

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 14.11.2022 15:29:14  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668ab713a5d42bd37e3f1c1eabb7be945d74a4851da3bd689

**МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»

Кафедра теплогазоснабжения



## **ГИДРОГАЗОДИНАМИКА**

Методические рекомендации  
для практических занятий и самостоятельной работы студентов на-  
правлений подготовки 13.03.01 и 20.03.01 очной и заочной форм  
обучения.

КУРСК 2017

УДК 621.226

Составители: Е.М. Кувардина, Н.Е. Семичева

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплогазово-  
снабжение» Полищук В.Г.

Гидрогазодинамика: методические рекомендации для практиче-  
ских занятий и самостоятельной работы студентов направлений под-  
готовки 13.03.01 и 20.03.01 очной и заочной форм обучения /Юго-  
Зап. гос. ун-т; сост.: Е. М. Кувардина, Н. Е. Семичева. - Курск, 2017.-  
56 с.- Библиогр.: с. 55

Излагаются методические рекомендации, контрольные задания,  
варианты и примеры решений задач.

Предназначены для студентов направлений подготовки  
13.03.01 и 20.03.01 очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16  
Усл.печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 2,9 .Тираж 30 экз. Заказ. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет  
305040. г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	4
1.1 Физические свойства жидкостей	4
1.2 Гидростатика	6
1.3 Кинематика и динамика жидкости	10
1.4 Режимы движения жидкости и основы гидродинамического подобия	13
1.5 Местные гидравлические сопротивления	16
1.6 Истечение жидкости через отверстия и насадки	16
1.7 Гидравлический расчет трубопроводов	18
1.8 Неустановившееся движение жидкости	19
1.9 Взаимодействие потока со стенками	20
2 Таблица вариантов для самостоятельной работы	21
2.1 Самостоятельная работа	22
3 Задачи для практических занятий	32
4 Примеры решения задач	41
Приложение	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55

## **1.ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Теоретический курс необходимо прорабатывать последовательно по отдельным темам в соответствии с прилагаемой программой, внимательно изучать выводы основных формул. Важно помнить допущения, сделанные в ходе вывода формул, так как они ограничивают применимость полученных закономерностей. В конце каждой темы приведены контрольные вопросы для самопроверки.

Работа над учебником обязательно должна сопровождаться решением задач по изучаемому разделу курса. В ходе решения задач лучше усваивается и закрепляется теоретический курс, выясняется суть гидравлических явлений.

Контрольные работы выполняются самостоятельно и считаются зачтенными, если все задачи решены правильно.

### **1.1 Физические свойства жидкостей**

Определение жидкости. Плотность, сжимаемость, температурное расширение, поверхностное натяжение. Вязкость жидкости и законы внутреннего трения. Неньютоновские жидкости. Модель идеальной жидкости.

Объектом изучения в гидравлике является жидкость - физическое тело, молекулы которого слабо связаны между собой. Поэтому при воздействии даже незначительной силы жидкость изменяет свою форму. Жидкость занимает промежуточное место между твердым телом и газом. Она способна сохранять свой объем и этим сходна с твердым телом, но не способна самостоятельно сохранять свою форму, что сближает её с газом. Все жидкости при изменении давления и температуры изменяют свой объем. Жидкости сжимаются незначительно: например, при повышении давления от 0,1 до 10 МПа объем воды уменьшается лишь на 0,5%. Поэтому чаще всего в гидравлических расчетах жидкости считаются несжимаемыми. Однако при рассмотрении отдельных вопросов, например гидравлического удара, сжимаемость жидкости следует учитывать. С увеличением температуры жидкости расширяются; например, при повышении температуры воды с 4 до 100 °С её объем увеличивается приблизительно на 4%.

Свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу или скольжению соприкасающихся слоев называется вязкостью. Вязкость приводит к появлению сил внутреннего трения между смежными слоями жидкости, текущими с различными скоростями. Она характеризует степень текучести жидкости, подвижности её частиц. Вода принадлежит к наименее вязким жидкостям. Вязкость эфира и спирта еще меньше. Наименьшей вязкостью обладает жидкая углекислота. Её вязкость в 50 раз меньше вязкости воды. С повышением давления вязкость жидкости увеличивается. Однако зависимость вязкости от давления существенна только при больших перепадах давления, измеряемых десятками мегапаскалей. Во всех других случаях влияние давления на вязкость можно не учитывать. При увеличении температуры вязкость жидкости заметно уменьшается. Отметим также, что вязкость газов увеличивается с ростом температуры. Пока жидкость не движется, вязкость не проявляется, поэтому при решении задач равновесия жидкостей её не надо принимать во внимание. При движении же жидкости необходимо учитывать силы трения, которые появляются из-за вязкости и подчиняются известному закону Ньютона. Однако существуют и такие жидкости, в которых силы трения возникают уже в состоянии покоя при их стремлении прийти в движение. Такие жидкости называются *неньютоновскими* или аномальными. К ним можно отнести нефтепродукты при температуре, близкой к температуре застывания, масляные краски и смазочные масла при низких температурах, коллоидные растворы, литой бетон, глинистый раствор, употребляемый при бурении скважин, и др.

Для упрощения рассмотрения законов механики жидкостей Л.Эйлер ввел понятие идеальной жидкости, т.е. такой воображаемой жидкости, которая является абсолютно подвижной (невязкой). При движении идеальной жидкости в ней не возникают силы внутреннего трения.

Молекулы, располагающиеся на поверхности жидкости, подвергаются притяжению находящихся ниже молекул. Это вызывает появление поверхностного натяжения жидкости, действием которого объясняется капиллярное поднятие или опускание жидкости в трубках малого диаметра или в узких щелях. Если жидкость смачивает твердые стенки, с которыми она соприкасается, то происходит ка-

пиллярное поднятие (например, вода в стеклянной трубке), если не смачивает – опускание жидкости (например, ртуть в стеклянной трубке). Это свойство жидкостей следует учесть при использовании трубок малого диаметра для измерения уровня или давления жидкости.

### **Вопросы для самопроверки**

1. В чем различие между плотностью и объемным весом?
2. Как изменяется плотность жидкости при увеличении давления и температуры?
3. Какова связь между коэффициентом объемного сжатия и объемным модулем упругости?
4. Что представляет собой коэффициент температурного расширения?
5. Как зависит вязкость жидкости от температуры и давления?
6. Как связаны между собой динамический и кинематический коэффициенты вязкости?
7. Чем отличается идеальная жидкость от реальной? В каких случаях при практических расчетах жидкость можно считать идеальной?
8. Как подсчитать величину капиллярного поднятия или опускания жидкости в стеклянной трубке малого диаметра?
9. Что называется давлением насыщенного пара жидкости? От чего оно зависит?
10. От чего зависит растворимость воздуха и других газов в жидкости?
11. В каких единицах выражают плотность, объёмный вес, коэффициенты температурного расширения и объемного сжатия, объемный модуль упругости, динамический и кинематический коэффициенты вязкости?

## **1.2 Гидростатика**

Гидростатика изучает законы равновесия жидкости. Она рассматривает вопросы распределения давления в покоящейся жидкости, определения величины, направления и точки приложения силы давления жидкости на плоские и криволинейные поверхности.

Как известно, единицей измерения давления является Ньютон на квадратный метр – паскаль. Для практических вычислений и из-

мерений эта единица неудобна, поэтому чаще применяют кратные единицы – килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа):  $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$ .

Величина атмосферного давления в какой-либо точке зависит от высоты этой точки над уровнем моря и незначительно колеблется в одной и той же точке. Нормальное атмосферное давление на уровне моря при температуре  $0^\circ\text{C}$  принимают равным  $p_{\text{ат}} = 101,3 \text{ кПа}$ .

Часто жидкость сверху соприкасается с газом. Поверхность раздела между жидкостью и газообразной средой называется свободной поверхностью жидкости.

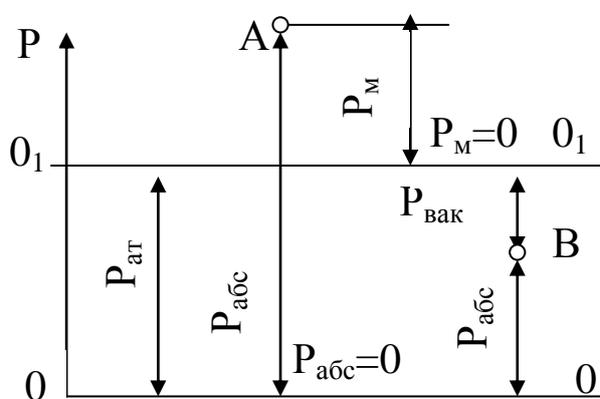


Рис. 1

Различают абсолютное давление  $p_{\text{абс}}$ , манометрическое (избыточное) –  $p_{\text{м}}$  и вакуум –  $p_{\text{вак}}$ , между которыми существуют (рис.1) следующие зависимости:

$$p_{\text{м}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{ат}}; \quad p_{\text{вак}} = p_{\text{ат}} - p_{\text{абс}} \quad (1)$$

где  $p_{\text{ат}}$  – атмосферное давление – давление между условными нулями. На рис. 1 можно проследить пределы изменения разных давлений. Величина вакуума, например, не может быть больше

атмосферного давления.

Жидкость давит на поверхность, с которой она соприкасается. При определении силы гидростатического давления, как правило, оперируют манометрическим давлением или вакуумом, так как атмосферное давление действует на расчетную конструкцию со всех сторон, и поэтому его можно не принимать во внимание. При определении силы давления часто используется так называемая пьезометрическая плоскость или плоскость атмосферного давления – горизонтальная плоскость, проходящая через уровень жидкости в пьезометре, присоединенном к сосуду. Поверхность жидкости на уровне пьезометрической плоскости подвергается лишь воздействию атмосферного давления, т.е.  $p_{\text{м}} = 0$ . Если сосуд с жидкостью открыт в атмосферу, то пьезометрическая плоскость совпадает со свободной поверхностью жидкости. В случае же герметично закрытого сосуда она может располагаться выше или ниже свободной поверхности. В общем

случае расстояние по вертикали до пьезометрической плоскости определяется по формуле

$$h=p/(\rho g), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $p$  – манометрическое давление или величина вакуума в любой точке жидкости. Расстояние  $h$  откладывается от той точки жидкости, давление в которой равно  $p$ , вверх, если оно манометрическое, и вниз - в случае вакуума.

Силу давления на плоскую поверхность можно определить аналитическим и графоаналитическим методами. При аналитическом методе силу давления выражают формулой

$$F=p_c S, \quad (3)$$

где  $p_c$  – гидростатическое давление в центре тяжести плоской фигуры;  $S$  – площадь фигуры.

При графоаналитическом методе строят э п ю р ы д а в л е н и я, выражающие закон распределения давления на контур тела, погруженного в жидкость. Сила давления равняется объему пространственной эпюры, а её вектор проходит через центр тяжести этой эпюры.

Равнодействующая сила давления жидкости на криволинейную поверхность обычно выражается тремя взаимно перпендикулярными составляющими:  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ . Горизонтальные составляющие  $F_x$  и  $F_y$  вычисляют как силы давления на плоскую поверхность, равную проекции данной криволинейной поверхности на соответствующую вертикальную плоскость. Для определения вертикальной составляющей  $F$  строят т е л а д а в л е н и я. При этом криволинейная поверхность проектируется вертикально на пьезометрическую плоскость. Телом давления называется тело, с одного конца ограниченное криволинейной поверхностью, с другого – пьезометрической плоскостью, а со сторон – вертикальной проектирующей поверхностью. Сила  $F_z$  равна весу жидкости, занимающей объем  $V$  тела давления:

$$F_z=\rho g V. \quad (4)$$

При определении сил давления жидкости на сложные поверхности часто бывает целесообразно сначала графически суммировать эпюры, а также тела давления, построенные для отдельных частей данной поверхности.

Покой жидкости относительно стенок сосуда, движущегося вместе с жидкостью, называется относительным её покоем или равновесием. При этом отдельные частицы жидкости не смещаются одна относительно другой и вся масса жидкости движется как одно твердое тело. В данном случае к силе тяжести добавляется ещё другая – сила инерции, и поверхность жидкости чаще всего перестает быть горизонтальной. В относительном покое может рассматриваться, например, жидкость в перемещающейся цистерне, горючее в баке движущейся машины, жидкость во вращающемся сосуде и т.п.

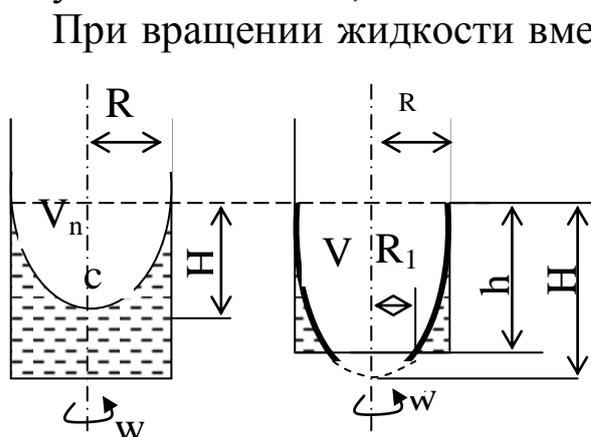


Рис.2

Рис.3

При вращении жидкости вместе с цилиндрическим сосудом относительно его вертикальной оси симметрии с постоянной угловой скоростью  $\omega$  её поверхность под воздействием центробежных сил принимает форму параболоида вращения (рис.2), высота  $H$  которого определяется по формуле

$$H = \omega^2 R^2 / (2g), \quad (5)$$

а объем параболоида

$$V_{\text{п}} = \pi R^2 H / 2. \quad (6)$$

Когда при вращении жидкости её свободная поверхность пересекает дно сосуда (рис.3), показанный объем жидкости можно вычислить двояко:

$$V = \pi(R^2 - R_1^2)h/2 \quad \text{или} \quad V = \pi gh^2 / \omega^2. \quad (7)$$

### Вопросы для самопроверки

1. Что называют гидростатическим давлением? В каких единицах его выражают? Каковы его основные свойства?
2. Каково основное уравнение гидростатики?
3. Что называют абсолютным давлением, манометрическим давлением, вакуумом?
4. Какой наибольший вакуум возможен и чем он ограничивается?
5. В чем разница между напором и давлением?
6. Почему при определении силы давления жидкости на поверхность чаще всего оперируют не абсолютным, а манометрическим давлением или вакуумом?

