



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Водоснабжение и водоотведение»

Практикум

для выполнения практических заданий
по дисциплинам

**«Основы гидравлики и
теплотехники»,
«Гидрогазодинамика»,
«Гидравлика систем ВиВ»**

Авторы

Цурикова Е.Г., Щуцкая Е.Е.,
Смоляниченко А.С., Шишова О.П.,
Харитоновна Т.А.

Ростов-на-Дону, 2016



Аннотация

Пособие предназначено для студентов направления 08.03.01 – Строительство.

Авторы

к.т.н., доцент Цурикова Е.Г.,
к.т.н., доцент Щуцкая Е.Е.,
к.т.н., асс. Смоляниченко А.С.,
асс. Шишова О.П.,
инженер Харитонова Т.А.



Оглавление

| | |
|--|-----------|
| Занятие 1 | 5 |
| 1.1. Основные физические свойства жидкостей..... | 5 |
| 1.2. Гидростатическое давление. Свойства гидростатического давления. Сила гидростатического давления | 7 |
| 1.3. Основной закон гидростатики | 8 |
| 1.4. Закон Паскаля..... | 8 |
| Пример решения задачи к занятию №1..... | 9 |
| Задачи для решения на занятии | 9 |
| Занятие 2 | 13 |
| 2.1. Пьезометрическая высота | 13 |
| 2.2. Вакуум | 13 |
| 2.3. Эпюры давления | 14 |
| 2.4. Сила давления на плоские поверхности..... | 17 |
| 2.5. Закон Архимеда. Силы, действующие на плавающее тело | 18 |
| Пример решения задачи к занятию №2..... | 19 |
| Задачи для решения на занятии | 21 |
| Занятие 3 | 25 |
| Контрольная работа №1 по вопросам | 25 |
| Занятие 4 | 26 |
| 4.1. Гидравлические элементы потока | 26 |
| 4.2. Уравнение неразрывности | 29 |
| 4.3. Уравнение Бернулли | 30 |
| Задачи для решения на занятии | 33 |
| Занятие 5 | 37 |
| 5.1. Режимы движения жидкостей | 37 |
| 5.2. Число Рейнольдса и критическое число Рейнольдса | 38 |
| 5.3. Общая формула для определения потерь напора между двумя сечениями..... | 39 |
| 5.4. Потери напора на трение по длине. Уравнение Дарси-Вейсбаха | 40 |
| 5.5. Потери напора в местных сопротивлениях | 41 |
| Пример решения задачи к занятию №5..... | 42 |
| Задачи для решения на занятии | 43 |
| Задачи для самостоятельного решения | 45 |

| | |
|---|-----------|
| Занятие 6 | 46 |
| 6.1. Истечение жидкости из отверстий и насадков | 46 |
| 6.2. Свободная струя жидкости..... | 48 |
| Пример решения задачи к занятию №6..... | 49 |
| Задачи для решения на занятии | 50 |
| Задачи для самостоятельного решения | 53 |
| Занятие 7 | 54 |
| 7.1. Основные формулы для расчета трубопроводов | 54 |
| 7.2. Гидравлический удар. Общие понятия | 56 |
| Пример решения задачи к занятию №7..... | 59 |
| Задачи для решения на занятии | 59 |
| Задачи для самостоятельного решения | 62 |
| Занятие 8 | 63 |
| Контрольная работа по вопросам №2 | 63 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 65 |

ЗАНЯТИЕ 1

- 1.1. Основные физические свойства жидкостей.
- 1.2. Гидростатическое давление. Свойства гидростатического давления. Сила гидростатического давления.
- 1.3. Основной закон гидростатики.
- 1.4. Закон Паскаля.
- 1.5. Виды гидростатического давления.

1.1. Основные физические свойства жидкостей

Жидкость есть физическое тело, обладающее двумя особыми свойствами:

- она весьма мало изменяет свой объем при изменении давления или температуры [в этом она сходна с твердым телом],
- она обладает текучестью, то есть она не имеет собственной формы и принимает форму того сосуда, в котором она находится [в этом она сходна с газом].

1.2. Основные физические свойства жидкостей.

Основными единицами в Международной системе единиц [СИ] являются

для длины – **метр** [м],

для времени - **секунда**[с],

для массы - **килограмм**[кг],

для термодинамической температуры - **кельвин**[К],

единицей силы в СИ служит сила, сообщающая массе в 1 кг ускорение, равное $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, ее называют **ньютон** [Н], $1\text{Н} = \frac{\text{кг}}{\text{м с}^2}$.

Применяют укрупненные единицы –

килоньютон $1\text{кН} = 10^3\text{Н}$,

меганьютон - $1\text{МН} = 10^6\text{Н}$.

Для измерения гидромеханического давления (напряжения), представляющего собой силу, отнесенную к площади, принят ньютон на квадратный метр $[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}]$, принимают единицу измерения принят **паскаль** – $\text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Также давление измеряют:

$$1 \text{ тех.атм} = 10 \text{ м.вод.ст.} = 735 \text{ мм.рт.ст.} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 0,981 \text{ бар.} = 98066 \text{ Па} = 980665 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$$

Рассмотрим физические свойства жидкостей, с которыми сталкиваются при гидравлических расчетах.

Плотность. Плотностью называют количество массы m жидкости, содержащейся в единице объема V , ее обозначают буквой ρ и определяют из отношения

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Единицей плотности является килограмм на кубический метр $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Иногда пользуются понятием - **относительная плотность**. **Относительной плотностью** вещества называют отношение плотности исследуемого вещества к плотности эталонного вещества. В качестве эталонной жидкости чаще всего используют дистиллированную воду, плотность которой при $+20^\circ\text{C}$ равна $998,203 \text{ кг/м}^3$, а при температуре максимальной плотности ($+4^\circ\text{C}$) составляет $999,973 \text{ кг/м}^3$.

Удельный вес. Удельным или объемным весом жидкости [удел. силой тяжести] γ называют вес G единицы ее объема V .

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

Удельный вес и плотность связаны между собой важной зависимостью, которую широко используют при гидравлических расчетах $\gamma = g\rho$.

$$g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{const}$$

Сжимаемость жидкостей характеризуется коэффициентом сжимаемости [или объемного сжатия] β_v , представляющим относительное изменение объема ΔV жидкости на единицу изменения объема Δp .

$$\beta_p = - \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{н}} \right]$$

Величина обратная коэффициенту сжимаемости, называется **модулем объемной упругости жидкости** и обозначается

$$K = \frac{1}{\beta_v} = \left[\frac{\text{н}}{\text{м}^2} \right].$$

Температурное расширение. Изменение объема жидкости в зависимости то температуры [температурное расширение] характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения β_t , выражающим относительное изменение объема

жидкости ΔV при повышении ее температуры Δt на 1°C :

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta t} = [^{\circ}\text{C}^{-1}].$$

Здесь V - первоначальный объем жидкости.

Вязкость жидкости и законы внутреннего трения.

Вязкостью называют свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям. Это свойство не может быть обнаружено при покое жидкости, так как оно проявляется лишь при ее движении.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right], \text{ иногда измеряют в стоксах } 1 \left[\frac{\text{см}^2}{\text{с}} \right] = 1$$

Ст.

Величину обратную динамической вязкости называют **текучестью**

$$\xi = 1/\mu$$

1.2. Гидростатическое давление. Свойства гидростатического давления. Сила гидростатического давления

Основным понятием гидростатики является понятие гидростатического давления в данной точке покоящейся жидкости. Это давление принято обозначать p и для краткости именовать **гидростатическим давлением**.

Сила P , действующая на рассматриваемую площадь S , называется **силой гидростатического давления [или суммарным гидростатическим давлением]**. Сила гидростатического давления пишется большой буквой P и измеряется, как и все силы ньютонами [Н].

$$\text{Разделив модуль силы [значение] } |P| \text{ на } S, \text{ получим } \frac{|P|}{S}$$

$$= P_{\text{ср}},$$

где величина $P_{\text{ср}}$ представляет значение той силы, которая приходится в среднем на единицу рассматриваемой площади S ;

$P_{\text{ср}}$ - называют **средним гидростатическим давлением**

±

Свойства гидростатического давления.

Первое свойство. Гидростатическое давление p , действу-

ет нормально к площадке действия и является сжимающим, то есть оно направлено внутрь того объема жидкости [или твердого тела, ограничивающего жидкость], который мы рассматриваем.

Второе свойство. Гидростатическое давление p в данной точке не зависит от ориентировки, то есть от угла наклона площадки

1.3. Основной закон гидростатики

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

Это уравнение является фундаментальным и называется основным уравнением гидростатики и показывает, что **гидростатическое давление в любой точке покоящейся капельной жидкости равно давлению на свободной поверхности, сложенному с произведением удельного веса жидкости на глубину погружения этой точки под свободной поверхностью.**

1.4. Закон Паскаля

Из основного уравнения гидростатики следует весьма важное следствие - **давление в покоящейся жидкости передается во все точки с одинаковой силой без изменения. Это и есть выражение закона Паскаля.**

1.5. Виды гидростатического давления.

p_0 – внешнее поверхностное давление (давление на свободную поверхность жидкости),

P_a – атмосферное давление, которое является частным случаем поверхностного давления,

p_a – абсолютное давление $p_a = p_0 + \gamma h$, которое учитывает все давления действующие на частицу жидкости,

$p_{\text{вес}} = \gamma h$, называется весовым давлением и представляет ту часть абсолютного давления p , которая обусловлена весом самой жидкости.

p – избыточное давление, та часть абсолютного давления которая превышает одну атмосферу, поэтому его часто называют сверхатмосферным или манометрическим.

Говоря о силе гидростатического давления P различают

- силу абсолютного гидростатического давления P_a ,

- силу избыточного гидростатического давления P или ее просто называют силой гидростатического давления.

В системе СИ единицей измерения давления является $P_a =$

$$\frac{H}{M^2}$$

а единицей измерения силы гидростатического давления H .

Пример решения задачи к занятию №1

Задача 1.1.1. Определить плотность жидкости $\rho_{ж}$, полученной смешиванием

объёма жидкости $V_1 = 0,018 \text{ м}^3$ (18 л) плотностью $\rho_1 = 850 \text{ кг/м}^3$

и объёма жидкости $V_2 = 0,025 \text{ м}^3$ (25 л) плотностью $\rho_2 = 900 \text{ кг/м}^3$.

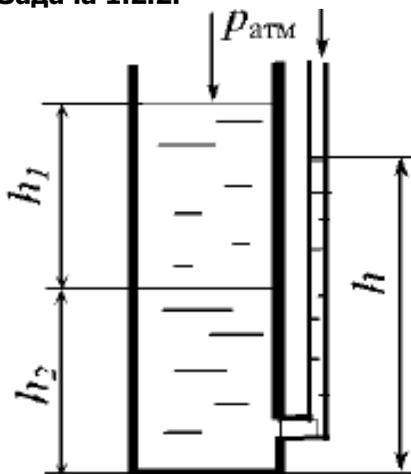
Решение. Плотность полученной жидкости находим из соотношения суммарных массы и объёма:

$$\rho_{ж} = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{V_1 + V_2} = \frac{850 \cdot 0,018 + 900 \cdot 0,025}{0,018 + 0,025} = 879 \text{ кг/м}^3$$

Задачи для решения на занятии

Задача 1.2.1. Стальной трубопровод длиной $L = 500 \text{ м}$ и диаметром $D = 0,4 \text{ м}$ испытывается на прочность гидравлическим способом. Определить объём воды ΔV , который необходимо подать в трубопровод за время испытаний для подъёма давления от $P_1 = 0,2 \text{ МПа}$ до $P_2 = 0,2 \text{ МПа}$. Деформацию материала труб не учитывать. Модуль объёмной упругости воды E принять равным 2060 МПа.

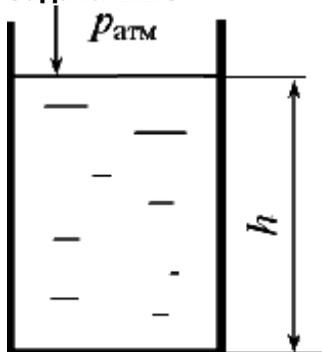
Задача 1.2.2.



В цилиндрическом отстойнике поверхность раздела между

маслом и осевшей водой установилась на глубине $h_1 = 1,2$ м. Определить плотность масла, если глубина воды $h_2 = 0,2$ м, а уровень воды в трубке установился на высоте $h = 1,2$ м.

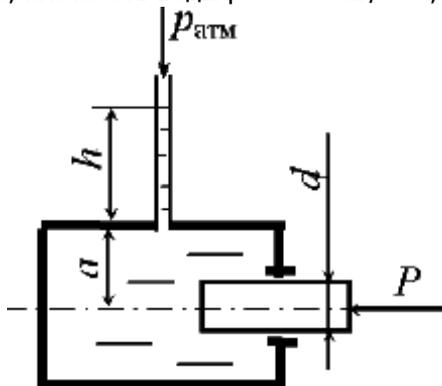
Задача 1.2.3.



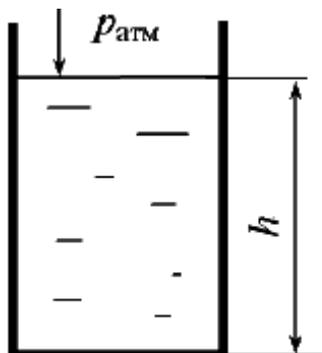
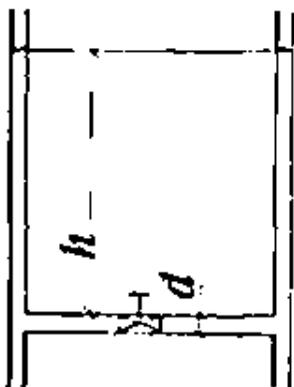
Определить избыточное p и P_A абсолютные давления в точке, расположенной на дне открытого резервуара, если уровень жидкости в резервуаре $h = 2,0$ м, плотность жидкости $\rho_{ж} = 103 \text{ кг/м}^3$. Атмосферное давление $p_a = 0,1$ МПа.

Задача 1.2.4.

На какую высоту h поднимется вода в пьезометре, если сила, действующая на плунжер, $P = 200$ Н, диаметр плунжера $d = 0,10$ м, плотность воды $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $a = 0,3$ м.



Задача 1.2.5. Определить высоту наполнения резервуара жидкостью с относительной плотностью $\delta = 0,85$, если в точке, расположенной на дне открытого резервуара, абсолютное давление $P_A = 135$ кПа. Атмосферное давление $P_a = 0,1$ МПа.


Задача 1.2.6.


