

МОДУЛЬ 11

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СТРУИ

ВВЕДЕНИЕ

Потоки жидкости или газа, не имеющие твердых границ, называются соответственно *жидкими* или *газовыми струями*.

Струи классифицируются по ряду признаков. Прежде всего, различают *затопленные* и *незатопленные* струи.

К *затопленным* относятся струи, которые движутся в жидкости, свойства которой однородны со струей, или в пространстве, занятом другой жидкостью. Струя может распространяться в движущейся жидкости или газе (в спутном или во встречном потоке).

Незатопленная жидкая струя движется в газовом пространстве, например в воздухе. Таковы струи дождевальных и пожарных установок, фонтанов, гидромониторов.

Различают также струи, движущиеся в неограниченном пространстве (*свободные струи*), и ограниченные струи, движение которых происходит в присутствии стенки (*пристенная струя*) или в тупиковой конструкции.

По форме поперечного сечения струи делят на *осесимметричные* (круглое сечение) или *плоские*.

Температура (а следовательно, и плотность, и вязкость) струи может отличаться от температуры пространства, где она движется, например при сбросе воды из тепловых или атомных электростанций в охладители – водохранилища (пруды).

Режим движения струй может быть ламинарным или турбулентным. Здесь будем рассматривать турбулентные струи как наиболее часто встречающиеся.

СХЕМА ИЗУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Тема занятия	Тип занятия	Вид (форма) занятия	Кол-во часов
1. Затопленные струи. Незатопленные струи. Динамические свойства струи.	Изучение нового материала	Лекция	2

1. ЗАТОПЛЕННЫЕ СТРУИ

При истечении в неподвижную однородную жидкость (рис. 11.1) струя постепенно расширяется. Считается, что в начальном сечении струи плоская эпюра скоростей прямоугольная. На границе струи с окружающей неподвижной жидкостью образуются вихри, поверхность струи по грани-

цам «взрыхленная». Осредненные очертания границ струи прямолинейные. На границе и вблизи нее формируется струйный *пограничный турбулентный слой*. Интенсивные пульсации скорости и перемешивание приводят к тому, что между струей и окружающей жидкостью происходит обмен количеством движения, струя под тормаживается, расширяется и одновременно увлекает с собой часть «внешней» жидкости.

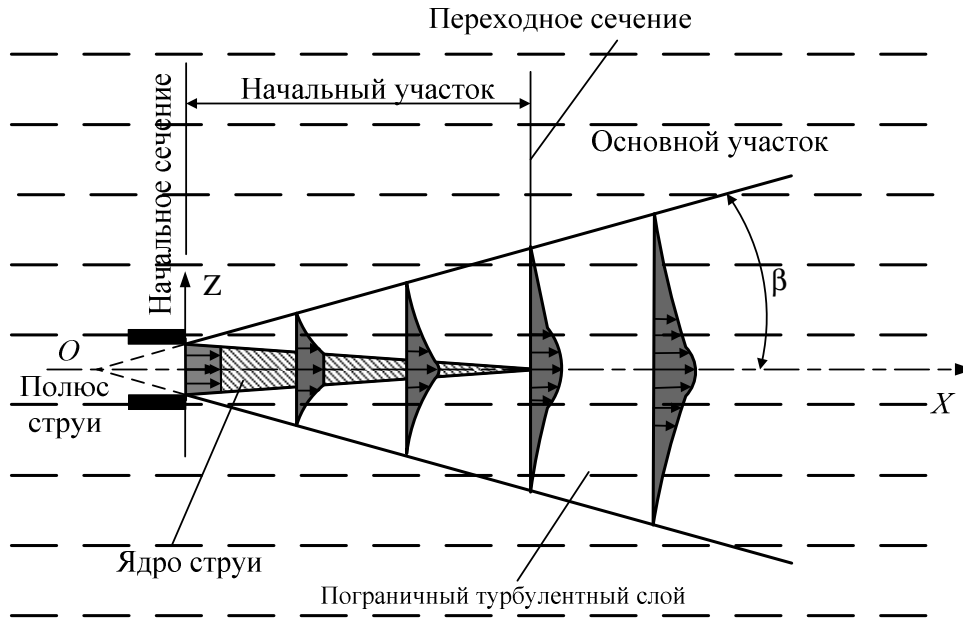


Рис. 11.1. Истечение струи в неподвижную однородную жидкость

Давление по длине струи сохраняется постоянным и равным давлению в окружающем пространстве. Количество движения струи по длине также не изменяется.

При выходе из насадка и на некотором расстоянии от него в центральной части струи существует ядро струи с постоянными осредненными скоростями. С увеличением поперечного размера пограничного слоя толщина ядра уменьшается. Затем ядро с равномерным распределением скоростей исчезает. Сечение, где это происходит, называют *переходным*, оно разделяет *начальный* и *основной участки струи*. На основном участке осевая скорость уменьшается. Если принять *угол расширения границ струи* β одинаковым на основном и начальном участках (на самом деле они несколько отличаются) и продлить внешние границы основного участка, то найдем точку их пересечения – так называемый полюс струи (точка O). Поперечные составляющие скорости в струях всегда заметно меньше, чем продольно направленные.

Расширение струи зависит от структуры и интенсивности турбулентности ϵ_0 на выходе из насадка (сопла) и от формы поперечного сечения струи.

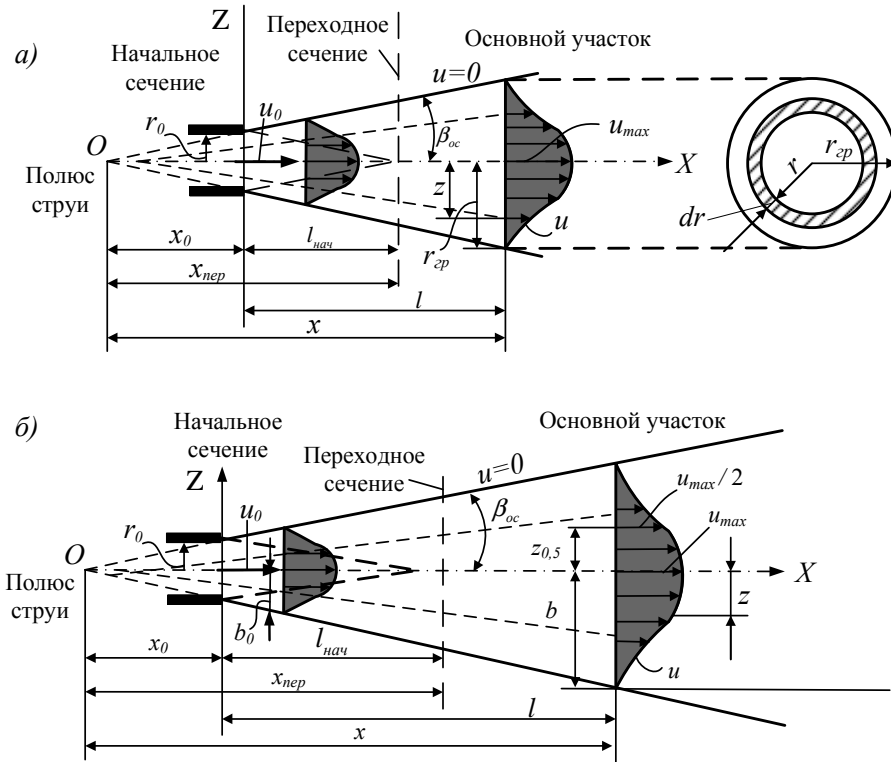


Рис. 11.2. Гидравлические струи:
 а – осесимметричная струя; б – плоская струя

Угол расширения характеризуется значениями $\operatorname{tg}\beta$, которые для осесимметричных струй (рис. 11.2, а) составляют:

$$\operatorname{tg}\beta_{oc} = 3,4a; \quad (11.1)$$

для плоских струй (рис. 11.2, б):

$$\operatorname{tg}\beta_{пл} = 2,4a, \quad (11.2)$$

где a – коэффициент, характеризующий влияние турбулентности струй на ее расширение.

При малой интенсивности турбулентности $a = 0,066 \div 0,08$, а за решетками, специально турбулизирующими поток на выходе, $a = 0,27$. В среднем для осесимметричных струй при малых ϵ_0 принимают $a = 0,07 \div 0,08$; а для плоских струй $a = 0,09 \div 0,12$.

Максимальную скорость в сечении струи (на ее оси) за пределами начального участка можно найти по формуле Г.Н. Абрамовича:

$$\frac{u_{\max}}{u_0} = \frac{0,48}{a + 0,145 d_0/l} \cdot \frac{d_0}{l}, \quad (11.3)$$

где d_0 – диаметр выходного сечения струи ($d_0 = 2r_0$).

Длина начального участка по Г.Н. Абрамовичу при $a \approx 0,07 \div 0,08$ равна $l_{нач} = (4,8 \div 4,2)d_0$.

Расстояние от полюса струи до переходного сечения:

$$x_{пер} = 0,96r_0/a; \quad (11.4)$$

а от полюса до начального сечения:

$$x_0 = 0,29r_0/a. \quad (11.5)$$

Длина начального участка струи (от начального сечения до переходного):

$$l_{нач} = x_{пер} - x_0 = 0,67r_0/a. \quad (11.6)$$

Если отсчитывать расстояния от начального сечения (рис. 11.2), то получим:

$$x = l + x_0 = l + 0,29r_0/a.$$

Геометрические параметры струи сильно зависят от интенсивности турбулентности ϵ_0 в начальном сечении. Изменяя ϵ_0 , можно изменять и эти параметры.

Диаметр осесимметричной струи в соответствии с (11.3) в любом сечении на расстоянии l от насадка при $a = 0,07$ равен:

$$d = d_0 + 0,47l. \quad (11.7)$$

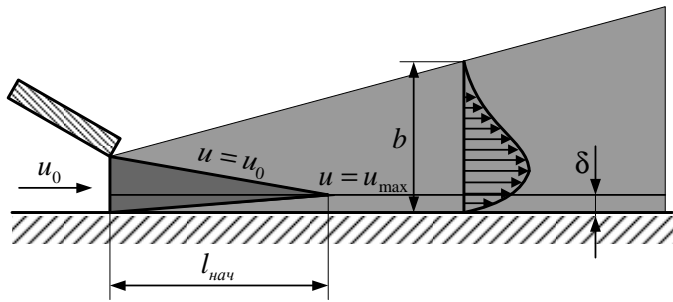


Рис. 11.3. Пристенная струя

В гидротехнике часто встречаются случаи движения струй в более сложных условиях, чем разобранные выше, например пристенные струи (рис. 11.3). Струи, вытекающие через насадок или трубу, с одной стороны ограничены твердой поверхно-

стью, например, дном, струйный поток при этом характеризуется появлением придонного пограничного слоя, где скорость распределяется по логарифмическому закону. Толщина этого слоя обозначена на рис. 11.3 как δ . Остальные обозначения известны.

2. НЕЗАТОПЛЕННЫЕ СТРУИ

Рассмотрим струю воды, вытекающую через круглое отверстие в атмосфере. Техническое применение таких струй весьма разнообразно.

В незатопленных струях различаются три части: компактную, раздробленную и распыленную (рис. 11.4).

Компактная часть струи имеет цилиндрическую или близкую к ней форму, сплошность потока здесь сохраняется. В *раздробленной части* происходит расширение струи и ее разрушение на отдельные крупные части. В *распыленной части* струя состоит из отдельных капель.

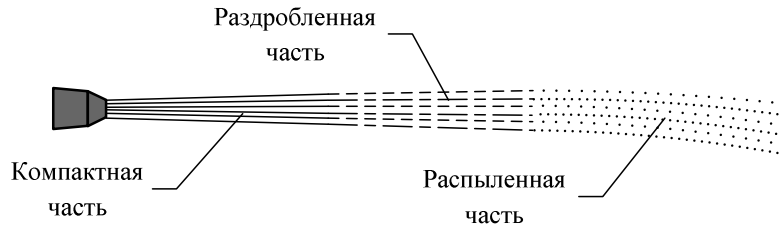


Рис. 11.4. Незатопленная струя

При полете струи на нее действуют сила тяжести, сопротивление воздуха и силы внутри струи, связанные с турбулентностью и колебательно-волновым движением жидкости в струе. Совместное действие всех этих сил приводит струю к распаду. Капли, образовавшиеся после распада, находятся под действием еще и сил поверхностного натяжения.

Рассмотрим некоторые виды струй.

Гидромониторные струи, используемые для разработки грунтов, должны иметь компактную часть максимально возможной длины, так как эта часть струи обладает необходимой мощностью. Для этого конструкция выходной части гидромонитора имеет такую поверхность, которая уменьшает начальную интенсивность турбулентности на выходе и создает возможность большего подавления внутренних колебаний струи, которые могут уменьшить устойчивость движущейся струи.

По экспериментальным данным Н.П. Гавырина установлено, что участок компактной струи гидромонитора с мощностью, необходимой для разработки грунтов, заканчивается от выходного сечения гидромонитора на расстоянии:

$$l \approx 0,415 \cdot \sqrt[3]{\theta \cdot H^2 \cdot d_0}, \quad (11.8)$$

где d_0 – диаметр выходного отверстия, мм;

H – напор перед выходным отверстием, м;

θ – угол наклона оси ствола к горизонту, град.

Формула (11.8) справедлива для $d_0 \leq 0,05$ м,

$H \leq 80$ м, $\theta = 5 \div 32^\circ$.

Высота *вертикальных струй* H_g (рис. 11.5) меньше, чем напор H на выходе из насадка. Это связано с сопротивлением окружающего воздуха движению струи. Высота компактной части струи $H_k < H_g$:

$$H_k = \beta H_g. \quad (11.9)$$

Согласно экспериментальным данным отношение $H_k/H_g = \beta$ уменьшается с увеличением H_g .