7. Какие устройства конструируются на основе закона Паскаля?
8. Как определить силу давления жидкости на плоскую поверхность?
9. Что такое центр давления? Когда центр давления плоской фигуры совпадает с её центром тяжести?
10. Чем отличаются эпюры давления в случае манометрического давления и в случае вакуума?
11. Какие правила следует соблюдать при вычерчивании тел давления?
12. Как определяется положение пьезометрической плоскости при наличии манометрического давления или вакуума?
13. Сформулируйте закон Архимеда.
14. Какие силы действуют на жидкость в случаях абсолютного и относительного покоя?
15. Какую форму принимают поверхности равного давления в следующих случаях:
  - а) когда на жидкость из массовых сил действует лишь сила тяжести (случай абсолютного покоя), б) при вращении жидкости вместе с сосудом вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью;
  - в) при прямолинейном движении сосуда с жидкостью; равномерно с положительным ускорением, с отрицательным ускорением?

### 1.3 Кинематика и динамика жидкости

Основным уравнением гидродинамики является уравнение Бернулли. Его составляют для двух живых сечений потока, и для установившегося движения реальной жидкости оно имеет следующий вид:

$$z_1 + p_1/(\rho g) + \alpha_1 v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + \alpha_2 v_2^2/(2g) + \Sigma h, \quad (8)$$

где  $z$  – геометрический напор или высота положения – расстояние от произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения до центра тяжести сечения ( в энергетическом смысле – это удельная, т.е. отнесенная к единице веса жидкости, потенциальная энергия положения);  $p$  – давление в центре тяжести сечения;  $p/(\rho g)$  – пьезометрический напор – вертикальное расстояние между центром тяжести сечения и уровнем жидкости в пьезометре (удельная потенциальная энергия давления);  $v$  – средняя скорость потока в сечении;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса ( отношение действительной кинетической энер-

гии потока к условной кинетической энергии, вычисленной по средней скорости);  $\alpha v^2/(2g)$  – скоростной напор (удельная кинетическая энергия);  $\Sigma h$  – гидравлические потери напора (та часть удельной механической энергии, которую жидкость теряет на преодоление сопротивлений на участке потока между сечениями 1 и 2. Вследствие работы сил трения она превращается в тепловую энергию и рассеивается в пространстве). Гидравлические потери состоят из потерь на трение  $h_{тр}$  и местных потерь  $h_m$ , т.е.  $\Sigma h = h_{тр} + h_m$ . Уравнение Бернулли является частным случаем закона сохранения энергии. Оно может быть выражено и в другом виде, где все члены представляют собой энергию, отнесенную к единице объема

$$\rho g z_1 + p_1 + \rho \alpha_1 v_1^2 / 2 = \rho g z_2 + p_2 + \rho \alpha_2 v_2^2 / 2 + \Delta p, \quad (9)$$

где  $\Delta p = \rho g \Sigma h$  – потери давления.

Как видно, уравнение Бернулли выражает связь между тремя разными параметрами потока: высотой положения  $z$ , давлением  $p$  и средней скоростью  $v$ .

При решении практических задач вместе с уравнением Бернулли применяется и уравнение постоянства расхода, т.е. равенства расхода  $Q$  во всех сечениях установившегося потока

$$Q = v_1 S_1 = v_2 S_2 = \dots = v_n S_n = \text{const}. \quad (10)$$

Из него следует, что средние скорости  $v$  обратно пропорциональны площадям  $S$  живых сечений.

При использовании уравнения Бернулли целесообразно руководствоваться следующим:

1) оно применяется только для установившегося движения вязкой несжимаемой жидкости в том случае, когда из массовых сил на неё действует лишь сила тяжести;

2) два живых сечения, к которым применяется уравнение Бернулли, должны быть нормальными к векторам скоростей и располагаться на прямолинейных участках потока. Движение жидкости в окрестности выбранных сечений должно быть параллельно струйным или плавно изменяющимся, хотя между ними поток может быть и резко изменяющимся. На участке потока между сечениями не должно быть источника или потребителя энергии жидкости (насоса или гидродвигателя);

3) если поток неустановившийся или на участке между расчетными сечениями имеется источник или потребитель энергии, к при-

веденным уравнениям (8,9) необходимо дописать дополнительные члены;

4) обычно расчетные сечения удобно подбирать там, где известно давление. Но в уравнение должна попасть и неизвестная величина, которую нужно определить. Нумерация выбранных сечений 1 и 2 производится по направлению потока. В противном же случае меняется знак гидравлических потерь  $\Sigma h$  или  $\Delta p$ ;

5) плоскость сравнения должна быть горизонтальной. По высоте её можно подобрать произвольно, но очень часто удобно использовать плоскость, проходящую через центр тяжести нижнего расчетного сечения;

6) геометрический напор  $z$  выше плоскости сравнения считается положительным, а ниже – отрицательным;

7) когда площадь расчетного сечения сравнительно большая, скоростной напор  $\alpha v^2/(2g)$  и член  $\rho \alpha v^2/2$  являются ничтожными величинами по сравнению с другими членами и приравниваются нулю.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Чем установившееся движение жидкости отличается от неустановившегося, равномерное от неравномерного, напорное от безнапорного?
2. Чем отличается траектория частицы жидкости от линии тока? Когда они совпадают?
3. Что представляет собой расчетная модель потока?
4. Можно ли измерить скорость струйки? Среднюю скорость потока?
5. Каков геометрический смысл членов уравнения Бернулли? Каков их энергетический смысл?
6. От чего зависит численное значение коэффициента Кориолиса?
7. Чем отличаются уравнения Бернулли для идеальной и реальной жидкости, для элементарной струйки и потока?
8. Какие ограничения существуют в применении уравнения Бернулли (8,9)?
9. Когда пьезометрическая и напорная линии параллельны между собой?
10. При помощи каких линий можно судить о значении и изменении давления вдоль потока?

11. Почему гидравлический уклон потока реальной жидкости всегда положительный?

#### **1.4 Режимы движения жидкости и основы гидродинамического подобия**

Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Число Рейнольдса. Основы теории гидродинамического подобия. Моделирование гидродинамических явлений.

##### **Вопросы для самопроверки**

1. Чем отличается структура потока при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости?
2. Как определить число Рейнольдса для круглой трубы?
3. Что называют критической скоростью?
4. Влияет ли температура жидкости на значение критической скорости?
5. Как зависят потери на трение от скорости потока при разных режимах движения жидкости?
6. Для чего нужно знать режим движения жидкости?
7. Каковы принципы геометрического, кинематического и динамического подобия потоков?
8. Какие силы преобладают в потоке, если моделирование производится по равенству чисел Рейнольдса, по равенству чисел Фруда?

##### **Ламинарное движение жидкости**

Потери напора на трение по длине трубы при любом режиме движения жидкости определяют по формуле Дарси:

$$h_{\text{тр}} = \lambda L v^2 / (d 2g) \quad \text{или} \quad \Delta p_{\text{тр}} = \lambda \rho L v^2 / (2d). \quad (11)$$

При ламинарном течении жидкости  $\lambda = 64/Re$  и первая формула (11) превращается в формулу Пуазейля:

$$h_{\text{тр}} = 64 V^2 L / (Re d^2 g) \quad \text{или} \quad h_{\text{тр}} = 128 V L Q / (\pi g d^4) \quad (12)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $L$  – длина расчетного участка трубы;  $d$  – диаметр трубы;  $Re = vd/\nu$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости. Из формулы

(12) следует, что при ламинарном течении жидкости гидравлические потери на трение прямо пропорциональны средней скорости потока. Кроме того, они зависят от физических свойств жидкости и от геометрических параметров трубы, а шероховатость стенок трубы не имеет никакого влияния на потери на трение.

На расход жидкости, протекающей через узкие зазоры, очень влияют его толщина и эксцентricность кольцевого зазора.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Какой кривой описывается распределение скоростей в сечении трубы при ламинарном течении жидкости? Каково соотношение между средней и максимальной скоростями?
2. От каких параметров зависят гидравлические потери в ламинарном потоке?
3. Чему равно значение коэффициента Кориолиса при ламинарном движении жидкости в трубе?
4. Как определить длину начального участка ламинарного течения и потери в нем?
5. Как определить потери на трение в случае неизотермического течения жидкости в трубе?
6. Какое явление называется облитерацией?

### **Турбулентное движение жидкости**

Потери напора на трение по длине трубы при турбулентном движении определяют также по формуле Дарси (11), но в этом случае коэффициент трения  $\lambda$  определяют по другим зависимостям, чем в ламинарном потоке. Таким образом, формула Дарси является универсальной – её можно применять для любых жидкостей при любом режиме движения.

Имеется ряд формул для определения коэффициента  $\lambda$  в зависимости от режима течения жидкости и числа Рейнольдса, например:

- 1) ламинарное движение (I зона,  $Re \leq 2320$ );  $\lambda = 64/Re$ ;
- 2) неопределенное движение (II зона,  $2320 < Re < 4000$ ). Трубопроводы с движением, соответствующим этой зоне, проектировать не рекомендуется;
- 3) турбулентное движение ( $Re \geq 4000$ );

а) зона гладких труб (Ш зона,  $4000 \leq Re \leq 20d/\Delta_3$ ). Формула Блазиуса

$$\lambda = 0,3164 / (Re)^{0,25} \quad (13)$$

б) переходная зона (1У зона,  $20d/\Delta_3 < Re \leq 500d/\Delta_3$ ), формула Альтшуля

$$\lambda = 0,11 (\Delta_3/d + 68/Re)^{0,25} \quad (14)$$

в) зона шероховатых труб (V зона,  $Re > 500d/\Delta_3$ ), формула Шифринсона

$$\lambda = 0,11 / (\Delta_3/d)^{0,25} \quad (15)$$

Зону V ещё называют зоной квадратичного сопротивления, так как здесь гидравлические потери на трение пропорциональны квадрату скорости. Для турбулентного движения самой общей является формула 1У зоны. Из неё как частные случаи легко получаются формулы для Ш и У зон. С увеличением номера зоны растёт число Рейнольдса, увеличивается турбулентность, толщина ламинарного пристенного слоя уменьшается и, следовательно, увеличивается влияние шероховатости и уменьшается влияние вязкости, т.е. числа Re на коэффициент гидравлического трения. В первых трех зонах коэффициент  $\lambda$  зависит лишь от числа Re, в 1У зоне – от числа Re и относительной шероховатости  $\Delta_3/d$ , в У зоне – лишь от шероховатости  $\Delta_3/d$ .

### Вопросы для самопроверки

1. Как распределяют скорости в сечении трубы при турбулентном течении жидкости? Каково соотношение между средней и максимальной скоростями?
2. Чему равно значение коэффициента Кориолиса при турбулентном движении жидкости в круглой трубе?
3. Почему гидравлические потери в турбулентном потоке больше, чем в ламинарном?
4. Почему одна и та же труба в одном случае может быть гидравлически гладкой, а в другом случае – гидравлически шероховатой?
5. Сколько имеется зон сопротивления и которые из них соответствуют турбулентному движению жидкости?
6. От чего зависит коэффициент гидравлического трения в различных зонах и как можно его определить?
7. Объясните понятие эквивалентной шероховатости

## 1.5 Местные гидравлические сопротивления

**Местные** гидравлические потери определяют по формуле Вейсбаха

$$h_m = \zeta v^2 / (2g) \quad \text{или} \quad \Delta p_m = \zeta \rho v^2 / 2, \quad (16)$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  $v$  – средняя скорость в сечении, как правило, за местным сопротивлением. Коэффициент  $\zeta$  при больших числах Рейнольдса зависит только от местного сопротивления. Однако при ламинарном течении он зависит не только от вида сопротивления, но и от числа Рейнольдса. Приведенные в приложении 5 значения коэффициента  $\zeta$  некоторых местных сопротивлений относятся к турбулентному течению с большими числами Рейнольдса. Для ламинарного движения коэффициент  $\zeta$  должен быть пересчитан с учетом влияния числа Рейнольдса.

Простое суммирование потерь в местных сопротивлениях возможно, если они расположены друг от друга на расстоянии, равном не менее 20-30 диаметров трубы. В противном же случае сопротивления влияют друг на друга и работают как одна система, для которой необходимо определить свое значение коэффициента местного сопротивления экспериментальным путем.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие сопротивления называют местными?
2. По какой формуле определяют местные потери?
3. От чего зависит значение коэффициента  $\zeta$  и как оно определяется?
4. В каком сечении берется скорость при определении местных потерь по формуле Вейсбаха?
5. Когда местные потери отдельных сопротивлений можно просто суммировать?

## 1.6 Истечение жидкости через отверстия и насадки

Расход жидкости при её истечении через отверстие или насадок определяется по формуле

$$Q = v \cdot S = \mu S \sqrt{2gH_o} \quad \text{или} \quad Q = \mu \cdot S \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (17)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода,  $S$  – площадь отверстия или сечения насадка;  $H_o$  – действующий напор, равный:

$$H_o = H + [(p_o - p) / (\rho g)] + \alpha_o v_o^2 / (2g), \quad (18)$$

где  $H$  – расстояние от центра тяжести площади отверстия или сечения насадка до поверхности жидкости в резервуаре;  $p_0$  – давление на поверхности жидкости в сосуде;  $p$  – давление в среде, в которую происходит истечение жидкости;  $v_0$  – скорость подхода жидкости в резервуаре;  $\alpha_0 v_0^2 / (2g)$  – величина малая, и ею можно пренебречь;  $\Delta p$  – потери давления при истечении через местное сопротивление (например, через дроссель, распределитель и другую гидравлическую аппаратуру).

