

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н.И. Вавилова»**

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
для студентов 2 курса
направления подготовки

35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции
профиль подготовки
Технологии пищевых производств в АПК

Саратов 2018

Гидромеханические процессы в пищевой промышленности: методические указания для выполнения лабораторных работ для студентов 2 курса направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции /Под. ред. Моргуновой Н.Л. Сост. Моргунова Н.Л.// ФГБОУ ВО "Саратовский ГАУ". – Саратов, 2018.- 39с.

Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины: "Гидромеханические процессы в пищевой промышленности" и предназначены для студентов 2 курса направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Направлены на формирование у студентов навыков использования в практической деятельности специализированных знаний разделов гидромеханики

СОДЕРЖАНИЕ

1. Единицы измерения физических величин. Физические свойства жидкостей.
2. Приборы для измерения уровня, давления, расхода.
3. Измерение и вычисление гидростатического давления.
4. Обучающая программа «Решение задач по гидростатике»
5. Режимы движения.
6. Экспериментальное исследование уравнения Бернулли на трубе переменного сечения.
7. Истечение при постоянном напоре.
8. Экспериментальное определение коэффициента гидравлического трения.
9. Экспериментальное исследование работы центробежного насоса.
10. Обучающая программа «Решение задач по гидродинамике»

Введение

Дисциплина «Гидромеханические процессы в пищевой промышленности» является первым блоком дисциплин гидромеханики, к которым относятся также «Реология» и «Процессы и аппараты пищевых производств». Знания, полученные в рамках данной дисциплины, позволят грамотно проводить инженерные расчеты. Несомненно, что эта дисциплина является базой для следующих двух дисциплин, и основные законы течения жидкостей лежат в основе теории гидромеханики. Технологи перерабатывающих производств изучают следующие разделы: гидростатика, гидродинамика. Выходным контролем дисциплины «Гидромеханические процессы в пищевой промышленности» является экзамен, для дисциплины «Реология» - зачет, для дисциплины «Процессы и аппараты пищевых производств» - экзамен.

ТЕМЫ 1, 2. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Цель занятия: Изучить единицы измерения физических величин. Ответить на контрольные вопросы.

Единицы измерения физических величин подразделяют на основные, производные и дополнительные.

Основные единицы измерения – это значения физических величин, выбранные в определенной системе измерения. Основные величины могут выбираться произвольно, но важно, чтобы система была удобной для практического применения. Как правило, в качестве основных единиц выбирают величины, характеризующие коренные свойства материального мира: длину, массу, время, силу, температуру, количество вещества и др. Каждой основной величине присвоен символ в виде прописной буквы латинского или греческого алфавита, называемой **размерностью** основной физической величины.

Основные единицы

Величина	Единица измерения		
	Система СИ	СГС	МКГСС
Длина	м	см	м
Масса	кг	г	кгс (кГ)
Время	с	с	с

До того как метрологи мира пришли к идее введения **МСИ (СИ)** была широко распространена система единиц измерения **СГС**, в которой в качестве основных системных единиц измерения были приняты: сантиметр (см) для измерения длины, грамм (г) для измерения массы и секунда для измерения времени. Многие пользуются этой системой до сих пор. Аналогично в технике существовала своя техническая система единиц измерений **МКГСС**, в которой в качестве основных системных единиц измерения были приняты метр (м) для измерения длины, килограмм-сила (кгс или кГ) для измерения силы и секунда (с) для измерения времени. Так в международной системе единиц СИ масса вещества измеряется в кг, объём жидкого тела в $м^3$.

Производные единицы могут быть выражены через основные с помощью математических операций умножения и деления. Некоторым из производных единиц, для удобства, присвоены собственные названия, такие единицы тоже можно использовать в математических выражениях для образования других производных единиц.

Математическое выражение для производной единицы измерения вытекает из физического закона, с помощью которого эта единица измерения определяется или определения физической величины, для которой она вводится. Например, скорость — это расстояние, которое тело проходит в единицу времени. Соответственно, единица измерения скорости — м/с (метр в секунду).

Часто одна и та же единица измерения может быть записана в нескольких вариантах, с помощью разного набора основных и производных величин. Однако, на практике, используются установленные (или просто общепринятые) выражения, которые наилучшим образом отражают физический смысл измеряемой величины. Например, для записи значения момента силы следует использовать $H \times m$, и не следует использовать $m \cdot H$ или $Dж$.

Например, производные единицы получают используя второй закон Ньютона $F = m \cdot a$, опуская векторные обозначения: $H = \frac{кг \cdot м}{с^2}$; $Па = H / м^2 = (кг \cdot м) / (с^2 \cdot м^2)$; $Дж = H \cdot м$; для плотности $\rho = m / V = кг / м^3$ и т.д.

Единицы, не входящие в Систему СИ

Некоторые единицы измерения, не входящие в Систему СИ, по решению Генеральной конференции по мерам и весам «допускаются для использования совместно с СИ».

Единица измерения	Международное название	Обозначение		Величина в единицах СИ
		русское	международное	
минута	minute	мин	min	60 с
час	hour	ч	h	60 мин = 3600 с
сутки	day	сут	d	24 ч = 86 400 с
градус	degree	°	°	(П/180) рад
литр	litre (liter)	л	l, L	1 дм ³
тонна	tonne	т	t	1000 кг
морская миля	nautical mile	миля		1852 м

Дополнительными единицами являются величины, полученные из основных и производных посредством введения величин, кратных 10, они имеют приставки (милли 10⁻³, санти 10⁻²).

Приставки СИ для образования десятичных и дольных единиц

Наименование	Русское обозначение	Международное обозначение	Множитель
экса	Э	E	10 ¹⁸
пета	П	P	10 ¹⁵
тера	Т	T	10 ¹²
гига	Г	G	10 ⁹
мега	М	M	10 ⁶
кило	к	k	10 ³
гекто	г	h	10 ²
дека	да	da	10 ¹
деци	д	d	10 ⁻¹
санти	с	c	10 ⁻²
милли	м	m	10 ⁻³
микро	мк	μ	10 ⁻⁶
нано	н	n	10 ⁻⁹
пикто	п	p	10 ⁻¹²
фемто	ф	f	10 ⁻¹⁵
атто	а	a	10 ⁻¹⁸

За единицу давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль – давление, вызываемой силой 1Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м². В качестве единиц давления применяют также *физическую и техническую атмосферы*.

Физическая (нормальная) атмосфера есть то давление, которое своим весом производит столб ртути высотой в 760 мм и поперечным сечением 1 см², равна 1,033 кгс/см² (10330 кгс/м²). Техническая атмосфера соответствует давлению в 1 кгс/см² и равна давлению столба ртути высотой 735,6 мм и поперечного сечения 1 см² или 0,968 физической атмосферы.

Давление p может измеряться в абсолютных атмосферах (ата) и в избыточных атмосферах (ати), т. е. в атмосферах, превышающих давление наружного воздуха.

Обычно принимают, что температура t измеряется в градусах международной (стоградусной) шкалы (°С); при этом за 0°С принята температура таяния льда, а за 100°С — температура кипения воды при давлении в 1 физическую атмосферу.

Физическая атмосфера:

$1 \text{ атм.} = 760 \text{ мм рт.ст.} = \rho \cdot g \cdot h = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,760 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,033 \cdot 10^4 \text{ мм вод.ст.} = 1,033 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 1,033 \text{ кгс/см}^2$.

Техническая атмосфера:

$1 \text{ ат.} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10000 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 735,6 \text{ мм рт.ст.} = 10^4 \text{ мм вод.ст.}$

$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 1,02 \text{ атм.} = 0,102 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

В системе СГС за единицу вязкости принимается пуаз $1 \text{ П} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с/см}^2$.

Так как $1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н} = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ кгс}$, а $1 \text{ м}^2 = 10^4 \text{ см}^2$, то $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 0,0102 \text{ кгс} \cdot \text{с/м}^2$. Учитывая, что ньютон измеряется в $(\text{кг} \cdot \text{м})/\text{с}^2$, размерность динамической вязкости (μ или η) можно представить и так $\mu = \text{Па} \cdot \text{с} = \text{Н} \cdot \text{с/м}^2 = (\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с})/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2) = \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Единицей измерения кинематической вязкости является стокс $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$; $\nu = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}} = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = 10^4 \text{ см}^2/\text{с} = 10^4 \text{ Ст}$; сотая доля стокса называется сантистоксом (сСт).