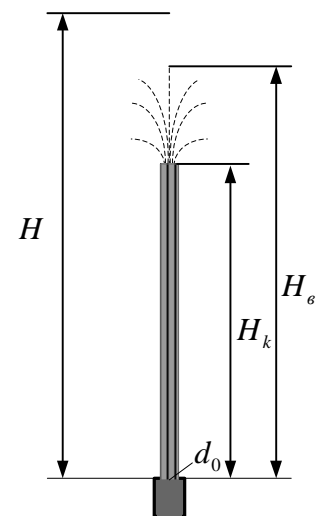


Рис. 11.5. Вертикальная струя

Запишем потери напора удельной энергии, затрачиваемой на преодоление сопротивлений при движении струи в воздухе, условно в виде:

$$h_{mp} = H - H_B \quad \text{или} \quad h_{mp} = k \frac{H_B}{d_0} \frac{v_0^2}{2g}, \quad (11.10)$$

где d_0 – диаметр выходного отверстия насадка;
 v_0 – скорость в выходном сечении насадка;
 k – коэффициент.

Так как для насадка (см. модуль 10) $v_0 = \varphi \cdot \sqrt{2gH}$ (φ – коэффициент скорости), то:

$$h_{mp} = H - H_B = k \frac{H_B}{d_0} \varphi^2 H; \quad H_B = \frac{H}{1 + \frac{k\varphi^2}{d_0} H} = \frac{H}{1 + \psi H}, \quad (11.11)$$

где $k\varphi^2/d_0$ обозначено через ψ .

Коэффициент ψ (при $\varphi \approx 1$) определяется по эмпирической формуле:

$$\psi = \frac{0.00025}{d_0 + (10d_0)^3},$$

где d_0 – в метрах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется струями?
2. Какие струи относятся к затопленным?
3. Какие струи относятся к незатопленным?
4. Какие струи относятся к свободным струям?
5. Какие струи относятся к пристенным струям?
6. Какие бывают струи по форме поперечного сечения?
7. Расскажите, как происходит формирование затопленной струи.
8. Изобразите строение затопленной гидравлической струи.
9. Запишите формулу для определения максимальной скорости в сечении струи.
10. Покажите строение незатопленной струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

МОДУЛЬ 12

СУЖАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ

СХЕМА ИЗУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Тема занятия	Тип занятия	Вид (форма) занятия	Кол-во часов
1. Объемные расходомеры. Расходомеры переменного перепада давления.	Изучение нового материала	Лекция	2
2. Конструктивные особенности сужающих устройств. Диафрагмы. Расходомерные сопла. Трубы Вентури. Расходомеры постоянного перепада давления. Ротаметры.	Изучение нового материала	Лекция	2

1. ОБЪЕМНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Для учета количества жидкости, расходуемой отдельными небольшими потребителями (жилые и общественные здания, небольшие предприятия, отдельные цеха), наибольшее распространение получили механические скоростные счетчики воды.

По конструктивному исполнению скоростные (тахометрические) счетчики жидкости подразделяют на две основные группы: крыльчатые, ось вращения крыльчатки которых перпендикулярна направлению движения жидкости, и турбинные, у которых ось вращения турбинки параллельна направлению движения жидкости.

Принцип действия скоростных счетчиков жидкости основан на измерении числа оборотов крыльчатки или турбинки, приводимых в движение потоком протекающей через счетчик жидкости. Число оборотов крыльчатки или турбинки пропорционально количеству протекающей через счетчик жидкости. Ось крыльчатки или турбинки с помощью передаточного механизма соединена со счетным механизмом, который, учитывая число оборотов, показывает количество протекающей через счетчик жидкости.

Метрологическими параметрами счетчиков воды являются пределы допускаемой погрешности в различных диапазонах измеряемых расходов и класс счетчика.

Важнейшими характеристиками счетчиков, с помощью которых можно объективно оценить их метрологические параметры, являются следующие фиксируемые значения измеряемых расходов:

Q_{\max} – максимальный расход, при котором счетчик может работать кратковременно, не более одного часа в сутки;

$Q_{\text{ном}}$ – номинальный расход, при котором счетчик может работать длительное время;

$Q_{\text{э}}$ – эксплуатационный расход, при котором счетчик может работать непрерывно в течение всего срока эксплуатации;

Q_n – переходный расход, разделяющий рабочий диапазон на два поддиапазона с различными пределами допускаемой относительной погрешности;

Q_{\min} – наименьший расход, для которого нормируется предел допускаемой относительной погрешности;

$Q_{\text{п.ч.}}$ – порог чувствительности, такой наименьший расход, при котором начинается устойчивое вращение рабочего органа счетчика.

Метрологические качества счетчиков можно оценить, используя график погрешности этих приборов (рис. 12.1).

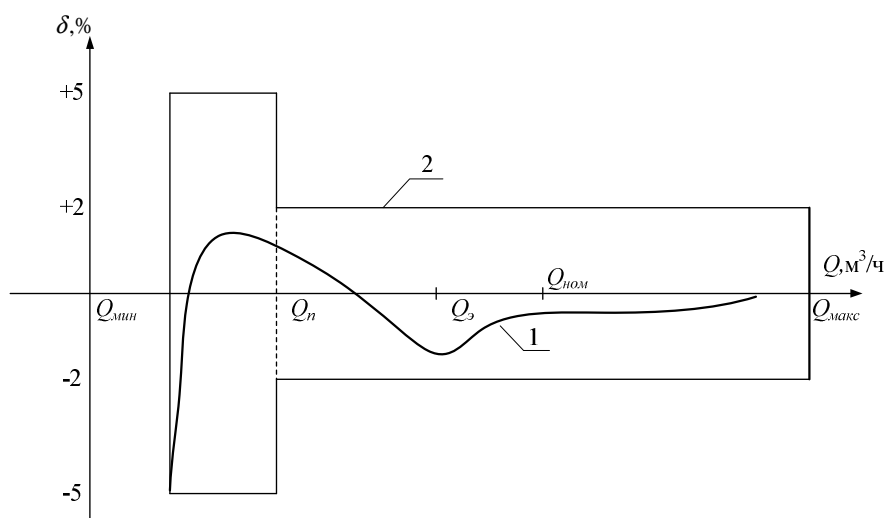


Рис. 12.1 График изменения погрешности скоростных счетчиков:
1 – фактическая погрешность; 2 – допускаемые погрешности

1.1. Крыльчатые счетчики воды

Крыльчатые счетчики воды выполняют одноструйными и многоструйными. В крыльчатом одноструйном счетчике (рис. 12.2, а) вода подводится к крыльчатке одной струей, направленной по касательной к окружности, проходящей через центры лопаток крыльчатки. В многоструйных счетчиках (рис. 12.2, б) вода с помощью направляющего аппарата

подводится к крыльчатке несколькими струйками, равномерно распределенными по ее окружности.

Одноструйные счетчики проще по конструкции, чем многоструйные, имеют меньше деталей, меньшие габаритные размеры и массу, менее требовательны к качеству жидкости, проходящей через них. Основным недостатком одноструйных счетчиков является одностороннее давление на ось крыльчатки и опорные подшипники, что приводит к более быстрому изнашиванию этих деталей.

Наличие направляющего аппарата с небольшими отверстиями у многоструйных счетчиков приводит к тому, что при засорении одного или нескольких отверстий распределение струек и их воздействие на крыльчатку меняются, что ведет к погрешностям измерения. Следовательно, многоструйные счетчики более требовательны к качеству жидкости, проходящей через них.

Крыльчатые счетчики воды подразделяются на так называемые «сухоходы» и «макроходы». Счетчики-«макроходы», по сравнению с сальниковыми «сухоходами», имеют более простую конструкцию, меньший порог чувствительности и более широкий диапазон измерений. По сравнению со счетчиками, имеющими магнитную муфту, у «макроходов» нет преимуществ в части диапазона измерений. У счетчиков-«сухоходов» счетный механизм отделен от редуктора водонепроницаемой перегородкой, а ось последней шестерни редуктора, соединяющая его со счетным механизмом, проходит через сальник. В новых типах счетчиков используется магнитная муфта (рис. 12.3).

У счетчиков-«макроходов» редуктор и счетный механизм выполнены в одном блоке, который размещается в корпусе, заполняемом водой. Циферблат счетчика-«макрохода» прикрывается толстым стеклом, которое воспринимает давление воды в трубопроводе, где установлен счетчик.

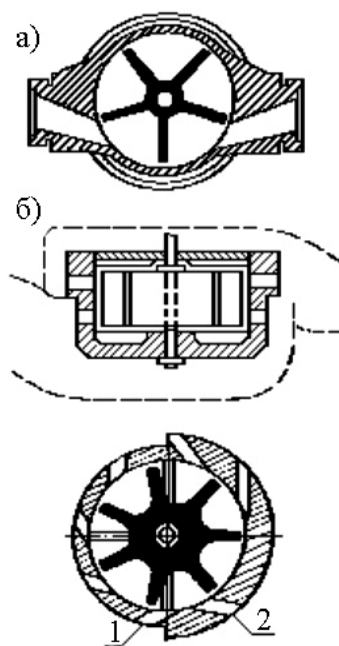


Рис. 12.2. Крыльчатые счетчики воды

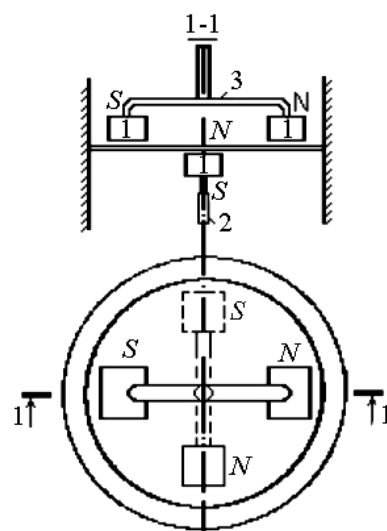


Рис. 12.3. Устройство магнитной муфты крыльчатых счетчиков воды:
1 – магнит; 2 – ведущая муфта; 3 – ведомая муфта

По допустимой максимальной температуре воды различают счетчики холодной и горячей воды. В счетчиках холодной воды, предназначенных для измерения воды с температурой до 40 °С, крыльчатка выполняется из пластмассы. В счетчиках горячей воды, применяемых для измерения воды с температурой до 90 °С, крыльчатка выполняется из латуни.

Крыльчатые счетчики ВСКМ (рис. 12.4) конструктивно состоят из трех основных блоков: корпуса с фильтром, измерительной камеры и счетного механизма.

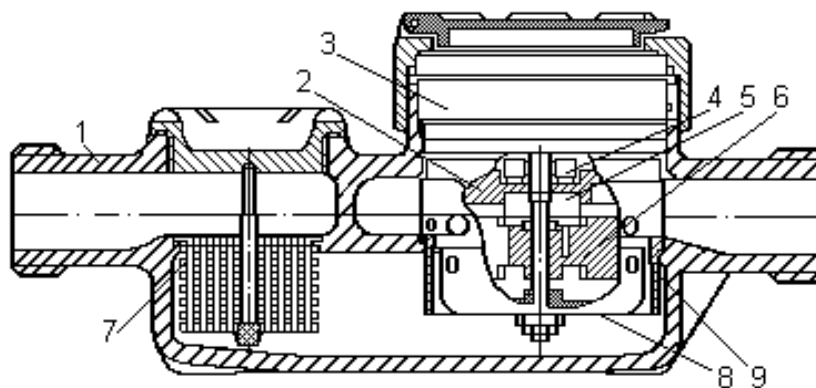


Рис. 12.4. Разрез крыльчатого счетчика воды ВСКМ:

1 – корпус; 2 – разделительный диск; 3 – счетный механизм; 4, 5 – ведомый и ведущий магниты; 6 – крыльчатка; 7 – фильтр-сетка; 8 – рабочая камера; 9 – рубашка

В корпусе, изготовленном из чугуна, находится винт для регулирования погрешности за счет пропуска части потока воды в обход измерительной камеры. Фильтр может быть снят для очистки без демонтажа счетчика с места установки.

Поток воды после фильтра подходит к нижней части измерительной камеры. Поднимаясь вверх между рубашкой и камерой, поток через косые тангенциально направленные отверстия проходит внутрь камеры, и приводит во вращение крыльчатку с закрепленной на ней ведущей половиной магнитной муфты. Опоры крыльчатки изготовлены из корунда, что обеспечивает их высокую износостойчивость. По винтовой траектории вода попадает в верхнюю часть измерительной камеры и через выходные тангенциальные отверстия отводится в выходной патрубок счетчика. Через нижнюю стенку разделительного стакана, изготовленного из немагнитного материала (латунь), вращение ведущей части магнитной муфты передается и ее ведомой части, расположенной в счетном механизме. Редуктор счетного механизма и отсчетное устройство с роликами, стрелками и сигнальной звездочкой помещены в герметизированный стакан, закрытый стеклом.

Отсчетное устройство имеет пять роликов для измерения объема воды в кубометрах и стрелочные указатели, используемые только при поверке. Сигнальная звездочка предназначена для быстрого определения работоспособности счетчика и при поверке вместе с оптоэлектронным узлом сьема сигнала.

1.2. Турбинные счетчики воды

Основной частью турбинных счетчиков воды является измерительная камера, обеспечивающая преобразование скорости потока во вращательное движение турбинки.

Измерительная камера располагается горизонтально или вертикально (рис. 12.5) в корпусе счетчика, где также встроены блок счетного механизма и регулятор.

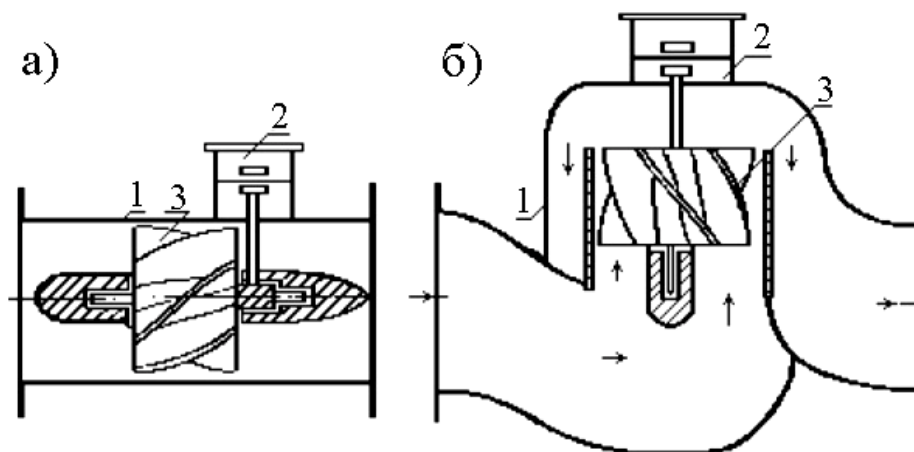


Рис. 12.5. Турбинные счетчики воды

Турбинные счетчики больших диаметров (более 100 мм) с горизонтальной измерительной камерой иногда конструируют так, что камеру со счетным механизмом можно снять без демонтажа корпуса счетчика, который остается на трубопроводе. Счетчики меньших диаметров имеют невынимающийся механизм, который можно ремонтировать, только сняв счетчик с места его установки.