Две вертикальные трубы центрального отопления соединены горизонтальным участком, на котором установлена задвижка диаметром $d = 0,2$ м. Температура воды в правой вертикальной трубе 80°C , а в левой 20°C . Найти разность сил суммарного давления на задвижку справа $F_{пр}$ и слева $F_{л}$. Высота воды в вертикальных трубах над уровнем горизонтальной трубы $h = 20$ м.

Задачи для самостоятельного решения.

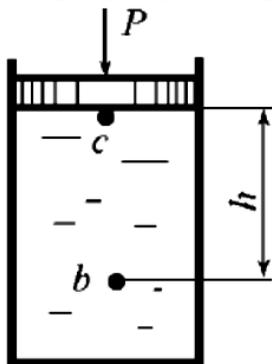
Задача 1.3.1. Определить плотность морской воды $\rho_{м.в.}$ на глубине, где приращение давления составляет $\Delta p = 10,3$ МПа. Плотность морской воды

на поверхности $\rho_{м.в.} = 1030$ кг/м³, а объёмной модуль упругости $E_{м.в.} = 2 \cdot 10^3$ МПа.

Задача 1.3.2.

Определить избыточное давление в точке c под поршнем, а

также, на какой глубине h должна находиться точка b , чтобы избыточное давление в этой точке было в два раза больше, чем в точке c . Диаметр поршня $d = 0,4$ м, а сила, действующая на поршень, $P = 24$ кН. Плотность жидкости $\rho_{ж} = 950$ кг/м³.



ЗАНЯТИЕ 2

- 2.1. Пьезометрическая высота.
- 2.2. Вакуум.
- 2.3. Эпюры давления.
- 2.4. Сила давления на плоские поверхности. Гидростатический парадокс.
- 2.5. Закон Архимеда. Силы, действующие на плавающее тело.
- 2.6. Остойчивость, ее виды. Три характерные точки плавающего тела.

2.1. Пьезометрическая высота

Пьезометрическая высота – это высота отвечающая давлению, выражена высотой некоторого столба жидкости.

Величину h_A называют пьезометрической высотой, отвечающей абсолютному давлению в точке, или просто **абсолютной пьезометрической высотой (иногда приведенной высотой)**.

h_A - есть высота такого столба жидкости, который своим весом способен создать давление равное абсолютному давлению в рассматриваемой точке.

Размерность h_A - размерность длины, м, длина вертикального столба жидкости с указанием ее удельного веса.

Таким образом, имеем два способа выражения абсолютного гидростатического давления:

- единицами $\frac{\text{сила}}{\text{площадь}}, \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$, кПа;

- единицами длины, м. столба жидкости.

Также иногда меряют техническими атмосферами

1 ат = 100 кПа = 10 м.вод.ст.

Пьезометрическая высота отвечающая избыточному давлению в точке называется **избыточной пьезометрической высотой или просто пьезометрической высотой $h_{изб}$** .

2.2. Вакуум

В случае, когда $p_A < p_a$, возникает вакуум в жидкости. С точки зрения гидравлики **вакуум это не давление, а недостаток давления до атмосферного.**

Величина вакуума выражается тремя способами:

- единицами сила/ площадь $\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$, кПа;
- единицами длины (или высоты) вертикального столба жидкости, характеризуемой m , $h_{\text{вак}}$ вакуумметрической высотой или высотой вакуума.
и называется
- в долях атмосферного давления.

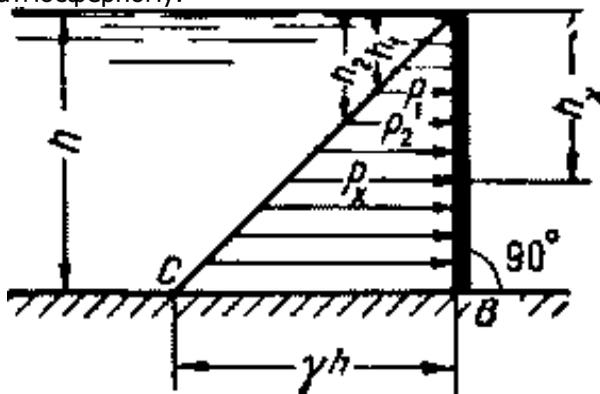
2.3. Эпюры давления

Гидростатическое давление может быть представлено графически в виде эпюры давления. **Эпюрой давления** называется график распределения давления жидкости по длине какого-либо контура или стенки.

Эпюра избыточного гидростатического давления на вертикальную стенку. Уравнение избыточного гидростатического давления

$$P = P_A - P_0 = \gamma h$$

выражает закон нарастания гидростатического давления, в жидкости по мере увеличения глубины от свободной поверхности. Изобразим графически изменение давления P на плоскую вертикальную стенку высотой h , поддерживающую жидкость в каком-либо сосуде или гидротехническом сооружении с одной стороны и пусть при этом давление на свободной поверхности жидкости равно атмосферному.



Если мы начертим вертикаль АВ в известном масштабе, на соответствующих глубинах h_1, h_2 отложим на перпендикулярах к этой вертикали вычисленные значения P_1, P_2 и т. д. в некотором принятом масштабе и соединим концы отложенных отрезков,

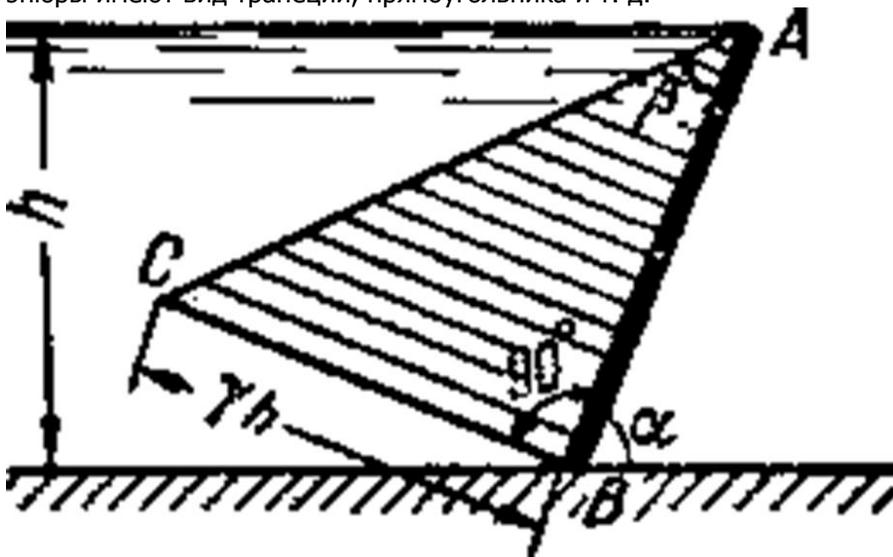
и получим прямую AC.

Прямоугольный треугольник ABC является эпюрой избыточного гидростатического давления жидкости на вертикальную стенку AB.

Отметим, что построение эпюры в виде прямоугольного треугольника не представляет никакой трудности. Достаточно только в нижней точке B восстановить перпендикуляр линии стенки AB, отложить на нем величину p и полученную точку C соединить с точкой A, лежащей на пересечении линии стенки со свободной поверхностью.

Имея эпюру давления, можно определить избыточное гидростатическое давление в любой точке рассматриваемой стенки, так как каждая ордината эпюры (перпендикулярная к стенке линии AB), взятая в масштабе сил, даст избыточное гидростатическое давление в данной точке.

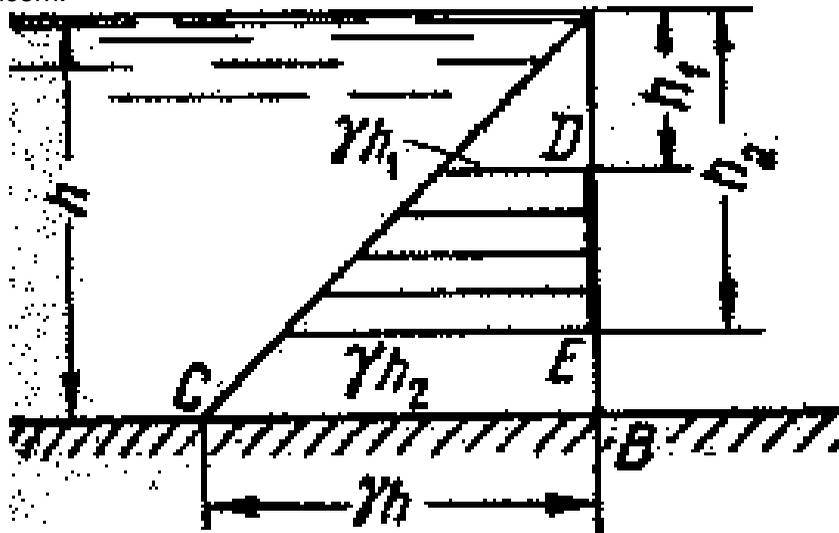
Эпюры давления не всегда изображаются прямоугольным треугольником; в практике могут быть случаи, когда эти эпюры имеют вид трапеции, прямоугольника и т. д.



Эпюра избыточного гидростатического давления на наклонную стенку изображается, так же как и на вертикальную стенку, прямоугольным треугольником. Катеты этого треугольника будут равны $BC = \gamma h$ и $AB = \frac{h}{\sin \alpha}$, где α — угол наклона стенки AB к горизонту.

При построении эпюр давления необходимо помнить, что ординаты γh должны всегда откладываться перпендикулярно к стенке, а глубины h — всегда по вертикали, независимо от наклона стенки.

Эюра давления на часть вертикальной стенки изображается трапецией с основаниями γh_1 и γh_2 и высотой $DE = h_2 - h_1$, где h_1 и h_2 — глубины точек D и E от свободной поверхности.



Эту трапецию легко получить из прямоугольного треугольника, построенного на линии стенки AB, если восставить из точек D и E перпендикуляры к линии AB до пересечения их с линией AC.

Эюра давления на наклонную стенку при давлении жидкости с обеих сторон изображается трапецией с основаниями:

$$AB = \frac{h_1}{\sin \alpha} \quad \text{и} \quad DE = \frac{h_1}{\sin \alpha} \quad \text{и} \quad \text{высотой} \quad EC = \gamma h_1 - \gamma h_2$$

Легко видеть, что эта результирующая эпюра давления в виде трапеции получается, как разность площадей двух эпюр: большого треугольника слева и малого справа; это вычитание на чертеже произведено геометрически.

2.4. Сила давления на плоские поверхности

Зная закон распределения гидростатического давления в жидкости, можно найти полную силу давления на ограничивающие жидкостью поверхности – стенки и дно сосуда. Эта задача сводится к определению силы давления (по значению и направлению) и нахождению точки ее приложения.

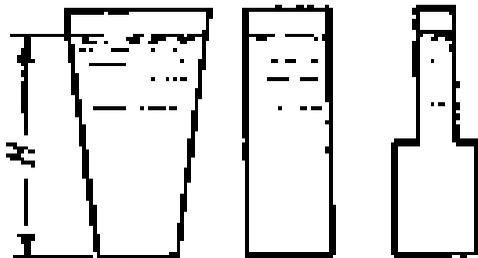
Направление силы давления определяется из свойств гидростатического давления – оно направлено под углом 90° к стенке ограничивающей жидкостью.

Значение силы давления определяется формулой $P = p \cdot S$.

Сила P , действующая на рассматриваемую площадь S , называется **силой гидростатического давления (или суммарным гидростатическим давлением)**. Сила гидростатического давления измеряется, как и все силы ньютонами [H]. Гидростатическое давление определяют по основному закону гидростатики

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

Очевидно, что давление на дно зависит не от формы и объема сосуда, а зависит от площади дна и высоты столба жидкости в сосуде. Поэтому для сосудов разной формы заполненных одной и той же жидкостью до одного и того же уровня H и имеющих одинаковую площадь дна, сила полного давления на дно будет одинакова.



Это свойство жидкости, на первый взгляд противоречащее обычным представлениям, известно под названием **гидростатического парадокса**.

В ряде случаев (прямоугольные стенки) полное давление на плоскую стенку можно определить графическим способом. Для этого отложим у основания стенки нормально к ее поверхности отрезок, равный $\rho g H$, и соединим его конец прямой линией с точкой стенки, взятой на свободной поверхности жидкости. Будет получена так называемая эпюра давления, представляющая со-

бой прямоугольный треугольник.

Полная сила давления на всю стенку определяется объемом трехгранной призмы с площадью основания равной $\rho g H \frac{H}{2}$, и высотой V .

Объем такой призмы

$$V = \rho g H^2 \frac{B}{2},$$

что совпадает с величиной полного давления R на рассматриваемую плоскую стенку. Аналогично можно найти полное давление и на другие типы плоских стенок. Так для наклонной прямоугольной стенки полное давление определяется объемом наклонной трехгранной призмы.

Сила давления жидкости на стенку кроме значения и направления характеризуется также **точкой приложения силы давления**, эта точка **называется центром давления**. Центр давления лежит на оси симметрии и для его определения остается найти только одну вертикальную координату.

2.5. Закон Архимеда. Силы, действующие на плавающее тело

Закон Архимеда гласит: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная силе тяжести жидкости в объеме этого тела.

На тело, погруженное полностью или частично в жидкость, действуют две силы:

1) сила тяжести тела $G = V g \rho_T$, приложенная в его центре тяжести C , действует сверху вниз ($\rho_T =$ **плотность тела**),

2) выталкивающая (подъемная, поддерживающая, Архимедова) сила

$R = V g \rho_{ж}$, приложенная в центре давления или, как его называют еще, в центре водоизмещения D , которая направлена снизу вверх ($\rho_{ж} =$ **плотность жидкости**).

Центром водоизмещения является центр тяжести вытесненного объема жидкости. В зависимости от соотношения сил G и R могут быть три состояния тела, погруженного в жидкость:

1) если $G > R$, а $\rho_T > \rho_{ж}$, то тело тонет;

2) если $G = R$, а $\rho_T = \rho_{ж}$, то тело находится в безраз-

личном равновесии (тело находится там куда его поместили);
 3) если $G < R$, а $\rho_T < \rho_{ж}$, то тело всплывает до тех пор, пока сила тяжести вытесненной жидкости (выталкивающая или подъемная сила R) не станет равна силе тяжести тела G .

Условия равновесия плавающего тела:

- 1) центр тяжести тела и центр давления (водоизмещения) должны лежать на одной вертикали;
- 2) $G = R$.