Градус Цельсия (обозначение: °С) — широко распространённая единица измерения температуры, применяется, наряду с Кельвином.

Градус Цельсия назван в честь шведского учёного Андерса Цельсия, предложившего в 1742 году новую шкалу для измерения температуры. За ноль по шкале Цельсия принималась точка плавления льда, а за 100° — точка кипения воды при стандартном атмосферном давлении. Эта шкала линейна в интервале 0—100° и так же линейно продолжается в области ниже 0° и выше 100°. Линейность является основной проблемой при точных измерениях температуры. Классический термометр, заполненный водой, невозможно разметить для температур ниже 4 градусов Цельсия, т.к. в этом диапазоне вода начинает снова расширяться.

Согласно современному определению, градус Цельсия равен одному Кельвину, а ноль шкалы Цельсия установлен таким образом, что температура тройной точки воды равна 0,01 °С. В итоге, шкалы Цельсия и Кельвина сдвинуты на 273,15: °С = К - 273,15. Тройная точка воды — строго определенные значения температуры и давления, при которых вода может одновременно и равновесно существовать в виде трёх фаз — в твердом, жидком и газообразном состояниях. В системе СИ температура тройной точки воды принята равной 273,16 К при давлении 609 Па.

Кельвин (обозначение: К) — единица измерения температуры в СИ, предложена в 1848 году. До 1968 года Кельвин официально именовался *градусом Кельвина*.

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	$10 \text{ Н} \approx 1 \text{ кгс}$
Плотность	кг/м^3	$1000 \text{ кг/м}^3 = 1 \text{ г/см}^3$
Вязкость кинематическая	$\text{м}^2/\text{с}$	$1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$
Давление	$\text{Па} = \text{Н/м}^2$	$100000 \text{ Па} \approx 1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 760 \text{ мм рт.ст.}$

Дюйм (от нидерл. duim — большой палец) — русское название для единицы измерения расстояния в некоторых европейских неметрических системах мер. Слово дюйм введено в русский язык Петром I в самом начале XVIII века. В России наиболее были известны английский дюйм и французский дюйм; первый чаще применялся в науке и технике, второй — в типографике.

Старая русская система мер была привязана к английской: 1 дюйм (равный английскому) = 10 линий = 100 точек = 4/7 вершка = 1/12 фута (равных английским) =

1/28 аршина = 1/84 сажени = 1/42000 версты, однако в быту использовались преимущественно не футы и дюймы, а соразмерные им аршины (7/3 фута) и вершки (7/4 дюйма).

Сегодня под дюймом чаще всего понимают английский дюйм, равный **2,54 см** ровно. В последние годы под влиянием американской техники и технической терминологии дюймы употребляются в русском языке существенно чаще.

Размерности имеют широкое практическое применение и позволяют переводить единицы из одной системы в другую, проверять правильность расчетных формул, оценивать изменение размера производной величины при изменении размеров основных величин.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

К основным свойствам всех жидкостей относят:

1. Плотность
2. Удельный вес
3. Давление столба жидкости

К основным физическим свойствам капельных жидкостей относят:

1. Упругость
2. Сжимаемость
3. Температурное расширение
4. Вязкость
5. Поверхностное натяжение
6. Растворимость газов в капельных жидкостях
7. Испаряемость

Изучим поверхностное натяжение жидкости с помощью лабораторной работы.

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему, делают краткий конспект, изучают поверхностное натяжение жидкости с помощью виртуальной лабораторной работы. В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер с выходом в Интернет

Список литературы

<http://fcior.edu.ru/> Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов.

Контрольные вопросы

1. Что такое основные, производные и дополнительные единицы измерения величин?
2. Единицы измерения давления?
3. Понятия техническая и физическая атмосферы?
4. Единицы измерения температуры?
5. Для чего применяют единицу измерения – дюйм?
6. Какие основные физические свойства жидкостей.
7. Какими свойствами обладают капельные жидкости?

ТЕМЫ 3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ, ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ЖИДКОСТИ

Цель занятия: Изучить приборы для измерения уровня, давления и расхода жидкости. Ответить на контрольные вопросы.

Приборы для измерения уровня жидкости (уровнемеры)

Уровнемер - прибор для измерения или контроля уровня жидкостей и сыпучих материалов в емкостях, резервуарах, хранилищах, технологическом оборудовании химического производства и т.п. Уровнемер имеет шкалу с делениями, которая градуируется в см, дм и м.

Уровнемер для жидкости по принципу действия может быть:

поплавок, визуальный, гидростатический, электрический, ультразвуковой, радиоизотопный.

Поплавковые уровнемеры (рис 2.1). Чувствительный элемент - поплавок, находящийся на поверхности жидкости. На рис.а изображен уровнемер с плавающим поплавком. Уровень жидкости определяется положением груза относительно шкалы. Пределы измерений устанавливают в соответствии с принятыми значениями верхнего (ВУ) и нижнего (НУ) уровней. На рис.б представлен уровнемер с тонущим поплавком. При изменении уровня жидкости по закону Архимеда изменяется действующая на конец рычага выталкивающая сила. Действие этой силы воспринимает тензопреобразователь, либо индуктивный преобразователь, либо заслонка, перекрывающая сопло.

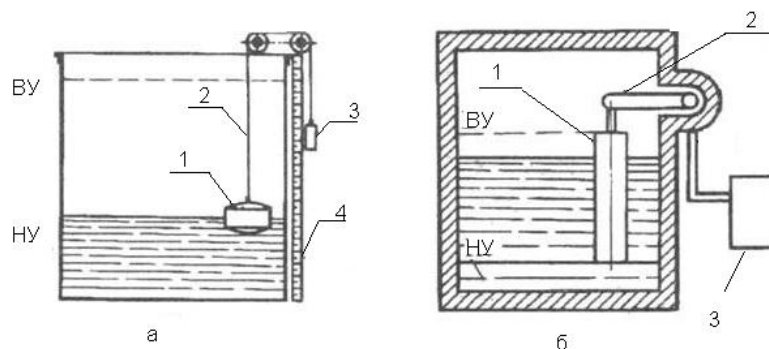


Рис. 2.1 Поплавковые уровнемеры

а – с плавающим поплавком: 1 – поплавок, 2- гибкий трос, 3- груз, 4- шкала; б – с тонущим поплавком: 1 – тонущий поплавок (бук), 2- рычаг, 3- тензопреобразователь.

Визуальные уровнемеры (рис. 2.2) - простейшие измерители уровня жидкости. К резервуару 1 через запорные вентили 2 подсоединено уровнемерное (водомерное) стекло (трубка 3). Аппарат и трубка представляют собой сообщающиеся сосуды, поэтому уровень H жидкости в трубке всегда равен ее уровню в аппарате и отсчитывается по шкале.

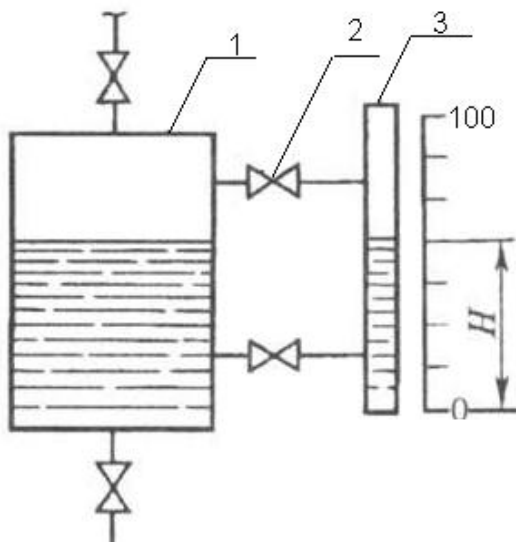


Рис. 2.2 Визуальный уровнемер

1 – резервуар, 2 – запорные вентили, 3- уровнемерное стекло.

Приборы для измерения давления

Приборы для измерения давления подразделяются на:

1. приборы для измерения атмосферного давления – барометры;
2. приборы для измерений разности абсолютного и атмосферного давлений, т.е. избыточного давления и вакуума.

Приборы, измеряющие положительное избыточное давление называются манометрами. Приборы, измеряющие вакуум (недостаток давления до атмосферного) называют вакуумметрами. Приборы, измеряющие как манометрическое давление, так и вакуум называют мановакуумметрами.

