искривления оси трубопровода, изменения проходных сечений любых гидравлических аппаратов, стыки трубопроводов и т.п. Потери напора на местных сопротивлениях $\Delta h_м$ определяются по формуле Вейсбаха:

$$\Delta h_м = \xi_м \frac{V^2}{2g};$$

где $\xi_м$ - коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления зависит от конкретных геометрических размеров местного сопротивления и его формы. В связи со сложностью процессов, которые происходят при движении жидкости через местные сопротивления, в большинстве случаев его приходится определять на основании экспериментальных данных.

Однако в некоторых случаях величины коэффициентов местных сопротивлений можно определить аналитически.

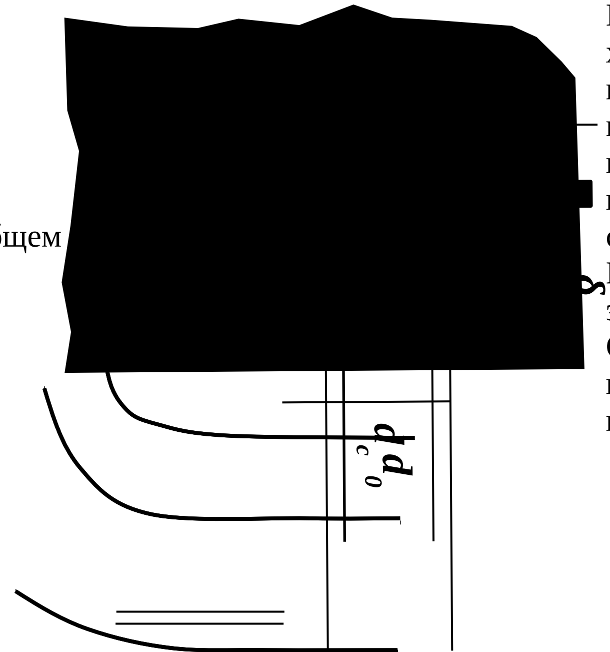
Из определения коэффициента $\xi_м$ видно, что он учитывает все виды потерь энергии потока жидкости на участке местного сопротивления. Его физический смысл состоит в том, что он показывает долю скоростного напора, затрачиваемого на преодоление данного сопротивления.

Коэффициенты различных сопротивлений можно найти в гидравлических справочниках. В том случае, если местные сопротивления находятся на расстоянии меньше (25÷50)d друг от друга (d - диаметр трубопровода, соединяющего местные сопротивления), весьма вероятно их взаимное влияние друг на друга, а их действительные коэффициенты местных сопротивлений будут отличаться от табличных. Такие сопротивления нужно рассматривать как единое сложное сопротивление, коэффициент $\xi_м$ которого определяется только экспериментально. Нужно отметить, что из-за взаимного влияния местных сопротивлений, расположенных вблизи друг друга в потоке, во многих случаях суммарная потеря напора не равна простой сумме потерь напора на каждом из этих сопротивлений.

7.Истечение жидкости и газа через отверстия и насадки.

В своей практике все мы встречались с процессом истечения жидкости через отверстие, под действием гидростатического напора.

Подобные режимы течения жидкости происходят в контрольной и регулирующей аппаратуре различных гидравлических систем.



Истечение жидкости из отверстий характерно тем, что в этом процессе потенциальная энергия жидкости на очень коротком расстоянии и за очень короткий промежуток время превращается в кинетическую энергию струи (или капель в общем случае).

При этом происходят некоторые потери энергии.

Обратите внимание на то, что при вытекание жидкости через отверстие происходит сжатие струи. (переход).

То есть диаметр струи меньше диаметра отверстия. Возникает вопрос: Чем вызвано это сжатие?

Рассмотрим траекторию движения отдельных частиц. Частицы жидкости движутся к отверстию со всех сторон и изменение направления движения, в силу их инертности, мгновенно произойти не может.

То есть сжатие струи обосновывается инерцией частиц жидкости движущихся при подходе к отверстию по криволинейным траекториям.

Сжатие струи характеризуется коэффициентом сжатия ε.

Который находится как отношение площади живого сечения струи к площади отверстия.

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

Или отношение соответствующих квадратов диаметров.

Скорость истечение жидкости определяется по формуле

$$V_c = \phi \sqrt{2gH}$$

Где φ – коэффициент скорости.

Для определение расхода пользуются следующей формулой:

$$Q = \mu \cdot S_0 \sqrt{2gH}$$

Ее называют инженерной формой у – е Бернулли.

Истечение через насадки.

Насадком называется короткая трубка длиной от двух до шести диаметров, присоединённая к выходу отверстия, через которое истекает жидкость.

Роль насадка может выполнять и отверстие в толстой стенке, когда диаметр отверстия значительно меньше её толщины.

Подобные режимы течения жидкости возникают при вытекании жидкости из резервуаров, баков, котлов в атмосферу или пространство, заполненное жидкостью.

Простейшим насадком является цилиндрический насадок.

Расход в этом случае через насадок определяется по той же формуле, что и для отверстия.

Из-за того, что сжатия на выходе насадка нет (ε = 1,0) коэффициент расхода через такой насадок равняется

$$\mu = \varphi \approx 0{,}8 .$$

8. Гидроудар.

Теоретическое и экспериментальное исследование гидравлического удара в трубопроводах впервые было проведено известным русским учёным Николаем Егоровичем Жуковским в 1899 году. Это явление связано с тем, что при быстром закрытии трубопровода, по которому течёт жидкость, или быстром его открытии (т.е. соединении тупикового трубопровода с источником гидравлической энергии) возникает резкое, неодновременное по длине трубопровода изменение скорости и давления жидкости. Если в таком трубопроводе измерять скорость жидкости и давление, то обнаружится, что скорость меняется как по величине, так и по направлению, а давление - как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения по отношению к начальному. Это означает, что в трубопроводе возникает колебательный процесс, характеризующийся периодическим повышением и понижением давления. Такой процесс очень быстротечен и обусловлен упругими деформациями стенок трубы и самой жидкости.

Из формулы следует, что скорость распространения ударной волны зависит от сжимаемости жидкости и упругих деформаций материала трубопровода.

Ударное давление определяют по формуле, носящей имя Жуковского:

$$\Delta P = \rho V \frac{1}{\sqrt{\rho\left(\frac{D}{E_m\ \delta} + \frac{1}{E_ж}\right)}}.$$

где ρ - плотность жидкости,

D - диаметр трубопровода,

δ - толщина стенки трубопровода,

Ет – объёмный модуль упругости материала трубы,

Еж - объёмный модуль упругости жидкости

1. 6 Лекция №8, 9 (4 часа).

Тема: «Одномерные потоки газов.»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Дифференциальное уравнение течения газа в канале переменного сечения.
2. Связь геометрии канала с параметрами потока в нем. Критический расход газа.
3. Истечение газа сквозь сужающееся сопло (конфузор).
4. Течение газа в сопле Лаваля. Расчетный и нерасчетные режимы.
5. Сопротивления по длине для напорных и безнапорных потоков.

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

1. Дифференциальное уравнение течения газа в канале переменного сечения.

Рассматривается одномерное стационарное течение идеального газа в канале (трубе), площадь нормального поперечного сечения которого S меняется в зависимости от координаты x, направленной вдоль оси канала; завимость $S=S(x)$, очевидно, будет определять форму канала. Течение газа будем считать изоэнтропическим.

Для математического описания указанного течения используем уравнение неразрывности

ρVS = const

и уравнение Эйлера

$$VdV=-\frac{dp}{\rho}.$$

выразим $dp=a^2\,d\rho$, вследствие чего из будем иметь

$$\frac{d\rho}{\rho}=-M^2\frac{dV}{V}.$$

Это уравнение отражает роль числа Маха M как меры сжимаемости газа в потоке как при малых, так и при больших своих значениях, а именно:

а) при малых M (M<1) относительное изменение плотности газа намного (в M2 раз) меньше относительного изменения скорости потока $\left(\frac{|\Delta\rho|}{\rho}<<\frac{|\Delta V|}{V}\right)$ (ср. с оценкой (13.4)), что дает основание для использования при этом модели несжимаемой жидкости;

б) напротив, в сверхзвуковых потоках (M>1) относительное изменение плотности в M2 раз превосходит относительное изменение скорости $\left(\frac{|\Delta\rho|}{\rho}>>\frac{|\Delta V|}{V}\right)$, т.е. имеет место эффект сильной сжимаемости (или сильного расширения) газа.