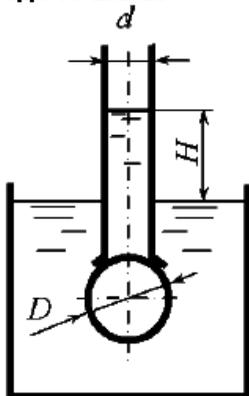
Линия пересечения свободной поверхности жидкости с поверхностью плавающего тела (например, баржи, понтона и т. п.) называется **ватерлинией**.

Глубина погружения самой низкой точки под уровень свободной поверхности называется **глубиной погружения**, или **осадкой**.

Способность плавающего тела, выведенного из состояния равновесия, вновь возвращаться в это состояние называется **остойчивостью**. В теории корабля различают два вида остойчивости: поперечную (при крене судна), когда один борт превышает другой; продольную, когда один конец судна (нос или корма) находится выше другого. Плавающее тело имеет три характерные точки:
 - центр тяжести, не меняющий своего положения по отношению к судну при любом его положении,
 - центр водоизмещения, перемещающийся при крене судна,
 - метacentр, изменяющий свое положение в зависимости от крена.

Пример решения задачи к занятию №2.

Задача 2.1.1.



Погруженный в воду полый шаровой клапан диаметром $D = 150$ мм и массой $m = 0,5$ кг закрывает входное отверстие трубы с внутренним диаметром $d = 100$ мм. При какой разности уровней H клапан начнёт пропускать воду из трубы в резервуар?

Решение.

На шаровой клапан действует выталкивающая сила, которая является результирующей сил давления жидкости и направлена вверх:

$$P = \rho \cdot g \cdot V_K - \rho \cdot g \cdot H \frac{\pi d^2}{4}$$

В данном выражении первое слагаемое является результирующей сил давления жидкости на клапан при условии $H = 0$. Эта сила направлена вверх. В этом слагаемом V_K - объём шарового клапана:

$$V_K = \frac{\pi D^3}{6}$$

Второе слагаемое - это сила давления столба жидкости высотой H , она направлена вниз. Клапан начнет пропускать воду, когда вес клапана уравновешивается силой P :

$$G = P$$

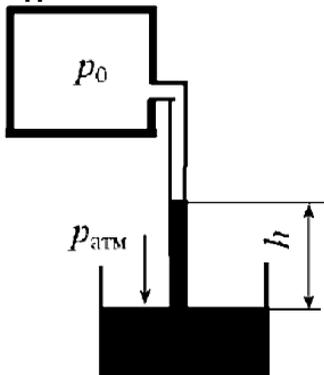
$$m \cdot g = \rho \cdot g \cdot \frac{\pi D^3}{6} - \rho \cdot g \cdot H \frac{\pi d^2}{4}$$

отсюда

$$H = \frac{\rho \cdot \frac{\pi D^3}{6} - m}{\rho \cdot \frac{\pi d^2}{4}} = 0,161 \text{ м.}$$

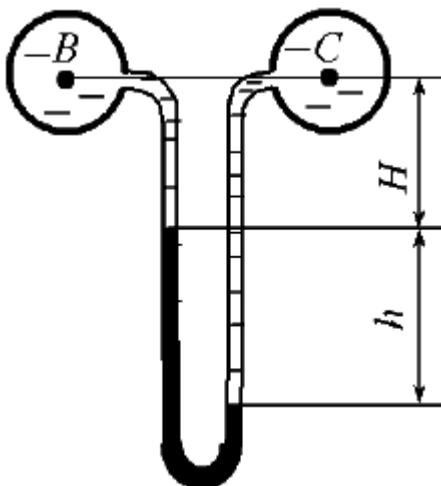
Задачи для решения на занятии

Задача 2.2.1.



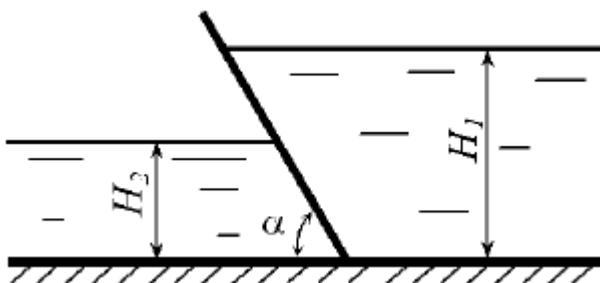
Определить абсолютное давление p_0 в закрытом резервуаре, если в трубке, присоединенной к резервуару, ртуть поднялась на $h = 0,2$ м. Атмосферное давление $p_a = 0,1$ МПа, плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Задача 2.2.2.



Абсолютное давление в трубопроводе $p_B = 1,5 \cdot 10^5$ Па. Определить избыточное давление в трубопроводе C, если оба трубопровода заполнены водой, а показание дифференциального ртутного манометра $h = 20$ см ($\rho_{рт} = 13600$ кг/м³).

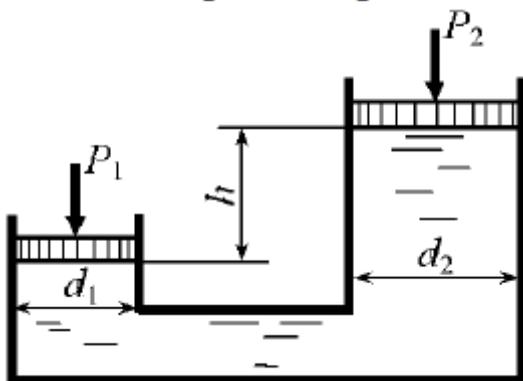
Задача 2.2.3.



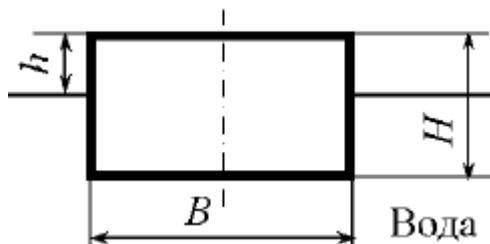
Определить равнодействующую силу и центр давления воды на наклонную прямоугольную стенку шириной $b = 10$ м, если глубины воды $H_1 = 6$ м, $H_2 = 2$ м, а угол наклона стенки $\alpha = 60^\circ$.

Задача 2.2.4.

На поршень одного из сообщающихся сосудов, наполненных водой, действует сила $P_1 = 600$ Н. Какую силу P_2 нужно приложить ко второму поршню, чтобы поршни находились в равновесии, если $h = 0,4$ м, $d_1 = 0,2$ м, $d_2 = 0,4$ м?



Задача 2.2.5.



Понтон прямоугольного сечения массой 4 т имеет следую-

щие размеры: длину $L = 10$ м, ширину $B = 3$ м, высоту $H = 1,5$ м. Определить грузоподъемность понтона при высоте надводной части борта $h = 40$ см, а также метацентрический радиус.

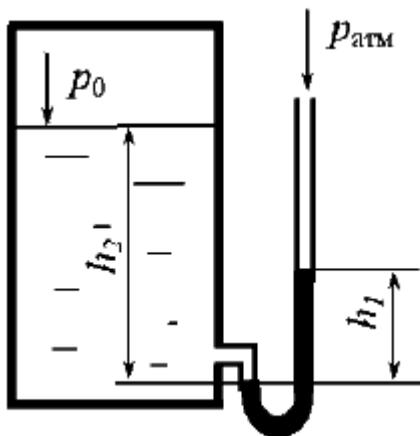
Задача 2.2.6.

Кусок льда размером $50 \times 50 \times 10$ см плавает свободно в сосуде, заполненном водой, температура которой 0 С. Относительная плотность льда $0,9$. Если лед будет таять, будет ли изменяться уровень воды в сосуде и на сколько? Объяснить почему.

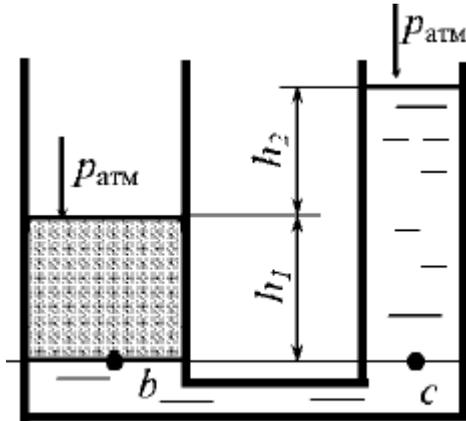
Задачи для самостоятельного решения.

Задача 2.3.1.

В закрытом резервуаре на поверхность жидкости действует поверхностное давление $P_0 = 135$ кПа. Определить показание ртутного пьезометра, присоединенного к резервуару, если глубина воды в резервуаре $h_B = 0,75$ м, относительная плотность ртути $\delta = 13,6$.



Задача 2.3.2.



В сообщающиеся сосуды налиты вода ($\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$) и бензин. Определить плотность бензина $\rho_{\text{б}}$, если высота налива воды $h_1 = 0,25 \text{ м}$, а разность уровней $h_2 = 0,10 \text{ м}$.

ЗАНЯТИЕ 3

Контрольная работа №1 по вопросам

1. Основные свойства жидкой и газообразной сред (общие и отличительные).
2. Капельные и газообразные жидкости.
3. Твердые и свободные поверхности.
4. Внутренние и внешние (массовые и поверхностные) силы.
5. Идеальная и реальная жидкости.
6. Физические свойства жидкостей и единицы их измерения.
7. Гидростатическое давление.
 8. Свойства гидростатического давления.
 9. Погрешности измерений.
 10. Основное уравнение гидростатики.
 11. Виды гидростатического давления.
 12. Пьезометрическая высота и единицы ее измерения.
 13. Вакуум и единицы его измерения.
 14. Абсолютный потенциальный напор.
 15. Поверхности равного давления.
 16. Свойства поверхностей равного давления.
 17. Формы поверхностей равного давления
 18. Приборы и методы измерения скорости и расхода жидкости.
 19. Расход объемный и расход массовый.
 20. Сила давления на ограничивающие жидкость поверхности (стенки и дно).
 21. Гидростатический парадокс.
 22. Центр давления.
 23. Графический способ определения полного давления жидкости на плоскую стенку.
 24. Основные случаи плавления тел
 25. Остойчивость и ее виды.
 26. Три характерные точки плавающего судна.
 27. Условия равновесия тела помещенного в жидкость.
 28. Приборы для измерения давления.

ЗАНЯТИЕ 4

- 4.1. Гидравлические элементы потока.
- 4.2. Уравнение неразрывности движения потока.
- 4.3. Уравнение Бернулли.

4.1. Гидравлические элементы потока

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, в гидродинамике основными элементами, характеризующими движение жидкости, будут два: гидродинамическое давление p и скорость движения (течения) жидкости u .

Картина скоростей в каждый данный момент времени в пространстве, заполненном движущейся жидкостью, называется полем скоростей, а картина давлений - полем давлений.

Гидродинамическое давление p - это внутреннее давление, развивающееся при движении жидкости. Скорость движения жидкости в данной точке — скорость перемещения находящейся в данной точке частицы жидкости, определяемая длиной пути L , пройденного этой частицей за единицу времени t .

Основной 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. Совокупность линий тока образуют элементарную струйку. **Элементарная струйка** — это совокупность линий тока, она характеризует состояние движения жидкости в данный момент времени. При установившемся движения элементарная струйка имеет следующие свойства:

- форма и положение элементарной струйки с течением времени остаются неизменными, так как не изменяются линии тока;
- приток жидкости в элементарную струйку и отток из нее через боковую поверхность невозможен, так как по контуру элементарной струйки скорости направлены по касательной;

- скорость и гидродинамическое давление во всех точках поперечного сечения элементарной струйки можно считать одинаковыми ввиду малости площади поперечного сечения

струйки.

Совокупность элементарных струек движущейся жидкости, называется **потоком** жидкости. Поток обычно ограничен твердыми поверхностями, по которым происходит движение жидкости (труба), и атмосферой (река, лоток, канал и т. в.). **Живым сечением** называется поверхность в пределах потока, проведенная перпендикулярно к линиям тока (элементарным струйкам). Площадь живого сечения обозначается греческой буквой ω (омега).

Смоченным периметром называется длина части периметра живого сечения, в пределах которой поток соприкасается с твердыми внешними стенками. Смоченный периметр обозначают греческой буквой χ (хи).

Гидравлическим радиусом называется отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

$$R = \frac{\omega}{\chi}$$

Между геометрическим радиусом: r и гидравлическим R большая разница. Рассмотрим круглое сечение трубопровода, по которому движется поток жидкости полностью заполняя его. Площадь живого сечения в этом случае будет определяться формулой:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$$

Смоченный периметр будет равняться длине окружности:

$$\chi = 2\pi d$$

Тогда гидравлический радиус определится формулой:

$$R = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{2\pi d} = \frac{d}{4},$$

а геометрический радиус равен $r = \frac{d}{2}$. Очевидно, что эти величины отличаются коренным образом.

Расходом жидкости называется количество жидкости, проходящее через живое сечение потока в единицу времени.

Расход может быть

объемный $Q = \left[\frac{m^3}{c}, \frac{m^3}{\text{час}} \right]$ ИЛИ $\left[\frac{л}{c}, \frac{л}{\text{час}} \right]$ или

массовый $M = \left[\frac{кг}{c}, \frac{т}{c} \right]$. Между этими расходами есть

связь:

$$M = Q \rho$$

Обычно пользуются объемным расходом. Расход потока жидкости обозначают - Q , а элементарной струйки - q .

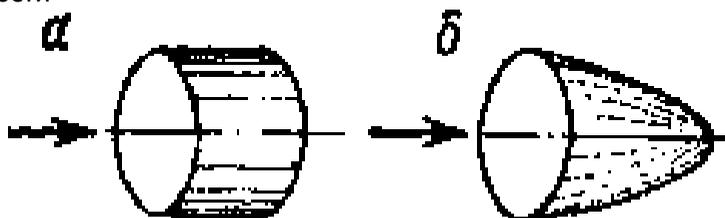
Расход жидкости в данном сечении потока

$$Q = u \Omega$$

где u - средняя скорость движения жидкости,

Ω - площадь живого сечения.

Средней скоростью потока u в данном сечении называется такая одинаковая для всех точек живого сечения скорость движения жидкости, при которой через это живое сечение проходит тот же расход Q , что и при действительных скоростях движения жидкости



Эпюры средней и действительной скоростей сильно различаются, но их площади в плане должны быть равны между собой.

Из формулы $Q = u \Omega$ можно написать $u = \frac{Q}{\Omega}$.

Эти формулы обычно используются при решении основных гидравлических задач, связанных с потоком жидкости.

Установившемся движением, называется такое движение, при котором в каждой данной точке основные элементы движения жидкости: u - скорость движения и гидродинамическое давление p не изменяются во времени. Это условие можно записать так

$$v = f_1 [x, y, z];$$

$$p = f_2 [x, y, z].$$

Установившееся движение в свою очередь подразделяется на равномерное и неравномерное.