3. приборы для измерения абсолютного давления называются манометрами абсолютного давления.

Абсолютное давление измеряется с помощью двух приборов манометра и барометра, если измеряемое давление больше атмосферного, и барометра и вакуумметра, если измеряемое давление меньше атмосферного.

4. приборы для измерения разности давлений – дифференциальные манометры.

По принципу действия приборы делятся на: жидкостные; деформационные (пружинные, мембранные); поршневые; электрические; комбинированные.

В жидкостных приборах давление уравнивается высотой столба жидкости, в поршневых – силой (грузом), действующей на поршень определенного сечения. В деформационных приборах, измеряемое давление уравнивается силой упругой деформации трубчатой пружины или мембраны. По целевому назначению приборы давления подразделяются на рабочие, контрольные и образцовые.

Жидкостные приборы

К приборам жидкостного типа относятся: пьезометр, ртутные манометры, поршневые манометры, дифференциальные манометры, микроманометры, вакуумметры. Пределы измерения таких манометров определяются их геометрическими размерами и плотностью уравнивающей жидкости и, как правило, не превышают 10^5 Па (750 мм. рт. ст.).

1. **Пьезометр** (рис 2.3а) применяется для избыточного давления и представляет собой вертикальную трубку с открытым верхним концом, который сообщается с атмосферой. Нижний конец трубки соединяется с точкой, в которой измеряется давление.

Под действием давления жидкость в трубке поднимается на высоту h , измеряемую по линейной шкале. Величина избыточного давления $P_{изб}$ в данной точке жидкости определяется по формуле:

$$P_{изб} = \gamma \pm h_1, \quad (2.1)$$

где γ – удельный вес жидкости, h – показание пьезометра, h_1 – глубина точки А под уровнем 0 шкалы прибора.

Величина h_1 (постоянную для данной точки) называют поправкой на положение прибора. Знак поправки зависит от вертикального расположения точки А и нуля прибора (если точка А ниже нуля прибора – поправка положительная, если выше нуля, то поправка отрицательная).

Пьезометрическая высота характеризует избыточное давление в сосуде и может быть мерой для определения его значения. Измерение давления пьезометрами весьма удобно и часто применяется в технике измерений, так как пьезометр очень чувствительный и точный прибор.

2. **Дифференциальный манометр** (дифманометр) (рис 2.3б) применяется для измерения разности давлений. Дифманометр применяется в том случае, если давление велико, а разность давлений мала и ее требуется определить с большой точностью. Дифференциальный манометр состоит из U-образной стеклянной трубки, примерно наполовину, заполненной рабочей жидкостью. Колена трубки присоединяются к точкам измерения давления. Под действием разности давлений рабочая жидкость в коленах перемещается.

Показания манометра связано с разностью давлений на уровнях рабочей жидкости в коленах:

$$P_{M_1} - P_{M_2} = \gamma_p \cdot h, \quad (2.2)$$

где γ_p – удельный вес рабочей жидкости.

Чтобы определить величину измеряемой разности давлений P_1 - P_2 надо выразить давления P_1 и P_2 через манометрические давления P_{M1} и P_{M2} .

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{M2} - \gamma \cdot h_1 \\ P_2 &= P_{M2} - \gamma \cdot h_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

где γ – удельный вес жидкости.

Тогда разность приборов может быть выражена:

$$P_1 - P_2 = \gamma_p \cdot h - \gamma(h_1 - h_2), \quad (2.4)$$

т.к. $h_1 = h + h_2$ преобразуем выражение (2.4):

$$P_1 - P_2 = \gamma_p - \gamma \cdot h. \quad (2.5)$$

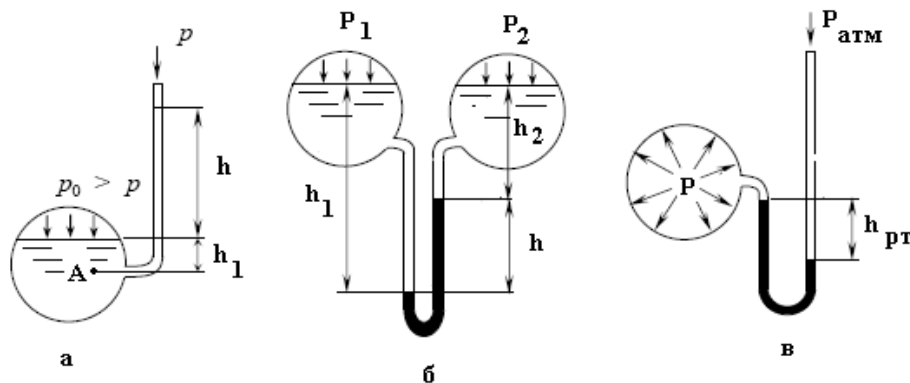


Рис. 2.3 а- пьезометр; б – дифманометр, в- вакуумметр

3. Вакуумметр – прибор для измерения вакуума. Вакуумметр (рис. 2.3в) представляет собой изогнутую трубку. Трубка с открытым концом сообщается с атмосферой. Применяя основное уравнение гидростатики:

$p = p_{атм} - \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт}$, находим высоту $h_{рт}$:

$$h_{рт} = \frac{P_{атм} - P}{\rho_{рт} g}. \quad (2.6)$$

Высоту $h_{рт}$ называют вакуумметрической и обозначают $h_{вак}$.

Применение рассмотренных приборов жидкостного типа ограничивается областью сравнительно невысоких давлений. В основном, их используют в лабораторной практике.

Деформационные приборы

Деформационные приборы для измерения давления имеют очень широкий диапазон применения: от 10 до 10^9 Па. В манометрах такого типа используется для измерения деформация или изгибающий момент упругих чувствительных элементов. Разновидностью деформационных приборов являются приборы с трубчатой пружиной, а так же самопишущие приборы. Самопишущие приборы (рис. 2.5, д) имеют в качестве чувствительного элемента многовитковую трубчатую пружину для манометров с верхним пределом измерения от 1 до 160 МПа либо мембрану - сильфон для манометров с верхним пределом измерения от 0,06 до 0,6 МПа, а так же для вакуумметров и большинства

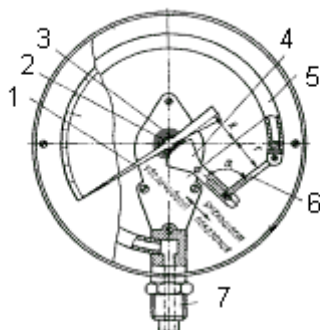


Рис. 2.4 Манометр
1- стрелка, 2 трубка, 3 - пружина, 4 - сектор, 5 - датчик давления, (манометрическая трубка), 6 - поводок, 7 - штуцер

мановакуумметров.

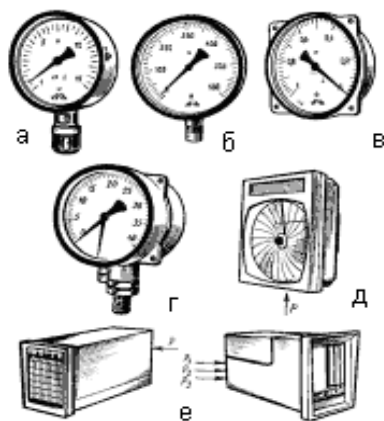


Рис. 2.4 Общий вид манометров, показывающие: а- типа ОБВ, б - типа АМУ, в - типа МОШ, электроконтактный типа ЭКМ, д -самопишущий типа МТС, е- регистрирующий типа ПКР.

Манометр. В качестве чувствительных элементов у манометров используются трубчатые пружины. Как видно из рисунка 2.4 один конец трубчатой пружины 3 переходит в штуцер 7 для восприятия измеряемого давления. Под действием давления свободный конец манометрической трубки 5 будет деформироваться (изгибаться), причем величина упругой деформации пропорциональна измеряемому давлению. В силу этого соотношения измерительная стрелка 1 за счет перемещения кинематического узла (трубка 2 - сектор 4 поводок 6) показывает относительно шкалы прибора истинное значение измеряемого давления.

В зависимости от назначения манометры (рис. 2.4) имеют соответствующую маркировку: виброустойчивые - МТП, МВТП; сверхвысокого давления - СВ; взрывозащищенные ВЭ-16-Р6; точных измерений - МТИ, ВТИ (класс 0,6; 1,0); образцовые - МО, ВО (класс 0,4), технические -

МТ; МОШ; ОБМ.