Далее, возьмем от обеих частей уравнения логарифмическую производную по x и запишем

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dx}+\frac{1}{V}\frac{dV}{dx}+\frac{1}{S}\frac{dS}{dx}=0.$$

Исключая отсюда плотность ρ с помощью , получим искомое дифференциальное уравнение

$$\left(M^2-1\right)\frac{1}{V}\frac{dV}{dx}=\frac{1}{S}\frac{dS}{dx},$$

которое связывает изменение скорости потока в канале с изменением площа-ди его сечения; оно носит имя Гюгонио.

Наряду с этим уравнением имеют место соотношения

$$\frac{M^2-1}{M^2}\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dx}=-\frac{1}{S}\frac{dS}{dx},$$

$$\frac{M^2-1}{kM^2}\frac{1}{p}\frac{dp}{dx}=-\frac{1}{S}\frac{dS}{dx},$$

$$\frac{M^2-1}{\left(k-1\right)M^2}\frac{1}{T}\frac{dT}{dx}=-\frac{1}{S}\frac{dS}{dx},$$

которые легко получаются из уравнений, и при учете изоэнтро-пических связей между параметрами p, ρ и T (10.8), (10.8′).

На основе уравнения проанализируем некоторые особенности изменения параметров газовых потоков в канале.

1. Если M<1, т.е. поток дозвуковой, то знаки $\frac{dS}{dx}$ и $\frac{dV}{dx}$ противопо-ложны. Таким образом, как и в случае несжимаемой жидкости: а) при рас-ширении канала $\left(\frac{dS}{dx}>0\right)$ скорость потока уменьшается $\left(\frac{dV}{dx}<0\right)$ и б) при сужении канала $\left(\frac{dS}{dx}<0\right)$ скорость потока увеличивается $\left(\frac{dV}{dx}>0\right)$.

2. Если M>1, т.е. поток сверхзвуковой, то знаки $\frac{dS}{dx}$ и $\frac{dV}{dx}$ одинаковы. Таким образом: а) при расширении канала $\left(\frac{dS}{dx}>0\right)$ скорость потока увели-чивается $\left(\frac{dV}{dx}>0\right)$ и б) при сужении канала $\left(\frac{dS}{dx}<0\right)$ скорость потока умень-шается $\left(\frac{dV}{dx}<0\right)$.

Этот необычный результат – эффект обращения воздействия ширины канала на скорость потока – объясняется отмеченным выше эффектом сильной сжимаемости газа при сверхзвуковых течениях. Действительно, при ускорении газа в таких потоках его плотность, согласно (14.3), уменьшается в M2 раз быстрее увеличения скорости, поэтому и величина ρV (плотность тока) будет уменьшаться, что, вследствие уравнения неразрывности (14.1), возможно только при увеличении площади сечения канала S. При торможении сверхзвукового потока ситуация будет прямо противоположной, однако следует отметить, что при этом в потоке обычно появляются скачки уплотнения, т.е. нарушается изоэнтропичность течения.

2. Связь геометрии канала с параметрами потока в нем. Критический расход газа.

Рассмотрим истечение газа из резервуара большого объема, в котором газ первоначально находится в покое, т.е. V0 = 0, при давлении p0 и темпера-туре T0, через малое отверстие по некоторому каналу в окружающую среду, давление в которой pн < p; при этом pн называется противодавлением. Связь формы (или геометрии) канала, которая представлена зависимостью $S = S(x)$, с параметрами одномерного изоэнтропического потока в нем выражается дифференциальными уравнениями (14.4)–(14.7). Можно, однако, представить эту связь в виде конечных, не дифференциальных соотношений, которые по существу представляют интегралы указанных уравнений. Они могут быть получены на основе уравнения неразрывности (6.3), которое запишем в форме

$$\rho VS = \rho_{¿} a_{¿} S_{¿}, \qquad (15.1)$$

где $S_{¿}$ – площадь критического сечения, в котором $V = a = a_{¿}$, $\rho = \rho_{¿}$; как известно (см. п.14), это сечение реализуется в горловине сопла Лаваля при расчетном сверхзуковом режиме течения газа в нем.

Разделяя в уравнении (15.1) термогазодинамические и геометрические параметры, будем иметь

$$\frac{\rho V}{\rho_{¿} a_{¿}} = \frac{S_{¿}}{S} \quad \text{или} \quad q = \frac{S_{¿}}{S}. \qquad (15.2)$$

Здесь $q = \frac{\rho V}{\rho_{¿} a_{¿}}$ – приведенный удельный расход (13.10), который представлен выше как функция $q(\lambda)$ (13.11) и как функция $q(M)$ (13.12). С помощью газодинамических функций $\tau(\lambda)$ (13.5), $\varepsilon(\lambda)$ (13.6), $\pi(\lambda)$ (13.7) величине q можно поставить в соответствие также параметры τ, ε, π . Таким образом, уравнение (15.2) при учете (13.11), (13.12), (13.15)–(13.7) представляет связь безразмерной площади текущего сечения канала $\bar{S} = S/S_{¿} (\geq 1)$ и безразмерных термогазодинамических параметров q, λ, M, τ, ε, π . Численный расчет указанных параметров обычно проводится с помощью таблиц газодинамических функций. Размерные значения V, T, ρ и p получаются затем при умножении безразмерных величин на соответствующие масштабы.

При описании истечения газа из резервуара сквозь сопло Лаваля необходимо определить величину секундного массового расхода газа при расчетном сверхзвуковом режиме течения

$$\dot m_{¿}=¿\rho_{¿}a_{¿}S_{¿} \quad , \qquad (15.3)$$

называемую критическим расходом. Для практических расчетов эту величину целесообразно представить в зависимости от параметров p_0 и T_0, соответствующих исходному состоянию покоя газа в резервуаре. Согласно (13.9), (12.5), (10.1,б), (11.3) имеем

$$\rho_{¿}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\rho_0 , \quad a_{¿}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{2}}a_0 , \quad \rho_0=\frac{p_0}{RT_0} , \quad a_0=\sqrt{kRT_0} .$$

Последовательно подставляя эти выражения в (15.3), после приведения получим

$$\dot m_{¿}=B\frac{p_0}{\sqrt{T_0}} , \text{ где } B=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}\sqrt{\frac{k}{R}} . \qquad (15.4)$$

Постоянная B определяется физическими свойствами газа; например, для воздуха $\left(k=1.4,\ R=287\ \frac{м^2}{c^2K}\right)$ B=0.0404 $\frac{сК^{\frac{1}{2}}}{м}$.

При произвольном нерасчетном режиме течения газа в том же сопле, когда в его горловине площадью $S_{\min}=S_{(*)}$ параметры потока не принимают своих критических значений, соответствующий расход может быть записан в виде

$$\dot m=\rho VS_{(¿)}=\rho_{¿}a_{¿}qS_{(¿)}=\dot m_{¿}q . \qquad (15.5)$$

Поскольку $q\le 1$, то из (15.5) следует, что критический расход в заданном канале при фиксированных параметрах p0 и T0 является максимально возможным, т.е. $\dot m\le\dot m_{¿}$

или, что то же самое, $\max\ \dot m|_{p_0,T_0}=\dot m_{¿}$

3. Истечение газа сквозь сужающееся сопло (конфузор).

Обращаемся вновь к задаче об истечении газа из резервуара большого объема, постановка которой дана в начале п.15. Предположим здесь, что сопло имеет вид конфузора, т.е. канала с уменьшающейся вниз по потоку площадью сечения S. Как явствует из анализа п.14, скорость дозвукового потока при этом будет увеличиваться, а давление, температура и плотность газа будут уменьшаться вдоль канала. Параметры потока в выходном сечении сопла обозначим индексом в: $V_в$, $P_в$, $T_в$, $\rho_в$; площадь этого сечения – $S_в$.