Турбинные счетчики используют для измерения расходов холодной воды температурой до 40 °С. Для измерения расходов воды температурой до 90 °С применяются счетчики, в конструкции которых используются специальные термостойкие пластмассы.

Турбинные счетчики СТВ (рис. 12.6) конструктивно состоят из следующих основных частей: корпуса, измерительной камеры, счетного блока и регулятора.

Корпус счетчика выполнен из серого чугуна и представляет собой цилиндрическую отливку с фланцами для присоединения к трубопроводу.

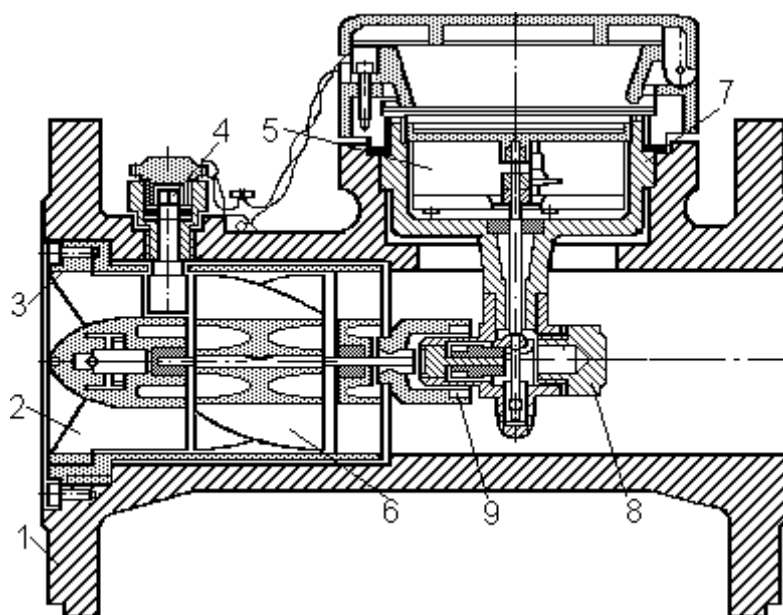


Рис. 12.6. Разрез турбинного счетчика воды:

- 1 – корпус; 2 – измерительная камера; 3 – струевыпрямитель;
 4 – регулятор; 5 – блок счетного механизма; 6 – турбинка;
 7 – чаша; 8 – заглушка; 9 – магнитная муфта

Измерительная камера устанавливается и крепится в расточке передней части корпуса и состоит из струевыпрямителя, камеры и турбинки с осью. Струевыпрямитель выполняется из полимерного материала и предназначен для выпрямления потока, поступающего на лопасти турбинки. Основными частями струевыпрямителя являются обтекатель и плоские ребра. В ступице струевыпрямителя расположена первая опора турбинки. Камера представляет собой пластмассовый цилиндрический патрубок, на торце которого расположена вторая опора турбинки, связанная с цилиндрической частью патрубка четырьмя радиальными ребрами.

Аксиальная пластмассовая турбинка с винтовыми лопастями имеет стальную ось, вращающуюся в подшипниках скольжения из графитового материала, обладающего в паре со сталью низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Торцевая опора турбинки представляет собой специальный корундовый наконечник, который при работе упирается в опору, также выполненную из корунда и встроенную в крестовину счетного блока. Блок счетного механизма, кроме крестовины, включает чашу и заглушку. В крестовине размещается коническая зубчатая передача и магнитная муфта, а в чаше расположен зубчатый конический редуктор и отсчетное устройство. Счетчики СТВ имеют стрелочно-роликовый счетный механизм и снабжены сигнальной звездочкой, являющейся индикатором вращения турбинки.

Регулятор предназначен для приведения числа оборотов турбинки в соответствие с показаниями отсчетного устройства в пределах допустимой погрешности счетчика. Регулятор представляет собой пластину, которая занимает место ребра струевыпрямителя. Поворот пластины регулятора отключает часть потока, подаваемого на турбинку в ту или другую сторону, замедляя или ускоряя вращение турбинки.

2. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Принцип измерения расхода расходомером переменного перепада давления основан на том, что в зависимости от расхода вещества изменяется перепад давления на неподвижном сужающем устройстве, установленном в трубопроводе или элементе трубопровода (колени).

Расходомеры переменного перепада давления состоят из трех элементов: сужающего устройства, дифференциального манометра для измерения перепада давления и соединительных линий с запорной и предохранительной арматурой.

Применяются следующие стандартные сужающие устройства: диафрагмы, сопла, сопла Вентури и трубы Вентури.

Теоретические основы измерения расхода с помощью сужающих устройств установленное в трубопроводе сужающее устройство (рис. 12.7) приводит к увеличению скорости в суженном сечении. В результате часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую, поэтому статическое давление в суженном сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Перепад давлений зависит от скорости движения жидкости, а следовательно, и от расхода.

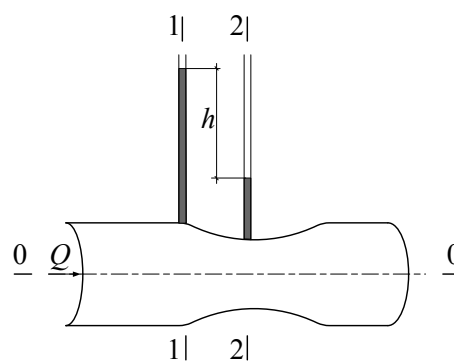


Рис. 12.7. Сужающее устройство

Для вывода основного уравнения расхода жидкости, протекающего через сужающее устройство, используется уравнение Д. Бернулли, составленное для сечений 1-1 и 2-2. Сечение 1-1 выбирается перед сужающим устройством, а сечение 2-2 в сжатом сечении. Плоскость сравнения проводится по оси трубопровода. Потери напора между сечениями не учитываются.

В этом случае уравнение Бернулли запишется следующим образом:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g}. \quad (12.1)$$

Принимая во внимание $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, используя уравнение неразрывности $v_1\omega_1 = v_2\omega_2$ и учитывая, что, решается уравнение относительно v_1 :

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = h.$$

$$v_1 = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} \cdot \sqrt{h}. \quad (12.2)$$

Теоретический расход в трубопроводе определяется по формуле:

$$Q_m = \omega_1 v_1 = \frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} \sqrt{h}, \quad (12.3)$$

$$\frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} = C \quad (12.4)$$

Тогда уравнение расхода примет вид:

$$Q_m = C\sqrt{h}, \quad (12.5)$$

где C – постоянная расходомера.

При выводе зависимости (12.5) не учитывались потери энергии, поэтому фактический расход будет меньше теоретического. Это несоответствие расходов характеризуется коэффициентом расхода:

$$\mu = \frac{Q}{Q_m}. \quad (12.6)$$

Окончательная формула для определения расхода принимает следующий вид:

$$Q = \mu C \sqrt{h} = A \sqrt{h}, \quad (12.7)$$

где A – коэффициент расхода расходомера:

$$A = \mu \cdot C. \quad (12.8)$$

3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

При измерении расхода методом переменного перепада давления используются правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами.

Стандартные (нормализованные) сужающие устройства должны отвечать требованиям этих правил и применяться для измерения расхода вещества без их индивидуальной градуировки.

3.1. Диафрагмы

При измерении расхода жидкости благодаря простоте конструкции, удобству монтажа и демонтажа широкое распространение получили диафрагмы. Стандартные диафрагмы (рис. 12.8), представляющие собой диск с отверстием, могут быть с угловым или фланцевым способами отбора перепада давления.

Конструктивно диафрагмы выполняются камерными или бескамерными. В бескамерных диафрагмах отбор перепада давления осуществляется через отверстия в трубопроводе или фланцах.

Кольцевые камеры предназначены для осреднения и выравнивания давления по периметру сечения. В результате этого повышается точность измерения. Камеры выполняют в ободах или обоймах диафрагмы. Для труб диаметром более 400 мм камеры выполняются в виде кольцевой трубки, охватывающей трубопровод.

Точность измерений расхода с помощью диафрагм существенно зависит от качества их установки и наличия перед ними участков труб расчетного диаметра без дополнительных источников возмущений (заусенцы, сварные швы, колена, тройники, запорная арматура).

Основным недостатком диафрагмы является то, что она обладает большим гидравлическим сопротивлением и вызывает значительные потери напора.

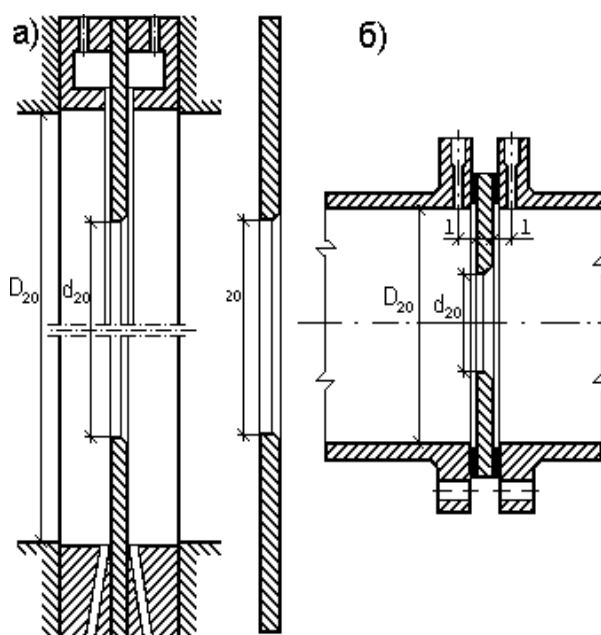


Рис. 12.8. Диафрагмы

3.2. Расходомерные сопла

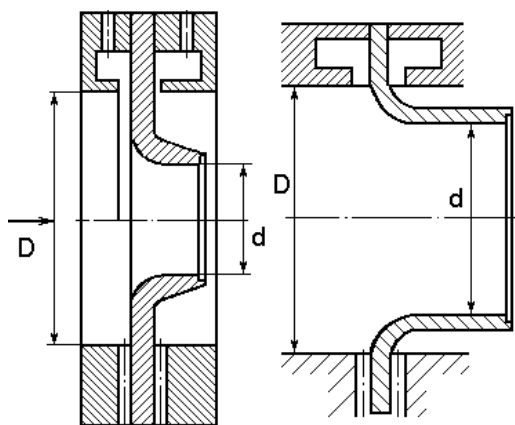


Рис. 12.9. Схемы стандартных сопел

Сопла в качестве сужающих устройств для расходомеров распространения не получили, так как потери напора в них немногим меньше, чем в диафрагмах, а изготовление их значительно сложнее.

Сужающим устройством, обладающим высокой точностью измерения расхода и не создающим больших потерь напора, является сопло Вентури.

Соплом Вентури называется сужающее устройство, входная часть которого выполнена по форме стандартного сопла, а в устье имеется конус, служащий для уменьшения потерь напора.

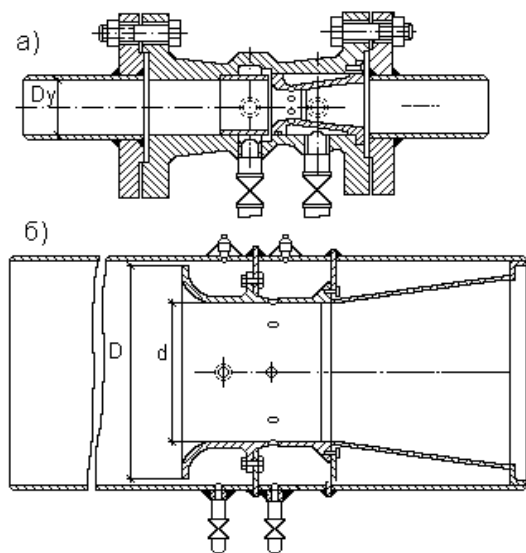


Рис. 12.10. Схема сопел Вентури:
а) первого типа; б) второго типа

Основное уравнение расхода (12.3) справедливо и для сопел. Расходомерное сопло (рис. 12.9) представляет собой устройство с круглым отверстием, имеющим плавно сужающуюся часть на входе и цилиндрическую часть на выходе.

Точность измерения расхода соплами несколько выше точности измерения диафрагмами благодаря отсутствию дополнительной погрешности на недостаточную остроту входной кромки.

В зависимости от длины и центрального угла конуса различают длинные и укороченные сопла Вентури. В системах водоснабжения и канализации чаще используются укороченные сопла Вентури. Сопла Вентури изготавливают двух типов (рис. 12.10).

Первый тип предназначен для труб условным проходом от 50 до 200 мм, выполняют из цветных металлов и чугуном корпусом. Второй тип предназначен для труб условным проходом от 250 до 1400 мм, выполняют из чугуна, покрытым антикоррозионным корпусом без фланцев.

При установке сопла Вентури необходимо соблюдать соосность трубы и сопла. Вблизи сопла Вентури должны отсутствовать источники, приводящие к искажению потока.

3.3. Трубы Вентури

Трубы Вентури были предложены ранее других сужающих устройств. В зависимости от размеров диффузора трубы Вентури бывают короткими и длинными.

Наиболее простыми и удобными в изготовлении являются сварные трубы Вентури.

Стандартные трубы Вентури (рис. 12.11) состоят из следующих основных частей: входного цилиндра, сужающего конуса, горловины, расширяющегося конуса и выходного цилиндра. Все части собираются путем сварки. Отбор давления осуществляется из усредняющих кольцевых камер. В нижней части кольцевых камер устанавливаются пробковые краны для спуска жидкости.