В мембранных дифманометрах в качестве чувствительного элемента применяется мембранный блок (разделитель), состоящий из двух мембранных коробок, соединённых между собой и заполненных жидкостью. Одна из коробок расположена в "плюсовой" - нижней камере дифманометра, а другая - в верхней, "минусовой" камере. Центр мембранной коробки "минусовой" камеры соединён с преобразователем, передающим сигнал на вторичный показывающий или самопишущий прибор.

Приборы для измерения расхода и скорости

Измерение расхода с помощью объемных мерных баков. Этот способ состоит в том, что соответствующим измерителем объема (мерным баком или счетчиком) определяется количество жидкости, протекающее через систему за некоторый промежуток времени t (определяется секундомером).

$$\begin{aligned} W &= W_2 - W_1 \\ t &= T_2 - T_1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

где W_2 и W_1 – показания объемного мерника в конце и в начале опыта, T_2 и T_1 – показания секундомера в конце и в начале опыта.

Расход жидкости вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{W}{t}. \quad (2.8)$$

Этот способ измерения является достаточно точным и широко применяется в лабораторной практике.

Измерение расхода с помощью сужающих устройств. Этот способ основан на введении в поток сужающих устройств (диафрагмы или сопла), на основании чего в потоке возникает перепад давления.

Между величинами перепада давления и расходом жидкости есть определенная зависимость, которая может быть использована для вычислений расхода по перепаду давления. Составляется уравнение Бернулли для сечений перед входом в сужающее устройство и наибольшего сжатия потока. На основании уравнения Бернулли и уравнения неразрывности формула расхода Q может быть представлена в виде:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (2.9)$$

где μ - коэффициент расхода отверстия,
 H – напор истечения жидкости,
 ω - площадь отверстия.

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкости применяют диафрагмы или водомеры Вентури (рис 2.6 б). Диафрагма конструктивно является наиболее простым прибором, но обладает наибольшим гидравлическим сопротивлением и вызывает значительную потерю напора. Более совершенной конструкцией в отношении гидравлических сопротивлений является водомер Вентури. Расходомер Вентури состоит из двух конических насадков с цилиндрической вставкой между ними. Если в сечениях I-I и II-II поставить пьезометры, то разность уровней в них будет зависеть от расхода жидкости, протекающей по трубе. Действие прибора основано на принципе уравнения Бернулли.

Напорные устройства. Напорные устройства создают перепад давления, зависящий от динамического давления потока. Они преобразуют кинетическую энергию потока в потенциальную. К этим устройствам относятся напорные трубки, усреднители, крылья и усилители. Напорные усреднители образуют перепад давления в зависимости от расхода, а остальные устройства - в зависимости от скорости, существующей в месте их установки. С помощью напорных трубок можно определить расход жидкостей и газов.

Для измерения скорости в точках потока широко используется работающая на принципе уравнения Бернулли трубка Пито (рис.2.6 а), загнутый конец которой направлен навстречу потоку. Названа эта трубка по имени её изобретателя французского учёного А. Пито.

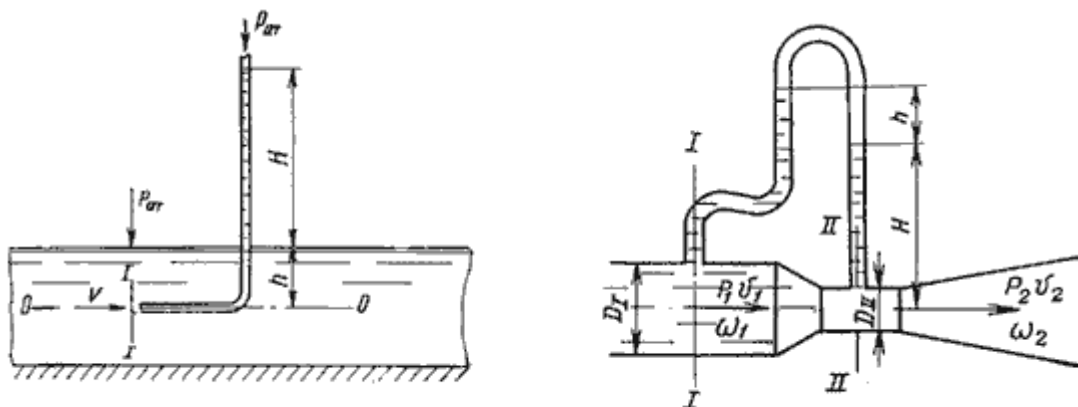


Рис.2.6. а - Трубка Пито, б- расходомер Вентури

Если в некоторой точке потока необходимо знать значение скорости, то в эту точку устанавливают продольно обтекаемую трубку (рис. 2.7). Тогда нулевая линия в точке А образует так называемую критическую точку, в которой скорость потока обращается в нуль. В последующих точках по поверхности трубки скорость будет расти и затем вновь падать (рис. 2.7), достигнув на некотором удалении от носика скорости, которая была бы в этом месте при отсутствии трубки.

Уравнение Бернулли для двух сечений 1-1 и 0-0 нулевой линии тока будет иметь вид:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho v_0^2}{2} + P_0, \quad (2.10)$$

где ρ – плотность среды кг/м³; v_1 , v_0 – скорость среды в соответствующих сечениях, м/с; P_1 , P_2 – давление в соответствующих сечениях, Па.

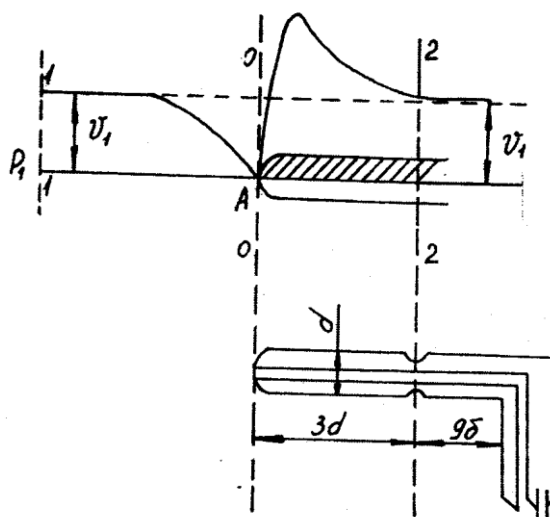


Рис. 2.7 Распределение скорости вдоль трубки Пито

Так как скорость $v_0=0$, то скорость v_1 равна:

$$v_1 = \sqrt{2(P_0 - P_1) / \rho}. \quad (2.11)$$

Полное давление P_0 может быть определено, если в критической точке сделать отверстие и тонкой трубкой соединить его с микроманометром. Давление P_1 определяют с помощью щели или нескольких отверстий, размещенных в сечении 2-2, в котором величина скорости из-за подтормаживающего влияния ножки трубки равна скорости v_1 . Из уравнения Бернулли, написанного для сечений 1-1 и 2-2, очевидно, что $P_1=P_2$. Отверстия в сечении 2-2 часто называют статическими.

Обычно разность давлений P_0 и P_1 измеряют дифференциальным микроманометром в миллиметрах водного столба. Трубки, имеющие лишь одно отверстие в критической точке, т.е. трубки для измерения полного напора, называют трубками Пито. Трубки, имеющие отверстие в критической точке и статическое отверстие, называют трубками Пито – Прандтля (рис. 2.8).