Коэффициент расхода  $\mu$  малого отверстия зависит от числа Рейнольдса. С увеличением  $Re$  коэффициент  $\mu$  сначала увеличивается, достигает максимального значения  $\mu_{\max} = 0,69$  при  $Re = 350$ , а затем начинает уменьшаться и стабилизируется на значении, равном  $0,60$ . Таким образом, отверстия (а также насадки) при больших числах  $Re$  удобно применять в качестве приборов для измерения расхода жидкости.

При истечении жидкости через затопленное отверстие или насадок для определения расхода применяется приведенная формула (17), но и в этом случае напор  $H_0$  берётся как разность гидростатических напоров по обе стороны стенки. Следовательно, расход в данном случае не зависит от высоты расположения отверстия или насадка.

В случае истечения жидкости через насадок образуется вакуум, который увеличивает его пропускную способность и является прямо пропорциональным напору  $H_0$ . Коэффициент расхода насадка зависит от его типа и числа Рейнольдса. По своему значению он превышает коэффициент расхода малого отверстия. Например, для внешнего цилиндрического насадка  $\mu \approx 0,80$ , для коноидального насадка  $\mu = 0,96-0,99$ .

### Вопросы для самопроверки

1. Какие отверстия считаются малыми?
  2. Какие могут быть случаи сжатия струи?
  3. Как связаны между собой коэффициенты сжатия  $\varepsilon$ , скорости  $\varphi$ , расхода  $\mu$  и местного сопротивления  $\zeta$  малого отверстия?
  4. Почему коэффициенты  $\varepsilon$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  отверстия всегда меньше единицы?
  5. Чем отличается насадок от трубы?
1. Может ли проявиться кавитация при истечении жидкости через насадки?

2. Каковы основные типы насадков и каково их практическое применение?
3. Сравните пропускную способность насадков разных типов и круглого отверстия.

### 1.7 Гидравлический расчет трубопроводов

При расчете напорных трубопроводов применяют уравнения Бернулли (8,9), постоянства расхода (10) и формулы (11,13) для определения гидравлических потерь. По соотношению местных потерь и потерь на трение трубопроводы подразделяют на короткие и длинные. К коротким относят всасывающие трубопроводы насосов, сифонные трубы, некоторые гидролинии гидроприводов и другие трубопроводы. При их расчете оценивают и определяют потери на трение и местные потери.

Расчет длинных трубопроводов ведется по упрощенному уравнению Бернулли. В данном случае скоростные напоры по сравнению с другими членами уравнения являются малыми величинами и ими обычно пренебрегают. Следовательно, напорная линия совпадает с пьезометрической. Местные потери либо совсем не оценивают, либо без точного расчета принимают равными некоторой доле потерь по длине – обычно 10-15%.

Расчет простых трубопроводов сводится к трем типовым задачам по определению напора, расхода, диаметра трубопровода. Задачи решают аналитическим и графоаналитическим способами. Задачи второго и третьего типов аналитическим способом решить непосредственно нельзя и приходится прибегать к методу подбора. Поэтому для этих случаев удобнее применять графоаналитический способ. При этом для задачи второго типа строится гидравлическая характеристика трубопровода, которая выражает связь между расходом и гидравлическими потерями, т.е.  $\Sigma h = f(Q)$ .

Чтобы построить такую характеристику, необходимо знать лишь геометрические параметры трубы – диаметр, длину и шероховатость. Произвольно подбирают несколько значений расхода и определяют соответствующие им гидравлические потери. По данным расчета и строится кривая характеристики трубы. При ламинарном

течении жидкости характеристика трубы имеет вид прямой линии, что облегчает её постройку.

При расчете сложных трубопроводов удобно пользоваться графоаналитическим способом, графически суммируя гидравлические характеристики отдельных труб.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие уравнения применяют при расчете напорных трубопроводов?
2. В чем различие в расчете коротких и длинных трубопроводов?
3. Какие задачи удобно решать графоаналитическим способом?
4. Как построить гидравлическую характеристику трубопровода?
5. Как строят гидравлические характеристики систем из последовательно и параллельно соединенных трубопроводов?

## **1.8 Неустановившееся движение жидкости**

Расчет жесткого трубопровода при неустановившемся движении несжимаемой жидкости ведется по уравнению Бернулли (8,9) с дополнительным инерционным членом, который учитывает потери напора на преодоление силы локальной инерции. Например, так ведется расчет линий всасывания поршневого насоса с весьма неравномерной подачей жидкости, труб при опорожнении резервуара в случае внезапного открытия крана.

При внезапном изменении скорости потока в напорном трубопроводе резко изменяется давление – возникает гидравлический удар. Он считается вредным явлением, так как может вызвать аварии в гидросистемах. В этом отношении прямой удар более опасен, чем не прямой. При прямом ударе повышение давления прямо пропорционально изменению скорости потока, плотности жидкости и скорости распространения ударной волны в ней.

### **Вопросы для самопроверки**

1. В чем различие между установившимся и неустановившимся движением жидкости?
2. Какое явление в напорных трубах называют гидравлическим ударом?

3. Что называют фазой гидравлического удара?
4. Чем отличается прямой удар от непрямого?
5. Какие силы вызывают резкое повышение давления в трубе при внезапной остановке движущейся жидкости?
6. Как определяют изменение давления при гидравлическом ударе?
7. От чего зависит скорость распространения ударной волны в жидкости?
8. Каковы меры борьбы с гидравлическим ударом?
9. Где применяют гидравлический удар?

### **1.9 Взаимодействие потока со стенками**

Воздействие струи на твердые преграды. Силы воздействия потока на стенки.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Чему равна активная сила струи жидкости на плоскую стенку?
2. На какой поверхности наибольшая активная сила струи?
3. Чему равна реактивная сила взаимодействия между струей и твердым телом?
4. Какое практическое применение активной и реактивной сил взаимодействия между струей и твердой преградой?

## 2 Таблица вариантов для самостоятельной работы

Последние две цифры шифра				Номера задач контрольных работ									
				Первой					Второй				
01	26	51	76	1а	5б	10е	15а	20е	1а	6б	11е	16е	25б
02	27	52	77	2а	6в	11д	16б	21е	2б	7в	12д	17д	24а
03	28	53	78	3а	7б	12г	15б	22д	3в	8г	13г	18в	23б
04	29	54	79	4а	8а	13в	17в	23а	4г	9д	14в	16а	22в
05	30	55	80	3б	9д	14а	18г	24б	5д	10е	15б	17б	21г
06	31	56	81	1б	5а	11е	19а	21д	5а	6а	14а	18в	21а
07	32	57	82	3к	7а	12б	16а	20а	4б	7б	13б	19а	22б
08	33	58	83	1г	6г	10д	17г	24в	3г	8а	15в	20г	23в
09	34	59	84	3в	9б	14д	18б	23б	2д	9б	11д	16в	24г
10	35	60	85	2е	8г	13д	19д	22а	1е	8в	12г	17г	25д
11	36	61	86	4г	9а	14г	15д	20г	3б	6в	15а	18б	22г
12	37	62	87	4б	7в	12а	16г	24а	4е	7а	14д	19в	21в
13	38	63	88	1е	5в	10а	17а	23е	1б	10в	13б	16б	23а
14	39	64	89	3г	6б	11г	18в	21в	2г	8б	12а	20а	24в
15	40	65	90	2г	8в	13а	19б	22г	5б	9г	11в	18д	25г
16	41	66	91	3д	5г	14в	15в	24д	1в	6г	13д	19г	23г
17	42	67	92	4е	6а	13г	16д	23в	2а	7д	12б	16г	22е
18	43	68	93	2ж	7д	12в	17б	22б	3д	8е	11г	17в	21д
19	44	69	94	1ж	8д	11а	18а	21а	4а	9а	14е	19б	24б
20	45	70	95	4д	9в	10б	19в	20в	5в	10г	11а	18е	25а
21	46	71	96	3и	7е	10г	15г	21г	3а	8в	12в	16д	25е
22	47	72	97	1к	5д	12д	19д	23д	4д	7г	13е	17е	24д
23	48	73	98	2и	8б	11в	17е	20б	1г	6д	14а	19д	23д
24	49	74	99	4в	6д	13б	16г	24е	2в	9б	15г	20г	22а
25	50	75	00	2б	9е	14б	15е	23г	5е	10д	11б	19б	21б

## 2.1 Самостоятельная работа

**Задача 1.** По трубопроводу диаметром  $D$  мм движется нефть с вязкостью  $\nu$ . Определить: а) режим движения при скорости  $V$ ; б) скорость, при которой произойдет смена режимов. Данные взять из табл. 1.

Таблица 1

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$D$ , мм	50	100	150	175	200	250
$\nu$ , Ст	0,25	0,28	0,14	0,31	0,28	0,44
$V$ , м/с	0,3	0,2	0,25	0,15	0,35	0,2

**Задача 2.** Определить диаметр  $D$ , при котором начнется смена режимов течения жидкости с вязкостью  $\nu$ , если в сечении  $d$  скорость составляет  $V_1$ . Данные взять из табл. 2.

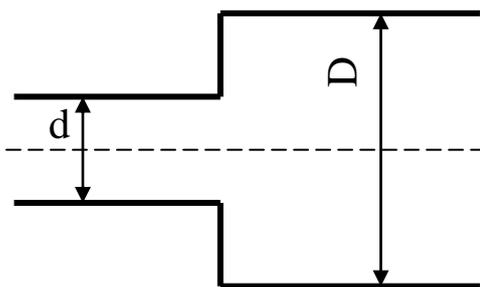


Таблица 2

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$\nu$ , Ст	0,28	0,24	0,20	0,31	0,25	0,44
$d$ , мм	100	50	75	150	175	200
$V$ , м/с	3,0	3,5	4,0	5,0	2,0	1,5

**Задача 3.** По конической сходящейся трубе движется вода с температурой  $t$  и с постоянным расходом  $Q$ . Определить: а) может ли произойти смена режимов движения воды в трубе, если в начальном сечении режим ламинарный; б) в сечении с каким диаметром будет наблюдаться смена режимов движения, если расход  $Q$ . Данные взять из табл. 3.

Таблица 3

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$t, ^\circ\text{C}$	15	10	5	20	18	25
$Q, \text{cm}^3/\text{c}$	207	150	300	320	250	120

**Задача 4.** Определить средние скорости, смоченные периметры и гидравлические радиусы в сечениях постепенно расширяющегося трубопровода, где диаметры  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  при расходе  $Q$ . Данные взять из табл. 4.

Таблица 4

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$D_1, \text{мм}$	50	25	75	50	100	150
$D_2, \text{мм}$	75	50	100	100	175	175
$D_3, \text{мм}$	100	75	150	175	200	200
$Q, \text{л/с}$	3,0	2,0	5,0	3,5	4,25	8,0

**Задача 5.** Определить режим течения жидкости вязкостью  $\nu$  по трубопроводу длиной  $L$ , который при перепаде давления  $\Delta P$  должен обеспечивать расход  $Q$ . Плотность  $\rho=850 \text{ кг/м}^3$ . Указания: воспользоваться законом Пуазейля. Данные взять из табл. 5.

Таблица 5

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$V, \text{Ст}$	0,2	0,34	0,31	0,44	0,4	0,44
$\ell, \text{м}$	5,0	5,0	2,0	1,5	2,5	1,0
$\Delta P, \text{МПа}$	0,5	0,08	1,1	1,08	1,8	2,0
$Q, \text{л/с}$	2,0	1,0	1,5	1,3	3,2	4,0

**Задача 6.** Из напорного бака вода вытекает через трубу переменного диаметра  $d_1$ ,  $d_2$ . Абсолютное давление  $P_0$ , высота  $H$ . Учитывая потери при внезапном расширении, определить скорости  $V_1$  и  $V_2$ , а также расход  $Q$ . Данные взять из табл. 6

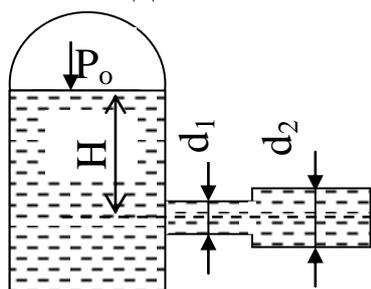


Таблица 6

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$d_1$ , мм	10	15	20	25	30	35
$d_2$ , мм	15	20	30	30	40	45
$P_{0abc}$ , МПа	0,12	0,15	0,16	0,18	0,18	0,2
$H$ , м	2,0	3,5	5,0	4,5	5,2	4,0

**Задача 7.** Определить давление  $P_1$  в сечении 1-1 горизонтально расположенного сопла гидромонитора, необходимое для придания скорости воде в выходном сечении 2-2  $V_2$ , если скорость движения воды в сечении 1-1 равна  $V_1$ . Учесть потери в конфузоре, коэффициент сопротивления конфузора  $\zeta_g = 0,22$ . Данные взять из табл. 7.

Таблица 7

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$V_2$ , м/с	40	30	35	38	45	28
$V_1$ , м/с	3,0	10,0	5,0	3,2	6,0	2,5

**Задача 8.** Определить расход воды в трубе длиной  $L$  и диаметром  $d$ . Давление  $P_1 = P_{abc} = 0,12$  МПа;  $P_2 = P_{изб} = 0,05$  МПа;  $H_1$ ;  $H_2$  заданы. Коэффициент трения  $\lambda = 0,025$ . Потери на местных сопротивлениях составляют 10% от потерь по длине. Данные взять из табл.8.