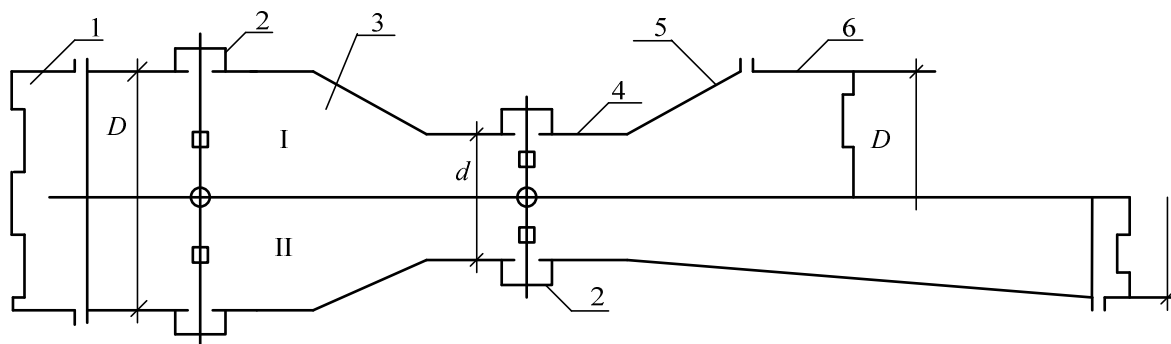


Рис. 12.11. Схема труб Вентури: I – короткая труба; II – длинная труба;
1 – входной патрубок; 2 – кольцевые камеры; 3 – входной конус; 4 – горловина;
5 – выходной; 6 – выходной патрубок

Трубы Вентури присоединяют к стальным трубопроводам сваркой. В некоторых случаях допускается присоединение на фланцах.

Особенностью стандартных труб Вентури является их малая металлоемкость. Необходимые длины прямых участков перед трубами Вентури существенно меньше, чем перед диафрагмами и соплами. Преимуществом труб являются малые потери напора, возможность измерения расхода загрязненной жидкости, долговечность. Единственным существенным недостатком является громоздкость.

4. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Расходомеры постоянного перепада давления относятся к группе расходомеров обтекания, то есть, к расходомерам, основанным на зависимости перемещения тела, воспринимающего динамическое давление обтекающего его потока, от расхода измеряемой среды.

Измерительный орган этих расходомеров, перемещаясь вертикально, в зависимости от расхода, изменяет площадь кольцевого зазора таким образом, что перепад давления по обе его стороны остается постоянным.

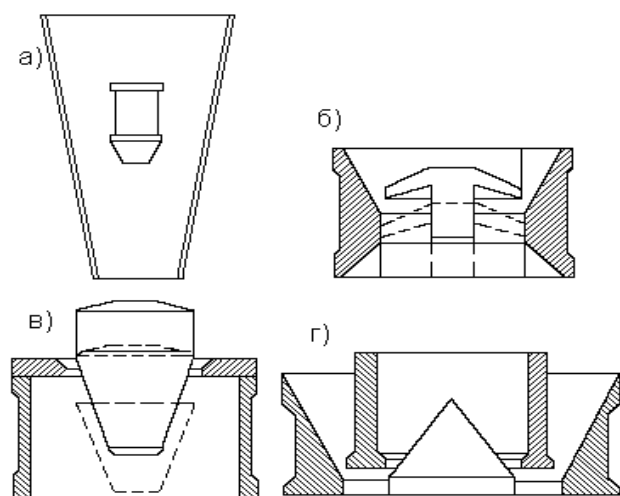


Рис. 12.12. Схемы ротаметрических пар:

- а) пара первого типа в стеклянных ротаметрах;
- б) то же в металлических;
- в) пара второго типа;
- г) пара третьего типа

Наиболее распространенными расходомерами постоянного перепада давления являются ротаметры. Основной измерительной частью ротаметров является ротаметрическая пара. Различают три типа ротаметрических пар (рис. 12.12).

Ротаметрическая пара первого типа состоит из измерительного конуса и поплавка (ротора). Эта конструкция применяется в стеклянных и металлических ротаметрах. Пара второго типа состоит из диафрагмы и поплавка и применяется в металлических ротаметрах. Ротаметрическая пара третьего вида состоит из кольцевого поплавка, размещенного в зазоре между внешним и внутренним конусами. Такие пары применяются в металлических ротаметрах для измерения больших расходов жидкости.

4.1. Теоретические основы измерения расхода при помощи ротаметров

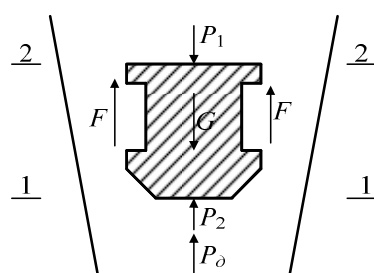


Рис. 12.13. Расчетная схема второго типа

Рассмотрим ротаметрическую пару первого типа. Поплавок в потоке обтекающей его жидкости находится под действием системы сил (рис. 12.13). На поплавок действуют:

- а) сила тяжести поплавка:

$$G = Wg(\rho_n - \rho), \quad (12.9)$$

где W – объем поплавка;

g – ускорение свободного падения;

$(\rho_n - \rho)$ – плотность жидкости и плотность материала, из которого изготовлен поплавок;

- б) сила давления на верхнюю часть поплавка:

$$P_2 = p_2 \cdot \omega_n, \quad (12.10)$$

где p_2 – давление жидкости над поплавком;

ω_n – площадь поплавка.

в) сила давления на нижнюю часть поплавка

$$P_1 = p_1 \cdot \omega_n, \quad (12.11)$$

где p_1 – давление жидкости под поплавком.

г) сила трения потока о поплавок:

$$F = \kappa \cdot v_\kappa \cdot \omega_\sigma, \quad (12.12)$$

где κ – коэффициент сопротивления поплавка;

v_κ – скорость движения жидкости в кольцевом канале между поплавком и стенкой;

ω_σ – площадь боковой части поплавка.

д) сила динамического давления:

$$P_\partial = \varphi \cdot \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot \omega_n \quad (12.13)$$

где φ – коэффициент сопротивления (обтекания) поплавка;

ρ – плотность жидкости;

v_1 – скорость движения жидкости в сечении 1-1 (рис. 12.13).

Перепад давления на поплавок определится из условия равновесия поплавка:

$$P_2 + G = P_1 + P_\partial + F \quad (12.14)$$

$$\rho_2 \omega_n + Wg(\rho_n - \rho) = \rho_1 \omega_n + \varphi \cdot \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} \omega_n + \kappa \cdot v_\kappa \cdot \omega_\sigma \quad (12.15)$$

$$p_1 \omega_n - p_2 \omega_n = Wg(\rho_n - \rho) - \varphi \rho \frac{v_1^2}{2} \omega_n - \kappa \cdot v_\kappa \cdot \omega_\sigma \quad (12.16)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{Wg(\rho_n - \rho)}{\omega_n} - \varphi \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} - \frac{\omega_\sigma}{\omega_n} \cdot \kappa \cdot v_\kappa \quad (12.17)$$

Для вывода основного уравнения расхода жидкости, протекающей через ротаметр, составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 (рис. 12.13):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \zeta \frac{v_2^2}{2g} \quad (12.18)$$

Решая совместно уравнения (12.17) и (12.18), получим зависимость для определения скорости движения жидкости в кольцевом канале:

$$v_\kappa = \kappa_1 \cdot \sqrt{\frac{2gW(\rho_n - \rho)}{\rho \cdot \omega_n}}, \quad (12.19)$$

тогда расход определится как:

$$Q = \omega_\kappa \cdot \kappa_1 \cdot \sqrt{\frac{2gW(\rho_n - \rho)}{\rho \omega_n}} \quad (12.20)$$

где κ_1 – коэффициент расхода ротаметра;

ω_κ – площадь кольцевого зазора между поплавком и стенкой.

Коэффициент расхода ротаметра зависит от угла конусности, формы и веса поплавка, плотности и вязкости жидкости, и установить его, даже для каких-либо эталонных условий, практически невозможно. Поэтому при изготовлении ротаметров прибегают к их экспериментальной градуировке.

4.2. Конструкции ротаметров

По конструктивному исполнению ротаметры подразделяют на стеклянные с местным отсчетом (РМ) и металлические с электрическим (РЭ) или пневматическим (РП) выходным сигналом.

Ротаметры типа РМ со стеклянной трубкой (рис. 12.14) заменяют ранее выпускавшиеся типа РС.

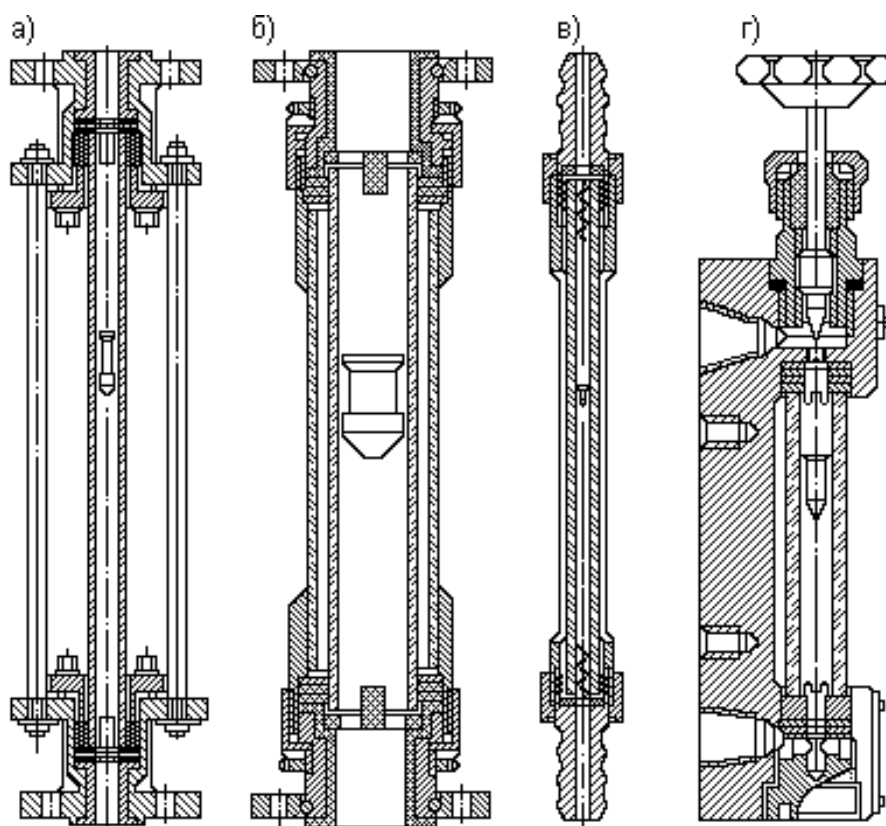


Рис. 12.14. Ротаметры со стеклянной измерительной трубкой:
а) ротаметр с фланцевыми соединениями; б) ротаметр с защитной трубкой;
в) ротаметр со штуцерами для шлангов; г) ротаметр РС-3А

Поплавок у ротаметров типа РМ в зависимости от пределов измерения изготавливают из стали, анодированного дюралюминия, эбонита или титана. Ротаметры этого типа могут работать при температуре измеряемой среды в пределах от 5 до 50 °С. Они находят широкое применение в научных исследованиях, а также в промышленности для измерения небольших расходов жидкости и газов (например, в хлораторах ЛОНИИСТО). Основная наибольшая приведенная погрешность составляет $\pm 2,5\%$.

Ротаметры типа РЭ с дистанционной электрической передачей показаний состоят из двух основных частей – ротаметрической и электрической (рис. 12.15). Ротаметрическая часть представляет одну из трех типов ротаметрических пар, размещенных в металлическом корпусе. Поплавок жестко связан с подвижной осью, перемещающейся внутри корпуса. Электрическая часть состоит из индукционной катушки и сердечника, закрепленного на оси поплавка. Катушка включена в дифференциально-трансформаторную схему вторичного прибора. Электрическая часть защищена от попадания измеряемой среды измерительной трубкой, а снаружи кожухом. Ротаметры поставляются в комплекте с вторичным прибором, как правило, серии КСД. Нижний предел измерения ротаметров типа РЭ не более 0,2 от верхнего, класс точности 2,5.

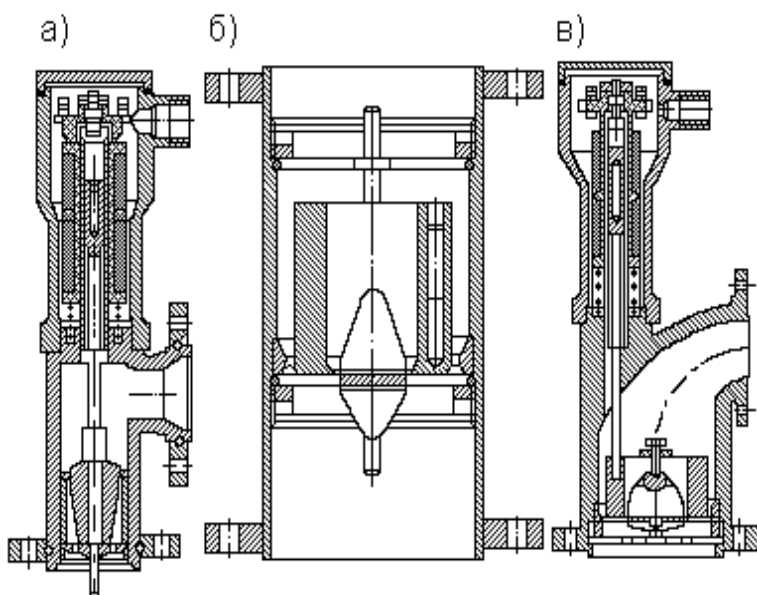


Рис. 12.15. Металлические ротаметры РЭ: а) для малых расходов; б, в) для больших и средних расходов

Ротаметры с процентной шкалой и унифицированным пневматическим выходным сигналом ($0,02 \div 0,1$ МПа) выпускают трех типов: РП с корпусом из нержавеющей стали, РПФ с корпусом армированным фторопластом, и РПО с паровым обогревом корпуса. Связь поплавка с пневматической системой в ротаметрах типа РП осуществляется за счет сдвоенного магнита, установленного на подвижном шарнире поплавка, который через стенку корпуса управляет положением следящего магнита и связанной с ним заслонки. Эти приборы предназначены для применения во взрывоопасных производствах.