Рассмотрим отношение секундного массового расхода протекающего сквозь сопло газа к своему критическому значению, который имел бы место при $V_в = a_¿$,

$$\frac{\dot m}{\dot m_¿} = \frac{\rho_в V_в S_в}{\rho_¿ a_¿ S_в} = q_в = \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \lambda_в \varepsilon_в \qquad (16.1)$$

где $\lambda_в = V_в / a_¿$, $\varepsilon_в = \rho_в / \rho_0$, $q_в = \rho_в V_в / \rho_¿ a_¿$ (13.11). Выразим здесь $\lambda_в$ и $\varepsilon_в$ через $\pi_в = p_в / p_0$ с помощью равенств (13.7) и (13.8)

$$\varepsilon_в = \pi_в^{\frac{1}{\kappa}}, \quad \lambda_в = \left[\frac{\kappa+1}{\kappa-1}\left(1-\pi_в^{\frac{k-1}{k}}\right)\right]^{\frac{1}{2}},$$

тогда для $q_в$ (16.1) получим

$$q_в = q(\pi_в) = A\pi_в^{\frac{1}{\kappa}}\left(1-\pi_в^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (16.2)$$

где $A = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}\left(\frac{k+1}{k-1}\right)^{\frac{1}{2}}$. Отметим, что $q(0) = q(1) = 0$, $q(\pi_¿) = 1$,

где $\pi_¿ = \frac{p_¿}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$. Нетрудно убедиться, что при 0≤π<π* функция q(π) возрастает, достигая своего максимума q(π*) =1, а при π*<π≤1 убывает до q(1) = 0.

Рассмотрим зависимость приведенного расхода $q = \frac{\dot m}{\dot m_¿}$ истекающего из сопла газа от отношения противодавления pн к давлению в резервуаре p0 – πн = pн / p0.

При уменьшении…………скорость истечения …возрастает от……Отсюда следует, что понижение давления…., которое можно рассматривать как слабое возмущение, распространяющееся относительно потока газа с местной скоростью звука а, будет распространяться навстречу вытекающей из сопла струе и достигать выходного сечения этого сопла. Таким образом, при ……….и зависимость …..от ….будет описываться формулой (16.2) при …Отметим, что при дальнейшем понижении противодавления, т.е. при………, указанное возмущение уже не сможет достигнуть выходного сечения сопла, так как составляющая абсолютной скорости его распространения в направлении, противоположном струе, при ….обратится в 0 (см.п.11), т.е. это возмущение давления … будет как бы сноситься встречным потоком газа. Это привод к своеобразному явлению, называемому «запирание» потока или кризис течения. Изменение давления …в указанном диапазоне не отразится на параметрах истечения, так что при этом ………., т.е. часть графика зависимости …при ….представится отрезком горизонтальной прямой …., а не штриховой кривой, соответствующей формуле (16.2).

Максимально возможный при заданных параметрах состояния газа в котле …и … массовый расход протекающего газа определяется по формуле (15.4) при

$$\dot{m}_{\max}=\dot{m}_{¿}=\rho_{¿}a_{¿}S_{в}=B\frac{p_0}{\sqrt{T_0}}S_{в} \qquad (16.3)$$

и реализуется в диапазоне противодавлений 0<pн≤p* (0<πн≤π*).

При имеет место равенство

$$\dot{m}=\rho_{в}V_{в}S_{в}=\dot{m}_{¿}q_{в}=B\frac{p_0}{\sqrt{T_0}}S_{в}q(\pi_{н}), \qquad (16.4)$$

в котором qв=q(πн) определяется по формуле (16.2) при πв=πн .

4. Течение газа в сопле Лаваля. Расчетный и нерасчетные режимы.

Рассмотрим задачу об истечении газа из большого резервуара (см.15) через канал в виде сопла Лаваля. Такой канал, в отличие от предыдущего случая (п.16), имеет как начальную сужающуюся (конфузорную), так и расширяющуюся (диффузорную) части, которые смыкаются между собой в минимальном по площади сечении – горловине сопла.

При заданной форме (геометрии) сопла, задаваемой функцией S=S(x) расчет параметров изоэнтропического потока в нем можно провести посредством решения дифференциального уравнения (14.4), которому путем подстановки M=M(λ) (12.7) придадим вид

$$\frac{\lambda^2-1}{1-\frac{k-1}{k+1}}\frac{1}{\lambda}\frac{d\lambda}{dx}=\frac{1}{S}\frac{dS}{dx} \qquad (17.1)$$

либо с помощью конечного соотношения (см.15.2))

$$q=\frac{S_{¿}}{S}, \qquad (17.2)$$

которое является интегралом дифференциального уравнения (17.1) при q=q(λ) (13.11).

Если в горле сопла, т.е. при s=s$_{\min}$, приведенная скорость λ достигла критического значения λ = 1, т.е. $S_{\min}=S_{¿}$, то дальнейшее развитие потока может быть как сверхзвуковым, так и дозвуковым, Это усматривается из того, что при любом s>s ¿ уравнение (17.2) имеет 2 корня: 1) $\lambda'>1$ и 2) $\lambda''<¿$ 1. Указанная альтернатива разрешается заданием противодавления рн, а именно: различным значениям πн=рн /р0 соответствуют различные возможные режимы течения газа в сопле Лаваля.

Для анализа этих режимов рассмотрим решения уравнения (17.2) при (как и выше, индекс в отмечает параметры, соответствующие выходному сечению сопла). Предположим, что S* = Smin, т.е. в горловине сопла реализуется критическое сечение. Согласно (17.2), имеем

$$q(\lambda_в)=\frac{S_¿}{S_в} \quad (17.3)$$

Так как S $_в>¿$ $¿$ S $¿$, то это уравнение имеет 2 решения: $\lambda_в'>1$ и λ. Им соответствуют 2 значения давления: рв′ называется расчетным давлением, а рв″ – предельным давлением.

Реализация различных режимов течения газа определяется соотношением протидавления рн и указанных значений Р и р. При этом возможны следующие варианты:

а)Если рн=рв‘($\pi_н=\pi_в'$), то реализуется расчетный сверхзвуковой режим течения, при котором скорость потока в сопле монотонно возрастает плоть до значения на выходе Vв = $\lambda_в a_¿$; температура, плотность и давление вдоль канала будут уменьшаться, причем рв=рв=’рн.

б)При р0> рн>рв’’(1> $\pi_н \geq \pi_в''$) течение газа в сопле будет сверхзвуковым. Скорость потока достигает максимума в горловине сопла, а затем уменьшается диффузорной части; на выходе Vв= $\lambda_в'' a_¿$. Давление и плотность, напротив, в горловине имеют минимумы; на выходе рв=рн $¿$ рв.

в) Если рв’’>рн>рв" ($\pi_в>\pi_н>\pi_в$), то в сопле или вне его возникнут сложные явления – скачки уплотнения (см.п.99), при которых движение газа уже не будет непрерывным одномерным и изоэнропическим.

г)При рн<рв ($\pi_н<\pi_в'$) истечение происходит с избытком давления (недорасширенное истечение). Внутри сопла газ движется так же, как и в расчетном режиме; в выходном сечении рв =рв', Vв= $\lambda_в' a_¿$ а по выходе из сопла газ будет продолжать изоэнтропически расширяться и ускоряться с образованием волн разрежения и сжатия.