Равномерным - называется такое установившееся движение, при котором живые сечения вдоль потока не изменяются; в этом случае $\omega = \text{const}$; средние скорости по длине потока также не изменяются, т.е. $u = \text{const}$.

Напорным называется движение жидкости, при котором поток полностью заключен в твердые стенки и не имеет свободной поверхности. Напорное движение происходит вследствие разности давлений и под действием силы тяжести. Примером

напорного движения является движение жидкости в замкнутых трубопроводах (например, в водопроводных трубах).

Следует отметить еще один вид движения: свободную струю. **Свободной струей** называется поток, не ограниченный твердыми стенками.

Плавно изменяющимся называется такое движение жидкости, при котором кривизна струек незначительна (равна нулю или близка к нулю), а угол расхождений меж струйками весьма мал (равен нулю или близок к нулю), т. е. практически поток жидкости мало отличается от параллельноструйного. Это предположение вполне оправдывается при изучении многих случаев движения жидкости в каналах, трубах и других сооружениях. Отметим следующие свойства потока при плавноизменяющемся движении:

1) поперечные сечения потока плоские, нормальные к оси потока;

2) распределение гидродинамических давлений по сечению потока подчиняется закону гидростатики, т.е. гидродинамические давления по высоте сечения распределяются по закону прямой.

3) удельная потенциальная энергия (т. е. потенциальная энергия единицы веса жидкости) по отношению к. некоторой плоскости сравнения, для всех точек данного сечения потока жидкости есть величина постоянная.

4.2. Уравнение неразрывности

Это уравнение называется уравнением неразрывности; оно является первым основным уравнением гидродинамики.

Переходя к потоку в целом, и используя понятие средней скорости, получим путём аналогии уравнение неразрывности для потока

$$v \Omega_1 = v \Omega_2 = v \Omega_n = \text{const}$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_n = \text{const}$$

Это уравнение дает соотношение, часто применяемое при практических расчетах

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

т. е. средние скорости в поперечных сечениях потока, при неразрывности движения обратно пропорциональны площади этих сечений.

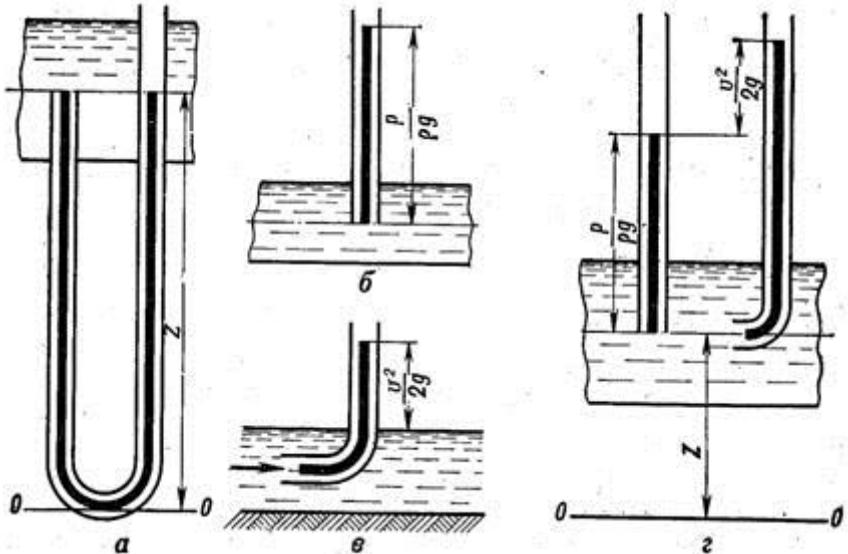
4.3. Уравнение Бернулли

Уравнение Бернулли является основным в технической гидромеханике. Оно устанавливает зависимость между скоростью и давлением в различных сечениях одной и той же элементарной струйки.

Уравнение Бернулли можно сформулировать следующим образом: для потока реальной жидкости полная удельная энергия в каждом сечении (сумма удельной энергии положения, удельной энергии давления и кинетической удельной энергии) есть величина постоянная.

Физический смысл уравнения Бернулли обычно рассматривается с двух точек зрения: **гидравлической и энергетической**. Гидравлический смысл уравнения Бернулли обусловлен тем, что жидкость обладает некоторым напором, который складывается из: геометрического напора z , пьезометрического

$h_p = \frac{p}{\gamma}$ и скоростного $\frac{v^2}{2g}$. Этот напор не является величиной постоянной, так как его значение зависит от выбора положения плоскости сравнения.



Виды напора жидкости: *а* – геометрический напор; *б* – пьезометрический напор; *в* – скоростной напор в открытом потоке; *г* – виды напора в трубопроводе. Этот напор в открытом, безнапорном русле измеряется изогнутой трубкой – трубкой Пито (рис. *в*), а в закрытом трубопроводе – при

помощи двух: пьезометрической трубки и трубки Пито (рис. 4). Разность уровней жидкости в этих трубках и характеризует скоростной напор. Таким образом, каждый член уравнения Бернулли характеризует тот или другой вид напора жидкости. Поэтому уравнение Бернулли в целом отражает полный напор жидкости H в любом живом сечении. В гидравлике для характеристики удельной энергии часто используют понятие напора. Под напором понимают энергию жидкости, отнесенную к единице силы тяжести, а не массы, как это сделано при выводе уравнения Бернулли.

Напор измеряется единицами длины $[z, \frac{p}{\gamma}, \frac{v^2}{2g}]$. При этом сла-

гаемые уравнения Бернулли $z + \frac{p}{\gamma}$ являются удельной потенци-

альной энергией в сечении потока, а величина $\frac{v^2}{2g}$ - удельной

кинетической энергией потока в сечении. Это дает возможность строить графики уравнения Бернулли. По оси абсцисс откладывают расстояния по оси струйки от некоторого сечения, принимаемого за начальное, а по оси ординат - значения составляющих напора для ряда сечений.

Таким образом, **энергетический смысл уравнения Бернулли заключается в том, что каждый член этого уравнения характеризует тот или иной вид удельной энергии, а уравнение в целом – полную удельную энергию жидкости в любом живом сечении.** Линейная размерность членов уравнения Бернулли позволяет, вычислив их значения для различных живых сечений, построить график Уравнения Бернулли (иллюстрирующий изменение видов напора по длине струйки). Напор

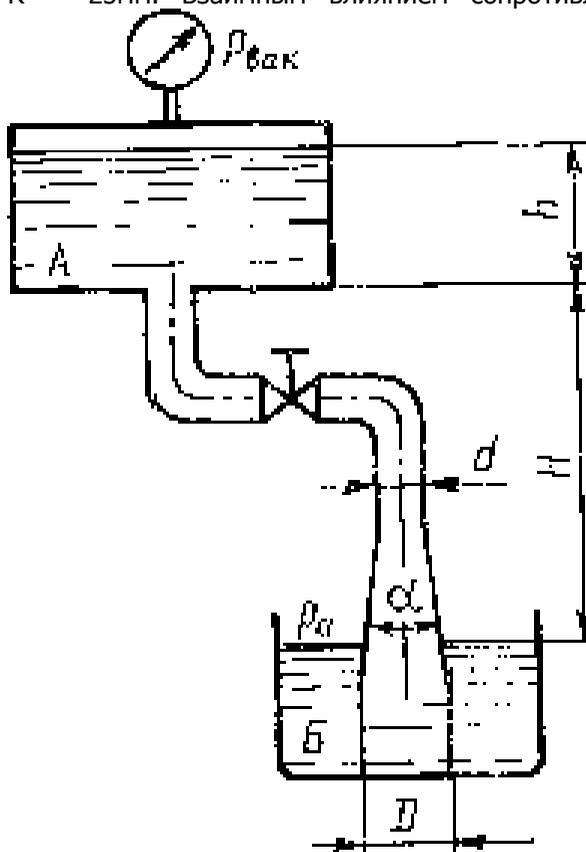
измеряется единицами длины $[z, \frac{p}{\gamma}, \frac{v^2}{2g}]$. Это дает возможность

строить графики уравнения Бернулли. По оси абсцисс откладывают расстояния по оси струйки от некоторого сечения, принимаемого за начальное, а по оси ординат - значения составляющих напора для ряда сечений.

Пример решения задачи к занятию №4. Задача 4.1.1.

Вода перетекает из бака в резервуар по трубе длиной $l = 2,5$ м и диаметром $d = 25$ мм, на которой установлены вентиль (коэффициент местных потерь = 3,5) и диффузор с углом $\alpha = 8^\circ$ и диаметром выходного отверстия $D = 75$ мм. Показание мановакуум-

метра $p_{\text{бак}} = 10 \text{ кПа}$. Уровень воды в баке $h = 2 \text{ м}$, расстояние от бака до резервуара $H = 2,5 \text{ м}$. Определить расход Q с учетом всех местных сопротивлений и трения по длине ($\lambda = 0,03$). Вход в трубу без закруглений, радиус кривизны колен $R = 25 \text{ мм}$. Взаимным влиянием сопротивлений пренебречь.



Решение:

Составляем уравнения Бернулли для сечений А-А и сечения Б-Б:

$$Z_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} = Z_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} + h_{A-B}$$

$v_A = 0$ - так как поверхность на одном уровне.

$$Z_A = H + h$$

$$p_A = p_{\text{атм}} - p_{\text{бак}} = 101325 - 10000 = 91325 \text{ Па}$$

$$Z_B = 0$$

$$h_{A-B} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi_{\Sigma} \right) \frac{v_B^2}{2g}$$

Уравнение Бернулли примет вид

$$(H + h) + \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}}{\rho g} + 0 = 0 + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} + h_{A-B}$$

$$(H + h) - \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} = h_{A-B}$$

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{диф}} + 2 \xi_{\text{пов}} + \xi_{\text{вент}} + \xi_{\text{вых}} = 5,545$$

, Т.К.

$$\xi_{\text{вх}} = 0,5 \text{ (вход без закруглений)}$$

$$\xi_{\text{диф}} = 0,125 \left(\frac{R}{d} = 1, \alpha = 90^\circ \right)$$

$$\xi_{\text{пов}} = 0,21 \left(\frac{R}{d} = 1, \varphi = 90^\circ \right)$$

$$\xi_{\text{вент}} = 3,5$$

$$\xi_{\text{вых}} = 1$$

Подставляем значения в уравнение Бернулли

$$(2 + 2) - \frac{10000}{1000 \cdot 9,81} = (0,03 + \frac{2,5}{0,025} + 5,545) \frac{v_B^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$v_B^2 = 6,844 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$$

$$v_B = 2,62 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Тогда расход $Q = v \cdot \omega = v_B \frac{\pi d^2}{4} = 1,29 \frac{\text{л}}{\text{с}}$

Задачи для решения на занятии

Задача 4.2.1.

Труба, по которой течет вода, имеет переменное сечение. Определить скорость во втором сечении, если скорость в первом сечении $v_1 = 0,05 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $d_1 = 0,2 \text{ м}$; $d_2 = 0,1 \text{ м}$.

Задача

4.2.2.

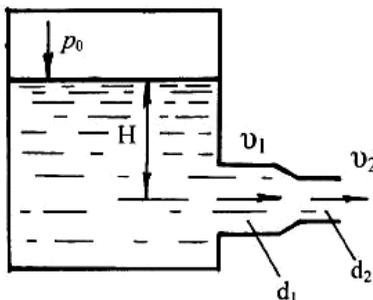
По трубопроводу диаметром $d = 150 \text{ мм}$ перекачивается нефть

плотностью $\rho = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ в количестве $1200 \frac{\text{т}}{\text{сутки}}$. Определить секундный объемный расход нефти Q и среднюю скорость ее течения u .

Задача 4.2.3.

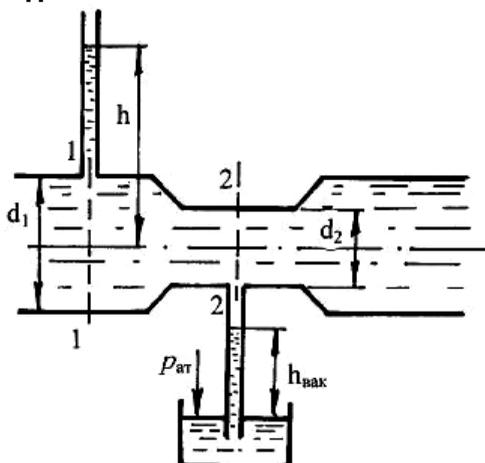
По полностью заполненному трубопроводу перекачивается жидкость со скоростью $u = 0,2$ м/с. Определить расход жидкости Q , если гидравлический радиус $R = 0,015$ м.

Задача 4.2.4.



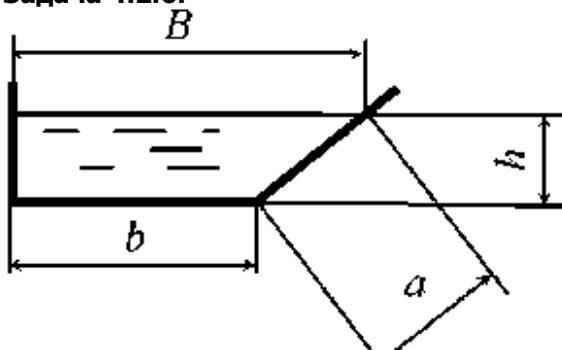
Из напорного бака вода течет по трубе диаметром $d_1 = 20$ мм, и затем вытекает в атмосферу через насадок с диаметром выходного отверстия $d_2 = 10$ мм. Избыточное давление воздуха в баке $p_0 = 0,18$ МПа; высота $H = 1,6$ м. Пренебрегая потерями энергии, определить скорости течения воды в трубе v_1 и на выходе из насадка.

Задача 4.2.5.



Определить, на какую высоту поднимется вода в трубке, один конец которой присоединен к суженному сечению трубопровода, а другой конец опущен в воду. Расход воды в трубе $Q = 0,025 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$; избыточное давление $p_1 = 49 \text{ кПа}$; диаметры $d_1 = 100 \text{ мм}$ и $d_2 = 50 \text{ мм}$. Потерями напора пренебречь.

Задача 4.2.6.