Ротаметры, особенно со стеклянной трубкой, требуют точной установки по вертикали. Отклонение оси ротаметра от вертикали на $1 \div 3$ приводит к существенным дополнительным погрешностям измерения расхода.

К достоинствам ротаметров следует отнести сравнительно небольшие потери напора ($\Delta h \leq 1$ м), которые мало зависят от расхода: например, при изменении расхода в 5 раз потери напора увеличиваются в $1,5 \div 2$ раза.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. К какому типу расходомеров относятся крыльчатые счетчики?
2. Что измеряет крыльчатый счетчик?
3. Как определяется расход жидкости при помощи счетчика?
4. Как подводится жидкость к крыльчатке в одноструйных счетчиках?
5. Как подводится жидкость к рабочей камере многоструйных счетчиков?
6. Что такое порог чувствительности?
7. Какой расход называется минимальным?
8. Что такое переходный расход?
9. Что такое номинальный расход?
10. Что такое эксплуатационный расход?
11. Что такое максимальный расход?
12. Как производят коррекцию показаний крыльчатого счетчика при его поверке?
13. Как производят коррекцию показаний турбинного счетчика при его поверке?
14. Каково основное назначение струевыпрямителя? Как он устроен?
15. Для чего предназначен регулятор в скоростных счетчиках?
16. Как передается вращение турбинки отсчетному устройству?
17. Что собой представляет магнитная муфта?
18. На чем основан принцип измерения расхода расходомером переменного перепада давления?
19. Какие стандартные сужающие устройства используются в расходомерах переменного перепада давления?
20. Что учитывает коэффициент расхода m ?
21. Как определяется коэффициент расхода расходомера A ?
22. Что такое модуль сужающего устройства?
23. Как осуществляется отбор перепада давления?
24. Для чего предназначены кольцевые камеры при отборе перепада давления?
25. Какое из сужающих устройств создает наибольшие потери напора?
26. Какое из сужающих устройств создает наименьшие перепады давления?
27. Что представляет собой расходомерное сопло?
28. Что представляет собой сопло Вентури?
29. Из каких элементов состоит труба Вентури?

30. В чем отличие короткой трубы Вентури от длинной?
31. К какой группе расходомеров относятся ротаметры?
32. Из чего состоит ротаметрическая пара первого типа?
33. Из чего состоит ротаметрическая пара второго типа?
34. Из чего состоит ротаметрическая пара третьего типа?
35. Какие силы действуют на поплавков?
36. Как изменится перепад давления, если вес поплавка увеличить?
37. Как изменится перепад давления, если вес поплавка уменьшить?
38. Как изменится положение поплавка, если его вес уменьшить, а расход оставить постоянным?
39. Как изменится положение поплавка, если его вес увеличить, а расход оставить постоянным?
40. Чем объясняется горизонтальный участок на тарировочном графике?
41. Как изменится горизонтальный участок на тарировочном графике, если увеличить вес поплавка?
42. Как изменится угол между тарировочным графиком и горизонтальной линией при увеличении веса поплавка?
43. Как устроен ротаметр типа РМ?
44. В каких единицах отградуирована шкала стеклянного ротаметра?

МОДУЛЬ 13

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА И ЖИДКОСТИ

ВВЕДЕНИЕ

Движение твердых тел в жидкости (обтекание жидкостью твердых тел) представляет одну из важнейших проблем гидромеханики. Основной задачей при изучении этого движения является определение сил, которые возникают при относительном движении тела и жидкости. Тело, движущееся в жидкости, встречает со стороны последней сопротивление, для преодоления которого нужно приложить некоторую силу. Таким будет, например, сопротивление, которое встречает при своем движении самолет, автомобиль или поезд со стороны воздуха, корабль или подводная лодка со стороны воды. В случае, когда тело неподвижно, а жидкость обтекает его, наоборот, тело оказывает сопротивление движению жидкости, на преодоление которого затрачивается часть энергии потока обтекающей жидкости. Примером этого является давление ветра на здание, обтекание мостового быка водой и т.п.

СХЕМА ИЗУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Тема занятия	Тип занятия	Вид (форма) занятия	Кол-во часов
1. Сопротивление давления. Давление ветра на здания и сооружения. Сопротивление трения. Пограничный слой. Расчет дефлекторов, аэродинамика внутри помещений. Особенности аэродинамики высотных зданий. Аэродинамическое сопротивление капель при их движении в камере орошения. Вторичный распад крупных капель.	Изучение нового материала	Лекция	2

1. ОБТЕКАНИЕ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ ПЛАСТИНКИ

Рассмотрим вначале случай обтекания потоком жидкости пластинки, установленной перпендикулярно скорости потока (рис. 13.1). Струйки жидкости, встречаясь с пластинкой, оказывают дополнительное давление, обусловливаемое изменением направления течения, на поверхность пластинки, обращенную навстречу потоку. Со стороны пластинки на жидкость действует сила сопротивления, равная по величине добавочной силе давления на пластинку.

Непосредственно за пластинкой в результате отрыва струи от пластинки образуется область беспорядочного вихревого движения. В этой области давление оказывается пониженным, в результате чего возникает дополнительная сила сопротивления, также направленная навстречу потоку; поскольку эта сила зависит от формы тела, ее называют *сопротивлением формы*.

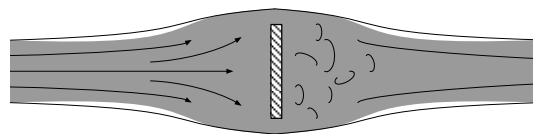


Рис. 13.1. Обтекание потоком пластинки перпендикулярной направлению потока

Сумму обоих указанных сопротивлений называют *сопротивлением давления*.

Если пластинка расположена вдоль потока, оказываемое ею сопротивление вызывается главным образом тангенциальными силами трения, возникающими на боковых поверхностях пластинки (так называемое *сопротивление трения*).

Сопротивления давления и трения существуют чаще всего одновременно, и полное сопротивление F , которое возникает при относительном движении тела и жидкости, представляет собой сумму этих сопротивлений. Таким образом:

$$F = F_{\text{давл}} + F_{\text{тр}}.$$

Соотношение между компонентами полного сопротивления в различных случаях различно (пластинки, расположенные вдоль или поперек потока, являются предельными случаями). Полное сопротивление F определяется из формулы, предложенной еще Ньютоном, в виде:

$$F = C_{\omega} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (13.1)$$

где C – коэффициент сопротивления, определяемый обычно из опытов;
 ω – характерная площадь тела;
 ρ – плотность жидкости;
 v – характерная скорость.

2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Формулу для определения сопротивления давления обычно записывают в виде:

$$F_{\text{давл}} = C_{\text{д}} \omega \rho \frac{v^2}{2},$$

где $C_{\text{д}}$ – коэффициент сопротивления давления;

ω – площадь миделевого сечения тела (проекция тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения).

Рассмотрим обтекание кругового цилиндра потоком невязкой жидкости (без трения). Картина течения (рис. 13.2) является симметричной: на боковых поверхностях цилиндра течение ускоренное, а на лобовой и кормовой поверхностях – замедленное. В критических точках A и D скорость потока равна нулю, а давление имеет максимальную величину, одинаковую для обеих точек.

Распределение давлений по поверхности цилиндра представлено на рис. 13.3. Там, где давление жидкости больше, чем давление в набегающем потоке, стрелки, изображающие силы давления, направлены к стенкам цилиндра, где оно меньше, – от стенок. Вследствие симметрии этих сил относительно двух взаимно перпендикулярных плоскостей AD и BC равнодействующая их равна нулю. Равномерный поток идеальной жидкости не оказывает силового воздействия на обтекаемый им цилиндр, то есть сопротивление цилиндра равно нулю. Этот вывод, противоречащий реально наблюдаемым явлениям при обтекании, известен под названием парадокса Эйлера – Даламбера.

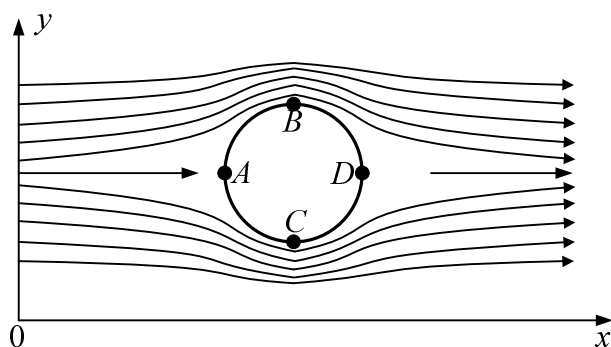


Рис. 13.2. Обтекание цилиндра невязкой жидкостью

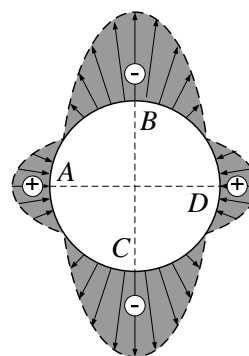


Рис. 13.3. Распределение давлений при обтекании цилиндра невязкой жидкостью

При обтекании цилиндра реальной (вязкой) жидкостью (рис. 13.4) частицы, движущиеся в непосредственной близости к его поверхности, теряют часть кинетической энергии под действием сил трения; в результате эти частицы уже не могут далеко продвинуться в зону возрастающего давления на участке BD и останавливаются, не доходя до точки D , а затем под действием давления во внешней зоне потока начинают двигаться назад. По мере увеличения скорости зона возвратного течения возрастает и из нее развивается крупный вихрь, который в дальнейшем отрывается от обтекаемого тела и уплывает вниз по течению. На его месте возникает новый вихрь, который также отрывается, и т.д. Образование вихрей за обтекае-

мым телом приводит к резкому понижению давления в кормовой части цилиндра по сравнению с давлением в невозмущенном течении. Распределение давления по поверхности цилиндра, обтекаемого вязкой жидкостью, представлено на рис. 13.5.

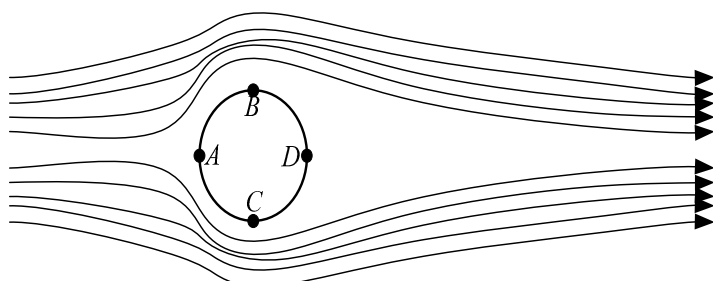


Рис. 13.4. Обтекание цилиндра вязкой жидкостью

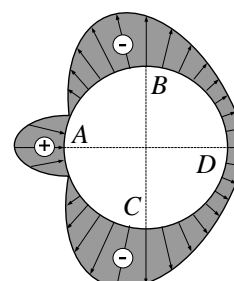


Рис. 13.5. Распределение давлений при обтекании цилиндра вязкой жидкостью

В лобовой (носовой) части цилиндра давление практически совпадает с тем, которое возникает при движении идеальной жидкости (см. рис. 13.3). По мере приближения к кормовой части давление на поверхности цилиндра становится меньше, чем в соответствующих местах цилиндра, обтекаемого идеальной жидкостью.

Таким образом, силы перед цилиндром и за ним не компенсируют друг друга. Равнодействующая сил давления на обтекаемое тело, направленная в сторону течения жидкости, обуславливает собой сопротивление давления.

Аналогичная картина наблюдается и при обтекании жидкостью тел другой формы. При этом форма обтекаемого тела в значительной степени определяет характер распределения давлений, а следовательно, и величину сопротивления давления.

Для тела заданной формы распределение давления при обтекании его потоком зависит от числа Рейнольдса. Поскольку сопротивление давления непосредственно связано с характером обтекания, коэффициент C_d зависит как от формы тела, так и от числа Рейнольдса.

Теоретическое определение коэффициента C_d обычно затруднено и его значение часто находят экспериментально, испытывая тело (или его модель) в аэродинамической трубе. На рис. 13.6 приведены экспериментальные данные о зависимости коэффициента сопротивления давления от числа Рейнольдса для цилиндра (кривая 1), круглого диска (кривая 2) и шара (кривая 3). Здесь число Рейнольдса $Re = u_\infty l / \nu$, где u_∞ – скорость на-

бегающего потока, l – характерный линейный размер (например, для шара – его диаметр). С увеличением числа Рейнольдса значение коэффициента сопротивления давления уменьшается, принимая практически постоянную величину при больших числах Рейнольдса. Влияние числа Рейнольдса на коэффициент C_D при обтекании диска не обнаруживается.

Если надо получить, возможно, малые значения коэффициента C_D (в некоторых случаях, например, для раскрытого парашюта, наоборот, желательно иметь высокий коэффициент сопротивления), телу придается обтекаемая форма, что способствует уменьшению размеров области отрывного течения.

Если тело несимметрично или его плоскость симметрии расположена наклонно по отношению к потоку (рис. 13.7), результирующая силы F , действующая на тело (в нашем случае – крыло самолета) со стороны потока, не совпадает с направлением потока. Тогда эту силу можно разложить на две составляющие: F_x , направленную вдоль потока, и F_y , перпендикулярную потоку. Составляющая F_x – это уже рассмотренное выше лобовое сопротивление. Составляющая F_y называется подъемной силой. При увеличении угла между профилем крыла и направлением потока (так называемый «угол атаки») на подсасывающей стороне крыла возможно образование отрыва потока, в результате которого сопротивление резко возрастает, а подъемная сила падает. Исследования обтекания тел нашли широкое применение при расчетах и конструировании лопаток колес турбокомпрессоров, вентиляторов, насосов, пропеллеров и винтов.