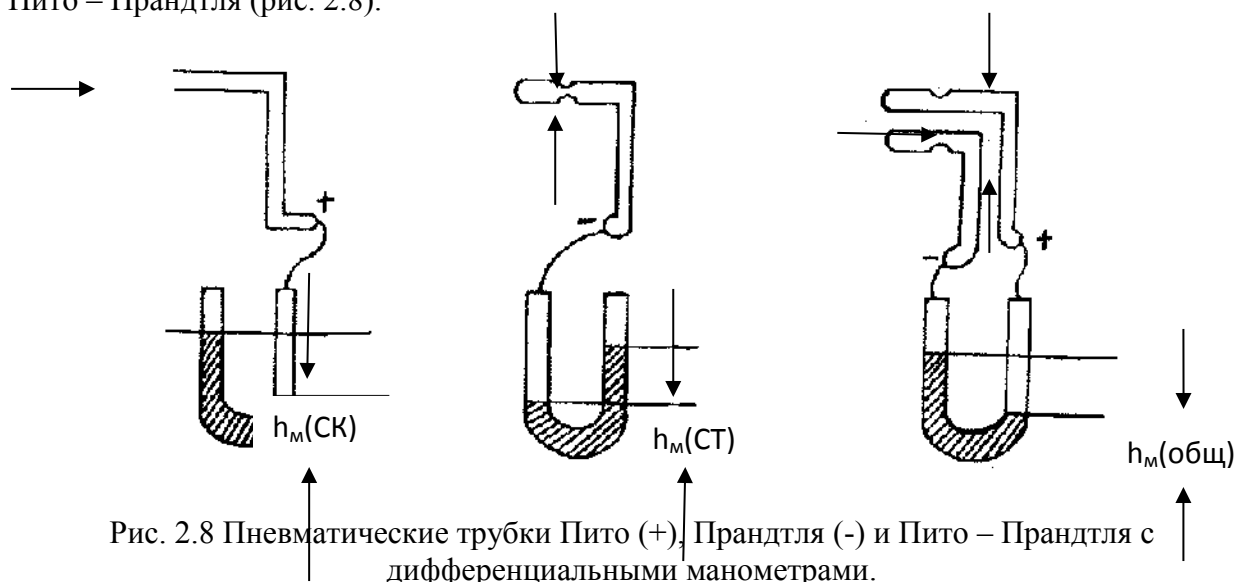


Рис. 2.8 Пневматические трубки Пито (+), Прандтля (-) и Пито – Прандтля с дифференциальными манометрами.

При изменениях в потоках газа с большими скоростями плотность его будет переменной и для расчета скорости пользуются формулой Сен-Венана.

Для определения больших скоростей данным методом необходимо использовать формулу:

$$P_0 - P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2(1 + \varepsilon)} \quad (2.11)$$

ε – поправка на сжимаемость, % (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Значения поправки на сжимаемость для различных скоростей

$v, \text{ м/с}$	34	68	102	136	170
$\varepsilon, \%$	0,25	1,0	2,25	4,0	6,2

Нижний предел скорости, определяемый скоростными трубками, зависит от точности измерений разности давлений. Обычно он равен 6-8 м/с.

Соответствующее подключение к трубкам Пито, Прандтля, Пито - Прандтля дифференциальных манометров (рис. 2.8) позволяет регистрировать на них значение общего $h_{м.общ}$, статического $h_{м.ст}$ и скоростного $h_{м.ск}$ напоров воздушного потока, так как

$$\begin{aligned} P_{общ} &= P_{м.общ} = \rho_m - \rho \cdot gh_{м.общ}, \\ P_{ст} &= P_{м.ст} = \rho_m - \rho \cdot gh_{м.ст}, \\ \Delta P_{ск} &= P_{общ} - P_{ст} = \frac{\rho v^2}{2}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Решая систему уравнений (2.12) относительно v , находят локальные значения скорости в любой точки поперечного сечения:

$$v = \sqrt{2} \frac{\Delta P_{ск}}{\rho} = \sqrt{2} gh_{м.ск} \frac{\rho_m - \rho}{\rho}. \quad (2.13)$$

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему, делают краткий конспект, изучают приборы с помощью виртуальной лабораторной работы. В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер с выходом в Интернет

Список литературы

<http://fcior.edu.ru/> Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы применяются для измерения уровня жидкости? Принцип их действия.
2. Какие приборы применяются для измерения давления?
3. Расскажите о жидкостных приборах для измерения давления.
4. Расскажите о деформационных приборах.
5. Какие приборы применяют для измерения расхода и скорости?

ТЕМЫ 4, 5. ИЗМЕРЕНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель занятия: изучить тему, подготовиться к проведению лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы.

По своим физическим свойствам жидкости занимают промежуточное положение между твердыми телами и газами. Жидкость мало изменяет свой объем при изменении давления или температуры, в этом отношении она сходна с твердым телом. Жидкость обладает текучестью, благодаря чему она не имеет собственной формы и принимает форму сосуда, в котором находится. В этом отношении жидкость имеет сходство с газом. Покоящаяся жидкость подвержена действию двух категорий внешних сил: массовых и поверхностных.

К массовым относят силы, направление и величина которых обусловлены массой самой жидкости. Например, сила тяжести, сила инерции, центробежная и т.д.

К поверхностным относят силы, действующие на поверхность, отделяющую рассматриваемый объем от газовой или твердой фазы. Например, сила давления атмосферного воздуха или поршня на поверхность жидкости.

В покое жидкости может существовать только напряжение сжатия, т.е. давление. Необходимо четко представлять разницу, между понятиями *среднего* гидростатического давления, гидростатического давления *в точке*, выраженных в единицах напряжения, и понятием суммарного гидростатического давления *на поверхность*, выраженного в единицах силы.

Наиболее часто встречающимся в природе и технике случаем равновесия (покоя) жидкости является равновесие под действием одной поверхностной силы (силы давления на свободную поверхность) и одной массовой силы (силы тяжести).

Основным понятием гидростатики является понятие гидростатического давления. Выделим, в находящейся в равновесии жидкости, некоторый объем произвольной формы. Рассечем его на две части I и II плоскостью АВ (рис. 3.1).

Воздействие части I жидкости на часть II будет передаваться по плоскости раздела АВ. Выделим на плоскости раздела площадку площадью ΔS . Заменим воздействие части I на эту площадку силой ΔP . Сила воздействия ΔP , приходящаяся на эту площадку называется силой гидростатического давления.

Отношение силы к площади представляет среднее гидростатическое давление:

$$p_{cp} = \frac{\Delta P}{\Delta S} . \quad (3.1)$$

Если площадь ΔS стремится к 0, то отношение $\frac{\Delta P}{\Delta S}$ будет стремиться к пределу, который называется гидростатическим давлением в точке.

В жидкости возникает давление, в результате действия этих сил. Давление в любой точке определяется по формуле:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} . \quad (3.2)$$

Единичное гидростатическое давление обладает **двумя основными свойствами**: давление в точке по всем направлениям действует с одинаковой силой и эта сила направлена всегда по внутренней нормали к площадке.

Гидростатическое давление – это сжимающее напряжение, возникающее в жидкости под действием сил тяжести, так как в покое жидкости не могут существовать касательные и растягивающие усилия. Величина гидростатического давления в любой точке жидкости по всем направлениям одинакова.

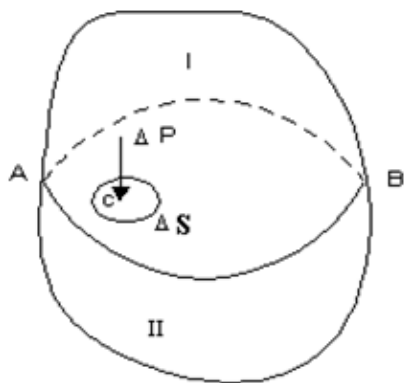


Рис. 3.1 Гидростатическое давление

Здесь термин «напряжение» понимается в механическом смысле, как величина, напрямую связанная с деформацией и расстоянием между молекулами. В механике сплошной среды напряжение есть просто отношение соответствующей силы к площади действия (нормальное напряжение, касательное напряжение).

Единичное гидростатическое давление зависит от глубины погружения точки и веса жидкости над данной точкой:

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (3.3)$$

где ρ – плотность жидкости кг/м³,

g – ускорение свободного падения, м/с²,

h – расстояние от точки в объеме жидкости до свободной поверхности, м.

Свободная поверхность – поверхность раздела фаз (например, жидкость – газ или жидкость – твердое тело).

На поверхности Земли все мы испытываем давление атмосферы Земли, так называемое атмосферное давление, равное одной атмосфере (1 атм). Известно, что атмосферное давление изменяется в зависимости от погоды. Эти изменения очень малы,

если измерять их в атмосферах, поэтому атмосферное давление измеряют в миллиметрах ртутного столба с помощью барометров.