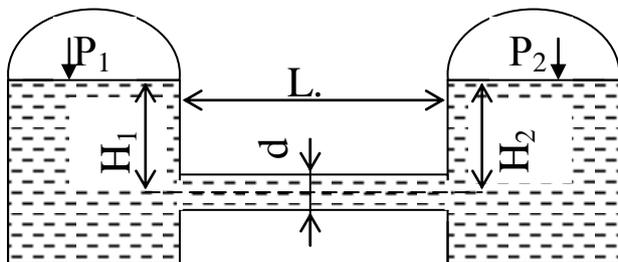
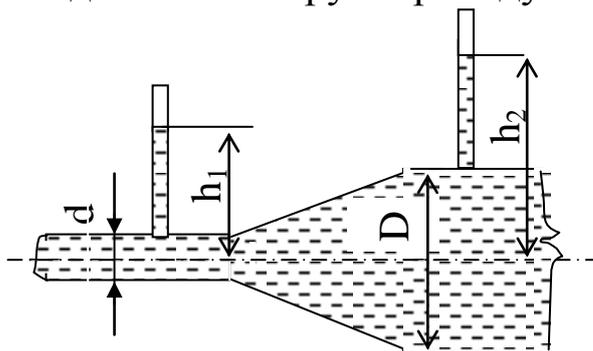


Таблица 8

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$L$ , м	100	150	200	250	300	350
$d_1$ , мм	50	75	50	100	125	75
$H_1$ , м	20	15	22	18	16	21
$H_2$ , м	3	4	4	2	0	5

**Задача 9.** По трубопроводу переменного сечения протекает вода с расходом  $Q$ , диаметр  $d$ .



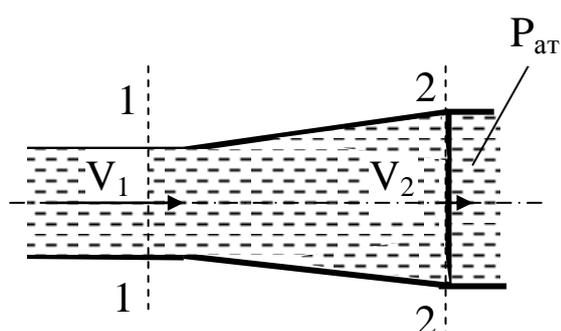
Определить: 1) разность показаний пьезометров при диаметре  $D$ ;

2) диаметр  $D$  при показаниях пьезометров  $h_1$  и  $h_2$ . Потерями пренебречь. Данные взять из табл. 9.

Таблица 9

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$Q$ , л/с	Общие данные					
	6	8	10	9	11	20
$d$ , мм	40	50	75	80	85	90
$D$ , мм	Вопрос 1					
	80	90	125	125	105	120
$h_1$ , м	Вопрос 2					
	2,0	1,5	2,0	2,5	1,2	1,0
$h_2$ , м	2,8	1,9	2,2	2,6	1,3	1,25

**Задача 10.** Определить давление  $P_1$  в сечении 1-1 горизонтального диффузора, необходимое для придания скорости воде в выходном сечении 2-2  $V_2$ , если скорость движения воды в сечении 1-1 равна  $V_1$ . Учтеть потери в диффузоре, коэффициент сопротивления  $\zeta_g = 1,22$ . Данные взять из табл. 10.

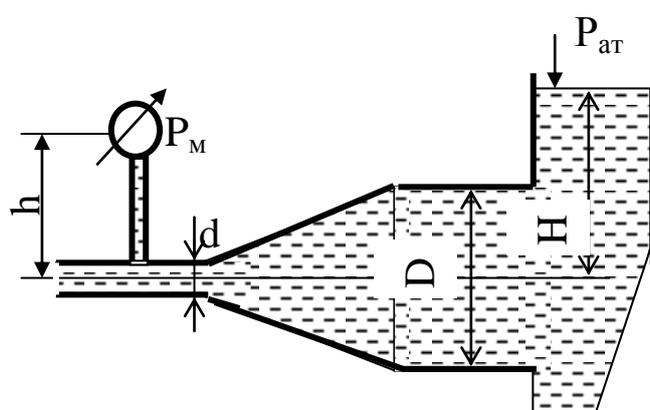


Данные взять из табл. 10.

Таблица 10

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$V_2$ , м/с	1,5	1,8	2,0	2,5	2,8	3,2
$V_1$ , м/с	1,8	2,5	2,2	3,0	3,5	4,0

**Задача 11** Определить расход жидкости, вытекающей из трубы диаметром  $d$  через диффузор и далее по трубе диаметром  $D$  в бак.



Коэффициент сопротивления  $\zeta_{\text{д}}=0,2$  (отнести к скорости в трубе), показание манометра  $P_M$ , высота  $h$ ,  $H$ . Плотность жидкости  $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$ . Учесть потери на внезапное расширение, потерями на трение пренебречь, режим течения считать турбулентным. Данные взять из табл.11.

Таблица 11

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$d_1$ , мм	16	20	25	20	18	23
$D$ , мм	20	25	35	30	22	28
$P_M$ , кПа	20	25	30	25	28	30
$h$ , м	0,5	0,6	1,0	1,2	1,1	0,8
$H$ , м	5,0	5,2	6,0	4,5	4,8	4,8

**Задача 12.** Определить разность показаний пьезометров при соотношении  $d/D$  и скорости в большем сечении  $V$ . Учесть потери при внезапном расширении. Плотность протекающей жидкости  $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\zeta_p=0,56$ . Данные взять из табл.12

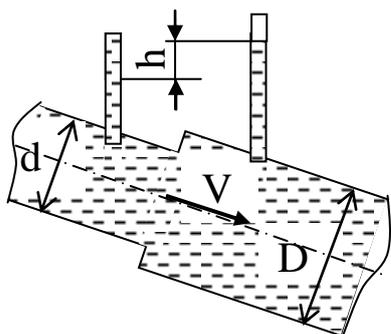
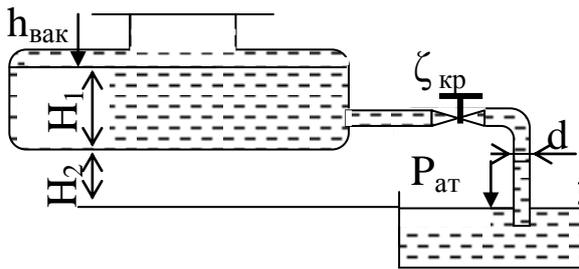


Таблица 12

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$d/D$	1/2	1/1,8	1/2,2	1/2,5	1/3	1/4
$V$ , м/с	2,0	1,8	2,3	2,5	2,0	1,5

**Задача 13.** Бензин сливается из цистерны по трубе диаметром  $d$ , на которой установлен кран с сопротивлением  $\zeta_{\text{кр}}=3,0$ . Определить

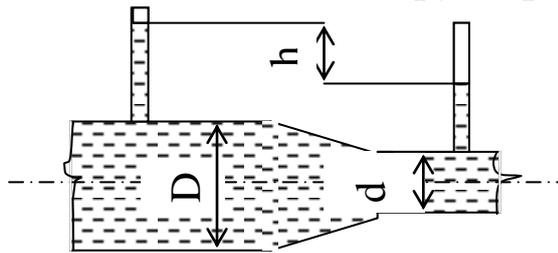


расход бензина при  $H_1$  и  $H_2$ , если в верхней части цистерны имеет место вакуум  $h_{\text{вак}}$  ртутного столба. Плотность бензина  $\rho=750$  кг/м<sup>3</sup>. Потерями по длине трубопровода пренебречь. Данные взять из табл.13.

Таблица 13

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
d, мм	50	40	60	65	70	75
$H_1$ , м	1,5	1,2	1,5	1,8	2,0	2,5
$H_2$ , м	1,3	1,4	1,0	1,5	1,8	2,0
$h_{\text{вак}}$ , мм рт.ст.	74	78	85	80	90	100

**Задача 14.** По трубопроводу переменного сечения протекает вода с расходом  $Q$ , диаметр суженной части  $d$ . Определить диаметр  $D$  основного трубопровода при разности показаний пьезометров  $h$ . Потерями пренебречь. Данные взять из табл.14.

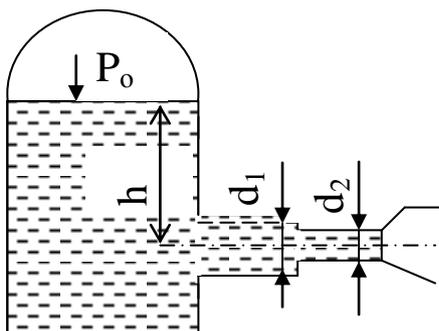


вода с расходом  $Q$ , диаметр суженной части  $d$ . Определить диаметр  $D$  основного трубопровода при разности показаний пьезометров  $h$ . Потерями пренебречь. Данные взять из табл.14.

Таблица 14

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$Q$ , л/с	9,0	8,0	10,0	10,5	7,0	6,0
d, мм	50	45	55	50	30	35
h, мм	0,3	0,28	0,8	0,25	0,5	0,6

**Задача 15.** Из напорного бака вода течёт по трубе диаметром  $d_1$  и затем вытекает в атмосферу через насадок с диаметром  $d_2$ . Абсолютное давление  $P_0$ , высота  $h$ . Определить расход и скорость  $V_1$  и  $V_2$ , пренебрегая потерями. Данные взять из табл. 15



и затем вытекает в атмосферу через насадок с диаметром  $d_2$ . Абсолютное давление  $P_0$ , высота  $h$ . Определить расход и скорость  $V_1$  и  $V_2$ , пренебрегая потерями. Данные взять из табл. 15

Таблица 15

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$d_1$ , мм	40	45	50	30	50	60
$d_2$ , мм	25	25	30	20	28	40
$P_{0\text{ абс}}$ , МПа	0,15	0,12	0,11	0,10	0,14	0,15
$h$ , м	5,0	4,0	8,0	10,0	5,5	6,0

**Задача 16.** Определить мощность для рассчитанной подачи по трубопроводу длиной  $L$ , диаметром  $d$ , если давление в начале трубопровода  $P_1$ , давление в конце трубопровода  $P_2$ . Коэффициент трения принять равным  $\lambda=0,025$ . Плотность перекачиваемой жидкости  $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$ . Данные взять из табл. 16.

Таблица 16

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$L$ , м	500	1000	1500	2000	2500	3000
$d$ , мм	100	150	200	250	300	400
$P_1$ , МПа	1,5	1,8	2,0	2,5	2,8	3,5
$P_2$ , МПа	0,3	$P_{ат}$	0,5	$P_{ат}$	0,2	0,1

**Задача 17.** Определить потери давления в трубопроводе длиной  $L$  и диаметре  $d$  при расходе  $Q$ . Труба гидравлически гладкая. Плотность жидкости  $\rho=850 \text{ кг/м}^3$ , вязкость  $\nu=0,3 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ . Данные взять из табл. 17.

Таблица 17

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
$L$ , м	200	250	150	100	300	500
$d$ , мм	25	32	45	50	100	75
$Q$ , л/с	1,0	1,5	5,0	8,0	15,0	10,0

**Задача 18.** Керосин перекачивается по горизонтальной трубе длиной  $L$  и диаметром  $d$  в количестве  $Q$ . Определить требуемое давление и необходимую мощность, если свойства керосина:  $\nu=0,25 \text{ Ст}$ ,  $\rho=800 \text{ кг/м}^3$ . Труба гидравлически гладкая. Данные взять из табл. 18.

Таблица 18

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
L, м	50	75	100	125	150	200
d, мм	32	50	60	65	75	100
Q, л/с	2,0	6,8	9,3	9,8	12,0	15,0

**Задача 19.** Определить расход  $Q$  в трубопроводе диаметром  $d$  и длиной  $L$ , если потери напора составляют  $\Delta h$ . Движение воды происходит в квадратичной зоне сопротивлений. Абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубопровода  $k$ . Данные взять из табл.19.

Таблица 19

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	Е
d, мм	32	50	75	100	125	150
L, м	80	120	150	500	700	1000
$\Delta h$ , м	5,0	8,0	10,0	12,0	15,0	22,0
k, мм	0,03	0,01	0,05	0,2	0,3	0,35

**Задача 20.** Определить режим течения жидкости вязкостью  $\nu=0,4$  Ст и плотностью  $\rho=850$  кг/м<sup>3</sup> по трубопроводу длиной  $L$ , который при перепаде давления  $\Delta P$  должен обеспечивать расход  $Q$ . Указания: воспользоваться законом Пуазейля. Данные взять из табл. 20.

Таблица 20

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
L, мм	5	3	8	10	12	15
$\Delta P$ , МПа	1,5	2	2,2	0,8	1,8	2,5
Q, л/с	2,0	1,0	1,5	2.2	2,5	3,8

**Задача 21.** Определить давление  $P_1$  в начале трубопровода длиной  $L$  и диаметр  $d$ , если жидкость вязкостью  $\nu=0,42$ Ст и плотностью  $\rho=850$  кг/м<sup>3</sup> вытекает из трубопровода при давлении  $P_2=P_{ат}$  с расходом  $Q$ . Данные взять из табл.21.

Таблица 21

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
L, м	1000	800	1500	500	1250	2000
d, мм	150	100	150	75	50	200
Q, л/с	10,0	8,0	12,0	5,5	8,0	30,0

**Задача 22.** Жидкость плотностью  $\rho=800 \text{ кг/м}^3$  и вязкостью  $\nu=2,2 \text{ Ст}$  подается на расстояние L по горизонтальной трубе диаметром d в количестве Q. Определить давление и мощность, которые требуются для указанной подачи. Местные сопротивления отсутствуют. Данные взять из табл.22.

Таблица 22

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
L, м	32	45	55	60	80	100
d, мм	20	32	45	50	75	50
Q, л/с	1,2	2,0	2,2	3,0	4,5	5,0

**Задача 23.** Определить потери напора при движении воды по стальному трубопроводу длиной L и диаметром d. Расход воды Q, вязкость  $\nu=1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , шероховатость внутренней поверхности трубопровода  $k=0,3 \text{ мм}$ . Данные взять из табл.23.

Таблица 23

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
L, м	150	200	300	400	500	800
d, мм	50	75	100	125	150	100
Q, л/с	5,5	8,0	6,0	12,0	15,0	10,0

**Задача 24.** Определить расход в трубопроводе длиной L и диаметром d, если давление в начале трубопровода  $P_1$ , давление в конце трубопровода  $P_2$ . Перекачиваемая жидкость – вода. Коэффициент гидравлического трения принять  $\lambda=0,0125$ . Данные взять из табл. 24.