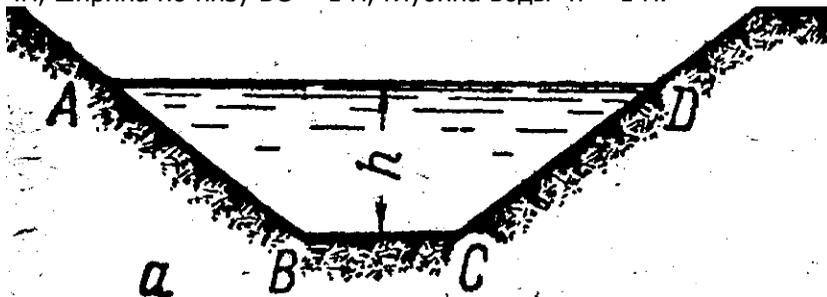


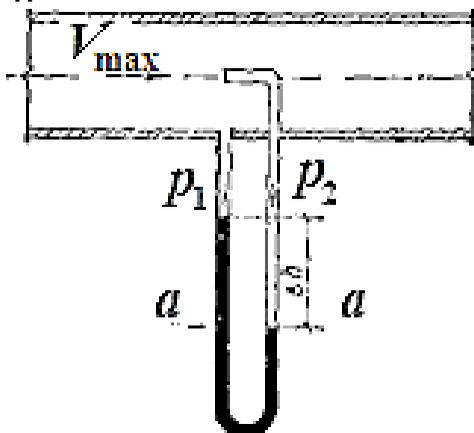
Жидкость движется в лотке со скоростью $u = 0,1 \text{ м/с}$. Глубина наполнения лотка $h = 30 \text{ см}$, ширина по верху $B = 50 \text{ см}$, ширина по низу $b = 20 \text{ см}$. Определить смоченный периметр, площадь живого сечения, гидравлический радиус, расход.

Задачи для самостоятельного решения.

Задача 4.3.1.

Определить смоченный периметр, живое сечение и гидравлический радиус канала трапецеидального сечения, имеющего следующие размеры: ширина по верху водной поверхности $AD = 4 \text{ м}$, ширина по низу $BC = 1 \text{ м}$, глубина воды $h = 1 \text{ м}$.



Задача 4.3.2.


На оси водопроводной трубы установлена трубка Пито с дифференциальным ртутным манометром. Определить максимальную скорость движения воды в трубе V_{\max} , если разность уровней ртути в манометре $\Delta h = 18$ мм.

ЗАНЯТИЕ 5

- 5.1. Режимы движения жидкостей.**
- 5.2. Число Рейнольдса и критическое число Рейнольдса.**
- 5.4. Общая формула для определения потерь напора между двумя сечениями.**
- 5.5. Потери напора на трение по длине. Уравнение Дарси-Вейсбаха.**
- 5.6. Потери напора в местных сопротивлениях.**

5.1. Режимы движения жидкостей

Одна из основных задач практической гидравлики - оценка потерь напора на преодоление гидравлических сопротивлений, возникающих при движении реальных жидкостей в различных гидравлических системах. Точный расчет этих потерь во многом определяет надежность технических расчетов, степень совершенства и экономическую целесообразность инженерных решений, принимаемых при проектировании.

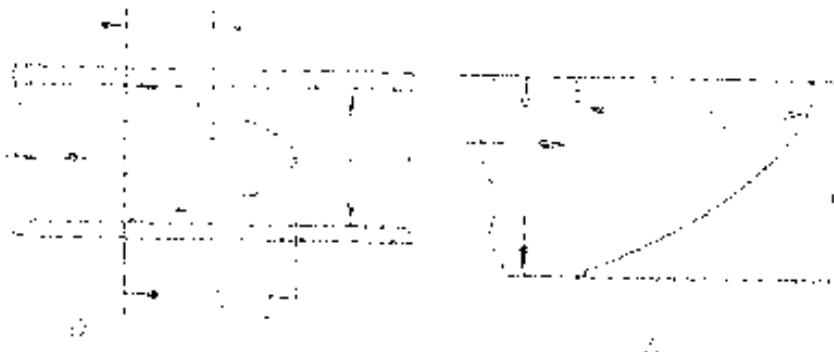
Чтобы правильно определить эти сопротивления, прежде всего необходимо составить ясное представление о механизме самого движения жидкости. При исследовании этого вопроса было сделано заключение о существовании двух различных, резко отличающихся друг от друга режимов движения жидкости. Это со всей очевидностью было подтверждено физиком Рейнольдсом на основе простых и наглядных опытов.

Движение жидкости при малых скоростях, когда отдельные струйки жидкости движутся параллельно оси потока, называют ламинарным [лат, ламина - слой], или струйчатым. Ламинарное движение можно рассматривать как движение отдельных слоев жидкости, происходящее без перемешивания частиц.

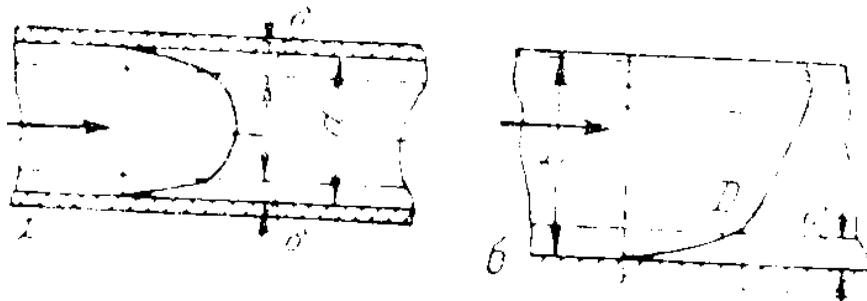
Второй вид движения жидкости, наблюдаемый при больших скоростях, называют турбулентным [лат, турбулентус - вихревой]. В этом случае в движении жидкости нет видимой закономерности.

Каждый из режимов имеет свою особенную эпюру распределения скоростей.

Для ламинарных а) закрытого и б) открытого потоков она будет иметь вид



Для турбулентных а) закрытого и б) открытого потоков она будет иметь вид



Обобщив результаты своих опытов, проведенных на круглых трубах, а также исходя из некоторых теоретических соображений, Рейнольдс нашел общие условия при которых возможны существование того или иного режима и переход от одного режима к другому. Он установил, что основными факторами определяющими характер режима являются; средняя скорость движения жидкости v , диаметр трубопровода d , плотность жидкости ρ , ее вязкость ν .

5.2. Число Рейнольдса и критическое число Рейнольдса

Для характеристик режима движения жидкости Рейнольдс ввел безразмерный параметр Re , учитывающий влияние перечисленных выше факторов, называемый числом [критерием] Рейнольдса.

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

В настоящее время при расчетах принято исходить только из одного критического значения числа Рейнольдса - $Re =$

2300. При $Re < 2300$ режим считается ламинарным, а при $Re > 2300$ - всегда турбулентным. При этом движение жидкости в неустойчивой зоне исключается из рассмотрения, что приводит к некоторому запасу и большей надежности в гидравлических расчетах. Без особого расчета могут быть получены значения Re для сечения любой формы (не только круговой). Имея в виду, что при круговом сечении гидравлический радиус равен $R = \frac{d}{4}$, подставим в формулу

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

вместо d его значение, равное $4R$. Тогда получим формулу для числа Рейнольдса, выраженного через гидравлический радиус

$$Re = \frac{v 4R}{\nu}$$

откуда

$$\frac{Re}{4} = \frac{vR}{\nu}$$

Принимая по-прежнему для критического значения числа Рейнольдса независимо от формы живого сечения $Re_{кр.} = 2300$, находим, что для сечения любой формы критерием для суждения о характере режима движения является величина, равная

$$\frac{2300}{4} = 575.$$

Таким образом, если

$$\frac{vR}{\nu} < 575, \quad \text{режим ламинарный,}$$

если

$$\frac{vR}{\nu} > 575, \quad \text{режим турбулентный.}$$

Критическая скорость Рейнольдса — величина средней скорости потока, соответствующая критическому числу Рейнольдса при данных условиях.

5.3. Общая формула для определения потерь напора между двумя сечениями

В уравнении Бернулли для потока реальной жидкости есть слагаемое

h_{n-n+1} , которое учитывает все потери, возникающие при

движении потока от одного сечения до другого (от n -го до $n + 1$). Эта величина определяется по формуле

$$h_{n-n+1} = h_{дл} + \Sigma h_{м.с.},$$

где

$h_{дл}$ - потери удельной энергии, возникающие по длине трубопровода,

$\Sigma h_{м.с.}$ - сумма всех местных потерь удельной энергии, возникающих в местах, где поток меняет или направление, или величину, или одновременно и направление и величину.

Считается, что потери энергии преобразуются в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающей среде.

5.4. Потери напора на трение по длине. Уравнение Дарси-Вейсбаха

Потери по длине потока (линейные потери) обычно обозначаются $h_{дл}$.

Это затраты удельной энергии потока (напора) на преодоление сопротивления трению:

- трению потока о стенки трубопровода, связанные с шероховатостью,

- трение струек друг о друга, связанного с вязкостью.

Эти потери определяются по формуле Дарси-Вейсбаха.

$$h_{дл} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

где

l – длина трубопровода,

d – диаметр трубопровода, когда трубопровод не круглый, то необходимо воспользоваться гидравлическим радиусом R ,

u - скорость потока в конечном сечении трубопровода.

λ - коэффициент гидравлического трения, чаще определяемый теоретически. Ниже приводятся наиболее простые из известных формул для определения коэффициента гидравлических сопротивлений. Известно несколько формул для определения λ для более точных расчетов этого коэффициента и привязанные к определенным условиям потока:

а) для турбулентного потока по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

б) для ламинарного потока

$$\lambda = \frac{64}{Re},$$

где Re – число Рейнольдса, определяемое по формуле

$$Re = \frac{\vartheta d}{\nu};$$

ν - коэффициент кинематической вязкости.

u - средняя скорость потока в трубопроводе в конечном-последнем сечении,

d - диаметр трубопровода, если трубопровод не круглый пользуются

гидравлическим радиусом, $4R = D$, где

$$R = \frac{\omega}{\chi} = (м)$$

ω - площадь живого сечения трубопровода,

χ - смоченный периметр.

5.5. Потери напора в местных сопротивлениях

При движении реальной жидкости по водотoku кроме потерь на трение по длине потока могут возникать и местные потери напора.

Причиной последних являются разного рода конструкционные вставки – конструктивные элементы гидравлической системы, необходимость которых вызвана условиями проекта сооружения, а также его эксплуатации.

Конструктивные элементы гидравлической системы (они же местные сопротивления) вызывают изменение потока движения жидкости:

а) по величине (запорная арматура, сужение и расширение, резкое и плавное),

б) по направлению (колесо трубопровода, гусак),

в) одновременно по значению и по направлению (воздуховоды, тройники).

В практических расчетах местные потери определяют по формуле, выражающей потерю пропорционально скоростному напору.

$$h_{м.п.} = \xi \frac{v^2}{2g}.$$

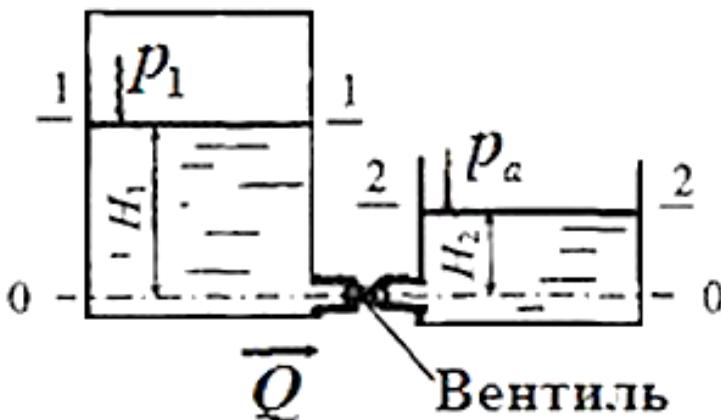
где v - средняя скорость движения жидкости в сечении потока за местным сопротивлением;

ξ - безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом местного сопротивления, его значение определяют опытным путем, для наиболее распространенных случаев его значение есть в справочной литературе.

Пример решения задачи к занятию №5

Задача 5.1.1.

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



Решение.

Перед записью уравнения Бернулли выбираем два сечения. В качестве начального сечения принимаем открытую поверхность жидкости в напорном баке и обозначаем его 1-1. В пределах этого сечения скорость жидкости мала $V_1 \approx 0$, абсолютное давление $p_1 = p_a + p_{изб}$. Конечное сечение выбираем на поверхности жидкости в сливном баке 2-2. В пределах этого сечения скорость $V_2 \approx 0$, абсолютное давление $p_2 = p_a$. В качестве произвольной горизонтальной плоскости для отсчета нивелирных высот (сечение 0-0) выбираем плоскость, совпадающую с осью трубопровода. Тогда $z_1 = H_1$, а $z_2 = H_2$. В соответствии с условием задачи учитываем только местные потери напора на вентиле h_v , тогда уравнение Бернулли принимает вид:

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

Выразим потери напора на вентиле

$$h_B = H_1 - H_2 + \frac{P_1}{g\rho} - \frac{P_a}{g\rho} = H_1 - H_2 + \frac{P_{изб}}{g\rho}$$

= 4,5 м

С другой стороны, потери напора можно определить по формуле Вейсбаха

$$h_B = \xi \frac{v^2}{2g}$$

Скорость движения жидкости выразим из уравнения неразрывности потока

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

Подставив в формулу и выразив коэффициент сопротивления, окончательно получаем:

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

Откуда можно найти коэффициент местных сопротивлений

$$\xi_B = \frac{\pi^2 d^4 g h_B}{8Q^2} = 2,2$$

Задачи для решения на занятии

Задача 5.2.1.

Определить число Рейнольдса и режим движения воды в водопроводной трубе диаметром $d = 300$ мм, если расход $Q = 0,136 \frac{м^3}{с}$. Коэффициент кинематической вязкости для воды (при $t = 10^\circ C$) $\nu = 1,306 \cdot 10 \frac{м^2}{с}$.

Задача 5.2.2.

Определить изменится ли режим движения воды в напорном трубопроводе диаметром $d = 0,5$ м при возрастании температуры воды от $15^\circ C$ до $60^\circ C$, если расход в трубопроводе $Q =$

15 $\frac{\text{л}}{\text{мин}}$.

Задача 5.2.3.