В режимах а), в) и г) расход газа в сопле одинаково определяется по горловине сопла, где во всех этих случаях реализуется критическое сечение

$$\dot{m} = \rho_¿ a_¿ S_¿ = m_¿ = B\frac{p_0}{\sqrt{T_0}} S_¿ \quad (17.4)$$

т.е. расход будет критический (см.п.15). Для режимов б) имеем

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\text{¿}}} = \frac{\rho_{в} V_{в} S_{в}}{\rho_{\text{¿}} V_{\text{¿}} S_{\text{¿}}} = \frac{q_{в}}{S_{\text{¿}} / S_{в}} = \frac{q(\pi_{н})}{q(\pi''_{в})} \quad . \qquad (17.5)$$

Поскольку $\pi_{н} \geq \pi''_{в}$, то $q(\pi_{н}) \leq q(\pi''_{в})$ и $\dot{m} = \dot{m}(\pi_{н}) \leq \dot{m}_{\text{¿}}$.

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 $V = r^2 l$, где r - радиус капилляра термометра.
3. С учетом начального (при 0 ^{O}С) объема термометрической жидкости V найти значение коэффициента теплового расширения $_T = (V/V) / T$ и сравнить его со справочным значением $^*{}_T$ (табл. 1.1). Значения используемых величин занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Вид жидкости	r, см	V, см^3	T, ^{O}С	l, см	V, см^3	$_T$, ^{O}С$^{-1}$	$^*{}_T$, ^{O}С$^{-1}$
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 шкалы 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 $= 4m/(d^2h)$, 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	, /см^3	*, г/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

$$= g\, d^2\, t\, (_ш/ -1) \,/\, [18l + 43.2l\, (d/D)],$$

где g – ускорение свободного падения; d, D – диаметры шарика и цилиндрической емкости; , $_ш$ - 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	, кг/м^3	*t*, сек	*l*, м	*d*, м	*D*, м	$_ш$, кг/м^3	, м^2/с	*, м^2/с
М-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 $=M\ t$ (*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*, м^2/с^2	*t*, с	, м^2/с	*T*, ^{O}С	*, м^2/с
М-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*, $м^3/с$	, $кг/м^3$	*n*	, Н/м	*, Н/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;
- разобратся 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 уровненя 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 (мембраны, сильфоны, манометрические трубки). 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 .

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

4. Цена деления прибора .

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

5. Линейность прибора

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

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

$$p = p_0 + \rho g h,$$

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/м^3;

g -ускорение свободного падения, м/с^2.

Следствие из уравнения: Для одной и той же жидкости замкнутого объёма 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 трубки открыты, жидкость в ней поднимется под действием гидростатического давления до уровня 2 - 2.

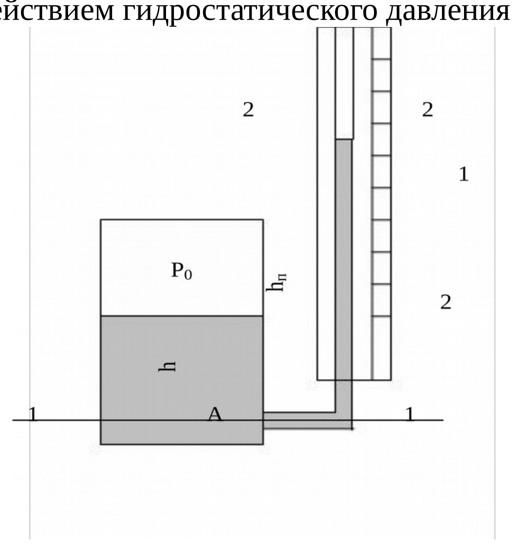


Рис 2.1 Пьезометр

1- стеклянная трубка, 2 – измерительная шкала.

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

$$p_0 + \rho g h = p_{am} + \rho g h_n ,$$

откуда

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

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 $\rho_{рт}$ =13 600 кг/м^3.

Простейшим типом жидкостного манометра является U-образный ртутный манометр (рис. 2.2), в котором один конец трубки 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: $p=\rho_{pm} g\left(h_n-\Delta h\right)$, где Δh - глубина понижения уровня ртути в левом колене 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 $p<p_{ат}$, а другой конец опущен в открытый сосуд.

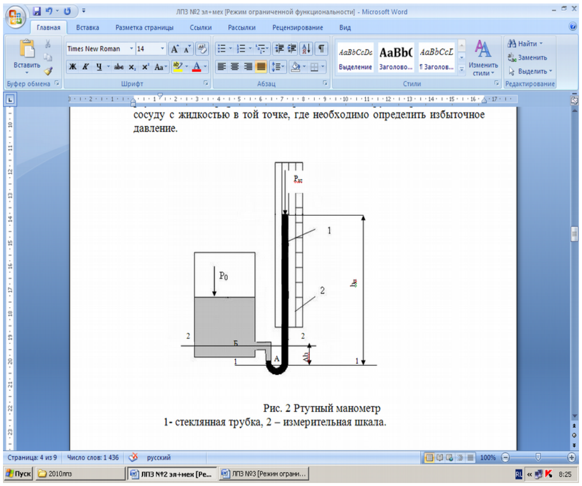


Рис. 2.2 Ртутный манометр
1- стеклянная трубка, 2 – измерительная шкала.

Для намерения давления газа в сосуде можно воспользоваться формулой

$$p_{am}=p+\rho g h_{вак}$$

откуда

$$p=p_{am}-\rho g h_{вак}$$

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

$$h_{вак}=\left(p_{am}-p\right)/\rho g$$

Применение рассмотренных приборов жидкостного типа ограничивается областью сравнительно небольших давлений.

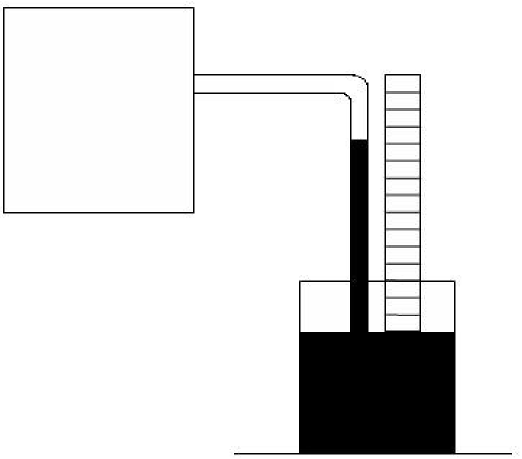


Рис. 2.3 Ртутный вакуумметр

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 трубки -

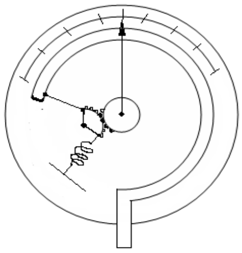


Рис. 2.4 Механический манометр

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

пружины эллиптического сечения, стрелки и передаточного механизма.

Манометр свободным концом трубки 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 I...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.

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

Порядок поверки. Поверяемый 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

.

а) $p_o > p_a$ б) $p_o < p_a$ в) $p_o < p_a$

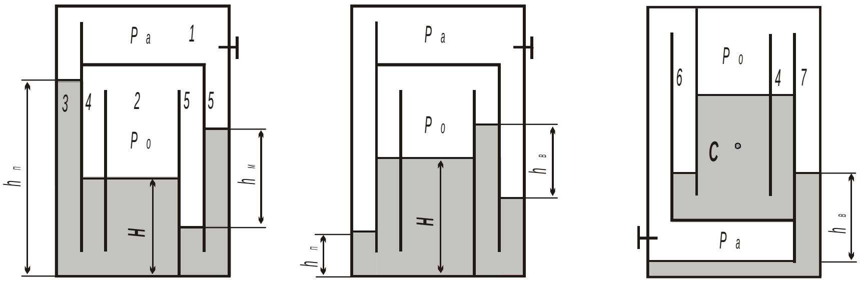


Рис. 2.5 Схема устройства

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 ($p_o p_a$), 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 $h_п$, уровнемера H и мановакуумметра $h_м$.

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 *р*.

4. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 создать вакуум ($p_о < p_а$), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 5 появляется обратный перепад $h_в$ (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 ***С*** 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 $p_а$ = 100000 Па, плотность воды ρ = 1000 кг/м^3.