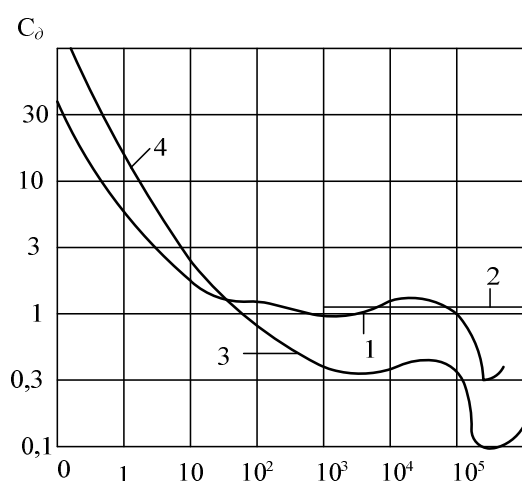


Рис. 13.6. Зависимость коэффициента сопротивления давления от числа Рейнольдса

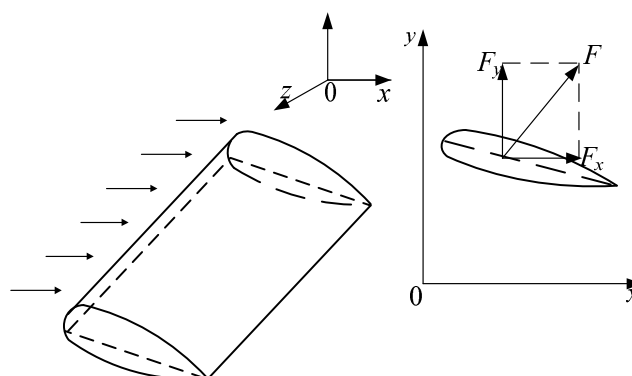


Рис. 13.7. К понятию о подъемной силе

3. ДАВЛЕНИЕ ВЕТРА НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Давление ветра на сооружение, а также распределение этого давления по контуру сооружения необходимо учитывать при проектировании сооружений в районах, где действуют ветры значительной силы.

В большинстве случаев, однако, сооружения настолько мало обтекаемы, что коэффициент сопротивления их зависит только от формы и расположения и практически не зависит от числа Рейнольдса. При этом формы зданий и их расположение по отношению к переменному направлению ветра обычно так сложны и несимметричны, что аналитическое определение распределения давления становится невозможным. В этих случаях приходится переходить к продувке моделей сооружений в аэродинамической трубе или к буксировке их в гидравлическом бассейне.

Скорость ветра растет с удалением от поверхности земли по степенному закону:

$$u / u_{\infty} = (y / H)^{1/7},$$

где u_{∞} – скорость ветра на достаточно большом расстоянии H от поверхности земли;

u – скорость ветра на расстоянии y от поверхности.

Поэтому особенно большим ветровым давлениям подвергаются высокие здания и сооружения. Для уменьшения давления ветра следует, по возможности, уменьшать площадь сечения сооружения в направлении, перпендикулярном направлению господствующих ветров, и придавать сооружениям возможно более обтекаемые очертания. Из-за ветрового воздействия на здание в зимние периоды возникает инфильтрация холодного воздуха в помещения, что приводит к увеличению теплотерь.

Давление ветра (на единицу площади) на здания и сооружения обычно выражается через скоростной напор свободного ветрового потока в виде:

$$p = \kappa_{\epsilon} \frac{\rho \cdot u_{\infty}^2}{2},$$

где κ_{ϵ} – аэродинамический коэффициент;

u_{∞} – скорость ветра на достаточном удалении от сооружения.

В случае повышенного избыточного давления ветра на поверхность сооружения аэродинамический коэффициент κ_{ϵ} принимает положительные значения, в случае разрежения – отрицательные.

Схематическое распределение аэродинамических коэффициентов по контуру здания представлено на рис. 13.9. Величину аэродинамического коэффициента в масштабе откладывают в виде отрезков, перпендикуляр-

ных контуру здания в заданной точке. При этом значения κ_6 , отвечающие давлению больше атмосферного, откладываются внутри контура [+], а меньше атмосферного – снаружи [-]. Повышенные давления возникают на той стороне здания, на которую набегают ветровые потоки. На наветренной стороне здания κ_6 составляет от 0,5 до 0,8; на заветренной торцевой стороне – от -0,2 до -0,3.

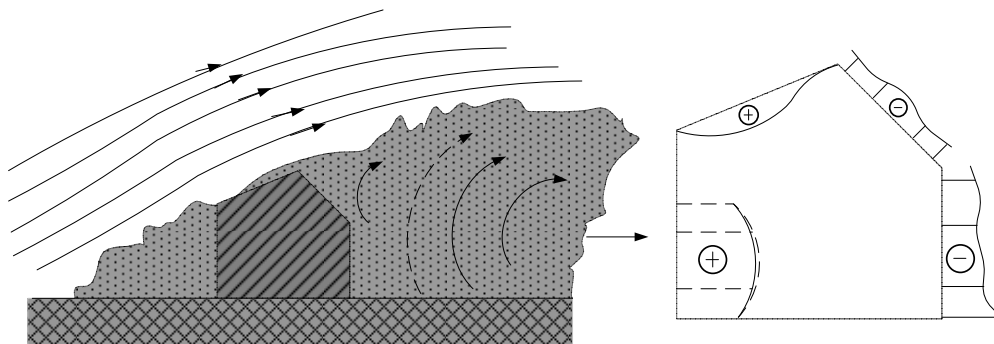


Рис. 13.9. Распределение давлений при обтекании здания

4. СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ. ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

При определении величины сопротивления трения формула (13.1) записывается в виде:

$$F_{тр} = C_F \omega \rho \frac{u_\infty^2}{2},$$

где ω – обтекаемая поверхность тела;

C_F – коэффициент сопротивления трения.

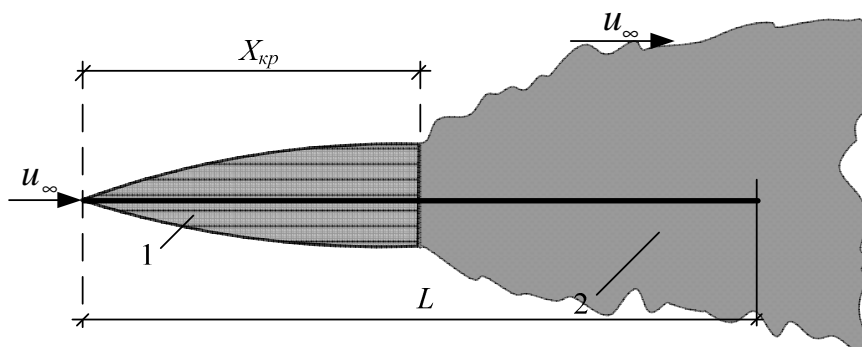


Рис. 13.10. Продольное обтекание плоской пластинки:

- 1 – ламинарный пограничный слой;
- 2 – турбулентный пограничный слой

Этот вид сопротивления можно наблюдать в чистом виде при обтекании пластинки, установленной вдоль течения (рис. 13.10). При этом нет отрыва струи, но вдоль пластинки возникает так называемый пограничный слой жидкости, поперечные размеры которого увеличиваются вниз по течению. Вне этого слоя скорость потока такова, какой она была бы при отсутствии пластинки, то есть влияние сил вязкости здесь пренебрежимо мало. Наоборот, в пределах пограничного слоя силы вязкости оказываются столь же существенными, как и силы инерции.

Пограничный слой, начинаясь у передней точки обтекаемого тела, распространяется по всей его поверхности; при этом он постепенно расширяется. Практически за толщину слоя принимают то расстояние от пластинки, на протяжении которого скорость отличается не более чем на 1 % от скорости невозмущенного потока u_∞ .

Пограничный слой может быть ламинарным или турбулентным. От состояния пограничного слоя в значительной мере зависит и величина сопротивления трения. Обычно в передней части пластинки пограничный слой имеет ламинарный характер; по мере увеличения толщины ламинарного слоя он теряет устойчивость и переходит в турбулентный пограничный слой. Состояние пограничного слоя (то есть будет ли он ламинарным или турбулентным) зависит главным образом от числа Рейнольдса, характеризующего движение в этом слое и записываемого в виде

$$Re_x = \frac{u_\infty L}{\nu} ,$$

где L – длина пластинки.

Для плоской пластинки ламинарный пограничный слой переходит в турбулентный при:

$$Re_{кр} = \frac{u_\infty \cdot x_{кр}}{\nu} = 485\,000 ,$$

где $x_{кр}$ – длина от переднего ребра пластинки до конца ламинарной части пограничного слоя (см. рис. 13.10).

Если длина пластинки L меньше $x_{кр}$ ($L < x_{кр}$), то весь пограничный слой будет ламинарным; при $L > x_{кр}$ часть пограничного слоя будет ламинарной, а часть – турбулентной (так называемый смешанный пограничный слой).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните, как происходит обтекание потоком жидкости пластинки установленной перпендикулярно потоку.
2. Какое сопротивление называется сопротивлением формы?
3. Какое сопротивление называется сопротивлением давления?
4. Какое сопротивление называется сопротивлением трения?
5. Как найти полное сопротивление?
6. Как найти сопротивление давления?
7. Покажите эпюру распределения давления при обтекании цилиндра невязкой жидкостью?
8. Объясните физическую картину, возникающую при обтекании потоком вязкой жидкости цилиндра?
9. Покажите эпюру распределения давления при обтекании цилиндра вязкой жидкостью?
10. Как коэффициент сопротивления давления зависит от числа Рейнольдса?
11. Объясните, как формируется подъемная сила при обтекании потоком жидкости крыла самолета?
12. Как определить ветровое давление на здание?
13. Покажите, как происходит распределение давления ветра при обтекании здания?
14. Как определить сопротивление трения?
15. Как формируется пограничный слой при продольном обтекании плоской пластинки?

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшуль А.Д., Кисилев П.Г. Гидравлика и аэродинамика.– М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
2. Примеры расчетов по гидравлике. Учеб. пособие для вузов. / Под ред. А.Д. Альтшуля. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.

ГЛОССАРИЙ

<i>Абсолютное полное гидростатическое давление</i>	Напряжение сжатия жидкости, фактически существующее в данной точке.
<i>Архимедова сила</i>	Сила, действующая со стороны жидкости или газа на погруженное в них тело.
<i>Атмосферное давление</i>	Давление атмосферного воздуха на находящиеся в нем предметы и на земную поверхность. В каждой точке атмосферы атмосферное давление равно весу вышележащего столба воздуха с основанием, равным единице площади. С высотой атмосферное давление убывает.
<i>Аэрация потока жидкости</i>	Насыщение жидкости воздухом в процессе ее движения.
<i>Аэродинамика</i>	Раздел гидродинамики, изучающий законы движения газообразной среды и ее взаимодействия с движущимися в ней твердыми телами. Основными задачами аэродинамики являются: – определение сил, действующих на обтекаемое газом тело; – распределение давления на поверхность тела; – распределение скоростей в газе, обтекающем тело.
<i>Аэродинамическая сила</i>	Сила, с которой газообразная среда действует на поверхность движущегося в ней твердого тела. Полная аэродинамическая сила раскладывается уф: 1) аэродинамическое сопротивление; 2) подъемную силу; 3) боковую силу, перпендикулярную аэродинамическому сопротивлению и подъемной силе.
<i>Аэростатика</i>	Раздел механики, изучающий условия равновесия газов и действие неподвижных газов на погруженные в них твердые тела. Основными задачами аэростатики являются: – исследование зависимости давления в атмосфере от высоты; – исследование поддерживающей силы, которая действует на плавающие в воздухе тела.
<i>Бар</i>	Внесистемная единица давления. Один бар равен силе в 1 000 000 дин, действующей на площадь в 1 см ² , что эквивалентно давлению ртутного столба высотой в 750,08 мм или 100 кПа.
<i>Бурное состояние потока</i>	Состояние потока при глубине меньше критической.
<i>Вакуумметрическое давление (вакуум)</i>	Разность между атмосферным давлением и полным (абсолютным) давлением в жидкости (газе).
<i>Винтовое движение жидкости</i>	Частный случай вихревого движения, когда вектор угловой скорости совпадает по направлению с вектором линейной скорости данной частицы.
<i>Вихревая трубка</i>	Трубка, образованная системой вихревых линий, проходящих через точки элементарного замкнутого контура.
<i>Вихревая линия</i>	Линия, касательные ко всем точкам которой являются векторами вихря в этих точках.

<i>Вихревое движение жидкости</i>	Движение жидкости с вращением ее частиц вокруг своих центров тяжести.
<i>Вихревой шнур</i>	Масса движущейся жидкости, заключенная в вихревой трубке.
<i>Внутреннее трение</i>	Совокупность процессов: – происходящих в твердых, жидких и газообразных телах при их деформации; – приводящих к необратимому рассеянию механической энергии и ее превращению во внутреннюю энергию
<i>Вода</i>	Химическое соединение водорода и кислорода, существующее в жидком, твердом и газообразном состояниях.
<i>Водоворот</i>	Зона в потоке, характеризующаяся круговым замкнутым движением воды, возникающим: – в результате слияния двух течений; – при обтекании течением выступов берега и дна; – при резком расширении русла. Морские водовороты вызываются столкновением приливных и отливных волн и встречных течений.
<i>Водоворотная зона</i>	Область, занятая вращающимися массами жидкости, граничащая с основным течением данного потока.
<i>Водоизмещение</i>	Объем погруженной в жидкость части плавающего тела.
<i>Волны ветровые</i>	Волны на свободной поверхности воды, обусловленные воздействием ветра.
<i>Высота приведенная</i>	Высота столба жидкости, который соответствует абсолютному (полному) давлению в данной точке жидкости.
<i>Высота пьезометрическая</i>	Высота столба жидкости, вес которой при давлении, равном нулю на его свободной поверхности, уравнивает давление в данной точке, то есть высота столба жидкости, равная $p/\rho g$.
<i>Вязкая жидкость</i>	Жидкость, обладающая вязкостью (термин, противоположный термину «невязкая жидкость»).
<i>Вязкость</i>	Свойство жидкости оказывать сопротивление относительному движению (сдвигу) частиц жидкости.
<i>Газообразные жидкости</i>	Жидкости, которые: – занимают все предоставленное им пространство; – не имеют свободной поверхности; – значительно изменяют свой объем, сжимаясь и расширяясь под воздействием внешних сил.
<i>Гидравлика</i>	Отдел механики жидкости, изучающий кроме общих законов равновесия и движения жидкости специальные вопросы, связанные с инженерной практикой.
<i>Гидравлический удар</i>	Резкое изменение давления жидкости при напорном режиме, вызываемое резким изменением скорости за весьма малый промежуток времени.
<i>Гидравлический уклон</i>	Уменьшение удельной энергии потока, отнесенное к его длине.
<i>Гидроаэродинамика</i>	Раздел физики, изучающий законы движения жидкостей и газов и взаимодействия жидкостей и газов с различными телами при их относительном движении.