Для демонстрации изменения давления и потерь напора при внезапном расширении трубопровода необходимо спроектировать лабораторную установку. Трубопровод горизонтальный, диаметр трубы большего сечения равен 100мм. Определить:

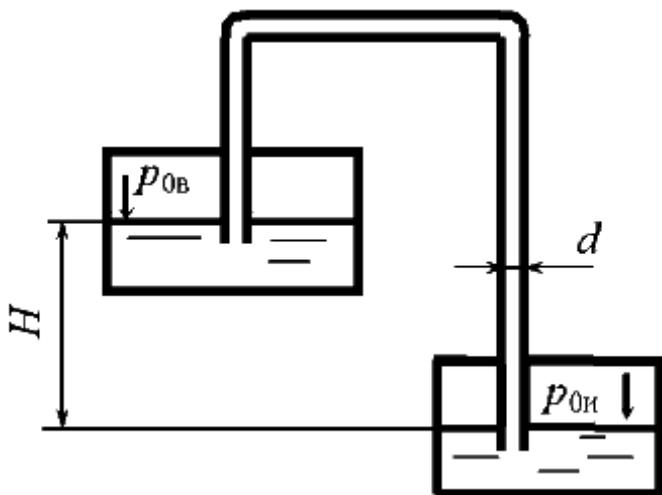
- 1) диаметр меньшей трубы d_1 , чтобы потери напора при внезапном расширении и расходе воды, равном $5000 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$, составляли 40 см,
- 2) разность давлений в сечениях, вызванную внезапным расширением.

Задача 5.2.4.

По горизонтальному трубопроводу длиной $l = 150$ м и диаметром $d = 200$ мм движется жидкость плотностью $\rho = 950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, имеющая кинематический коэффициент вязкости $\nu = 15$ сСт. Трубы бесшовные стальные, бывшие в эксплуатации. Определить среднюю по живому сечению скорость движения жидкости, если перепад давлений в начале и в конце участка трубопровода составляет $\Delta p = 12$ кПа. Местные потери напора не учитывать.

Задача 5.2.5.

По трубопроводу, соединяющему два резервуара, в которых поддерживаются постоянные уровни, перетекает жидкость плотностью $\rho = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Диаметр трубопровода $d = 50$ мм. В верхнем баке создан вакуум $P_{0в} = 30$ кПа, а в нижнем баке поддерживается избыточное давление $P_{0н} = 85$ кПа. Разность уровней в баках $H = 8$ м. Определить направление движения и расход жидкости, если коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,032$, а длина трубопровода $l = 30$ м. Местными потерями напора пренебречь.

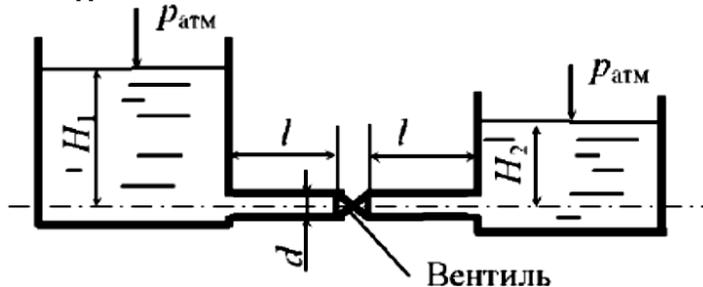


Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.3.1.

Радиатор системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания состоит из пучка трубок диаметром 8 мм, по которым протекает вода при температуре $t = 90^\circ\text{C}$. Определить минимальную допустимую среднюю скорость движения воды в трубках при условии, что режим движения должен быть турбулентным.

Задача 5.3.2.



Горизонтальная труба диаметром $d = 100$ мм состоит из двух участков и соединяет резервуары, в которых поддерживаются постоянные уровни $H_1 = 6$ м и $H_2 = 2$ м. Длина каждого участка трубопровода $l = 25$ м. Определить расход воды, если коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,025$.

ЗАНЯТИЕ 6

6.1. Истечение жидкости из отверстий и насадков.

6.2. Гидравлические струи.

6.1. Истечение жидкости из отверстий и насадков

Задача об истечении сводится к определению скорости и расхода вытекающей жидкости. При истечении жидкости рассматривается движение жидкости на коротком участке, поэтому сопротивления по длине потока очень малы и ими пренебрегают. Потери напора определяются только величиной местных сопротивлений. Расчету истечения уделяется большое внимание потому, что гидравлический расчет многих гидротехнических сооружений и устройств (шлюзов, регуляторов, водоспусков, труб под насыпями, сифонов, дюкеров, гидромониторов) проводится по формулам истечения.

Отношение площади сжатого сечения к площади отверстия называется коэффициентом сжатия

$$\epsilon = \frac{\omega_c}{\omega_{отв}}$$

Величина коэффициента сжатия находится в пределах $\epsilon = 0,60 \dots 0,64$.

Величину

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}}$$

называют коэффициентом скорости.

Скорость истечения можно определять по формуле

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

Величина живого сечения пропускающего расход жидкости будет определяться формулой

$$\omega_c = \epsilon \omega_{отв}$$

Расход через маленькое незатопленное отверстие будет определяться по формуле

$$Q = \varphi \epsilon \omega_{отв} \sqrt{2gH}$$

Где величину

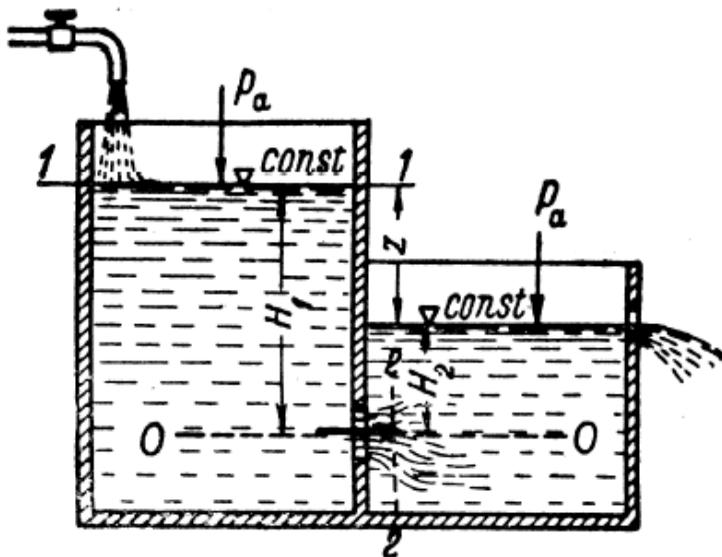
$$\epsilon \varphi = \mu$$

называют коэффициентом расхода.

$$Q = \mu \omega_{отв} \sqrt{2gH} .$$

Если истечение про- исходит не в атмосферу, а под

уровень, т.е. отверстие затоплено, то в области выхода струи из отверстия образуется сжатое сечение. Составим УБ для сечений 2-2 и сечения 1-1, совпадающих со свободной поверхностью, относительно плоскости сравнения 0-0, проходящей через центр тяжести отверстия.



$$u = \varphi \sqrt{2 g z}$$

$$Q = \varepsilon \varphi \omega_0 \sqrt{2 g z} = \mu \omega_{отв} \sqrt{2 g z}$$

Насадком называется короткая напорная труба при гидравлическом расчете, которой потери по длине не учитываются. Насадок представляет собой патрубок плотно соединенный с отверстием в тонкой стенке. Чтобы струя жидкости выходила из насадки полным сечением, смачивая весь периметр его отверстия, длина насадка должна быть в пределах $L = 3...5 D$,

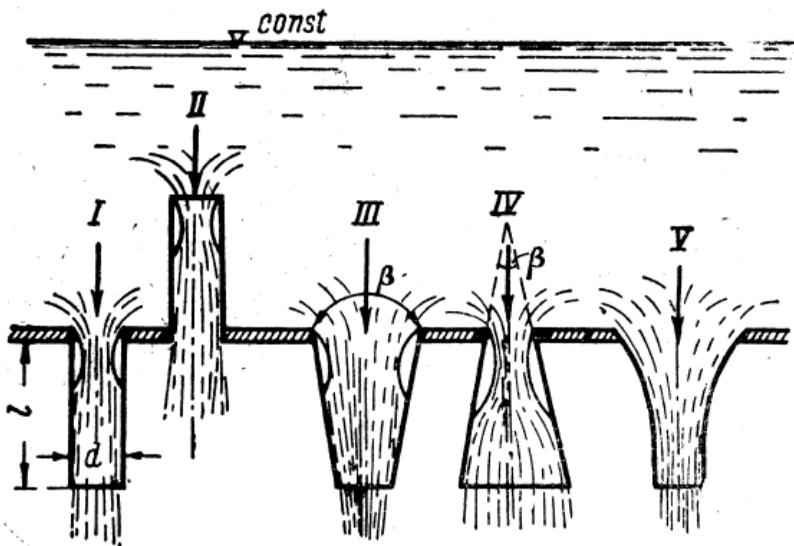
где D – внутренний диаметр насадка. Насадки влияют на коэффициенты скорости, сжатия и поэтому и на величину коэффициента расхода.

Типы насадков.

По форме различают следующие типы насадков : 1 - цилиндрические внешние (насадок Вентури), 2- цилиндрические внутренние (насадок Борда), 3 - конические сходящиеся и 4 - расходящиеся, 5 - коноидальный насадок (имеющий вид вытекающей струи).

Общие расчетные формулы для определения расхода

через насадки при постоянном напоре такие же, как и для отверстий



6.2. Свободная струя жидкости

Свободной струей жидкости называется поток, не ограниченный твердыми стенками.

Свободной струей жидкости называется поток, не ограниченный твердыми стенками.

Различают следующие виды струй.

1. Затопленные и незатопленные струи.
2. Свободные струи могут быть ламинарными и турбулентными, чаще турбулентные.
3. По форме различают осесимметричные или плоские струи.
4. Есть понятие пристенной струи, когда струя имеет одну стенку.

Пожарные и фонтанные струи. Общая высота вертикальной струи (включая распыленную часть) H_{ϕ} будет меньше напора H , под которым струя выходит из насадки, так как часть напора тратится на преодоление сопротивления струи в воздухе. Общая высота струи будет определяться по формуле:

$H_{\phi} = H / 1 + \psi H$, где ψ - коэффициент для водяных струй вычисляемый по формуле $\psi = 0,00025 / (d + 1000d^3)$, d - диаметр насадка в метрах.

В пожарном деле большое значение имеют наклонные струи, высота которых ориентировочно принимается $0,8 H_{\phi}$.

Гидромониторные струи. (Гидромонитор – аппарат для создания струй и управления их полетом с целью разрушения и смыва горных пород). Дальность боя такой струи определяется по формуле Н.П.Гавырина

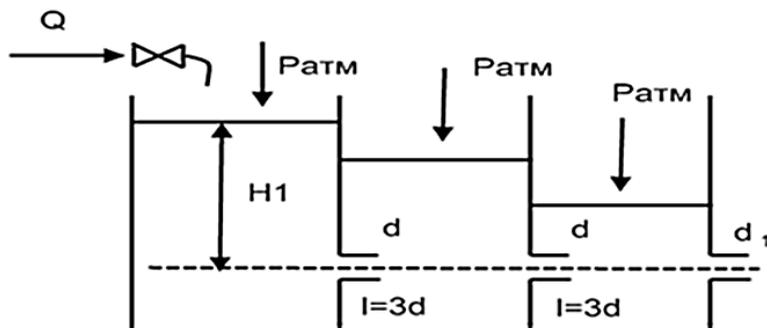
$L = 0,415 (\alpha d H^2)^2$, где α - угол наклона струи, d - диаметр насадка в мм, H - напор на выходе из насадка в м.

Дождевальные струи. Дальность полета этой струи L считают при наклоне к горизонту $\alpha = 32^\circ$. $L = 0,42 H + 1000 d$. d - диаметр насадка в м, H - напор на выходе из насадка в м.

Пример решения задачи к занятию №6

Задача 6.1.1.

В бак, разделенный перегородками на три отсека, подается жидкость Ж в количестве Q . Температура жидкости 20°C . В первой перегородке бака имеется коноидальный насадок, диаметр которого равен d , а длина $l = 3d$; во второй перегородке бака – цилиндрический насадок с таким же диаметром d и длиной $l = 3d$. Жидкость из третьего отсека через отверстие диаметром d_1 поступает наружу, в атмосферу. Определить H_1 , H_2 и H_3 уровней жидкости.



Решение задачи 6.1.1.

Расход жидкости через отверстия определяется по формулам

$$Q = \mu_1 \omega_1 \sqrt{2g (H_1 - H_2)}$$

$$Q = \mu_2 \omega_2 \sqrt{2g (H_2 - H_3)}$$

$$Q = \mu_3 \omega_3 \sqrt{2g H_3}$$

Где коэффициенты расхода $\mu_1 = 0,97$ (коноидальная

насадка), $\mu_2 = 0,80$ (цилиндрическая насадка), $\mu_3 = 0,62$ (круглое отверстие).

Сначала определяем и рассчитываем

$$H_3 = \frac{8Q^2}{g \mu_3^2 (\pi d_1^2)^2} = 11,3 \text{ м}$$

Затем определяем

$$H_2 - H_3 = \frac{8Q^2}{g \mu_2^2 (\pi d_2^2)^2} = 2,87 \text{ м}$$

Так же определяется

$$H_1 - H_2 = \frac{8Q^2}{g \mu_1^2 (\pi d_1^2)^2} = 1,89 \text{ м}$$

Очевидно, что

$$H_1 = 11,3 + 2,87 + 1,89 = 16,06 \text{ м}$$

$$\text{Тогда } H_2 = 14,17 \text{ м, } H_3 = 11,3 \text{ м.}$$

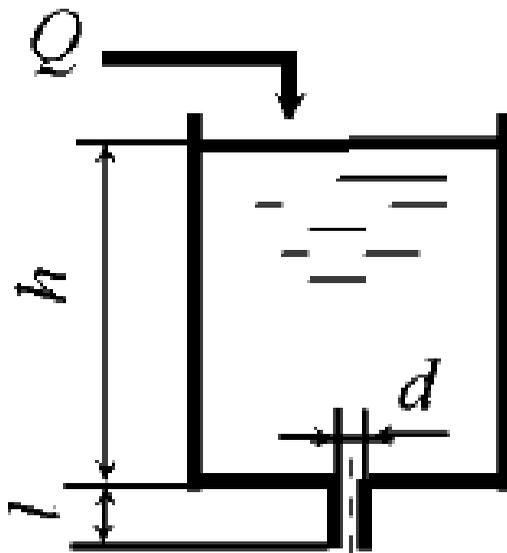
Задачи для решения на занятии

Задача 6.2.1.

Через отверстие в тонкой стенке вода втекает в бак, имеющий объем $W = 1,90 \text{ м}^3$. Площадь отверстия $\omega = 20 \text{ см}^2$. Напор над центром отверстия $H_1 = 0,90 \text{ м}$. Определить время t наполнения бака. При каком напоре H_2 бак наполнится в 2 раза быстрее.

Задача 6.2.2.