Таблица 2.1

№ №	Наименование величин	Обозначения, формулы	Условия опыта	
			$P_o P_a$	$P_o P_a$
1 1	Пьезометрическая высота, м	$h_п$		

2 2	Уровень жидкости в резервуаре, м	H		
3 3	Манометрическая высота, м	$h_м$		-
4 4	Вакуумметрическая высота, м	$h_в$	-	
5 5	Абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра, Па	$p=p_a+\rho g h_п$		
6 6	Абсолютное давление в резервуаре над жидкостью, Па	$p_o=p_a+\rho g h_м$		-
		$p_o=p_a-\rho g h_в$	-	
7 7	Абсолютное давление на дне резервуара через показания мановакуумметра и уровнемера, Па	$p^*=p_o+\rho g H$		
8 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:

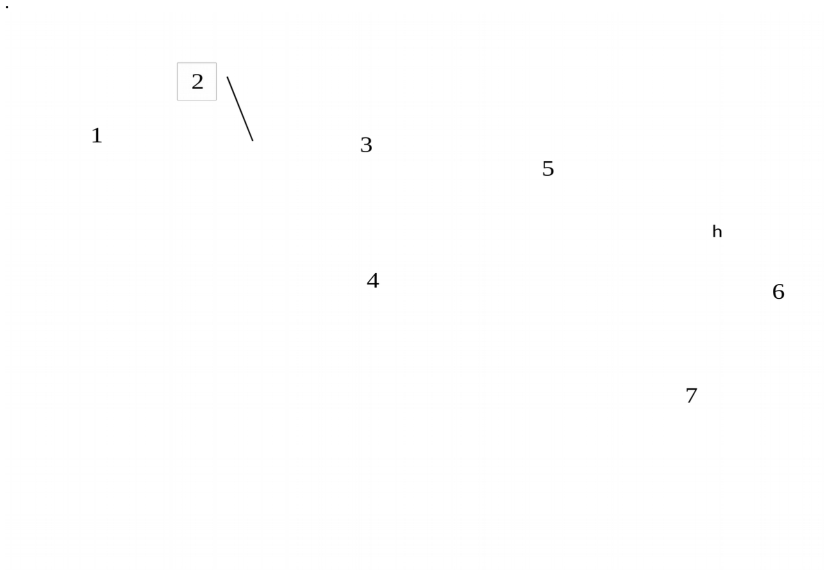


Рис. 3.1 Схема установки Рейнольдса

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

Порядок выполнения.

1 – открыть вентиль3, а затем, плавно открывая вентиль 6 установить ламинарное движение жидкости. При этом необходимо, чтобы был максимальный расход жидкости, при ламинарном движение.

2 – снять показаний 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, $м^2$	Измерительный объем (V), $м^3$	Время, t с	Q, $м^3/с$	Т, °С	υ, $м^2/с$	v, м/с	Re
1	ламинарный									
2	момент перехода									
3	турбулентный									
4	момент перехода									

2.4 Лабораторная работа №4 (2 часа).

Тема: «Иллюстрация уравнения Бернулли»

2.4.1 Цель работы: Опытное подтверждение уравнения Д. Бернулли, т.е. понижения механической энергии по течению и перехода потенциальной энергии в кинетическую и обратно (связи давления со скоростью).

2.4.2 Задачи работы:

– измерить пьезометрические напоры в сечениях
- наблюдать с помощью приборов изменение полной удельной энергии по длине потока в напорном трубопроводе переменного сечения и переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно в соответствии с уравнением Бернулли
- построить по данным измерений пьезометрическую и напорную линии.
- сравнить измеренный скоростной напор в сечениях с вычисленным по средней скорости.

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Лабораторная установка «Установка Бернулли»
2. Методическое пособие «Иллюстрация уравнения Бернулли».

2.4.4 Описание (ход) работы:

1. Включить насос 3 при закрытом вентиле 6.
2. Плавно открыть вентиль 6.
3. Снять показания пьезометров $H_П$=P/(g) по нижним частям менисков воды в них и занести их в таблицу 1.
4. Определить расход с помощью расходометра 5.

Таблица 3.1

Наименование величин	Обозначения, формулы	Сечения трубы		
		I	II	III

Диаметр, м	d			
Площадь сечения канала, м	S			
1- опыт				
Измеряемый объем, $м^3$ $м^3$	V			
Время протекания измеряемого объема, с	t			
Расход, $м^3 м^3$/с	$Q = \frac{V}{t}$			
Средняя скорость, м/с	$v = \frac{Q}{S}$			
Геометрическая высота, м	z			
Пьезометрическая высота, м	$\frac{P}{\rho g}$			
Пьезометрический напор, м	$H_п = z + \frac{P}{\rho g}$			
Скоростной напор, м	$H_c = \frac{v^2}{2g}$			
Полный напор, м	$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$			
Мощность потока, Вт	$N = \rho g Q H$			
2- опыт				
Измеряемый объем, $м^3$ $м^3$	V			
Время протекания измеряемого объема, с	t			
Расход, $м^3 м^3$/с	$Q = \frac{V}{t}$			
Средняя скорость, м/с	$v = \frac{Q}{S}$			
Геометрическая высота, м	z			
Пьезометрический напор, м	$H_п = z + \frac{P}{\rho g}$			
Скоростной напор, м	$H_c = \frac{v^2}{2g}$			
Полный напор, м	$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$			
Мощность потока, Вт	$N = \rho g Q H$			

5. Изменить расход с помощью вентиля 6 и повторить пункты 3, 4.
6. Плавно закрыть вентиль 6 и выключить насос.
7. Заполнить таблицу 3.1
8. Вычертить в масштабе трубу переменного сечения с пьезометрами (рис. 3.2). Соединив уровни жидкости в пьезометрах, получить пьезометрическую линию, показывающую изменение потенциальной энергии (давления) вдоль потока. Для получения напорной линии (линии полной механической энергии) отложить от оси канала полные напоры H и соединить полученные точки.

Проанализировать изменение полной механической H, потенциальной P/(g) и кинетической $v^2/(2g)$ энергий жидкости вдоль потока; выяснить соответствие этих изменений уравнению Бернулли

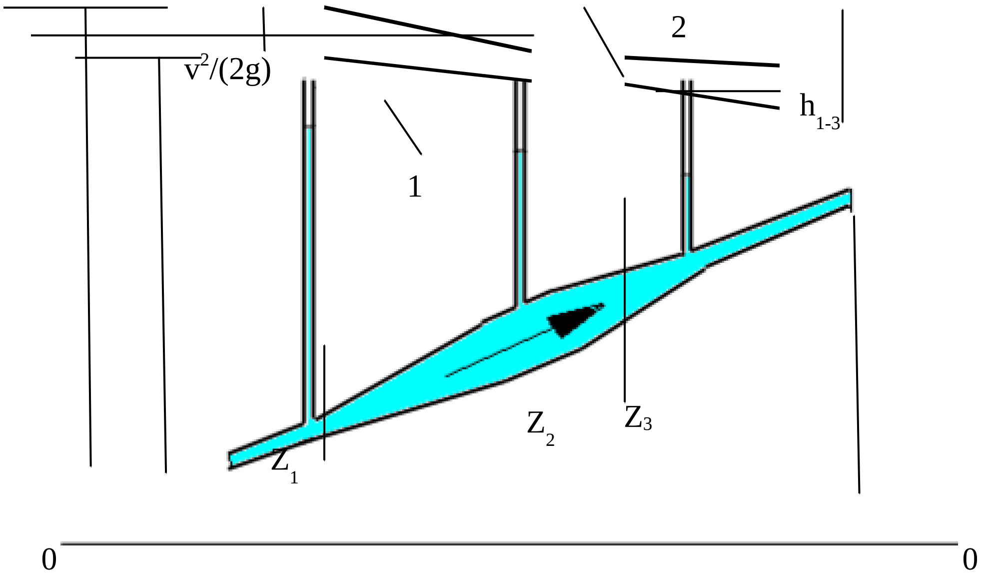


Рис 3.2. 1 - пьезометрическая линия, 2 - напорная линия, h_{1-3} – суммарные потери напора по длине, на внезапное сужение, на плавные расширения и сужения на участке 1 - 3.