Таблица 24

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
L, м	50	75	100	125	150	200
d, м	32	45	50	75	100	125
P <sub>1</sub> , ат	5	6	7	8	9	10
P <sub>2</sub> , ат	0,5	1,0	0,3	0,2	1,2	1,5

**Задача 25.** Жидкость плотностью  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup> и вязкостью  $\nu=0,01$  Ст нагнетается по горизонтальному трубопроводу длиной L и диаметром d. Определить давление в первоначальном сечении, если в конечном сечении трубопровода давление атмосферное, расход жидкости Q, шероховатость стенок трубопровода  $k=0,06$  мм. Данные взять из табл.25.

Таблица 25

Данные	Варианты					
	а	б	в	г	д	е
L, м	5	10	20	30	40	50
d, мм	25	32	40	50	75	100
Q, л/с	6,0	6,5	8,0	9,8	12	15

### 3 Задачи для практических занятий

#### Практическое занятие № 1

Тема: Уравнение Бернулли

Цель – усвоить физический смысл уравнения Бернулли для идеальной и реальной жидкости, научиться использовать его для решения задач.

#### Задача 1.

Дифференциальный ртутный манометр, присоединенный к горизонтальной трубе, по которой протекает вода, показывает разность уровней  $\Delta h$ . Определить объёмный расход, пренебрегая потерями напора, если  $d_1=0,25$  м, а  $d_2=0,10$  м.

Решение

Уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 имеет вид:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \text{ или } h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}.$$

Уравнение расхода

$$v_1 \cdot s_1 = v_2 \cdot s_2. \quad \Delta h = h_1 - h_2 = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g} \left( \frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right) \text{ в м водяного столба.}$$

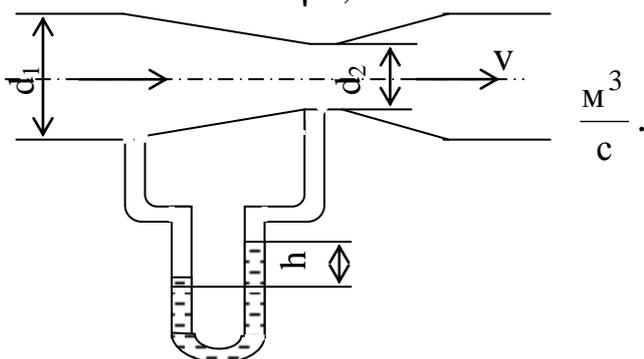
$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta H}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}.$$

Показания дифференциального ртутного манометра, переведенные в метры водяного столба:

$$p_1 - p_2 = h(\gamma_{\text{рт}} - \gamma_{\text{в}}) = 0,8 \cdot 9,8(13600 - 1000) = 98784 \text{ Па.}$$

Это соответствует высоте столба жидкости (воды)  $\Delta H = 10,1$  м.

$$\text{Тогда } V_1 = \sqrt{\frac{19,6 \cdot 10,1}{\frac{0,0039}{0,0001} - 1}} = \sqrt{5,28} = 2,29 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$



$$Q = v_1 \cdot s_1 = 2,29 \cdot 0,785 \cdot 0,0625 = 0,119$$

### Задача 2.

Определить разность давлений, если в трубе движется воздух  
 $p_1 - p_2 = \Delta h(\gamma_{\text{рт}} - \gamma_{\text{возд}}) = 0,8(13600 - 1200)9,8 = 106545 \text{ Па}$ .

Сравнивая с вычисленной разностью давлений для случая течения с водой

$p_1 - p_2 = 98784 \text{ Па}$ , можно считать, что она изменилась незначительно.  
 $106545 - 98784 = 7761 \text{ Па}$ .

При небольших  $\Delta h$ , например,  $\Delta h = 30 \text{ мм}$

1)  $p_1 - p_2 = 3704 \text{ Па}$ ; 2)  $p_1 - p_2 = 3998 \text{ Па}$ .

## Практическое занятие № 2

Тема: Уравнение Бернулли для реальной жидкости

Цель – отработка навыков решения задач для общего случая (наличия потерь напора на трение и местных сопротивлений).

### Задача 1.

Горизонтальная труба диаметром  $d = 0,15 \text{ м}$  и длинами  $\ell_1 = 40 \text{ м}$ ,  $\ell_2 = 10 \text{ м}$  соединяет два резервуара с постоянными уровнями  $H_1 = 6 \text{ м}$  и  $H_2 = 2 \text{ м}$ . Определить расход воды, если  $\lambda = 0,03$ , а  $\zeta_{\text{вентиль}} = 4$ ,  $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$ ,  $\zeta_{\text{вых}} = 1$ .

Решение

Уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 (плоскость сравнения 0-0)

$$H_1 + \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} = H_2 + \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} + h_{\text{потерь}}$$

$$H_1 - H_2 = \frac{v^2}{2g} \left( \lambda \frac{\ell_1 + \ell_2}{d} + \zeta \right)$$

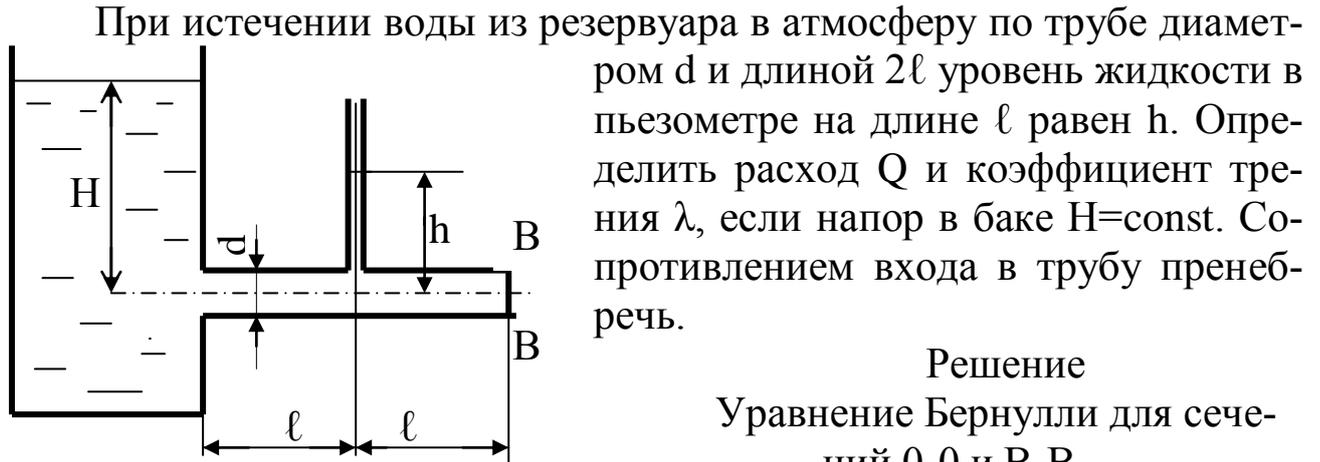
$$v = \frac{2g(H_1 - H_2)}{\lambda \frac{\ell_1 + \ell_2}{d} + 0,5 + 4,0 + 1,0} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8(6 - 2)}{0,03 \frac{50}{0,15} + 5,5}} = 2,25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Расход воды } v \cdot s = 2,25 \cdot 0,785 \cdot 0,0225 = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

### Задача 2.

Для условий задачи 1 построить пьезометрическую и напорную линии.

### Задача 3.



Решение

Уравнение Бернулли для сечений 0-0 и В-В

$$\frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} + H = \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + 2\lambda \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g}$$

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(1 + 2\lambda \frac{\ell}{d}\right).$$

Уравнение Бернулли для сечений 0-0 и 1-1

$$\frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} + H = \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} + h + \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g}$$

$$H - h = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{\ell}{d}\right).$$

$$H - H + h = \frac{v^2}{2g} \left(1 + 2\lambda \frac{\ell}{d} - 1 - \lambda \frac{\ell}{d}\right).$$

$$h = \frac{v^2}{2g} \lambda \frac{\ell}{d}; \quad v = \sqrt{\frac{2ghd}{\lambda \ell}};$$

$$Q = v \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \sqrt{\frac{2ghd}{\lambda \ell}} \cdot \frac{\pi d^2}{4}; \quad H -$$

$$2h = \frac{v^2}{2g}; \quad v = \sqrt{2g(H - 2h)};$$

### Задача 4.

Для условий задачи 3 построить пьезометрическую и напорную линии.

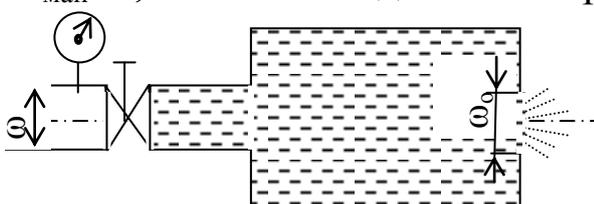
## Практическое занятие № 3

Тема: Истечение жидкости из отверстия при постоянном и переменном напоре

Цель – отработка навыков решения задач по теме занятия

### Задача 1.

Жидкость с плотностью  $\rho=880 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  под избыточным давлением  $P_{\text{ман}}=0,54 \cdot 10^6$  Па подаётся по трубе с площадью поперечного сечения  $\omega=8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  к баллону. На трубе перед баллоном установлен вентиль с коэффициентом сопротивления  $\zeta_B=7$ . Из баллона жидкость вытекает в атмосферу через отверстие площадью  $\omega_0$  с расходом  $Q$ . Найти расход  $Q$ .



Решение

$$Q = v \cdot \omega = \mu \cdot \omega_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \left[ P_{\text{изб}} + \frac{\rho v^2}{2} (1 + \zeta_B) \right]} - \text{const}$$

Из итога уравнения определяется скорость течения  $v$

$$v^2 = \mu \frac{\omega_0}{\omega} \frac{2}{\rho} \left[ P_{\text{изб}} + \frac{\rho v^2}{2} (1 + \zeta_B) \right]$$

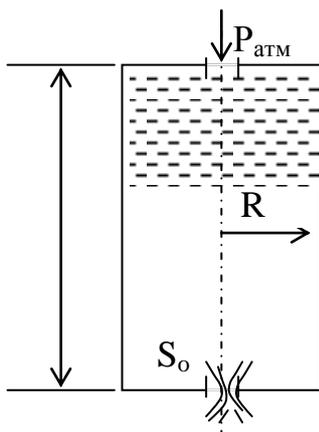
$$v^2 = \frac{P_{\text{изб}} \cdot \mu^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 \frac{2}{\rho}}{1 - \mu^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 (1 + \zeta_B)} = \frac{0,54 \cdot 10^6 \cdot 0,6^2 \left(\frac{1,2}{8}\right)^2 \frac{2}{880}}{1 - 0,6^2 \left(\frac{1,2}{8,0}\right)^2 (1 + 7)}$$

$$v = \sqrt{\frac{0,54 \cdot 10^6 \cdot 0,6^2 \cdot 0,0225 \cdot 2}{1 - 0,6^2 \cdot 0,0225 \cdot 8}} = 3,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; Q = 3,5 \cdot 10^4 = 0,0026 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

### Задача 2.

Резервуар-цилиндр заполнен жидкостью. Определить время её истечения для двух вариантов:

а) истечение происходит из малого отверстия при вертикальном положении цилиндра



б) истечение происходит из малого отверстия в дне цилиндра при горизонтальном положении.

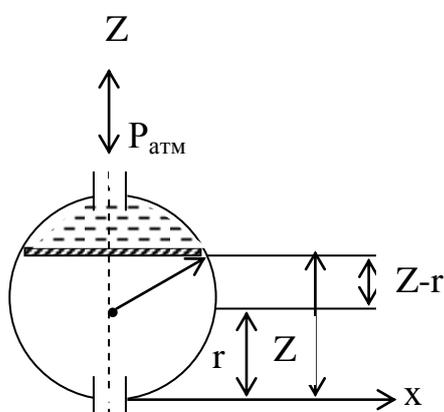
Истечение происходит при переменном напоре.

Дано: радиус цилиндра  $R=1$  м, длина  $L=5$  м, площадь отверстия  $S_0=5$  см<sup>2</sup>,  $\mu=0,62$ .

$$S=\pi R^2=\text{const.}$$

$t =$

$$\frac{S}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_0^H \frac{dH}{H^{\frac{1}{2}}} = \frac{2S\sqrt{L}}{\mu S_0 \sqrt{2g}} = \frac{2\pi R^2 \sqrt{L}}{\mu S_0 \sqrt{2g}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot \sqrt{5}}{0,62 \cdot (0,05)^2 \sqrt{2 \cdot 9,8}} = 264. \text{ с.}$$



Здесь площадь поперечного сечения

$$S=2L \cdot x, \quad x=f(z); \quad x^2+(z-r)^2=r^2$$

$$x=\sqrt{2rz-z^2} \quad \text{и} \quad S(z)=2L \cdot \sqrt{2rz-z^2}$$

$$t=\frac{2L}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_0^{2r} \frac{\sqrt{(2r-z)z}}{\sqrt{z}} dz$$

$$y=2r-z; \quad dy=-dz$$

$$t=\frac{2L}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_0^{2r} \sqrt{\frac{y(2r-y)}{\sqrt{2r-y}}} \cdot dy = \frac{2L}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \cdot \frac{2}{3} (2r-z)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^{2r} =$$

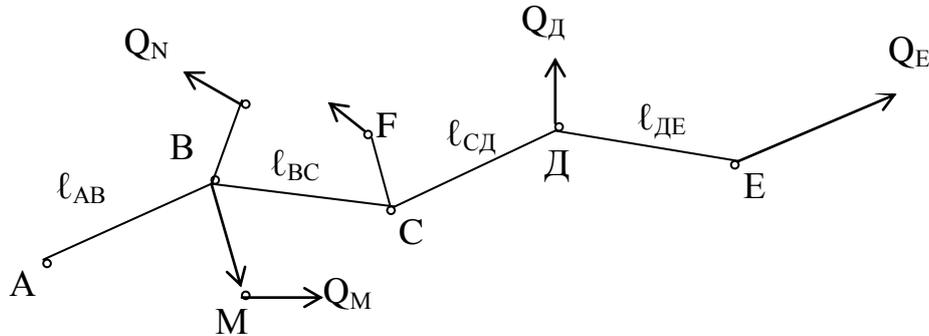
$$= \frac{4L(2r)^{\frac{3}{2}}}{3\mu S_0 \sqrt{2g}} = \frac{8}{3} \frac{L \cdot r^2}{\mu S_0 \sqrt{r} \sqrt{g}} = \frac{8 \cdot 5 \cdot 1}{3 \cdot 0,62 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \sqrt{9,8}} = 274,7 \text{ с.}$$

## Практическое занятие №4

### Тема: Расчет трубопроводов

Цель – отработать навыки решения задач по теме занятия.