Вода вытекает из открытого резервуара через внешний цилиндрический насадок диаметром $d = 3,2 \text{ см}$ и длиной $l = 16 \text{ см}$ в атмосферу при $h = 55 \text{ см}$. В резервуар поступает вода с расходом Q . Определить глубину воды в резервуаре, если насадок заменить отверстием того же диаметра.



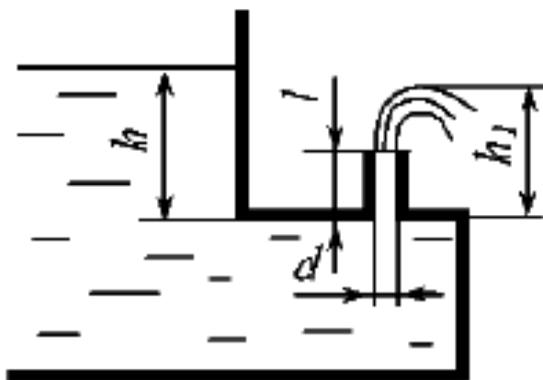
Задача 6.2.3.

Вода вытекает в атмосферу через установленный, на боковой поверхности закрытого резервуара насадок диаметром $d = 6$ см. Избыточное давление на свободной поверхности

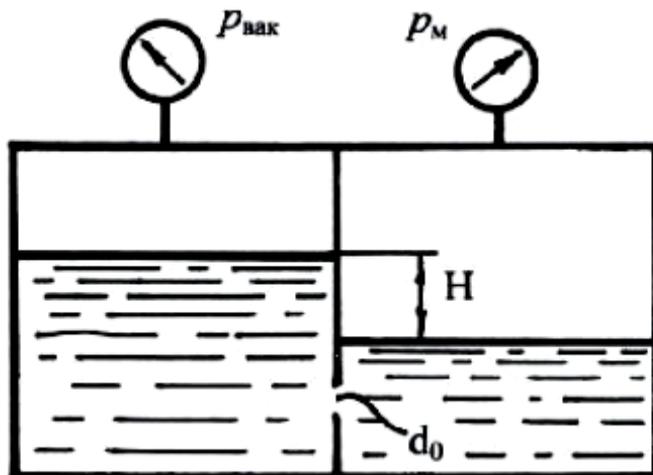
жидкости $P_{\text{ои}} = 6,1$ кПа, расход жидкости $Q = 5$ л/с, глубина погружения насадка $H = 90$ см. Определить коэффициент расхода насадка.

Задача 6.2.4.

Определить расход воды через вертикально установленный внешний цилиндрический насадок, если диаметр насадка $d = 2$ см, длина насадка $l = 10$ см. Глубина расположения входного отверстия насадка $h = 1,0$ м.


Задача 6.2.5.

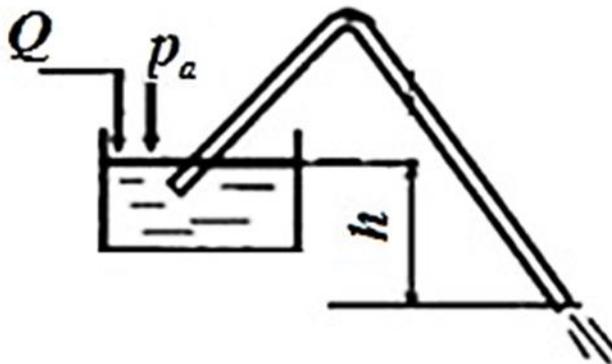
Определить направление истечения жидкости с плотностью $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ через отверстие $d_0 = 5 \text{ мм}$ и расход, если разность уровней $H = 2 \text{ м}$, показания вакуумметра соответствуют 147 мм.рт.ст., показания манометра $h_M = 0,25 \text{ Мпа}$, коэффициент расхода отверстия $\mu = 0,62$.



Задачи для самостоятельного решения

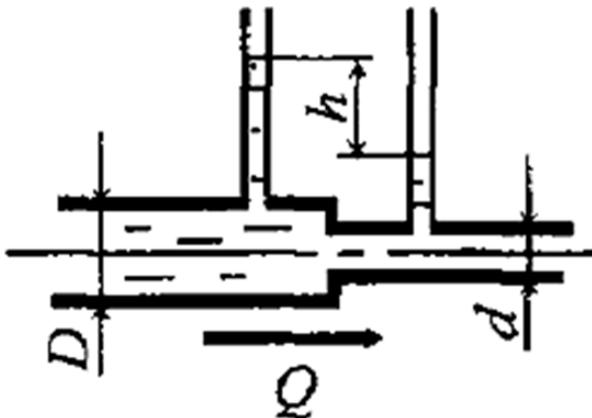
Задача 6.3.1.

Определить скорость движения бензина V и расход Q в сифонном трубопроводе. Нижняя точка оси трубопровода расположена ниже уровня жидкости в питающем резервуаре на расстоянии $h = 2,5$ м. Внутренний диаметр трубопровода $d = 25$ мм, плотность бензина $\rho = 850$ кг/м³. Потерями напора пренебречь.



Задача 6.3.2.

По горизонтальной трубе переменного сечения протекает нефть с расходом $Q = 1,3$ л/с. Определить разность показаний пьезометров h , если диаметр трубопровода в широком сечении $D = 10$ см, а в узком $d = 5$ см. Плотность нефти $\rho = 850$ кг/м³. Потерями напора пренебречь.



ЗАНЯТИЕ 7

7.1. Основные формулы для расчета трубопроводов.

7.2. Гидравлический удар в трубопроводах

7.1. Основные формулы для расчета трубопроводов

В зависимости от геометрической конфигурации и способов гидравлического расчета различают простые и сложные трубопроводы.

Простым трубопроводом называется трубопровод, состоящий из одной линии труб с постоянным расходом и передающий жидкость из резервуара в атмосферу или в другой резервуар (диаметр труб по длине может быть разным).

Сложные трубопроводы состоят из системы (сети) труб. Сложный трубопровод, состоящий из основной магистрали и ряда отходящих от нее ответвлений. Сложные трубопроводы подразделяются на следующие основные виды.

Основные задачи при проектировании трубопроводов.

Гидравлический расчет простого трубопровода обычно сводится к решению одной из трех основных задач.

1. Требуется определить напор H , необходимый для пропускания заданного расхода жидкости Q , по заданному трубопроводу длиной L и диаметром d .

Задача решается использованием формулы

$$H = \frac{v_2^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right)$$

С предварительным определением средней скорости

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

Тогда искомый напор будет

$$H = \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right)$$

Определение значений коэффициентов λ и ξ в данной задаче не вызывает трудностей, т.к. число Рейнольдса известно заранее.

2. Требуется определить пропускную способность (расход) трубопровода Q ,

при условии, что известны напор H , длина трубопровода L и ее диаметр d .

Задача решается исходя из предыдущей формулы

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 g H}{(1 + \lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi)}}$$

Так как коэффициенты λ и ξ являются функциями числа Рейнольдса, которое связано с неизвестным здесь расходом Q , то решение находим методом попыток, предполагая существование квадратичного закона, при котором коэффициенты λ и ξ не зависят от числа Рейнольдса.

Когда потери напора определяют по пропорции с квадратом средней скорости.

3. Требуется определить диаметр трубопровода d при заданных расходах Q , длине трубопровода L и напоре H . Здесь используем формулу

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 g H}{(1 + \lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi)}}$$

но встречаемся с затруднениями в вычислениях, так как не только неизвестно число Рейнольдса, но по отношению к искомому диаметру d получаем уравнение высших степеней.

В связи с этим решаем задачу методом попыток, полагая в первом приближении наличие квадратичного закона сопротивления, при котором коэффициент λ является функцией только диаметра (при заданной шероховатости стенок трубы), то уравнение приводят к виду

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 g H}{(1 + f_1(d) \frac{l}{d} + \Sigma \xi)}}$$

Задаваясь рядом значений диаметра d_1, d_2, d_3 и т.д. Вычисляя по последней формуле, соответственно ряд значений расхода строим график $Q = f(d)$, из которого определяем диаметр, отвечающий заданному расходу.

Эта задача допускает множество решений, т.к. при прочих условиях диаметр одновременно определяет и потери напора: чем меньше диаметр, тем больше потери и наоборот. Поэтому при решении исходят из требований оптимальности и технической целесообразности.

Экономически наиболее выгодный диаметр.

Задача, по определению диаметра трубопровода d при заданных расходах Q , длине трубопровода L и напоре H , допускает множество решений. Т.к. при прочих условиях диаметр од-

новременно определяет еще и потери напора: чем меньше диаметр, тем больше потери и наоборот. Поэтому при решении исходят из требований оптимальности и технической целесообразности.

При меньших диаметрах - требуются меньшие капитальные затраты на сооружение трубопровода, чем при больших диаметрах. Стоимость труб, объем земляных работ, работ по укладке труб. Но уменьшение диаметра это увеличение потерь и соответственно увеличение мощности насосов и двигателей. Экономически наивыгоднейший диаметр должен соответствовать наименьшей полной стоимости трубопровода и от расходов на сооружение насосных станций и эксплуатационных расходов. По формуле В.С. Яблонского

$$d_{з.н.} = 1,12 \sqrt[2]{Q}$$

При расчетах трубопроводов принимают, что наивыгоднейший диаметр обычно соответствует скорости течения 1 м\с.

7.2. Гидравлический удар. Общие понятия

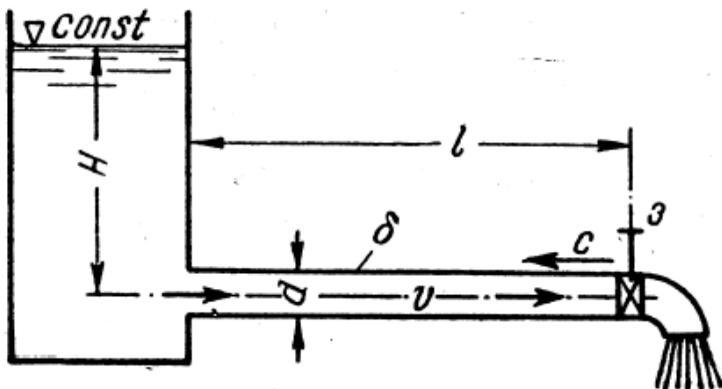
Гидравлическим ударом называется резкое изменение давления в напорном трубопроводе, вследствие внезапного изменения скорости движения жидкости в нем.

Гидравлический удар может иметь место при быстром закрытии задвижки на напорном трубопроводе, при внезапной остановке насосов или турбин и т.д. В этом случае происходит значительное повышение давления вследствие быстрого уменьшения скорости в трубопроводе. Такой гидравлический удар, характеризующийся повышением давления носит название **положительного удара**. Повышение давления при положительном **Г.У.**, может во много раз превышать нормальное давление в трубопроводе, что может стать причиной аварии трубы. Особо опасен **Г.У.** в длинных трубопроводах, в которых движутся большие массы жидкости с большими скоростями.

Г.У. может иметь место при быстром открытии задвижки на напорном трубопроводе. В этом случае происходит значительное понижение давления в трубопроводе, в результате резкого увеличения скорости. Такой гидравлический удар, характеризующийся резким понижением давления, носит название **отрицательного удара**. Понижение давления, при отрицательном **Г.У.** может вызвать в трубопроводе нежелательный вакуум.

Основные формулы для расчета положительного гидравлического удара.

Рассмотрим прямолинейный горизонтальный трубопровод длиной L и диаметром d . Один конец подсоединен к питающему резервуару с постоянным уровнем $H = \text{const}$, а другой конец заканчивается задвижкой.



Если внезапно прикрыть задвижку, то перед ней в результате внезапного резкого уменьшения скорости движения жидкости возникнет повышенное давление. Пусть p и u – давление и скорость в трубопроводе перед задвижкой до гидравлического удара, то есть при открытой задвижке. Давление и скорость обозначим p_1 и u_1 (перед задвижкой при Г.У., который произойдет при резком закрытии задвижки).

В этом случае повышение давления в трубопроводе составит

$$\Delta p = p_1 - p,$$

γ - объемный вес,

c - скорость распространения ударной волны.

Очевидно, что максимальное повышение давления при гидравлическом ударе имеет место при уменьшении скорости жидкости до нуля (при $u_1 = 0$), то есть

при полном и внезапном закрытии задвижки. В этом случае повышение давления в трубопроводе определяется по формуле:

$$\Delta p = \frac{v \gamma c}{g}$$

Для воды наибольшее повышение давления в трубе при гидравлическом ударе, выражают в м.вод.ст., т.е. пьезометрической высотой

$$\Delta p = \frac{v \gamma c}{g}$$

Для определения повышения давления при Г.У. необходимо знать скорость распространения ударной волны c .

При внезапной остановке движения жидкости повышенное давление, возникшее первоначально перед задвижкой, распространяется далее по трубопроводу против течения со скоростью c , названной скоростью распространения ударной волны. Эта скорость была установлена Жуковским Н.Е., она зависит от рода жидкости, материала трубы, диаметра трубы, толщины стенок и определяется

$$c = \frac{2\sqrt{k}}{2\sqrt{1 + \frac{d k}{\delta E}}}, \text{ м/сек}$$

k - модуль упругости жидкости ($\frac{\text{КГ}}{\text{М}^2}$),

ρ - плотность жидкости ($\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$),

d - внутренний диаметр трубы (м),

E - модуль упругости материала трубы ($\frac{\text{КГ}}{\text{М}^2}$),

Для воды выражение $\frac{2\sqrt{k}}{\sqrt{\rho}} = 1435 \text{ м/сек.}$

Следовательно, для случая, когда по трубопроводу движется вода, скорость распространения ударной волны будет

$$c = \frac{1435}{2\sqrt{1 + a \frac{d}{\delta}}}, \text{ м/сек}$$

Где $a = \frac{k_{\text{ВОДЫ}}}{E}$

Этой формулой в гидротехнике пользуются для определения скорости распространения ударной волны в напорных трубопроводах в ГТС.

Значение модуля упругости воды, нефти и т.д. определяются по справочной литературе.

Очевидно, что с увеличением диаметра трубы скорость распространения ударной волны уменьшается. Значит, что в трубах больших диаметров явление гидравлического удара проявляется слабее, по сравнению с трубами малых диаметров.

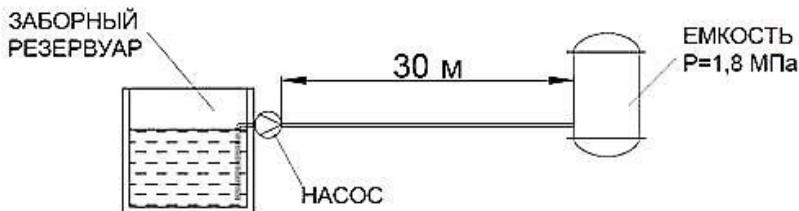
Также известно, что значение c будет для деревянных трубопроводов меньше, чем у металлических, значит для деревянных трубопроводов Г.У. менее опасен.