2.5 Лабораторная работа №5 (2 часа).

Тема: «Определение коэффициента гидравлического трения»

2.5.1 Цель работы: Найти значения коэффициента гидравлического трения λ опытным путем и его расчетные значения для условий опыта и сравнить между собой. Решить задачу на определение потерь напора.

2.5.2 Задачи работы:

- понятие потери напора по длине;
- значимость коэффициента гидравлического трения λ для вычисления потерь напора и его зависимость от режима движения жидкости, шероховатости внутренних стенок трубы и ее размеров;
- понятие гидравлические гладкие трубы;
- условия, при которых одна и та же труба работает как гидравлическая гладкая и как гидравлически шероховатая;
- понятие квадратичная область (зона) сопротивления.

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Лабораторная установка «Установка Гидродинамика»

2. Методическое пособие «Определение коэффициента гидравлического трения».

2.5.4 Описание (ход) работы:

Таблица 5.1.

Исходные данные	Ед. изм.	1 - труба	2 - труба
Внутренний диаметр трубы d	м		
Длина исследуемых участков l	м		
Абсолютная шероховатость	м		

Рабочее задание.

1. Включить насосную установку.
2. Открыть вентиль на входе по указанию преподавателя и снять показание манометров H_1, H_2, H_3, H_4.
3. Замерить время **t** протекания измеряемого объема V.
4. Снять показание термометра и найти значение коэффициента кинематической вязкости воды при этой температуре ν.
5. Свести показание в таблицу 5.2.
6. Повторить пункты 2, 3, 4, 5 два раза.
7. Обработать опытные данные.

Таблица 5.2.

Опытные данные

№	1 - труба		2 - труба		V, м^3	t, с	S, м^2	Q, м^3/с	T, °C	ν, м^2/с
	H_1, м	H_2, м	H_3, м	H_4, м						
1										
2										
3										

Обработка опытных данных.

1. Определить расход воды через установку для каждого опыта Q.
2. Определить среднюю скорость воды для каждой трубы и опыта v.
3. Определить число Рейнольдса для каждой трубы и опыта Re.
4. Определить потери по длине для каждой трубы и опыта $h_{дл}$.
5. Определить опытное значение коэффициента гидравлического для каждой трубы и опыта $\lambda_{оп}$.
6. Определить граничные числа Рейнольдса для каждой трубы $Re_{гр}$.
7. Определить расчетное значение коэффициента гидравлического трения для условий опыта $\lambda_{расч}$.
8. Отклонение опытного коэффициента гидравлического трения от расчетного ε.
9. Свести показание в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Опытные данные

№ опыта	1 - труба								
	Δh, м	ΔP, Па	v, м/с	Re	$Re_{гр\ 1}$	$Re_{гр\ 2}$	$\lambda_{оп}$	$\lambda_{расч}$	ε
1									
2									
3									
№ опыта	2 - труба								
	Δh, м	ΔP, Па	v, м/с	Re	$Re_{гр\ 1}$	$Re_{гр\ 2}$	$\lambda_{оп}$	$\lambda_{расч}$	ε
1									
2									
3									

2.6 Лабораторная работа №6 (2 часа).

Тема: «Определение местного коэффициента гидравлического трения»

2.6.1 Цель работы: Найти значения коэффициента местных сопротивлений ξм для внезапного расширения и вентиля опытным путем и их расчетные значения для ус¬ловий опыта и сравнить между собой.

2.6.2 Задачи работы: Уяснить:

- понятие местные потери напора;
- значимость коэффициента местных сопротивлений $\xi\xi_м$ для вычисления потерь напора и его зависимость от режима движения жидкости, и вида местных сопротивлений;
- понятие квадратичная область сопротивления;

2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Лабораторная установка «Установка Гидродинамика»

2. Методическое пособие «Определение местного коэффициента гидравлического трения».

2.6.4 Описание (ход) работы:

Таблица 6.1

Исходные данные	Ед. изм	Внезапное расширение		Вентиль	
		1 – сеч.	**2-** сеч.	**1** – сеч1	**2-** сеч1
Внутренний диаметр трубы	м				

Рабочее задание.

1. Включить насосную установку.
2. Открыть вентиль на входе по указанию преподавателя и снять показание дифференциальных манометров.
3. Замерить время **t** протекания измеряемого объема V
4. Снять показание термометра и найти значение коэффициента кинематической вязкости воды при этой температуре. Свести показание в таблицу 6.2.
5. Повторить пункты 2, 3, 4, два раза.
6. Обработать опытные данные.

Таблица 6.2

1							
2							

3							

Обработка опытных данных.

1. Определить расход воды через установку для каждого опыта Q.
2. Определить среднюю скорость воды для каждого сечения и опыта v.
3. Определить число Рейнольдса для каждого сечения и опыта Re.
4. Определить потери по длине для каждой трубы и опыта $h_{дл}h_{дл}$.
5. Определить опытное значение коэффициента местных сопротивлений $\xi\xi_{м}$.
6. Определить расчетное значение коэффициента местных сопротивлений $\xi\xi_{м}$.
7. Отклонение опытного коэффициента от расчетного ε.
8. Свести показание в таблицу 2.

Таблица 6.3.

Опытные данные

№	Δh, м	v, м/с	Re	$\xi_{м.оп}$	$\xi\xi_{м\ расч}$	ε	Q,

опыта		1 – сеч.	2 – сеч.	1 – сеч.	2 – сеч.	1 – сеч.	2 – сеч.	1 – сеч.	2 – сеч.		м^3
Внезапное расширение											
1											
2											
3											
Вентиль											
1											
2											
3											

2.7 Лабораторная работа №7 (2 часа).

Тема: «Испытание центробежного насоса»

2.7.1 Цель работы: По результатам испытаний построить напорную $H=f_1(Q)$ и энергетические $N=f_2(Q)$ и $\eta=f_3(Q)$ характеристики насоса.

2.7.2 Задачи работы: Уяснить:

- принцип работы центробежного насоса;
- устройство и назначение рабочего колеса, отвода и уплотнений;
- методику испытания насоса;
- смысл основных параметров насоса:

подачи- Q, КПД - η,
напора- H, допустимой вакуумметрической
давления - p, высоты всасывания - $H_{вак}^{доп}$
мощности - N,

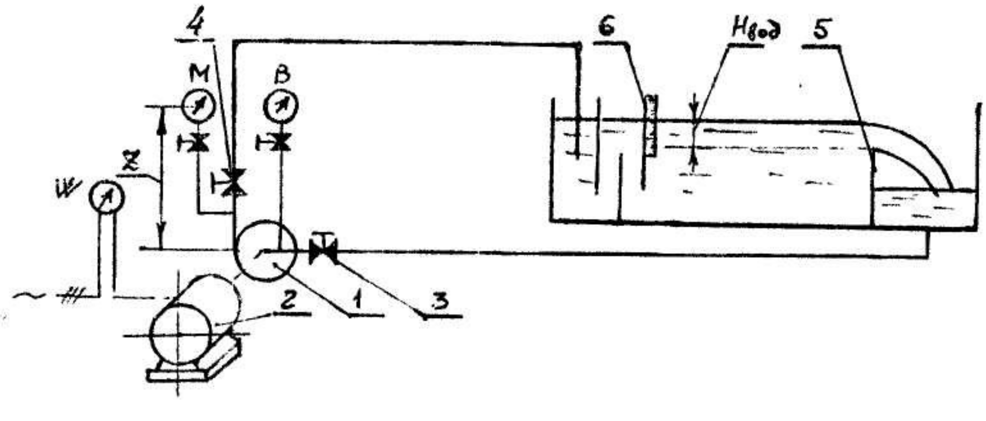
- качественную зависимость H , N, η, $H_{вак}^{доп}$ от подачи Q;
- отличие геометрической высоты подъема $H_г$ от напора насоса H;
- влияние степени прикрытия задвижки на нагнетательном трубопроводе на подачу насоса Q и на потребляемую им мощность N.

2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Насосная станция.

2. Методическое пособие «Испытание центробежного насоса».