<i>Гидродинамика</i>	Раздел механики жидкости (гидромеханики), изучающий движение жидкости, а также взаимодействие между жидкостью и твердыми телами при их относительном движении.
<i>Гидродинамическая сетка</i>	Сетка криволинейных квадратов, образованная пересечением семейства линий равного потенциала скорости и семейства линий тока (линий движения).
<i>Гидромеханика</i>	Механика жидкости, раздел механики, изучающий движение и равновесие жидкости, а также взаимодействие между жидкостью и твердыми телами, полностью или частично погруженными в жидкость.
<i>Гидростатика</i>	Раздел гидравлики, изучающий жидкости, находящиеся в состоянии относительного покоя, когда отсутствуют перемещения частиц относительно друг друга.
<i>Гидростатический парадокс</i>	Свойство жидкостей, заключающееся в том, что сила тяжести жидкости, налитой в сосуд, может отличаться от силы, с которой эта жидкость действует на дно сосуда
<i>Гидростатическое давление</i>	Давление, вызываемое весом жидкости. Гидростатическое давление зависит от координат точки, в которой оно измеряется.
<i>Градиент скорости</i>	Интенсивность изменения скорости по заданному направлению, обычно по нормали к направлению скорости.
<i>Давление</i>	Физическая скалярная величина, равная отношению перпендикулярной составляющей силы, равномерно распределенной по поверхности тела, к площади этой поверхности.
<i>Давление жидкости на стенку</i>	Сила, с которой жидкость давит на рассматриваемую площадь заданной плоской или криволинейной поверхности.
<i>Давление манометрическое</i>	Превышение давления в жидкости (газе) над атмосферным.
<i>Движение безвихревое (потенциальное)</i>	Движение жидкости без вращения ее частиц вокруг своих центров тяжести.
<i>Движение безнапорное</i>	Движение жидкости со свободной поверхностью.
<i>Движение ламинарное</i>	Движение жидкости без пульсации скорости и, следовательно, без молярного перемешивания жидкости.
<i>Движение одномерное</i>	Движение жидкости вдоль некоторой оси, при котором его характеристики (скорость, давление и др.) не зависят от расстояния частиц от этой оси.
<i>Движение осесимметричное</i>	Движение жидкости, при котором поле скоростей движения, давлений и других характеристик одинаково для любых плоскостей, проходящих через ось симметрии.
<i>Движение плавно изменяющееся</i>	Неравномерное движение жидкости, при котором кривизна линий тока и угол расхождения между ними весьма малы.
<i>Движение плоское (плоскопараллельное)</i>	Движение жидкости, параллельное некоторой неподвижной плоскости, при котором его характеристики (скорость, давление и др.) не зависят от расстояния частиц жидкости от этой плоскости.
<i>Движение пробковое</i>	Движение, при котором газовая фаза смеси периодически полностью занимает поперечное сечение трубопровода.

<i>Движение равномерное</i>	Движение, при котором скорости в сходственных точках двух смежных сечений равны между собой.
<i>Движение спокойное</i>	Движение жидкости в открытом русле при глубинах более критической.
<i>Движение турбулентное</i>	Движение жидкости с пульсацией скорости вследствие молярного перемешивания жидкости.
<i>Движение установившееся</i>	Движение жидкости, при котором его характеристики в любой точке потока остаются неизменными во времени.
<i>Динамическая вязкость (или коэффициент вязкости)</i>	Характеристика вязкости жидкости, выражаемая отношением касательного напряжения в точке поверхности соприкосновения слоев жидкости к градиенту скорости в данной точке по нормали к поверхности соприкосновения при движении жидкости параллельными слоями.
<i>Живое сечение потока жидкости</i>	Поверхность, являющаяся геометрическим местом частиц жидкости, скорости которых перпендикулярны к соответствующим элементам поверхности. Для установившегося течения жидкости в заполненной гладкой трубе живое сечение потока задается плоскостью, перпендикулярной оси трубы и ограниченной внутренней поверхностью трубы.
<i>Жидкая фаза</i>	Агрегатное состояние вещества, промежуточное между твердым и газообразным состояниями. В этом состоянии молекулы вещества: <ul style="list-style-type: none"> – обладают большей энергией, чем молекулы твердого тела; – менее плотно соединены друг с другом; – способны преодолевать силы взаимного притяжения.
<i>Жидкость</i>	Тело, обладающее свойством текучести, то есть способное сколь угодно сильно изменять свою форму под действием сколь угодно малых сил, но, в отличие от газа, весьма мало изменяющее свою плотность при изменении давления.
<i>Жидкость гидрофобная</i>	Водоотталкивающая жидкость.
<i>Жидкость идеальная (невязкая)</i>	Модель жидкости, наделенная свойством несопротивляемости усилиям сдвига.
<i>Жидкость капельная</i>	Термин, который применяется для отличия жидкости от газа в тех случаях, когда газ рассматривают как «сжимаемую жидкость».
<i>Жидкость многофазная</i>	Жидкость, представляющая собой механическую смесь капельной жидкости, влекомых ею наносов (твердая фаза) и газовых включений (в форме пузырьков).
<i>Жидкость ньютоновская</i>	Вязкая жидкость, точно отвечающая закону трения жидких тел Ньютона $\tau = \mu \frac{du}{dn}$; неньютоновская – жидкость не отвечающая этим законам.
<i>Жидкость однородная</i>	Жидкость, плотность которой во всех точках постоянна.
<i>Жидкость реальная</i>	Жидкость действительная, обладающая всеми характерными для нее физическими свойствами (обычно противопоставляется термину «идеальная жидкость»).

<i>Закон Архимеда</i>	Физический закон, определяющий силу Архимеда: На тело, на погруженное в жидкость (газ), действует выталкивающая сила: – численно равная весу жидкости (газа), вытесненной этим телом; – направленная в сторону, противоположную направлению веса тела; – приложенная в центре тяжести жидкости (газа) объема, занимаемого погруженной частью тела.
<i>Закон Бернулли</i>	Физический закон, в соответствии с которым: В каждой точке установившегося потока жидкости сумма внешнего, гидростатического и динамического давления есть величина постоянная.
<i>Закон Паскаля</i>	Основной закон гидростатики, в соответствии с которым жидкости и газы передают производимое на них давление одинаково по всем направлениям. На основе закона Паскаля работают гидравлические устройства, тормозные системы автомобилей, домкраты, прессы и т.п.
<i>Идеальная жидкость</i>	Жидкость, обладающая: – абсолютной подвижностью, то есть у нее отсутствуют силы трения и касательные напряжения; – абсолютной неизменностью объема под воздействием внешних сил; – отсутствием вязкости. Идеальная жидкость является физической моделью реальных жидкостей.
<i>Инверсия струи</i>	Изменение формы поперечного сечения струи по ее длине (при истечении жидкости из отверстия в атмосферу).
<i>Кавитация</i>	Явление нарушения сплошности текущей жидкости из-за выделения внутри нее пузырьков газа или паров самой жидкости.
<i>Капельные жидкости</i>	Вода, нефть, керосин и другие малосжимаемые жидкости, обладающие определенным объемом, величина которого практически не изменяется под воздействием внешних сил. Капельные жидкости не всегда заполняют предоставленный им объем, обычно они образуют ограниченную поверхность.
<i>Капля</i>	Небольшой объем жидкости, ограниченный в состоянии равновесия поверхностью вращения. Форма капли определяется действием сил поверхностного натяжения и внешних сил. Капли образуются при стекании жидкости с края поверхности или из малых отверстий, а также при конденсации пара на твердой несмачиваемой поверхности на центрах конденсации.
<i>Кинематическая вязкость ν</i>	Отношение динамической вязкости к плотности жидкости.
<i>Кипение</i>	Процесс парообразования, происходящий во всем объеме жидкости. При кипении происходит испарение в растворенные в жидкости пузырьки воздуха. С увеличением давления в пузырьках они всплывают на поверхность и лопаются.

<i>Коэффициент кинетической энергии потока (коэффициент Кориолиса)</i>	Отношение действительной удельной величины кинетической энергии потока к величине удельной кинетической энергии, вычисленной в предположении, что скорости во всех точках живого сечения равны средней скорости.
<i>Коэффициент количества движения потока (коэффициент Буссинеска)</i>	Отношение действительной величины количества движения потока к величине количества движения, вычисленного в предположении, что скорости во всех точках живого сечения равны средней скорости потока.
<i>Коэффициент сопротивления по длине (коэффициент Дарси)</i>	Безразмерная величина, зависящая от шероховатости стенок русла и числа Рейнольдса.
<i>Коэффициент Шези (или скоростной множитель)</i>	Наименование размерного коэффициента C в формуле средней скорости потока при равномерном движении, то есть в формуле Шези $v = C \cdot \sqrt{R \cdot i}$.
<i>Критическая глубина</i>	Глубина потока, при которой удельная энергия сечения для заданного расхода достигает минимального значения.
<i>Критическая скорость Рейнольдса</i>	Величина средней скорости потока, соответствующая критическому числу Рейнольдса при данных условиях.
<i>Критический уклон</i>	Уклон дна, при котором нормальная глубина потока равна критической глубине.
<i>Линия тока</i>	Линия, проведенная через ряд последовательно расположенных точек, скорость течения в которых направлена по касательной к этой линии.
<i>Манометр</i>	Прибор, предназначенный для измерения давления или разности давлений жидкостей и газов. Действие манометра основано на зависимости ряда физических параметров от давления.
<i>Местные потери напора</i>	Затраты удельной энергии потока на преодоление местных сопротивлений.
<i>Метацентрическая высота</i>	Расстояние от метацентра до центра тяжести тела.
<i>Метацентрический радиус</i>	Расстояние от метацентра до центра водоизмещения в равновесном состоянии плавающего тела.
<i>Механика сплошных сред</i>	Раздел механики, изучающий движение и равновесие газов, жидкостей и деформируемых твердых тел. В механике сплошных сред: – вещество рассматривают как непрерывную среду, пренебрегая его молекулярным / атомным строением; – считают непрерывным распределение в среде всех ее характеристик: плотности, напряжений, скоростей частиц и др. Механика сплошных сред подразделяется на гидроаэромеханику, газовую динамику, теорию упругости, теорию пластичности и другие разделы.

<i>Миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.)</i>	Внесистемная единица давления. 1 мм рт. ст. – гидростатическое давление 1 мм ртутного столба плотностью 13595,1 кг/м ³ при 0 °С и нормальном значении ускорения свободного падения. 1 мм рт. ст. = 133,322 Па.
<i>Напор</i>	Сумма трех высот: высоты положения, высоты давления и скоростной высоты.
<i>Нормальная атмосфера (атм)</i>	Внесистемная единица давления, равная давлению столба ртути 760 мм при 0 °С, плотности ртути 13595,1 кг/м ³ и нормальном ускорении свободного падения. 1 атм = 101325 Па
<i>Парциальное давление газа</i>	Давление, которое создал бы каждый из газов смеси, если остальные газы удалить из объема, занимаемого смесью. Давление смеси газов определяется законом Дальтона.
<i>Паскаль</i>	Единица давления в СИ. 1 паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м ² , расположенной перпендикулярно силе.
<i>Перегретая жидкость</i>	Жидкость, имеющая температуру выше температуры кипения при данном давлении. Перегретая жидкость может быть получена нагреванием в отсутствие в ней центров кипения. Такое состояние жидкости неустойчиво.
<i>Потери напора по длине</i>	Затраты удельной энергии потока жидкости на преодоление сил трения, пропорциональные длине расчетного участка.
<i>Поток жидкости</i>	Движение массы жидкости, ограниченной системой поверхностей твердых тел и / или поверхностей соприкосновения жидких и газообразных тел
<i>Пульсация давления</i>	Колебательное отклонение давления в данной точке от его среднего значения.
<i>Пульсация скорости</i>	Колебательное отклонение местной скорости от ее среднего значения на величину $\pm \Delta u$.
<i>Пьезометрический уклон</i>	Уменьшение потенциальной энергии потока, отнесенное к его длине.
<i>Расход</i>	Объем жидкости, протекающий в единицу времени через поперечное сечение потока.
<i>Расходная характеристика</i>	Расход в заданном русле при гидравлическом уклоне, равном единице.
<i>Реальные жидкости</i>	Жидкости, обладающие: – сжимаемостью; – сопротивлением сдвигающим усилиям; – вязкостью.
<i>Свободная поверхность</i>	Поверхность раздела между жидкостью и газообразной средой с постоянным давлением.