Различают давление абсолютное (иногда употребляют термин «полное») и избыточное. Абсолютным называется давление, определённое с учетом атмосферного давления. Избыточное давление это давление сверх атмосферного, определенное без учета атмосферного.

$$p_{абс} = p_{атм} + p_{изб}; p_{изб} = p_{абс} - p_{атм} \quad (3.4)$$

Абсолютное давление не может быть отрицательным, так как жидкость не воспринимает растягивающих напряжений $p_{абс} \geq 0$. Избыточное давление может быть и больше и меньше нуля $0 \leq p_{изб} \geq 0$. Для удобства, отрицательное избыточное давление, взятое со знаком плюс, называют вакуумметрическим давлением $-p_{изб} = p_{вак}$.

Очень часто избыточное давление называют манометрическим, так как оно измеряется с помощью манометров, или пьезометрическим, так как оно измеряется с помощью пьезометров.

Если на свободную поверхность жидкости действует атмосферное давление p_o , то общее или абсолютное давление в точке жидкости будет определяться по формуле:

$$p_{абс} = p_o + \rho gh = p_o + p_{изб} \quad (3.5)$$

В этом случае единичное гидростатическое давление называют избыточным давлением.

Если на свободную поверхность жидкости действует давление p_m , которое больше атмосферного, то абсолютное давление в точке жидкости определяется по формуле:

$$p_{абс} = p_o + p_m + \rho gh = p_o + p_{изб} \quad (3.6)$$

В этом случае под избыточным давлением понимают сумму давлений манометрического p_m и гидростатического, равного ρgh .

Выражения (3.3.) и (3.5.) называют основными уравнениями гидростатики и позволяют рассчитать абсолютное или избыточное давление в любой точке объема жидкости, находящейся под действием одной массовой силы (например, силы тяжести) и одной поверхностной силы (силы давления на свободную поверхность).

Гидростатическое давление зависит от положения рассматриваемой точки внутри жидкости и от внешнего давления, действующего на свободной поверхности жидкости. Гидростатическое давление имеет размерность напряжения, т.е. (сила/площадь). Измеряют давление в Н/м² (Паскаль). Атмосферное давление измеряют технической атмосферой равной 98100 Па или физической равной 101325 Па, иногда используется единица бар (1бар=10⁵Па).

Таблица перевода единиц давления

	н/м ²	бар	кгс/см ²	атм	мм рт. ст.	мм вод. ст.
1 н/м² (Паскаль)	1	10 ⁻⁵	1,01972*10 ⁻⁵	0,98692*10 ⁻⁵	750,06*10 ⁻⁵	0,101972
1 бар = 10⁶дин/см²	10 ⁵	1	1,01972	0,98692	750,06	1,01972*10 ⁴
1 кгс/см² = 1 ат	0,980665*10 ⁵	0,980665	1	0,96784	735,56	10 ⁴
1 атм	1,01325*10 ⁵	1,01325	1,0332	1	760	1,0332*10 ⁴

1 мм рт. ст. (тор)	133,322	$1,33322 \cdot 10^{-3}$	$1,35951 \cdot 10^{-3}$	$1,31579 \cdot 10^{-3}$	1	13,5951
1 мм вод. ст.	9,80665	$9,80665 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$9,67841 \cdot 10^{-5}$	$7,3556 \cdot 10^{-4}$	1

Рассмотрим диаграмму давления. Если из герметично закрытого сосуда удалять воздух, в сосуде создается разрежение – вакуум. Чем больше воздуха удалено из сосуда, тем вакуум глубже. Если в сосуде не останется ни одной молекулы газа, будет достигнут абсолютный вакуум. Этому состоянию соответствует точка 0 (рис. 3.2) на оси давления p . Атмосферное давление, равное 1 ат представлено на диаграмме горизонтальной линией А-А.

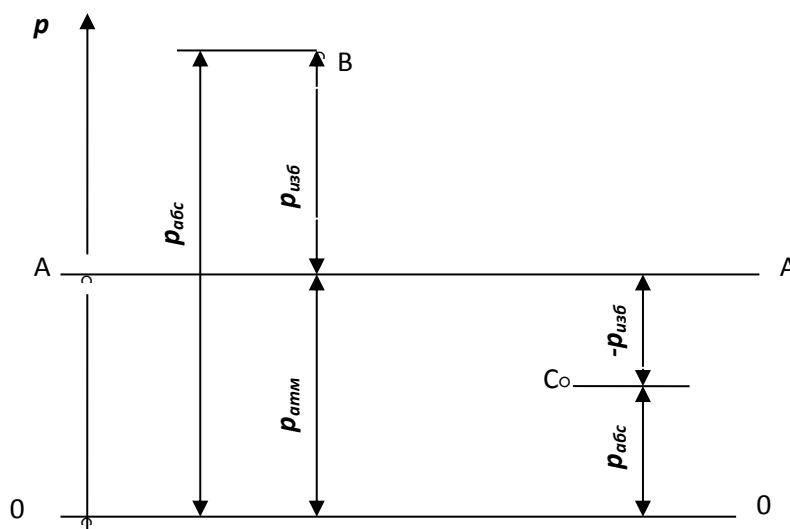


Рис. 3.2 Диаграмма давления

Область, где может быть давление ниже атмосферного (вакуум), сверху ограничена линией А-А, а снизу – горизонтальной линией 0-0, проходящей через точку 0.

Для произвольно выбранной точки В абсолютное давление на диаграмме представлено расстоянием от линии 0-0 до точки В. Это расстояние равно сумме двух отрезков: расстояния от линии 0-0 и А-А, равному $p_{атм}$ и расстоянию от линии А-А до точки В – превышению атмосферного давления на диаграмме, равному $p_{изб}$. Эти построения точно соответствуют основному уравнению гидростатики.

Если выбрать точку С ниже линии А-А в области, где давление ниже атмосферного, то абсолютное давление в этой точке меньше $p_{атм}$ и по условию основного уравнения гидростатики избыточное давление $p_{изб}$ должно иметь знак «минус». Из диаграммы видно, вакуум тем глубже, чем больше по модулю $p_{изб}$. Это значит, что глубину вакуума можно измерять, измеряя избыточное давление, т.е. вакуум возрастает от линии А-А (атмосферное давление) до линии абсолютного нуля 0-0 (абсолютный вакуум). Зная направление увеличения вакуума, знак «минус» при $p_{изб}$ можно не ставить. Избыточное давление, как видно из диаграммы, может возрастать от нуля до бесконечности. Область изменения вакуума ограничена атмосферным давлением с одной стороны и абсолютным нулем с другой.

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему, делают краткий конспект, изучают измерение гидростатического давления с помощью виртуальной лабораторной работы «ИнформГидро». В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер

Список литературы

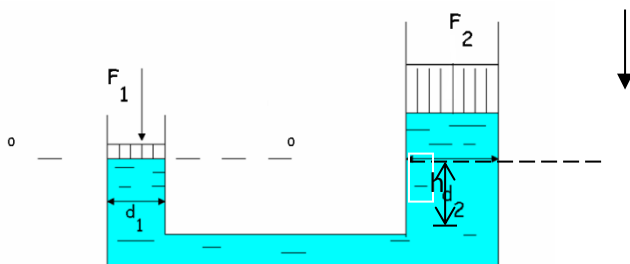
1. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах. – Учебное пособие для студентов вузов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Из-во «Нефть и газ», 2008. – 254 с

Контрольные вопросы

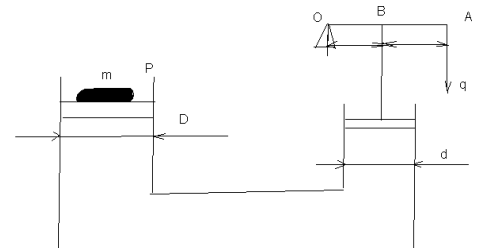
1. Каким видам внешних сил подвержена покоящаяся жидкость?
2. Объясните понятие гидростатического давления?
3. От каких величин зависит единичное гидростатическое давление?
4. Поясните, что такое атмосферное, абсолютное, избыточное давления?
5. Единицы измерения давления?
6. Поясните диаграмму давления.