2.7.4 Описание (ход) работы:



.

Рис. 8.1. Схема установки для испытания насоса

1- насос, 2- электромотор, 3- задвижка на входе в насос, 4- задвижка на выходе из насоса, 5- водослив, 6- уровнемер водослива, В- вакуумметр, М - манометр, W- ваттметр, z - высота установки манометра над осью насоса,

$H_{вод}$ напор водослива.

Исходные данные:

- тип и марка испытуемого насоса - центробежный консольный К-8/18;
- диаметр всасывающего патрубка насоса . . . . d = 40мм;
- диаметр нагнетательного патрубка насоса .... . d = 32мм;
- высота установки манометра, над осью насоса . . . z = 1,5м;
- коэффициент полезного действия электромотора. . . .η = 0,7;
- коэффициент пропорциональности для показаний к = 1 _

Таблица 8.1.

Опытные и расчетные данные

№ опыта	Опытные данные				Расчетные данные			
	Показания				Подача насоса Q, м³/с	Напор насоса H, м	Мощность насоса N, кВт	КПД насоса η, %
	манометра $P_м$, Па	Вакуумметра $P_в$, Па	Ваттметра W, кВт	Уровнемера $H_{вод}$, м				

Рабочее задание.

1. По макету изучить устройство центробежного насоса, найти места эксплуатационных утечек жидкости, подсоса воздуха и эксплуатационного износа.

2. Ознакомиться с правилами пуска и остановки насоса и в соответствие с ними пустить насос

3. Произвести испытания на шести режимах:

первый режим - закрыть задвижку на нагнетательном трубопроводе и записать в таблицу 1 отчета показания манометра, вакуумметра, ваттметра и уровнемера водослива.

второй режим - приоткрыть задвижку на нагнетательном трубопроводе так, чтобы давление по показаниям манометра изменилось на 0,1 кгс/см^2

и записать показания приборов.

$$P_2 = P_1 - 0{,}1$$

третий режим - той же задвижкой установить давление

и записать показания приборов.

$$P_3 = P_1 - 0{,}2$$

четвертый режим -

$$P_4 = P_1 - 0{,}4$$

пятый режим -

$$P_5 = P_1 - 0{,}8$$

шестой режим -

$$P_6 = P_1 - 1{,}6$$

4. Остановить насос по правилам.

5. Обработать опытные данные, построить характеристики насоса и записать выводы по результатам испытаний.

6. Найти эксплуатационные параметры испытуемого насоса для предложенной насосной установки,

Правила пуска насоса.

1. Закрыть задвижку на нагнетательном трубопроводе и открыть на

всасывающем.
2. Отключить манометр и вакуумметр.
3. Заполнить насос водой.
4. Включить электромотор.
5. Подключить манометр и вакуумметр.
6. Открыть задвижку на нагнетательном трубопроводе.

Правила остановки насоса
1. Закрыть задвижку на нагнетательном трубопроводе.
2. Выключить электромотор.
3. Отключить манометр и вакуумметр.

2.8 Лабораторная работа №8 (2 часа).

Тема: «Совместная работа двух центробежных насосов»

2.8.1 Цель работы: Построить:

- суммарные напорные характеристики насосов для параллельной и последовательной совместной работы;

- характеристику трубопровода насосной установки (график потребных напоров).

Найти подачу и мощность насосной установки с одним и двумя насосами.

2.8.2 Задачи работы: Уяснить:

Уяснить методику построения:

- суммарных напорных характеристик насосов;

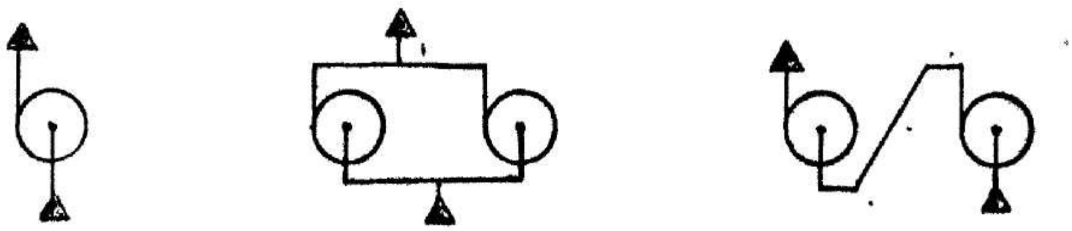
- характеристики трубопровода насосной установки.

2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Насосная станция.

2. Методическое пособие «Совместная работа двух центробежных насосов».

2.8.4 Описание (ход) работы:



Схемы соединения центробежных насосов для совместной работы

Исходите данные.

Насос №1 - K-8/I8 (1.5K - 6)

Насос №2. K-8/I8 (I.5K - 6)

Диаметр всасывающего патрубка насоса $d_{вс}$=40 мм

Диаметр нагнетательного патрубка $d_н$=32 мм

Поправка на установку манометра. . 1,5 м

Опытные и расчетные данные

Для насосной установки с одним насосом. Таблица 9.1

Опыт №1				Расчетные величины		
Показания			Геомет. высота подъема $H_г$, м	Подача насоса Q, $м^3/с$	Напор насоса H, м	Мощность насоса, N кВт
Манометра $P_м$, Па	Вакуумметра $P_в$, Па	Уровнемера водослива $H_в$, м				

Для насосной установки с двумя насосами. Таблица 9.2

№ опыта	Соединение двух насосов	Показания уровнемера, $H_в$, м	Подача насосной установки, $м^3/с$		Потребляемая мощность, кВт
			Опытная	Расчетная	
1	Параллельное				
2	Последовательное				

РАБОЧИЕ ЗАДАНИЕ.

1. Построить суммарные напорные характеристики для параллельного и последовательного соединения двух насосов.

2. Провести опыт № 1.

2.1 Включить один насос, соблюдая правила пуска.

2.2 Полностью открыть задвижку на нагнетательном трубопроводе.

2.3 Снять показания манометра, вакуумметра, уровнемера, водослива и измерить геометрическую высоту подъема воды $H_г$.

3. Провести опыт № 2.

3.1 Соблюдая правило пуска, включить второй насос.

3.2 Задвижками 1,2,3,4,5 соединить насосы параллельно.

3.3 Снять показания уровнемера водослива.

4. Провести опыт № 3.

4.1 Задвижкам 1,2,3,4,5 соединить насосы последовательно.

4.2 Снять показания уровнемера водослива.

4.3 Остановить насосы.

5. Вычислить опытнее значения подачи насосной установки с одним и двумя насосами по показаниям уровнемера водослива.

6. Вычислить напор насоса H и сопротивление трубопровода насосной установки С по данным опыта №1.

7. Записать уравнения характеристики трубопровода насосной установки и наложить её график на суммарные характеристики насосов.

8. Найти рабочие точки насосов на суммарных характеристиках и определив расчётные подачи и потребляемую насосной установкой мощность.

2.9 Лабораторная работа №9 (2 часа).

Тема: «Исследование течения газа»

2.9.1 Цель работы:

1. Исследовать характер изменения скорости и давления по длине сопла (u)
2. Исследовать характер изменения расхода воздуха при изменении параметров воздуха на входе в сопло.

2.9.2 Задачи работы: Уяснить:

Уяснить методику построения графиков изменения давления газа, скорости движения газа и расхода газа по длине сопла.

2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Дозвуковое сопло
2. Жидкостные манометры, вольтметры, термометр, барометр

2.9.4 Описание (ход) работы:

1. Включить вентилятор и установить рабочее напряжение 12,5 В.
2. Снять показания жидкостных манометров и записать данные в таблицу.
3. Установить рабочее напряжение 16,5 В и повторить пункт 2.
4. Установить рабочее напряжение 20 В и повторить пункт 2.
5. Определить во всех сечениях давление, скорость и расход.
6. Записать данные в таблицу.
7. Построить графики изменения давления газа, скорости движения газа и расхода газа по длине сопла.