#### Задача 1.



Определить диаметры на всех участках горизонтально расположенной водопроводной сети. Напор в точке А  $H_A=30$  м, а напор в точках потребления должен быть не менее 5 м. Длины участков  $\ell_{AB}=200$  м,  $\ell_{BC}=300$  м,  $\ell_{CD}=250$  м,  $\ell_{DE}=150$  м,  $\ell_{BN}=100$  м,  $\ell_{MB}=150$  м,  $\ell_{CF}=100$  м. Расходы в точках потребления:  $Q_M=1 \cdot 10^{-2} \frac{м^3}{с}$ ,  $Q_N=8 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{с}$ ,  $Q_F=1,5 \cdot 10^{-2} \frac{м^3}{с}$ ,  $Q_Д=5 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{с}$ ,  $Q_Е=1,2 \cdot 10^{-2} \frac{м^3}{с}$ .

Абсолютная шероховатость стенок трубопровода  $K=0,5$  мм, местными сопротивлениями пренебречь.

#### Решение

Диктующей точкой является точка Е. Потеря напора на АВСДЕ:  
 $\Sigma h = H_{нач} - H_{кон} = 30 - 5 = 25$  м.

Средний уклон

$$i = \frac{\sum h}{\sum \ell} = \frac{25}{200 + 300 + 250 + 150} = 0,0278.$$

Расходные характеристики и диаметры труб

$$K_{ДЕ}^2 = \frac{Q_{ДЕ}^2}{i_{cp}} = \frac{12^2 \cdot 10^{-4}}{0,0278} = 5180 \frac{л^2}{с^2}.$$

По таблицам определяем  $d_{ДЕ}=100$  мм

$$K_{CD}^2 = \frac{Q_{CD}^2}{i_{cp}} = \frac{17 \cdot 10^{-4}}{0,0278} = 10400 \frac{\text{л}^2}{\text{с}^2} \quad d_{CD}=125 \text{ мм.}$$

$$K_{BC}^2 = \frac{Q_{BC}^2}{i_{cp}} = \frac{32^2}{0,0278} = 36900 \frac{\text{л}^2}{\text{с}^2} \quad d_{DC}=150 \text{ мм}$$

$$K_{AB}^2 = \frac{Q_{AB}^2}{i_{cp}} = \frac{50^2}{0,0278} = 90000 \frac{\text{л}^2}{\text{с}^2} \quad d_{AB}=200 \text{ мм.}$$

Фактическое падение напора на участках магистрали

$$h_{AB} = \frac{Q_{AB}^2 \cdot \ell_{AB}}{K_{AB}^2} = \frac{50 \cdot 200}{155465} = 3,22 \text{ м;}$$

$$h_{BC} = \frac{Q_{BC}^2 \cdot \ell_{BC}}{K_{BC}^2} = \frac{32^2 \cdot 200}{34103} = 9,00 \text{ м;}$$

$$h_{CD} = \frac{Q_{CD}^2 \cdot \ell_{CD}}{K_{CD}^2} = \frac{17^2 \cdot 250}{12469} = 5,80 \text{ м;}$$

$$h_{DE} = \frac{Q_{DE}^2 \cdot \ell_{DE}}{K_{DE}^2} = \frac{12^2 \cdot 150}{3973} = 5,44 \text{ м.}$$

Полное падение напора  $\Sigma h=23,46 \text{ м.}$

Диаметры ответвлений

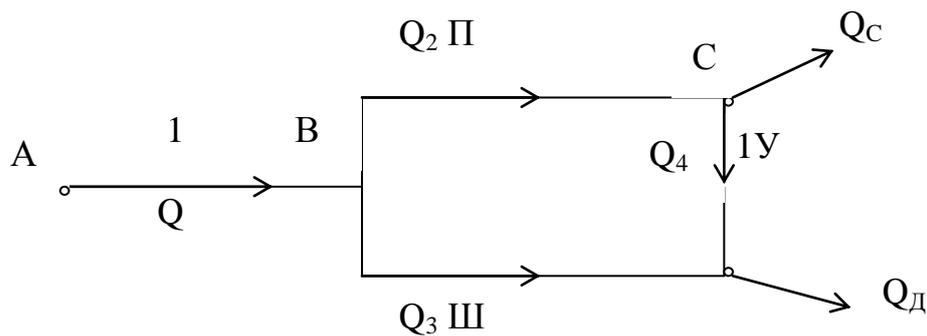
$$K_{CF}^2 = \frac{Q_{CF}^2 \cdot \ell_{CF}}{h_{CF}} = \frac{15^2 \cdot 100}{30 - 3,22 - 9,00 - 5,00} = 1760 \frac{\text{л}^2}{\text{с}^2} \quad d_{CF}=100 \text{ мм}$$

$$K_{BN}^2 = \frac{Q_{BN}^2 \cdot \ell_{BN}}{h_{BN}} = \frac{8^2 \cdot 100}{30 - 3,22 - 5,00} = 293 \frac{\text{л}^2}{\text{с}^2}, \quad d_{BN}=75 \text{ мм}$$

$$K_{BM}^2 = \frac{Q_{BM}^2 \cdot \ell_{BM}}{h_{BM}} = \frac{10^2 \cdot 150}{30 - 3,22 - 5,00} = 690 \frac{\text{л}^2}{\text{с}^2}, \quad d_{BM}=75 \text{ мм.}$$

## Задача 2.

Для кольцевого трубопровода определить напор в точке А. Известны расходы:  $Q_C=2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_D=3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\ell_1=400 \text{ м}$ ,  $d_1=200 \text{ мм}$ ,  $L_2=1000 \text{ м}$ ,  $d_2=150 \text{ мм}$ ,  $L_3=1000 \text{ м}$ ,  $d_3=100 \text{ мм}$ ,  $L_4=500 \text{ м}$ ,  $d_4=75 \text{ мм}$ .



### Решение

$$Q_D = Q_3 + Q_4 \quad Q_1 = Q_C + Q_D$$

$$Q_2 + Q_C + Q_4 \quad Q_3 = Q_D - Q_4$$

$$H = \frac{Q_1^2 L_1}{K_1^2} + \frac{Q_3^2 L_3}{K_3^2} = \frac{Q_1^2 L_1}{K_1^2} + \frac{Q_2^2 L_2}{K_2^2} + \frac{Q_4^2 L_2}{K_4^2}$$

$$\frac{Q_3^2 L_3}{K_3^2} = \frac{Q_2^2 L_2}{K_2^2} + \frac{Q_4^2 L_4}{K_4^2}$$

Отсюда следует:

$$\frac{(Q_D - Q_4)^2 L_3}{K_3^2} = \frac{(Q_C + Q_4)^2 L_2}{K_2^2} + \frac{Q_4^2 \cdot L_4}{K_4^2}$$

$$\frac{(Q_2^2 + Q_4^2 - 2Q_D \cdot Q_4)L_3}{K_3^2} = \frac{(Q_C^2 + Q_4^2 + 2Q_C \cdot Q_4)L_2}{K_2^2} + \frac{Q_4^2 \cdot L_4}{K_4^2}$$

Отсюда можно найти  $Q_4$

$$\frac{(30^2 - Q_4^2 - 2 \cdot 30 \cdot Q_4)1000}{53,7^2} = \frac{(20^2 + Q_4^2 + 2 \cdot 20 \cdot Q_4) \cdot 1000}{25090} + \frac{Q_4^2 \cdot 500}{24,94^2}$$

$$Q_4^2 + 45Q_4 - 598 = 0$$

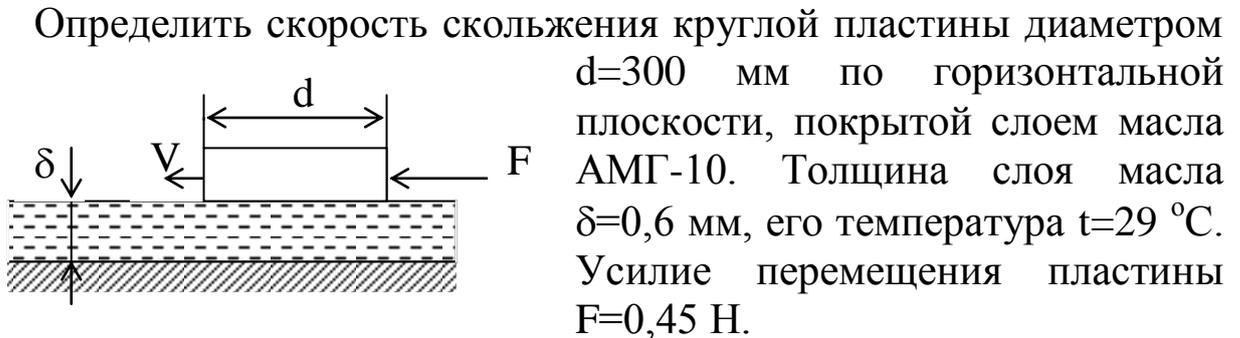
$$Q_4 = 10,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}, \quad Q_3 = 19,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_2 = 30,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}, \quad Q_1 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$H = \frac{50^2 \cdot 400}{116400} + \frac{19,25^2 \cdot 1000}{2886} = 137,6 \text{ м.}$$

## 4 Примеры решения задач

### Задача 1



Определить скорость скольжения круглой пластины диаметром  $d=300$  мм по горизонтальной плоскости, покрытой слоем масла АМГ-10. Толщина слоя масла  $\delta=0,6$  мм, его температура  $t=29$  °С. Усилие перемещения пластины  $F=0,45$  Н.

Решение.

Согласно закону Ньютона сила трения между слоями жидкости равна

$$T = \rho v_T \frac{dV}{dy},$$

где  $\rho$  - плотность масла;

$v_T$  - вязкость масла при температуре  $t$ ;

$s$  - площадь соприкасающихся слоев;

$dV/dy$  - поперечный градиент скорости.

При равномерном движении сила сопротивления движению равна движущейся силе, т.е.  $T=F$ . Поскольку слой масла тонкий, можно считать, что скорость в нем изменяется по прямолинейному закону и  $\frac{dv}{dy} \approx \frac{V}{\delta}$ .

$$F = \rho_M v_t s \frac{V}{\delta}, \text{ отсюда}$$

$$V = \frac{F \cdot \delta}{\rho v_t s}.$$

Из приложения выбираем плотность масла  $\rho_M=850$  кг/м<sup>3</sup> и вязкость при температуре  $t=50$  °С  $v_{50}=0,095$  Ст. Вязкость при заданной температуре

$$v_t = v_{50} \left( \frac{50}{t} \right)^n.$$

Показатель степени равен

$$n = \lg v_{50} + 2,7, \text{ где } v_{50} \text{ в Ст.}$$

$$n = \lg 0,095 + 2,7 = 0,99.$$

$$v_t = 0,095 \cdot 10^{-4} \left(\frac{50}{29}\right)^{0,99} = 0,163 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Площадь соприкасающихся слоев

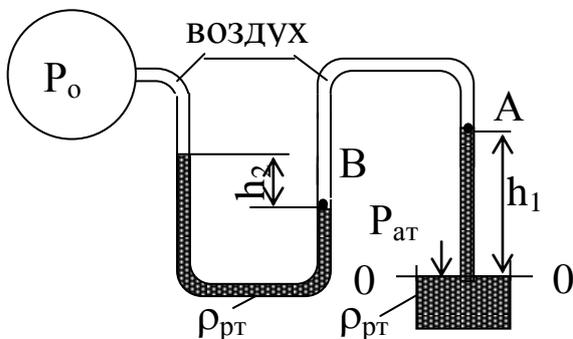
$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,07065 \text{ м}^2.$$

Скорость скольжения пластины

$$V = \frac{0,45 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{850 \cdot 0,163 \cdot 10^{-4} \cdot 0,07063} = 0,276 \text{ м/с}.$$

### Задача 2

Определить абсолютное и вакуумметрическое давление  $P_0$  в резервуаре (см.рис.), если заданы  $h_1=300$  мм рт.ст.,  $h_2=150$  мм рт.ст., атмосферное давление равно  $P_{ат}=98,1$  кПа. Плотность ртути  $\rho_{рт}=13600$  кг/м<sup>3</sup>.



Решение.