<i>Скоростная высота (скоростной напор)</i>	Высота, при свободном падении с которой частица жидкости приобретает данную скорость, то есть высота равная $v^2 / 2g$.
<i>Скорость местная</i>	Скорость в данной точке.
<i>Скорость осредненная</i>	Средняя величина местных скоростей за достаточно большой промежуток времени.
<i>Сообщающиеся сосуды</i>	Сосуды, имеющие в нижней части соединительные каналы. Если капиллярными явлениями можно пренебречь, то в сообщающихся сосудах свободные поверхности покоящейся жидкости находятся на одном уровне.
<i>Средняя скорость потока</i>	Скорость, с которой должны были бы двигаться все частицы жидкости через живое сечение потока, чтобы расход был равен расходу, проходящему через это сечение при действительном распределении скоростей.
<i>Техническая атмосфера (ат)</i>	Внесистемная единица давления, равная давлению 9,80665 Н/см ² . 1 ат = 98066,5 Па
<i>Торричелли (Торр)</i>	Внесистемная единица давления, равная 1 мм рт. ст. 1 торр = 133,332 Па
<i>Трубка Пито</i>	Прибор для измерения динамического давления текущей жидкости, представляющий собой изогнутую трубку, отверстие которой расположено перпендикулярно линиям тока жидкости, а противоположное колено ориентировано вертикально. Высота столба жидкости в вертикальном колене прямопропорциональна динамическому давлению жидкости.
<i>Трубка тока</i>	Трубка, образованная системой линий тока, проходящих через точки малого замкнутого контура.
<i>Удельная энергия</i>	Механическая энергия жидкости, приходящаяся на единицу весового расхода, определяемая относительно произвольно выбранной горизонтальной плоскости (численно равна напору.)
<i>Уравнение неразрывности</i>	Для стационарного течения жидкости – соотношение, связывающее: – плотность жидкости; – скорость жидкости в трубе; – площадь поперечного сечения трубы.
<i>Формула Торричелли</i>	Выражение, определяющее скорость вытекания жидкости через отверстие в стенке сосуда в зависимости от расстояния от оси отверстия до поверхности жидкости.
<i>Число Рейнольдса (Re)</i>	Отношение сил инерции к силам вязкости. Число Рейнольдса используется в гидродинамике для моделирования условий обтекания потоком различных тел, а также для установления режима движения жидкости в трубах и руслах.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Размерности величин в различных системах измерения

Величина	СИ	Перевод в другие единицы
Длина	м	$1 \text{ м} = 100 \text{ см} = 1000 \text{ мм}$
Площадь	м^2	$1 \text{ м}^2 = 10^4 \text{ см}^2 = 10^6 \text{ мм}^2$
Объём	м^3	$1 \text{ м}^3 = 10^6 \text{ см}^3 = 1000 \text{ л}$
Масса	кг	$1 \text{ кг} = 1000 \text{ г}$
Сила, вес	Н	$10 \text{ Н} \approx 1 \text{ кгс} = 10^{-3} \text{ тс}$
Плотность	$\text{кг}/\text{м}^3$	$1000 \text{ кг}/\text{м}^3 = 1 \text{ г}/\text{см}^3$
Удельный вес	$\text{Н}/\text{м}^3$	$10^4 \text{ Н}/\text{м}^3 = 1 \text{ тс}/\text{м}^3$
Вязкость кинематическая	$\text{м}^2/\text{с}$	$1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$
Давление	$\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$	$100000 \text{ Па} \approx 1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 =$ $= 10 \text{ м вод. ст.} = 760 \text{ мм рт. ст.}$

Таблица 2

Связь между единицами давления

Единица	Па	дин/см ²	кгс/м ²	кгс/см ²	атм.	мм рт. ст.
1 Па	1	10	0,102	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
1 дин/см ²	0,1	1	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
1 кгс/м ²	9,81	98,1	1	10^{-4}	$9,68 \cdot 10^{-5}$	$7,36 \cdot 10^{-2}$
1 кгс/см ²	$9,81 \cdot 10^4$	$9,81 \cdot 10^5$	10^4	1	0,968	$7,36 \cdot 10^2$
1 атм	$1,01 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^4$	1,03	1	$7,5 \cdot 10^2$
1 мм рт. ст.	$1,33 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^3$	13,6	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	1

Таблица 3

Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
$p_{н.п.}, \text{Па}$	50,5	125,6	279,6	612	1179	2335	4240	7360	12320

Таблица 4

Зависимость коэффициента кинематической вязкости воды от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	7	10	12
$\nu, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,0179	0,0152	0,0143	0,0131	0,0124
$t, ^\circ\text{C}$	15	17	20	25	30
$\nu, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,0114	0,0109	0,0101	0,009	0,008

Таблица 5

Плотность ρ воды

$t, ^\circ\text{C}$	+10	+20	+30	+40	+50
$\rho, \text{кг/м}^3$	999,73	998,23	995,67	992,24	988,07

Таблица 6

Шероховатость труб

Характеристика поверхности труб	Материал	$\Delta, \text{мм}$
1. Цельнотянутые трубы	из латуни	0,0015 – 0,01
	новые стальные	0,02 – 0,1
	стальные, находящиеся в эксплуатации	1,2 – 1,5
2. Цельносварные стальные трубы	новые	0,04 – 0,1
	бывшие в эксплуатации	0,1 – 0,15
3. Чугунные трубы	новые	0,25 – 1,0
	новые битумизированные	0,1 – 0,15
	бывшие в эксплуатации	1,0 – 1,5
4. Бетонные и асбестоцементные трубы	бетонные трубы при хорошей поверхности с затиркой	0,3 – 0,8
	бетонные трубы с шероховатой поверхностью	3,0 – 9,0
	новые асбестоцементные трубы	0,05 – 0,1
	асбестоцементные трубы, бывшие в эксплуатации	0,6
5. Стекланые трубы	трубы из чистого стекла	0,0015 – 0,01

Таблица 7

Значения коэффициента при внезапном расширении трубопровода

$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$\zeta_{в.р}$	81	64	49	36	25	16	9	4	1	0

Таблица 8

Значение коэффициента $\zeta_{в.с.}$ при внезапном сужении трубопровода

$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\zeta_{в.с.}$	0,41	0,4	0,38	0,36	0,34	0,3	0,27	0,2	0,16	0,1	0

Таблица 9

Значения коэффициента $\zeta_{\text{диафр}}$ диафрагмы в трубопроводе

$n_{\text{диафр}} = \omega_0 / \omega$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\zeta_{\text{диафр}}$	224	60,2	19,9	9,8	4,4	2,4	1,22

Таблица 10

Значения A и $\zeta_{\text{кв}}$ для некоторых местных сопротивлений

Наименование сопротивлений	A	$\zeta_{\text{кв}}$
Пробочный кран	150	0,40
Вентиль обыкновенный	3000	4,0
Вентиль «Косва»	900	2,5
Угловой вентиль	400	0,8
Шаровой клапан	5000	45
Угольник 90°	400	1,4
Угольник 135°	600	0,4
Колено 90°	130	0,2
Тройник	150	0,3
Задвижка (полное открытие)	75	0,15
Задвижка ($n = 0,75$)	350	0,2
Задвижка ($n = 0,5$)	1300	2,0
Задвижка ($n = 0,25$)	3000	20
Диафрагма ($n = 0,64$)	70	1
Диафрагма ($n = 0,40$)	120	7
Диафрагма ($n = 0,16$)	500	70
Диафрагма ($n = 0,05$)	3200	800

СОДЕРЖАНИЕ

МОДУЛЬ 0. Введение в курс «Механика жидкости и газа».....	3
Краткий исторический обзор развития механики жидкости	5
Цель преподавания дисциплины.....	9
Задачи изучения дисциплины	9
МОДУЛЬ 1. Физические свойства жидкости.....	10
Введение.....	10
Схема изучения материала	10
1. Основные физические свойства жидкости	11
Лабораторная работа № 1. «Определение вязкости жидкости вискозиметром Энглера»	19
Задания для практических занятий.....	24
Контрольные вопросы.....	25
Литература	26
МОДУЛЬ 2. Напряженное состояние жидкости.....	27
Схема изучения материала	27
1. Классификация сил, действующих в жидкости.....	27
2. Свойства напряжений поверхностных сил, действующих в жидкости	29
3. Уравнения движения жидкости в напряжениях	33
Контрольные вопросы.....	35
Литература	35
МОДУЛЬ 3. Гидростатика жидкости.....	36
Введение.....	36
Схема изучения материала	36
1. Дифференциальное уравнение равновесия жидкости (уравнение Эйлера).....	37
2. Поверхности равного давления.....	38
3. Основное уравнение гидростатики.....	40
4. Геометрическая интерпретация основного уравнения гидростатики.....	41
5. Закон Паскаля и его практическое приложение.	
Графическое изображение давления	43
6. Абсолютное и манометрическое давление. Вакуум.	
Приборы для измерения давления	46
7. Давление жидкости на плоские стенки	51
8. Давление жидкости на цилиндрические стенки.....	55
9. Закон Архимеда	57
Лабораторная работа № 2. «Приборы для измерения давлений. Измерение давления с помощью ртутного дифманометра»	58
Задания для практических занятий.....	66
Контрольные вопросы.....	74
Литература	75
МОДУЛЬ 4. Кинематика жидкости.....	76
Введение.....	76
Схема изучения материала	76
1. Два метода изучения движения жидкости	77

2. Виды движения жидкости	78
3. Линия тока и элементарная струйка	81
4. Гидравлические характеристики потока. Расход и средняя скорость	84
5. Уравнение неразрывности жидкости в дифференциальной форме	86
6. Уравнение неразрывности для элементарной струйки и потока жидкости при установившемся движении	88
Контрольные вопросы.....	90
Литература	90
МОДУЛЬ 5. Динамика жидкости	91
Введение.....	91
Схема изучения материала	92
1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки невязкой жидкости	92
2. Энергетическая интерпретация уравнения Бернулли для установившегося движения. Три формы записи уравнения Бернулли	94
3. Уравнение Бернулли для элементарной струйки вязкой жидкости	96
4. Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости при плавно изменяющемся движении	97
5. Условия применения уравнения Бернулли	99
Лабораторная работа № 3. «Построение диаграммы уравнения Бернулли».....	100
Задания для практических занятий.....	104
Контрольные вопросы.....	109
Литература	109
МОДУЛЬ 6. Режимы движения вязкой жидкости	110
Введение.....	110
Схема изучения материала	110
1. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Число Рейнольдса и его критическое значение	110
2. Турбулентные потоки. Осредненные скорости и напряжения. Пульсационные составляющие	115
3. Двухслойная модель турбулентного потока.....	116
4. Полуэмпирическая теория турбулентности Л. Прандля	117
Лабораторная работа № 4. «Исследование режимов движения жидкости в круглой трубе»	119
Контрольные вопросы.....	123
Литература	124
МОДУЛЬ 7. Потери напора при равномерном движении жидкости в круглой трубе.....	125
Схема изучения материала	125
1. Классификация потерь напора	126
2. Касательные напряжения и их распределение при равномерном движении	133
3. Потери напора при равномерном движении жидкости	135
Лабораторная работа № 5. «Определение коэффициента гидравлического трения при движении жидкости в круглой трубе»	148
Задания для практических занятий.....	153
Контрольные вопросы.....	155
Литература	156

МОДУЛЬ 8. Потери напора при неравномерном движении жидкости.....	157
Введение.....	157
Схема изучения материала.....	158
1. Потери напора на начальных участках трубопроводов.....	158
2. Потери напора в местных сопротивлениях.....	159
3. Потери напора при внезапном расширении. Формула Борда.....	162
4. Выход из трубы. Диффузор. Внезапное сужение. Вход в трубу. Конфузоры. Поворот.....	164
5. Эквивалентная длина. Взаимное влияние местных сопротивлений.....	167
6. Зависимость коэффициентов местных сопротивлений от числа Рейнольдса.....	169
Лабораторная работа № 6. «Измерение потерь напора в местных сопротивлениях».....	170
Контрольные вопросы.....	175
Литература.....	176
МОДУЛЬ 9. Гидравлические расчеты трубопроводов при напорном движении жидкости.....	177
Введение.....	177
Схема изучения материала.....	179
1. Расчет простого трубопровода постоянного диаметра.....	179
2. Три типа задач расчета трубопровода.....	181
3. Последовательное и параллельное соединение труб.....	185
4. Расчет трубопровода с непрерывным изменением расхода по длине.....	186
5. Сифонный трубопровод.....	187
6. Гидравлический расчет разветвленного трубопровода.....	191
7. Гидравлический удар как неустановившееся движение упругой жидкости в упругих трубопроводах.....	194
Задания для практических занятий.....	211
Контрольные вопросы.....	216
Литература.....	218
МОДУЛЬ 10. Истечение жидкости из отверстий и насадков.....	219
Введение.....	219
Схема изучения материала.....	221
Истечение жидкости при постоянном напоре.....	222
1. Истечение через малое незатопленное отверстие с острой кромкой.....	222
2. Коэффициенты сжатия, скорости и расхода при истечении через незатопленное малое отверстие.....	226
3. Истечение через малое затопленное отверстие с острой кромкой.....	227
4. Истечение через насадки.....	228
5. Вакуум во внешнем цилиндрическом насадке.....	231
6. Истечение через внешний затопленный цилиндрический насадок.....	233
7. Истечение через нецилиндрические насадки.....	234
8. Сравнение гидравлических характеристик отверстий и насадков.....	236
Истечение жидкости при переменном напоре.....	237
9. Общая характеристика явления.....	237
10. Истечение при переменном напоре и постоянном притоке.....	238
Лабораторная работа № 7. «Истечение жидкости через малые отверстия при постоянном напоре».....	242

Лабораторная работа № 8. «Истечение жидкости через насадки при постоянном напоре»	246
Контрольные вопросы.....	251
Литература.....	252
МОДУЛЬ 11. Гидравлические струи	253
Введение.....	253
Схема изучения материала	253
1. Затопленные струи	253
2. Незатопленные струи	256
Контрольные вопросы.....	258
Литература	258
МОДУЛЬ 12. Сужающие устройства для измерения расхода жидкости	259
Схема изучения материала	259
1. Объемные расходомеры.....	259
2. Расходомеры переменного перепада давления	265
3. Конструктивные особенности сужающих устройств	267
4. Расходомеры постоянного перепада давления.....	269
Контрольные вопросы.....	274
МОДУЛЬ 13. Относительное движение тела и жидкости	276
Введение.....	276
Схема изучения материала	276
1. Обтекание потоком жидкости пластинки	276
2. Сопротивление давления	277
3. Давление ветра на здания и сооружения.....	281
4. Сопротивление трения. Пограничный слой.....	282
Контрольные вопросы.....	284
Литература	284
ГЛОССАРИЙ.....	285
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	293

Учебное издание

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

для студентов специальности 1-70 04 02
«Теплоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»

Составители

ЛИПСКИЙ Владимир Константинович
КОМАРОВСКИЙ Дмитрий Петрович

Редактор Ю.В. Мацук

Дизайн обложки И.С. Васильевой

Подписано в печать 17.04.06. Формат 60x84 ¹/₁₆. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 17,4. Уч.-изд. л. 17,44. Тираж 92. Заказ 1533

Издатель и полиграфическое исполнение –
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29