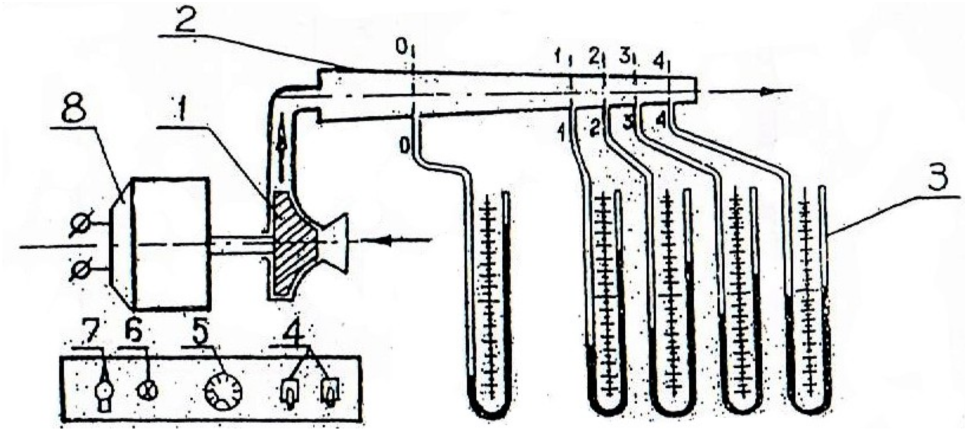


Рис. 9.1 Схема лабораторной установки:1-центробежный компрессор; 2-дозвуковое сопло; 3-жидостный манометр; 4-включатель;
5-волтьметр; 6-контрольная лампа;7-переключатель режимов;
8-электродвигатель.

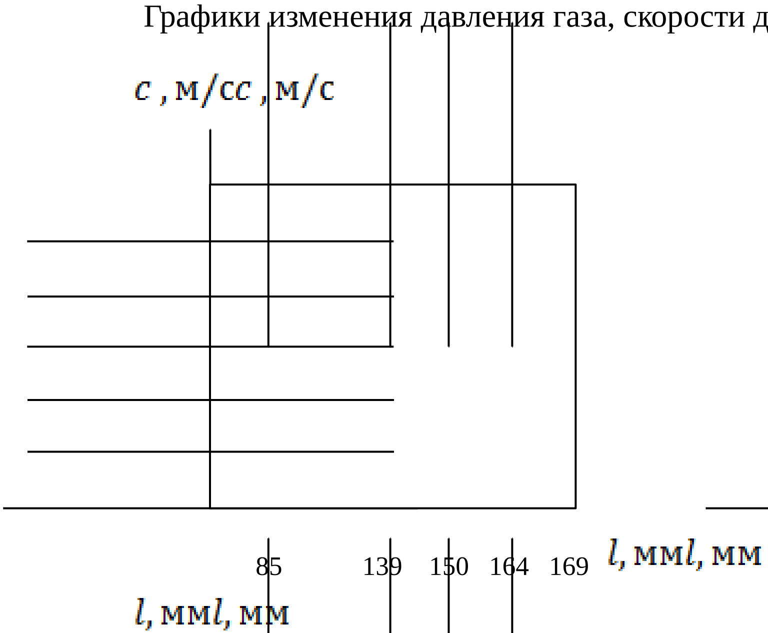
Таблица 1.

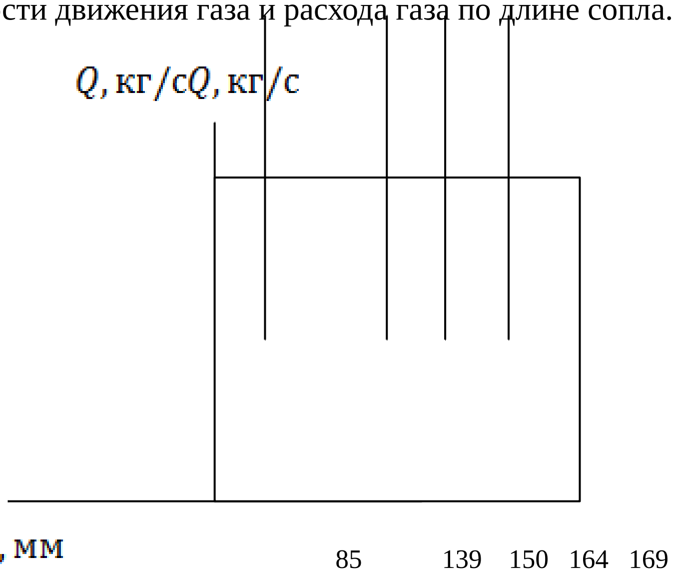
Таблица измерений и результатов вычислений.

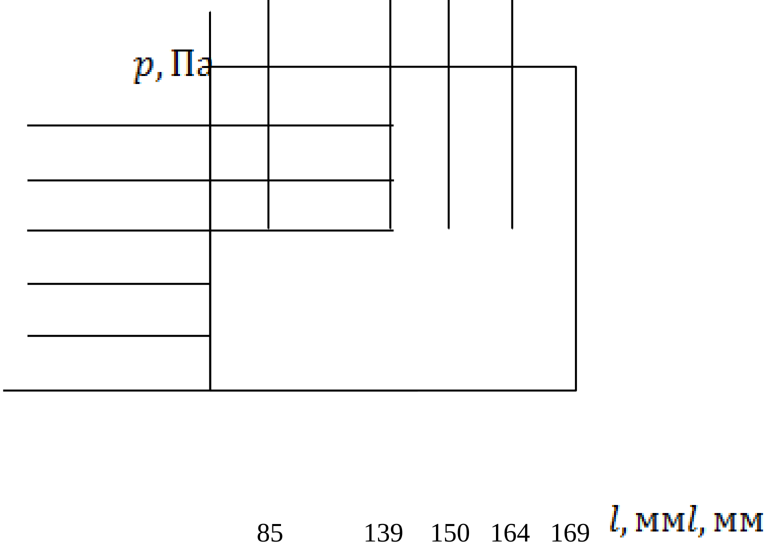
U,В	*Пара метры* / *№ сечений*	$p_x = (1$	**Давление в сечение, Па**	***Скорость воздуха, м/с*** / **Показание жидкостного манометра, мм**	***Площадь сечений, м²***	***Расход воздуха в сечение, кг/с***
12,5 В	*0*				$3215{,}36 \cdot 10^{-6}$	
	1				$1209{,}2 \cdot 10^{-6}$	
	2				$1133{,}54 \cdot 10^{-6}$	
	3				$1017{,}36 \cdot 10^{-6}$	
	4				$907{,}46 \cdot 10^{-6}$	
16,5В	*0*					
	1					
	2					
	3					

	4					
20B	*0*					
	1					
	2					
	3					
	4					

Графики изменения давления газа, скорости движения газа и расхода газа по длине сопла.







3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие №1(2 часа).

Тема: «Абсолютный покой жидкости»

3.1.1 Задание для работы:

1. Задача на использование основного уравнения гидростатики
2. Задача на использования закона Паскаля
3. Задача на определения сил давления на плоские и криволинейные поверхности

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, №3 (4 часа).

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

3.2.1 Задание для работы:

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

3.2.2 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 №4 (2 часа).

Тема: «Режимы течения.»

3.3.1 Задание для работы:

1. Задача с учетом режима течения жидкости.

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.

3.4 Практическое занятие №5 (2 часа).
Тема: «Истечение жидкости из отверстий и насадков.»

3.4.1 Задание для работы:
1. Задача с истечение жидкости через отверстие.
2. Задача с истечение жидкости через насадок.
3. Задача с истечение жидкости по уровень.

3.4.2 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.

3.4.3 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.

3.5 Практическое занятие №6, №7 (4 часа).
Тема: «Гидравлический расчет трубопроводов.»

3.5.1 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.

3.5.2 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.

3.5.3 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.

3.6 Практическое занятие №8 (2 часа).
Тема: «Течение газа.»

3.6.1 Задание для работы:
1. Задача с использованием сопла Лаваля.
2. Задача с движением подогреваемого газа по каналу постоянного сечения.

3.6.2 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.

3.6.3 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.