При предварительных приближительных расчетах скорость распространения ударной волны в воде, текущей в металлических трубах, принимается равной $c = 1000$ м/сек, (скорость распространения звука в воде $= 1435$ м/сек).

Пример решения задачи к занятию №7

Задача 7.1.1.

Каковы потери напора на местные сопротивления в горизонтальном трубопроводе диаметром 20x4 мм, по которому из открытого резервуара насосом перекачивается вода в реактор с давлением 1,8 бар? Расстояние между резервуаром и реактором составляет 30 м. Расход воды составляет 90 м³/час. Общий напор равен 25 м. Коэффициент трения принять равным 0,028.



Решение:

Скорость потока воды в трубопроводе равна:

$$v = (4 \cdot Q) / (\pi \cdot d^2) = ((4 \cdot 90) / (3,14 \cdot [0,012]^2)) \cdot (1/3600) = 1,6 \text{ м/с}$$

Найдем потери напора на трение в трубопроводе:

$$H_f = (\lambda \cdot l) / (d_s \cdot [v^2 / (2 \cdot g)]) = (0,028 \cdot 30) / (0,012 \cdot [1,6]^2) / ((2 \cdot 9,81)) = 9,13 \text{ м}$$

Общие потери составляют:

$$h_n = H - [(p_2 - p_1) / (\rho \cdot g)] - H_f = 25 - [(1,8 - 1) \cdot 10^5] / (1000 \cdot 9,81) - 0 = 16,85 \text{ м}$$

На потери на местные сопротивления приходится:

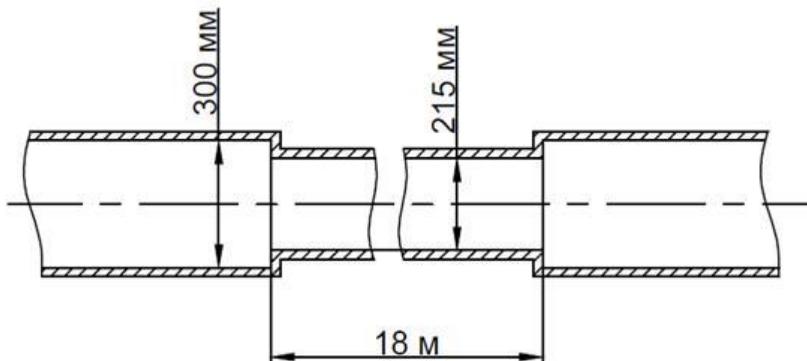
$$16,85 - 9,13 = 7,72 \text{ м}$$

Задачи для решения на занятии

Задача 7.2.1.

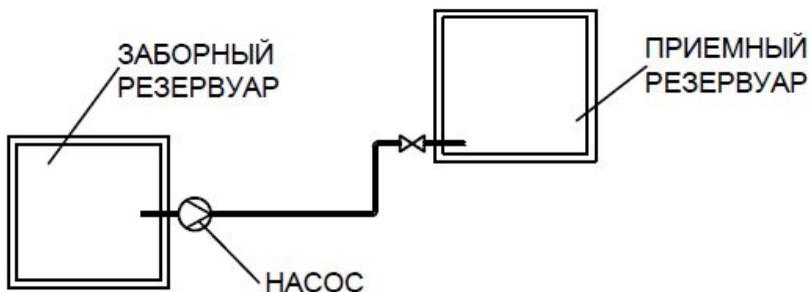
Участок прямого, горизонтального трубопровода с внутренним диаметром 300 мм подвергся ремонту путем замены участка трубы длиной 10 м трубой с внутренним диаметром 215 мм. Общая длина ремонтируемого участка трубопровода составляет 50 м. Заменяемый участок расположен на расстоянии 18 м от начала. По трубопроводу течет вода при 20 °С со скоростью 1,5 м/сек.

Необходимо выяснить как изменится гидравлическое сопротивление ремонтируемого участка трубопровода. Коэффициенты трения для труб диаметром 300 и 215 мм принять равными 0,01 и 0,012 соответственно.



Задача 7.2.2.

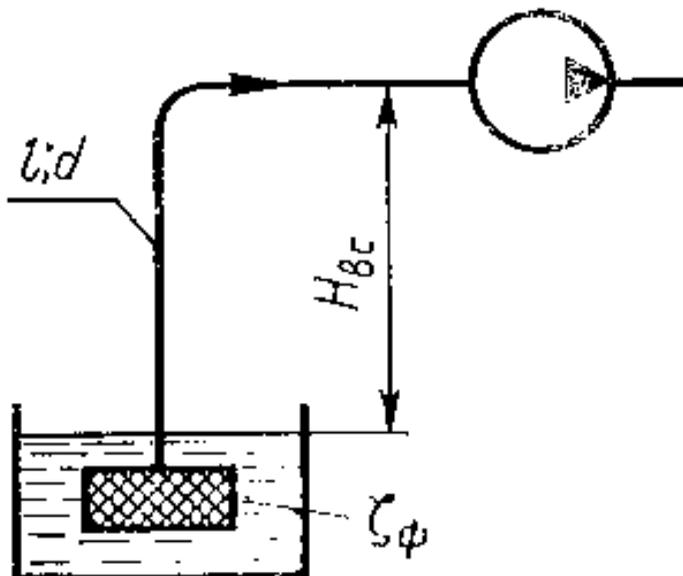
Вода перекачивается центробежным насосом по горизонтальному трубопроводу со скоростью 1,5 м/с. Общий создаваемый напор равен 7 м. Какова максимальная длина трубопровода, если забор воды идет из открытого резервуара, перекачивается по горизонтальному трубопроводу, имеющему один вентиль и два колена под 90°, и свободно изливается из трубы в другой резервуар? Диаметр трубопровода равен 100 мм. Относительную шероховатость принять равной $4 \cdot 10^{-5}$.



Задача 7.2.3.

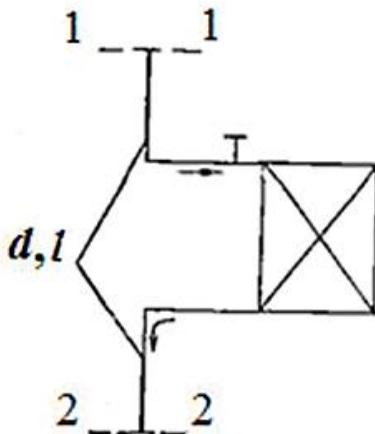
Определить максимальный расход бензина Q , который можно допустить во всасывающем трубопроводе насоса бензоколонки из условия отсутствия кавитации перед входом в насос, если высота всасывания $H_{вс}=4$ м, размеры трубопровода: $l=6$ м; $d=24$ мм; предельное давление бензина принять $p_{н.п.}=40$ кПа. Режим течения считать турбулентным. Коэффициент сопротивления

приемного фильтра $\zeta_{\phi}=2$; $H_0=750$ мм рт. ст.; $\rho=750$ кг/м³; коэффициент сопротивления трения $\lambda_T=0,03$.



Задача 7.2.4.

Расход горячей воды с температурой 95°C через радиатор водяного отопления $Q = 0,1$ м³/ч. Определить потери давления между сечениями 1-1 и 2-2, если диаметр подводящих трубопроводов $d = 0,0125$ м, а их общая длина $l = 5$ м. Принять следующие коэффициенты сопротивления: для поворота $\zeta_1 = 1,45$ для крана $\zeta_2 = 0,5$, для радиатора $\zeta_3 = 2,1$.

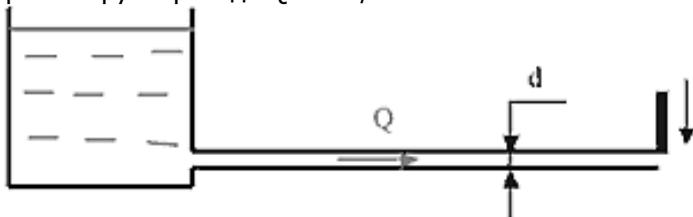


Задача 7.2.5.

Определить продолжительность закрытия задвижки на трубопроводе, если длина трубопровода $l = 800 \text{ м}$, $v = 3 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, допустимое давление в трубопроводе 1000000 Па , а гидростатическое давление $P = 200000 \text{ Па}$.

Задачи для самостоятельного решения
Задача 7.3.1.

Трубопровод, подключенный к баку с водой и имеющий $d = 50 \text{ мм}$, мгновенно закрывается. Определить скорость распространения ударной волны и величину ударного повышения давления, если толщина стенок трубы $\delta = 6 \text{ мм}$ и материал ее – сталь ($E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$). Модуль упругости воды $E_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, расход воды до закрытия трубопровода $Q = 2 \text{ л/с}$.


Задача 7.3.2.

По трубопроводу длиной $l = 0,05 \text{ км}$, диаметром $d = 62 \text{ мм}$, толщиной стенок $\delta = 5 \text{ мм}$, соединенному с баком под напором $H = 4 \text{ м}$, течет вода, модуль упругости которой $K = 2 \cdot 10^9 \text{ Па}$. В некоторый момент времени происходит мгновенное перекрытие потока в конце трубопровода. Найти скорость распространения волны гидравлического удара и величину ударного повышения давления, если труба стальная $E_c = 2 \cdot 10^{11}$. Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda = 0,03$. Как изменится ударное повышение давления, если стальную трубу заменить чугунной тех же размеров ($E_c = 0,98 \cdot 10^{11}$)?

ЗАНЯТИЕ 8

Контрольная работа по вопросам №2

1. Струйчатая модель движения потока.
2. Поле скоростей. Поле давлений.
3. Поток.
4. Установившееся и неуставившееся движение потока.
5. Линия тока и траектория движения отдельной частицы жидкости.
6. Свойства элементарной струйки при установившемся движении.
7. Площадь живого сечения потока.
8. Напорное и безнапорное движение потока.
9. Смоченный периметр.
10. Гидравлический радиус.
11. Расход потока.
12. Уравнение неразрывности расхода для элементарной струйки.
13. Равномерное и неравномерное движение потока.
14. Уравнение постоянства расхода (уравнение неразрывности).
15. Уравнение Бернулли для струйки идеальной жидкости.
16. Полный напор.
17. График уравнения Бернулли.
18. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости.
19. Отличие графика уравнения Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости от графика уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.
20. Гидравлический уклон.
21. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.
22. Экспериментальная установка для исследования уравнения Бернулли.
23. Полная потеря напора между двумя рассматриваемыми сечениями.
24. Опыты Рейнольдса.
25. Два вида движения жидкости.
26. Число Рейнольдса, критическое число Рейнольдса.
27. Экспериментальная установка для исследования режимов установившегося движения жидкости.
28. Схематизированная модель турбулентного потока.
29. Осредненная скорость. Пульсация скоростей.
30. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы (русла).

31. Понятие шероховатости. Абсолютная шероховатость.
32. Относительная гладкость. Относительная шероховатость.
33. Формула Дарси-Вейсбаха для определения потерь по длине.
34. Экспериментальная установка для определения коэффициента гидравлического трения для напорных труб.
35. Экспериментальная установка для определения величины коэффициента сопротивления трения по длине в круглой трубе.
36. Разновидности местных сопротивлений.
37. Экспериментальная установка для определения величины коэффициента сопротивления трения при местных сопротивлениях.
38. Истечение жидкости через отверстия и насадки.
39. Совершенное сжатие. Несовершенное сжатие. Неполное сжатие.
40. Траектория струи. Инверсия.
41. Виды насадков.
42. Свободные струи.
43. Фильтрация. Коэффициент фильтрации.
44. Закон Дарси основной закон фильтрации.
45. Расход скважины.
46. Кривая депрессии. Радиус фильтрации.
47. Противофильтрационные мероприятия в строительстве.
48. Простые и сложные трубопроводы.
49. Три основные задачи гидравлического расчета трубопровода.
50. Понятие гидравлического удара.
51. Борьба с гидравлическим ударом.
52. Использование явления гидравлического удара.
53. Существующие формы естественных и искусственных каналов. Геометрические элементы каналов.
54. Основные задачи гидравлического расчета открытых каналов.
55. Явление кавитации.
56. Последствия кавитации. Способы предотвращения кавитации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хансуваров К. И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: учебное пособие для техникумов. — М.: Издательство стандартов, 1990. 287 с.

2. Министерство образования Республики Беларусь и Министерство образования и науки Российской Федерации ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра «Безопасность жизнедеятельности» МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к лабораторной работе «ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ» Разработал: канд. техн. наук, доц. Мрочек В.И. Могилев, 2007.

3. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С МНОГОКРАТНЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ Москва ГОСТ 8.207-76 срок введения установлен с 01.01.77 Переиздание. Октябрь 2001 г.

4. Карелин В.С., Коноплёв Е.Н. Методическое пособие по выполнению лабораторных работ по гидравлике, гидравлическим машинам и гидроприводу Сентябрь, 2012.

5. Физические измерения в газовой динамике и при горении/ пер. с англ.,

Ч. 1 – 2. М., 1957.

6. Горлин С. М., Слезингер И. И., Аэромеханические измерения. М., 1964.

7. Попов С. Г., Измерение воздушных потоков. М.- Л., 1947.

8. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975.

9. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика: учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1972.648 с.

10. Л.С Сковрцов., и др. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: уч. пособие для вузов по напр. "Строительство". М.: Архитектура-С, 2008. 256 с.

11. Ботук Б.О. Гидравлика. М., «Высшая школа», 1962.

12. Лабораторный курс гидравлики, насосов, гидропередач/под ред. С.С. Руднева и Л.Г. Подвидза. М.: Машиностроение, 1974.

Основы гидравлики и теплотехники

13. Чугаев Р. Р. Гидравлика. 4-е изд. Л.: Энергоиздат.,1982.
14. Большаков В. А., Попов В. Н. Гидравлика: Общий курс. К.: Выща. шк., Главн. изд-во, 1989.
15. Рабинович Е. З. Гидравлика. М.: Недра, 1980.
16. Ландау Л.Д, Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. — 736 с.
17. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. В 2-х ч. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат. Ч. 1. 1992. 695 с.:Наука Ч. 2, 1967. 720 с.
18. Константинов Н. М., Петров Н. А., Высоцкий Л. И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. В 2-х частях. Ч 1: общие законы. - М.: Высшая школа, 1987. 304 с.
19. Кузьминский Р. А . Газодинамика: уч. пос. М.: РГОТУПС, 2010.