Давление в любой точке покоящейся жидкости определяется

по основному уравнению гидростатики

$$P = P_0 + \rho gh.$$

Относительно поверхности равного давления 0-0 записываем уравнение равновесия для т.А

$$P_{ат} = P_A + \rho_{рт}gh_1, \text{ отсюда}$$

$$P_A = P_{ат} - \rho_{рт}gh_1 = 98,1 \cdot 10^3 - 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,3 = 58075 \text{ Па}.$$

Давлением столба воздуха можно пренебречь и давление в т.А равно давлению в т.В

$$P_A = P_B.$$

Абсолютное давление в резервуаре равно

$$P_B = P_{оабс} + \rho_{рт}gh_2$$

$$P_{оабс} = P_B - \rho_{рт}gh_2 = 58075 - 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,15 = 38063 \text{ Па}.$$

Вакуумметрическое давление в резервуаре равно

$$P_{овак} = P_{ат} - P_{оабс} = 98,1 \cdot 10^3 - 38063 = 60037 \text{ Па}.$$

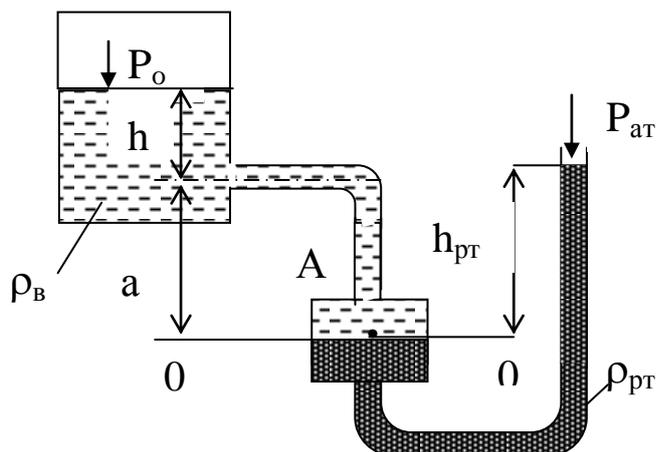
### Задача 3

По показанию ртутного чашечного манометра определить абсолютное и избыточное давление  $P_0$  на свободной поверхности жидко-

сти в резервуаре, если атмосферное давление  $P_{ат}=100$  кПа;  $h_{рт}=300$  мм;  $h=1,5$  м;  $\alpha=0,5$  м. Плотность воды  $\rho_в=1000$  кг/м<sup>3</sup>, плотность ртути  $\rho_{рт}=13600$  кг/м<sup>3</sup>.

Решение.

Из основного уравнения гидростатики следует, что во всех точках, лежащих в одной горизонтальной плоскости, давление одинаково.



Составляем уравнение равновесия относительно поверхности в т.А слева и справа

$$P_A = P_o + \rho_в g(h + \alpha)$$

$$P_A = P_{ат} + \rho_{рт} g h_{рт}$$

Приравниваем правые части вышеприведенных уравнений

$$P_o + \rho_в g(h + \alpha) = P_{ат} + \rho_{рт} g h_{рт}$$

Абсолютное давление на

свободной поверхности жидкости в резервуаре

$$P_{оабс} = P_{ат} + \rho_{рт} g h_{рт} - \rho_в g(h + \alpha)$$

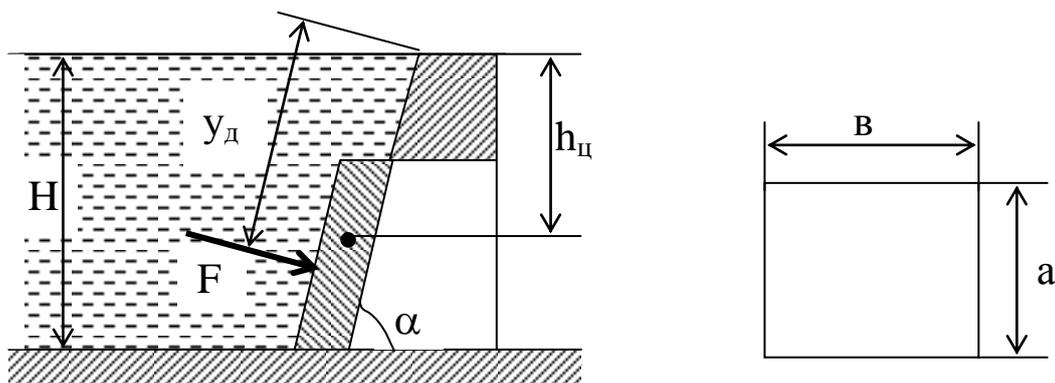
$$P_{оабс} = 100000 + 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,3 - 1000 \cdot 9,81(1,5 + 0,5) = 120405 \text{ Па.}$$

Избыточное давление на свободной поверхности жидкости в резервуаре

$$P_{оизб.} = P_{оабс} - P_{ат} = 120405 - 100000 = 20405 \text{ Па.}$$

#### Задача 4

Определить величину и точку приложения силы гидростатического давления на наклонный щит, закрывающий отверстие в теле плотины размерами  $(a \times b) = (2 \times 1,5)$  м, если глубина воды перед щитом  $H = 3$  м, угол наклона щита  $\alpha = 60^\circ$ .



Решение.

Сила давления воды на щит

$$F = \rho g h_{ц} \cdot S,$$

где  $h_{ц}$  – глубина погружения центра тяжести щита в воду;

$S$  – площадь смоченной поверхности щита.

$$F = \rho g \left( H - \frac{a}{2} \right) \frac{a \cdot b}{\sin \alpha} = 1000 \cdot 9,81 \left( 3 - \frac{2}{2} \right) \frac{2 \cdot 1,5}{\sin 60^\circ} = 67968 \text{ Н}.$$

Расстояние точки приложения силы давления от свободной поверхности

$$y_g = y_{ц} + \frac{I_o}{y_{ц} \cdot S},$$

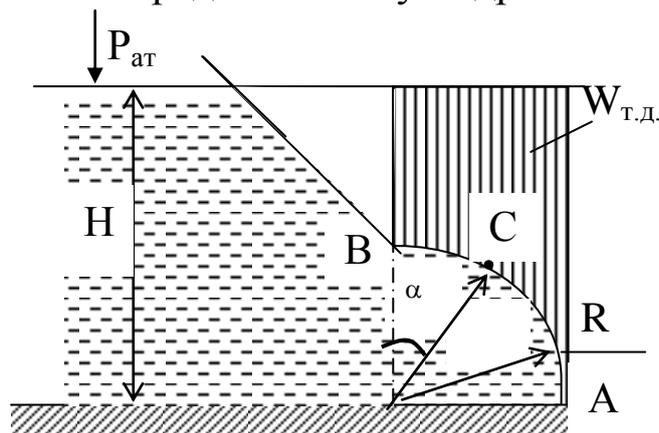
где  $y_{ц}$  – расстояние от свободной поверхности жидкости до центра тяжести смоченной поверхности щита;

$I_o$  – центральный момент инерции смоченной поверхности щита.

$$\begin{aligned} y_g &= \frac{H - a/2}{\sin \alpha} + \frac{b(a/\sin \alpha)^3 (\sin \alpha)^2}{12(H - a/2) \cdot a \cdot b} = \\ &= \frac{3 - \frac{2}{2}}{\sin 60^\circ} + \frac{1,5(2/\sin 60^\circ)^3 (\sin 60^\circ)^2}{12(3 - 2/2) \cdot 2 \cdot 1,5} = 2,358 \text{ м}. \end{aligned}$$

### Задача 5

Определить силу гидростатического давления воды и точку её



приложения на криволинейную часть сооружения АВ, если  $H=2$  м;  $R=0,5$ , ширина криволинейной части  $b=1,5$  м.

Решение.

Сила полного давления воды на криволинейную часть сооружения

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2},$$

где  $F_x$  – горизонтальная составляющая полной силы давления;

ления;

$F_z$  – вертикальная составляющая полной силы давления.

Горизонтальная составляющая полной силы давления на поверхность АВ равна произведению давления в центре тяжести проекции криволинейной поверхности на вертикальную плоскость на площадь этой проекции

$$F_x = \rho g h_{cy} \cdot S = \rho g \left( H - \frac{R}{2} \right) R \cdot b = 1000 \cdot 9,81 \left( 2 - \frac{0,5}{2} \right) 0,5 \cdot 1,5 = 12876 \text{ Н.}$$

Вертикальная составляющая полной силы давления на поверхность АВ равна весу жидкости, заключенной в объеме тела давления Вт.д.

Объём тела давления заключен между криволинейной поверхностью АВ, её проекцией на свободную поверхность жидкости или её продолжение и расположен между вертикальными плоскостями, проходящими через крайние образующие цилиндрической поверхности.

$$F_z = \rho g w_{m.d.} = \rho g \left( H \cdot R \cdot b - \frac{\pi R^2}{4} \cdot b \right) = 1000 \cdot 9,81 \left( 2 \cdot 0,5 \cdot 1,5 - \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 1,5 \right) = 11827 \text{ Н.}$$

Полная сила давления

$$F = \sqrt{(12876)^2 + (11827)^2} = 17483 \text{ Н.}$$

Направление действия силы полного давления

$$\cos \alpha = \frac{F_z}{F} = \frac{11827}{17483} = 0,6765,$$

$$\alpha = 52,7^\circ.$$

Точку приложения С равнодействующей силы полного давления находим графическим путем, проведя под углом  $\alpha$  прямую из центра кривизны криволинейной поверхности АВ.

### Задача 6

Определить средние скорости, смоченные параметры, гидравлические радиусы и режимы течения в сечениях постепенно расширяющегося трубопровода, где диаметры  $D_1=100$  мм,  $D_2=150$  мм,  $D_3=220$  мм при расходе  $Q=5$  л/с. По трубопроводу движется нефть с кинематической вязкостью  $\nu=0,25$  Ст.

Решение.

Исходя из уравнения неразрывности определяем средние скорости в сечениях

$$Q = V_1 S_1 = V_2 S_2 = \dots = V S = \text{const.}$$

$$V_1 = \frac{4Q}{\pi D_1^2} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,1^2} = 0,637 \text{ м/с},$$

$$V_2 = \frac{4Q}{\pi D_2^2} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,15^2} = 0,283 \text{ м/с},$$

$$V_3 = \frac{4Q}{\pi D_3^2} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,22^2} = 0,132 \text{ м/с}.$$

Смоченным периодом  $\chi$  называется часть периметра живого сечения потока, соприкасающееся со стенками русла.

$$\chi_1 = \pi D_1 = 3,14 \cdot 0,1 = 0,314 \text{ м}.$$

$$\chi_2 = \pi D_2 = 3,14 \cdot 0,15 = 0,471 \text{ м}.$$

$$\chi_3 = \pi D_3 = 3,14 \cdot 0,22 = 0,691 \text{ м}.$$

Гидравлическим радиусом  $R$  называется отношение площади живого сечения к смоченному периметру

$$R_1 = \frac{\pi D_1^2}{4\pi D_1} = \frac{D_1}{4} = \frac{0,1}{4} = 0,025 \text{ м}.$$

$$R_2 = \frac{\pi D_2^2}{4\pi D_2} = \frac{D_2}{4} = \frac{0,15}{4} = 0,0375 \text{ м}.$$

$$R_3 = \frac{\pi D_3^2}{4\pi D_3} = \frac{D_3}{4} = \frac{0,22}{4} = 0,055 \text{ м}.$$

В каждом сечении определяем режимы течения нефти по значению числа Рейнольдса. Если полученное значение  $Re$  меньше критического – режим течения ламинарный, если больше – турбулентный.

$$Re_{кр} = 2320$$

$$Re_1 = \frac{V_1 D_1}{\nu} = \frac{0,637 \cdot 0,1}{0,25 \cdot 10^{-4}} = 2548$$

режим течения турбулентный.

$$Re_2 = \frac{V_2 D_2}{\nu} = \frac{0,283 \cdot 0,15}{0,25 \cdot 10^{-4}} = 1698$$

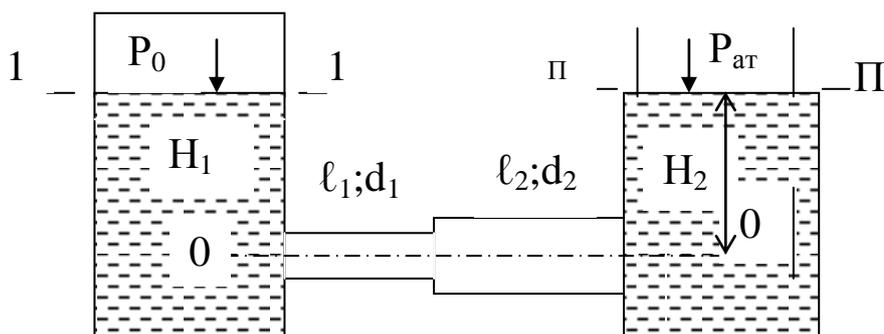
режим течения ламинарный.

$$Re_3 = \frac{V_3 D_3}{\nu} = \frac{0,132 \cdot 0,22}{0,25 \cdot 10^{-4}} = 1162$$

режим течения ламинарный.

### Задача 7

Определить расход воды в трубе переменного сечения, если заданы  $d_1=50$  мм;  $\ell_1=30$  м;  $d_2=75$  мм;  $\ell_2=50$  м;  $H_1=4$  м;  $H_2=3$  м; избыточное давление на свободной поверхности в левом резервуаре  $P_0=0,05$  МПа. Учесть потери на внезапном расширении и потери по длине. Коэффициент гидравлического трения  $\lambda=0,0125$ .



Решение.