ТЕМЫ 6, 7, 8. ОБУЧАЮЩАЯ ПРОГРАММА «РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ГИДРОСТАТИКЕ»

1. Определить температурный коэффициент объемного расширения воды, если при увеличении температуры с 10 до 200⁰ С объем воды, равный 7000 л, увеличился на 7 л.
2. Определить высоту столба воды, ртути, спирта, бензина и масла, уравнивающего манометрическое давление в 0,5 атм.
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{ртуть}} = 13600 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{спирт}} = 800 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{бензин}} = 760 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{молоко}} = 1031 \text{ кг/м}^3$
3. Определить атмосферное давление на поверхности открытого резервуара, если полное гидростатическое давление на глубине 20 м равно $4 \cdot 10^5$ Па, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.
4. Какой режим движения воды будет при температуре $t = 25^\circ\text{C}$ в круглой напорной трубе диаметром $D = 450$ мм, если расход $Q = 22$ л/с.
5. На поршень в одном из сообщающихся сосудов, заполненных водой, действует сила $F = 785$ Н. Какую силу F надо приложить ко второму поршню, чтобы система находилась в равновесии, если уровень воды под ним на $h = 0,6$ м выше уровня воды под первым поршнем? Диаметр первого поршня $d = 0,3$ м, второго поршня $d = 0,4$ м/

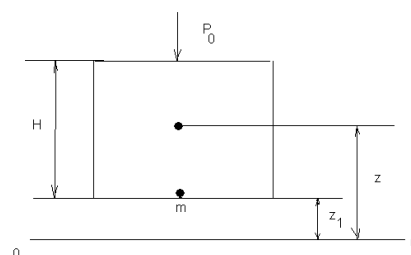


6. Определить силу q , которую нужно приложить к концу рычага малого гидравлического подъемника, чтобы поднять груз массой $m = 1,0$ т, если диаметр малого поршня $d = 5$ см, а большого $D = 25$ см. Расстояния $OB = 6$ см, $BA = 40$ см.

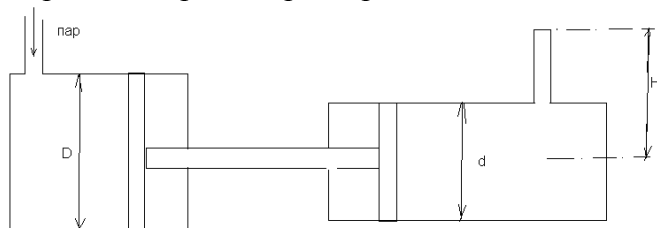


7. На какую величину изменится давление, действующее со стороны жидкости плотностью 960 кг/м^3 на материальную точку, находящуюся в сосуде на расстоянии $Z = 3$

м от плоскости сравнения О-О, если дно сосуда расположено от нее на расстоянии $Z_1=160$ см и если материальная точка опустится на дно.



8. Паровой прямодействующий насос подает жидкость на высоту H . Каково рабочее давление пара, если диаметр парового цилиндра $D=200$ мм, $d=50$ мм, жидкость нефть. Потерями на трение пренебречь.



Методика проведения занятия

Студенты изучают тему с помощью виртуальной программы «ИнформГидро». В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер

Список литературы

1. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах. – Учебное пособие для студентов вузов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Из-во «Нефть и газ», 2008. – 254 с

ТЕМЫ 9, 10. РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: Изучить режимы движения жидкости. Провести опыт для определения режимов движения жидкости при окрашивании струйки воды в стеклянной трубе.

Некоторыми учеными (Хаген, Менделеев и др.) было замечено, что существует два разных режима движения жидкости. Наиболее полно изучил этот вопрос в 1883 году английский физик О. Рейнольдс. Он наблюдал за движением жидкости в стеклянной трубе, вводя в поток краску при помощи тонкой трубки. В одном случае краска окрашивала только одну струйку потока (рисунок 4.1а). При этом движение жидкости характеризовалось слоистым течением (поперечное перемешивание жидкости отсутствовало, так как отсутствовали поперечные составляющие действительных скоростей). В другом случае струйка краски отклонялась от прямолинейного движения, начинала колебаться и окрашивала, в конечном итоге, весь поток основной жидкости (рисунок 4.1б). При этом наблюдалось беспорядочное движение частиц, что объяснялось появлением поперечных составляющих действительной скорости.

Первый режим движения был назван ламинарным, а второй турбулентным. Было установлено, что смена режимов происходит резко.

При ламинарном режиме жидкость движется слоями без поперечного перемешивания, причем пульсация скорости и давления отсутствуют.

При турбулентном режиме слоистость нарушается, движение жидкости сопровождается перемешиванием и пульсациями скорости и давления.

Экспериментально режим движения можно определить по поведению струйки краски, а на практике чаще всего определяют критерий Рейнольдса, который затем сравнивают с критическим числом Рейнольдса.

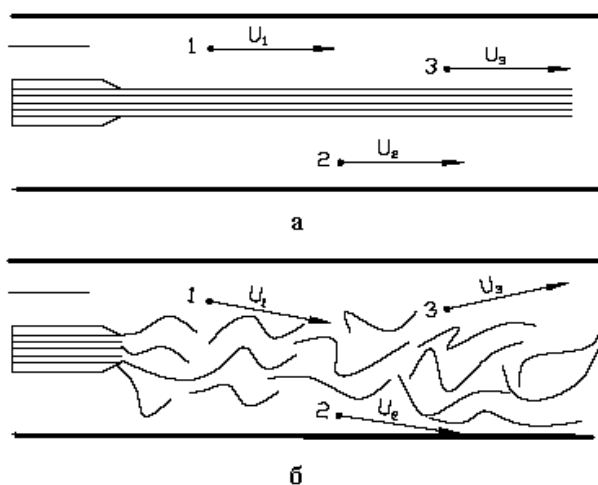


Рис.4.1. Режимы движения жидкости
а - ламинарный, б - турбулентный

Для труб круглого сечения число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{\vartheta d}{\nu} \quad (4.1)$$

для потоков произвольного поперечного сечения

$$Re = \frac{\vartheta d_{\text{э}}}{\nu}, \quad (4.2)$$

где, ϑ - средняя скорость жидкости; d - диаметр трубы; $d_{\text{э}}$ - эквивалентный диаметр трубы $d_{\text{э}} = 4 \cdot R_{\text{г}}$; $R_{\text{г}}$ - гидравлический радиус; ν - кинематическая вязкость жидкости.

Гидравлический радиус может быть найден по выражению:

$$R_{\text{г}} = \frac{\omega}{\chi}, \quad (4.3)$$

где ω - площадь живого сечения потока, м^2 ;

χ - смоченный периметр, м.

Смоченный периметр есть длина линии соприкосновения жидкости с твердыми стенками в живом сечении. Для труб круглого сечения:

$$\chi = \pi d. \quad (4.4)$$

Режим будет ламинарным, если $Re \leq Re_{\text{кр}}$, и турбулентным, если $Re > Re_{\text{кр}}$. Для круглых труб обычно принимают $Re_{\text{кр}} = 2320$.

Для определения режима движения жидкости в круглом трубопроводе при напорном движении достаточно вычислить по формуле (4.1) число Рейнольдса и сравнить его с критическим.

Скорость движения жидкости, при которой происходит смена режимов, называется критической скоростью. В отличие от числа Рейнольдса, одинакового для потока жидкости в трубопроводе любого диаметра, критическая скорость для каждой жидкости имеет свое значение, которое зависит от диаметра трубопровода и коэффициента вязкости жидкости.

$$\vartheta_{\text{кр}} = Re_{\text{кр}} \frac{\nu}{d} = 2320 \frac{\nu}{d}. \quad (4.5)$$

Расход жидкости определяют объемным методом:

$$Q = \frac{W}{\tau}, \quad (4.6)$$

где W – объем, набранный в мерный бак м^3 ; τ – время, с.

Средняя скорость потока определяется по формуле:

$$g = \frac{Q}{S}, \quad (4.7)$$

где Q – объемный расход $\text{м}^3/\text{с}$, S – живое сечение потока, м^2

Кинематический коэффициент вязкости воды берут из справочного материала или вычисляют по эмпирической формуле:

$$\nu = \frac{0,0178 \cdot 10^{-4}}{1 + 0,0033t + 0.00022t^2}, \quad (4.8)$$

где t – температура воды, $^{\circ}\text{C}$

Таблица 4.1

$t, ^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20	30	40	50
$\nu, \text{см}^2/\text{с}$	0,0178	0,0152	0,0131	0,0114	0,0101	0,0081	0,0066	0,0055

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему с помощью виртуальной программы «ИнформГидро». В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер

Список литературы

1. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах. – Учебное пособие для студентов вузов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Из-во «Нефть и газ», 2008. – 254 с

Контрольные вопросы

1. Как определяют число Рейнольдса?
2. Что такое критическое число Рейнольдса?
3. Какие режимы движения жидкости бывают?
4. Что такое гидравлический радиус и смоченный периметр?
5. Как определяют среднюю скорость потока?