Уравнение Д.Бернулли для потока реальной жидкости имеет вид

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Sigma \Delta h.$$

Выбираем плоскость сравнения 0-0 и сечения 1-1 и II-II. Записываем уравнение Д.Бернулли для данных сечений относительно плоскости 0-0.

$$H_1 + \frac{P_0 + P_{at}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = H_2 + \frac{P_{at}}{\rho g} + \frac{\alpha_{II} V_{II}^2}{2g} + \zeta_{exp} \frac{V_1^2}{2g} + \lambda \frac{\ell_1}{d_1} \cdot \frac{V_1^2}{2g} + \lambda \frac{\ell_2}{d_2} \cdot \frac{V_2^2}{2g}.$$

Скоростные напоры в сечениях  $\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = 0$ ;  $\frac{\alpha_{II} V_{II}^2}{2g} = 0$ , т.к. напоры

$H_1$  и  $H_2$  постоянны, течение жидкости установившееся

$$H_1 + \frac{P_0}{\rho g} = H_2 + \zeta_{exp} \frac{V_1^2}{2g} + \lambda \frac{\ell_1}{d} \frac{V_1^2}{2g} + \lambda \frac{\ell_2}{d_2} \frac{V_2^2}{2g}.$$

В данном уравнении 2 неизвестных  $V_1$  и  $V_2$ . Вторым уравнением системы является уравнение неразрывности.

$$Q = V_1 S_1 = V_2 S_2 = \text{const.}$$

$$V_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = V_2 \frac{\pi d_2^2}{4}, \text{ отсюда}$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2.$$

Делаем замену и решаем уравнение относительно  $V_1$

$$H_1 + H_1 + \frac{P_o}{\rho g} - H_2 = \frac{V_1^2}{2g} \left[ \xi_{\text{вп}} + \lambda \frac{\ell_1}{d_1} + \lambda \frac{\ell_2}{d_2} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 \right]$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2g(H_1 + \frac{P_o}{\rho g} - H_2)}{\xi_{\text{вп}} + \lambda \frac{\ell_1}{d_1} + \lambda \frac{\ell_2}{d_2} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4}}.$$

Определяем коэффициент внезапного расширения

$$\xi_{\text{вп}} = \left[1 - \frac{S_1}{S_2}\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,05}{0,075}\right)^2\right]^2 = 0,31$$

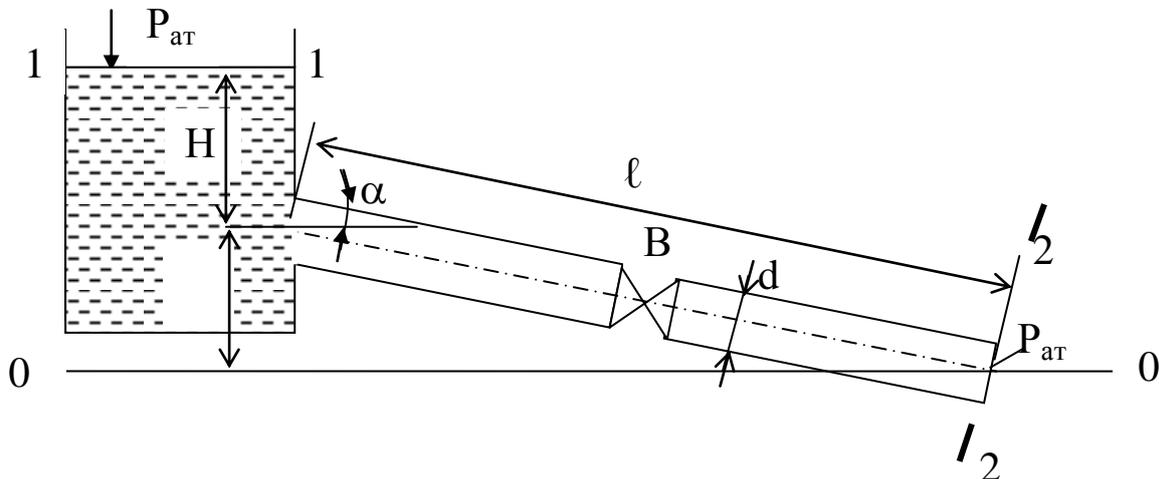
$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81(4 + \frac{0,05 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} - 3)}{0,31 + 0,0125 \frac{30}{0,05} + 0,125 \frac{50}{0,075} \left(\frac{0,05}{0,075}\right)^4}} = 3,56 \text{ м/с.}$$

Расход в трубе равен

$$Q = V_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = 3,56 \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 0,00698 \text{ м}^3/\text{с} = 6,98 \text{ л/с.}$$

### Задача 8

Из бака при постоянном напоре  $H=5$  м по прямому наклонному



трубопроводу длиной  $\ell=100$  м и диаметром  $d=0,1$  м вытекает вода в атмосферу. В трубе установлен вентиль В с сопротивлением  $\zeta_B=4,0$ , угол наклона трубопровода  $\alpha=10^\circ$ .

Определить расход воды в трубопроводе. Коэффициент трения принять равным  $\lambda=0,03$ .

Решение.

Составляем уравнение Д.Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 относительно плоскости сравнения 0-0, проведенной через центр тяжести живого сечения на выходе

$$Z + H + \frac{P_{am}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{P_{am}}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V_2^2}{2g} + \zeta_B \frac{V_2^2}{2g},$$

где  $Z = \ell \cdot \sin \alpha = 100 \sin 10^\circ = 15,6$  м.

Скоростной напор в сечении 1-1

$$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = 0.$$

Коэффициент Кориолиса принимаем равным  $\alpha_2=1,0$  как при турбулентном режиме течения. Решаем исходное уравнение относительно скорости  $V_2$ .

$$\frac{V_2^2}{2g} (\alpha_2 + \lambda \frac{\ell}{d} + \zeta_b) = Z + H$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g(Z + H)}{\alpha_2 + \lambda \frac{\ell}{d} + \zeta_b}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81(15,6 + 5)}{1,0 + 0,03 \frac{100}{0,1} + 4}} = 3,4 \text{ м/с.}$$

Расход воды равен

$$Q = V_2 \frac{\pi d^2}{4} = 3,4 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,027 \text{ м}^3/\text{с} = 27 \text{ л/с.}$$

### Задача 9

Определить потери напора по длине в стальном нефтепроводе длиной  $\ell=1000$  м при расходе  $Q=180$  м<sup>3</sup>/час, если кинематический коэффициент вязкости нефти  $\nu=0,8$  Ст, а диаметр трубопровода  $d=200$  мм.

Решение.

Определяем скорость движения нефти в трубопроводе

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 180}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2} = 1,6 \text{ м/с.}$$

Режим течения нефти определяем по значению числа Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{1,6 \cdot 0,2}{0,8 \cdot 10^{-4}} = 3980.$$

Режим течения турбулентный.

При данном значении числа Re коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  считаем по формуле Блазиуса, как для гидравлически гладких труб.

$$\lambda_{\text{гп}} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = \frac{0,3164}{3980^{0,25}} = 0,0398.$$

Потери давления в трубопроводе считаем по формуле Дарси

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda_{\text{гп}} \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2g} = 0,0398 \frac{1000}{0,2} \frac{1,6^2}{2 \cdot 9,81} \approx 26 \text{ м.}$$

### Задача 10

Определить мощность для рассчитанной подачи по трубопроводу длиной  $\ell=500$  м и диаметром  $d=100$  мм, если давление в начале трубопровода  $P_1=1,5$  кг/см<sup>2</sup>, давление в конце трубопровода  $P_2=0,3$  кг/см<sup>2</sup>. Коэффициент трения принять равным  $\lambda=0,025$ . Плотность перекачиваемой жидкости  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Решение.

Потери давления в трубопроводе определяются по формуле Дарси

$$\Delta P = \rho \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2}.$$

Разница давлений в начале и конце трубопровода полностью расходуется на преодоление потерь давления

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 1,5 - 0,3 = 1,2 \text{ кг/см}^2 = 1,2 \text{ кг/см}^2 = 0,12 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Из формулы Дарси определяем скорость движения жидкости

$$V = \sqrt{\frac{2d \cdot \Delta P}{\rho \lambda \ell}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,1 \cdot 0,12 \cdot 10^6}{1000 \cdot 0,025 \cdot 500}} = 1,38 \text{ м/с.}$$

Расход жидкости равен

$$Q = V \cdot S = V \frac{\pi d^2}{4} = 1,38 \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,0109 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Мощность для рассчитанной подачи равна  
 $N = \Delta P \cdot Q = 0,12 \cdot 10^6 \cdot 0,0109 = 1305 \text{ Вт.}$

## П Р И Л О Ж Е Н И Е

### 1. Средние значения плотности $\rho$ и кинематической вязкости $\nu$ некоторых жидкостей

Жидкость	Плотность кг/м <sup>3</sup> при T, °C		Кинематическая вязкость $\nu$ при T, °C			
	20	50	20	40	60	80
Вода пресная	998		0,010	0,0065	0,0047	0,0036
Нефть, Баку легкая	884	-	0,25	-	-	
Нефть, Баку тяжелая	924	-	1,4	-	-	-
Бензин авиаци- онный	745	-	0,0073	0,0059	0,0049	-
Керосин Т-1 (очищенный)	808	-	0,025	0,018	0,012	0,010
Керосин Т-2 (тракторный)	819	-	0,010	-	-	-
Дизельное топ- ливо	846	-	0,28	0,12	-	-
Глицерин	1245	-	9,7	3,3	0,88	0,38
Ртуть	13550	-	0,0016	0,0014	0,0010	-
Масла:						
касторовое	960	-	15	3,5	0,58	0,25
трансформатор- ное	884	880	0,28	0,13	0,078	0,048
АМГ-10	-	850	0,17	0,11	0,085	0,065
веретенное АУ	-	892	0,48	0,19	0,098	0,059
индустриальное 12	-	883	0,48	0,19	0,098	0,059
- « - 20	-	891	0,85	0,33	0,14	0,080
- « - 30	-	901	1,8	0,56	0,21	0,11
- « - 50	-	910	5,3	1,1	0,38	0,16
турбинное	-	900	0,97	0,38	0,16	0,088

У к а з а н и е. Плотность жидкости при другой температуре можно определить по формуле  $\rho_T = \rho_0 / (1 + \alpha \Delta T)$ , где  $\rho_0$  – плотность жидкости при температуре  $T = T_0 + \Delta T$ ;  $\Delta T$  – изменение температуры;  $T_0$  – температура, при которой плотность жидкости равна  $\rho_0$ ,  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения жидкости ( в среднем для минеральных масел можно принять  $\alpha = 0,0007 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ).

## 2. Зависимость плотности воды от температуры

T, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	1000	998	996	992	988	983	978	972	965	958

## 3. Средние значения модуля упругости E жидких и твердых тел

Жидкость	Модуль упругости E, 10 <sup>9</sup> МПа	Твердые тела	Модуль упругости E, 10 <sup>9</sup> МПа
Вода	2,06	Сталь углеродистая	206
Нефть	1,28	Сталь легированная	216
Керосин	1,37	Чугун черный	152
Спирт	0,98	Чугун белый	134
Масло турбинное 30	1,72	Дюралюминий	70
Глицерин	4,08	Латунь, бронза	118
Ртуть	24,6	Алюминий вальцованный	68

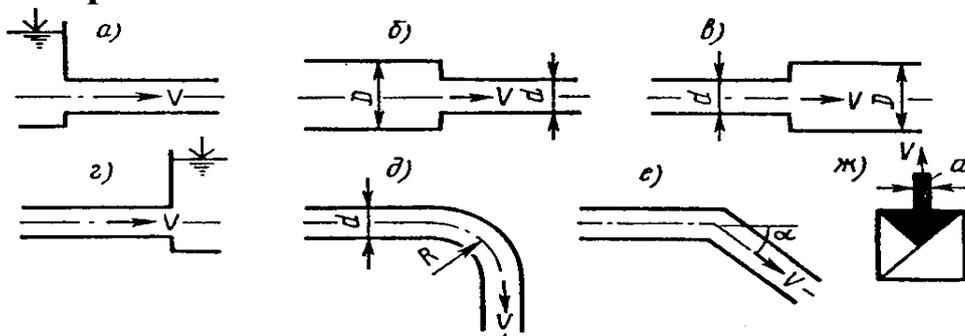
## 4. Средние значения эквивалентной шероховатости $\Delta_3$

Материал труб, способ изготовления	$\Delta_3$ , мм
1	2
Новые холоднотянутые и горячекатаные стальные трубы	0,060
Новые стальные сварные трубы	0,070
Новые обычные оцинкованные стальные трубы	0,12

Продолжение табл.

1	2
Старые стальные сварные	0,75
Сварные трубы из нержавеющей стали	0,075
Новые холоднотянутые алюминиевые трубы и трубы из алюминиевого сплава (дюралюминия)	0,030
Новые чугунные трубы	0,60
Бывшие в употреблении, но очищенные чугунные трубы	0,90

### 5. Значения коэффициентов $\xi$ некоторых местных сопротивлений



Тип препятствия	Схема сопротивления по рисунку	Значение коэффициента $\xi$
Вход в трубу	а	0,50
Внезапное сужение	б	$0,50 \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right]$
Внезапное расширение	в	$\left[ \left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right]^2$
Выход из трубы	з	1,0

Плавный поворот (см.схему на рис.д)		Крутой поворот (см. схему на рис. е)		Клапан всасывания (см.схему на рис. ж)	
d/R	$\xi$	$\alpha_1$	$\xi$	d <sub>1</sub> мм	$\xi$
0,20	0,14	20	0,12	20	15,5
0,40	0,21	30	0,16	40	12,0
0,60	0,44	45	0,32	60	9,5
0,80	0,98	60	0,56	80	8,0

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Самойлович, Г. С. Гидрогазодинамика [Текст] : учеб. / Г. С. Самойлович. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1990. - 382 с. :
2. Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем [Текст] / С. С. Кутателадзе, М. Стырикович. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергия, 1976. - 296 с.
3. Кудинов В.А. Гидравлика [Текст] : учебное пособие / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 2007. - 199 с.
4. Лапшев, Николай Николаевич. Гидравлика [Текст] : учебник / Н. Н. Лапшев. - 3-е изд., стер. - М. : Академия, 2010. - 272 с.
5. Гусев, Александр Андреевич. Гидравлика [Текст] : учебник для вузов / А. А. Гусев. - Москва : Юрайт, 2013. - 285 с.
4. Метревели, В. Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями [Текст] : учебное пособие / В. Н. Метревели. - М. : Высшая школа, 2007. - 192 с.
6. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация [Текст] : учебное пособие для вузов / В. И. Калицун, В. С. Кедров, Ю. М. Ласков. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Стройиздат, 2002. - 397 с.
7. Исаева, В. Н. Сборник задач по гидравлике [Текст] : сборник / Марийский политехн. ин-т им. А. М. Горького. - Йошкар-Ола : МарПИ, 1993. - 128 с.
8. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод [Текст] : учебное пособие / под ред. С. П. Стесина. - М. : Академия, 2005. - 336 с.