ТЕМЫ 11,12. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы: провести экспериментальное исследование уравнения Бернулли на трубе переменного диаметра.

Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости

Выделим двумя нормальными к линиям тока сечениями 1-1 и 2-2 отсек жидкости, который будет находиться под действием сил давления p_1 и p_2 и сил тяжести dG . Под действием этих сил через малый промежуток времени отсек жидкости из своего первоначального положения переместится в положение между сечениями 1'-1' и 2'-2'. Силы давления, приложенные к живым сечениям отсека с правой и с левой сторон имеют противоположные друг другу направления. $p_1 dS_1$ и $-p_2 dS_2$

Перемещение всего отсека жидкости можно заменить перемещением массы жидкости между сечениями: 1-1 и 1'-1' в положение 2-2 и 2'-2', при этом центральная часть отсека жидкости (можно утверждать) своего первоначального положения не меняет и в движении жидкости участия не принимает.

Тогда работа сил давления по перемещению жидкости dA_p можно определить следующим образом:

$$dA_{p_1} = p_1 \cdot v_1 \cdot dS_1 \cdot dt$$

$$dA_{p_2} = -p_2 \cdot v_2 \cdot dS_2 \cdot dt$$

$$dA_p = dA_{p_1} + dA_{p_2} = p_1 \cdot v_1 \cdot dS_1 \cdot dt - p_2 \cdot v_2 \cdot dS_2 \cdot dt$$

Работа сил тяжести будет равна работе по перемещению веса отсека жидкости на разницу уровней $(z_1 - z_2)$.

$$dG = \rho \cdot g \cdot v_1 \cdot dS_1 \cdot dt = \rho \cdot g \cdot v_2 \cdot dS_2 \cdot dt$$

$$dA_G = (z_1 - z_2) dG$$

При перемещении отсека жидкости кинетическая энергия изменится на величину:

$$dE_k = \frac{(v_2^2 - v_1^2) dM}{2} = \frac{(v_2^2 - v_1^2) dG}{2g}$$

Теперь запишем общее уравнение баланса энергии:

$$p_1 \cdot v_1 \cdot dS_1 \cdot dt - p_2 \cdot v_2 \cdot dS_2 \cdot dt + (z_1 - z_2) dG = \frac{(v_2^2 - v_1^2) dG}{2g}$$

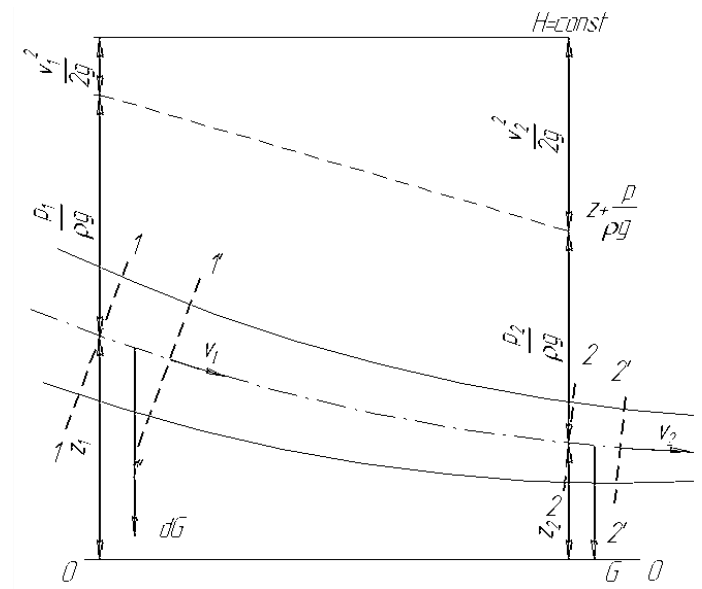
Разделив все элементы уравнения на dG и, переместив в левую часть уравнения величины с индексами «1» а в правую - с индексом «2», получим:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H$$

Это последнее уравнения носит название уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости для двух сечений.

Интерпретация уравнения Бернулли

Уравнение Бернулли является выражением закона сохранения механической энергии движущейся жидкости, по этой причине все части уравнения представляют собой величины удельной энергии жидкости. Все члены уравнения Бернулли имеют линейную размерность и представляют собой напоры.:



Величину $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$ называют полным гидродинамическим напором.

Следовательно, согласно уравнению Бернулли, для всех поперечных сечений установившегося потока идеальной жидкости гидродинамический напор остаётся неизменным. Характеризует удельную механическую энергию.

z - нивелирная высота, называемая также геометрическим, или высотным напором. Представляет собой удельную потенциальную энергию положения в данной точке (в данном сечении);

$\frac{p}{\rho g}$ -напор давления. Характеризует удельную потенциальную энергию давления в данной точке (в данном сечении);

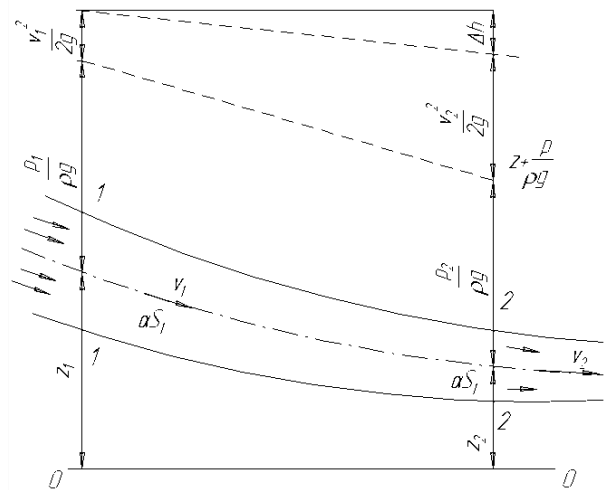
$\left(z + \frac{p}{\rho g} \right)$ -называется полным гидростатическим, статическим или пьезометрическим напором, (пьезометрической высотой) представляет собой высоту, на которую могла бы подняться жидкость при отсутствии движения. Выражает удельную потенциальную энергию в данной точке (в данном сечении);

$\frac{v^2}{2g}$ - скоростной, или динамический напор. Характеризует удельную кинетическую энергию в данной точке (в данном сечении).

Динамика реальной (вязкой жидкости)

Уравнение Бернулли для элементарной струйки вязкой жидкости

Выделим в элементарной струйке жидкости двумя сечениями 1-1 и 2-2 отсек жидкости. Отсек жидкости находится под действием сил давления (p_1 и p_2) и сил тяжести на жидкость в отсеке действуют также силы инерции самой движущейся жидкости, а также силы трения, препятствующие перемещению жидкости. В результате действия сил внутреннего трения часть механической энергии жидкости расходуется на преодоление возникающих сопротивлений. По этой причине величины гидродинамических напоров в сечениях будут неодинаковы. Естественно, что $H_1 > H_2$. Тогда разность гидродинамических напоров в крайних сечениях отсеков $H_1 - H_2 = \Delta h$ будут как раз характеризовать потери напора на преодоление сил трения. Эта величина носит название потерь напора на трение Δh_{mp}



В этом случае уравнение Бернулли примет следующий вид: $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} =$

$$z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{mp}$$

h_{mp} - потери удельной энергии (преобразование потенциальной энергии жидкости в тепловую энергию при трении).

Величина $\frac{h_{mp}}{l} = i$ носит название гидравлического уклона.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{mp}$$

α - коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения кинетической энергии по живому сечению потока

Напор

- Это энергия, отнесенная к весу жидкости (м).

Используется для построения графиков изменения различных видов энергии по длине потока

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{mp}$$

геометрический - z_1, z_2

пьезометрический - $p_1/\rho g, p_2/\rho g$

скоростной - $v_1^2/2g, v_2^2/2g$

Давление

- Это энергия, отнесенная к объёму жидкости (Па)

$$\rho g z_1 + p_1 + \alpha_1 \rho v_1^2/2 = \rho g z_2 + p_2 + \alpha_2 \rho v_2^2/2 + dp_{1-2}$$

весовое - $\rho g z_1, \rho g z_2$

статическое - p_1, p_2

динамическое - $\rho v_1^2/2, \rho v_2^2/2$

dp_{1-2} -потери давления на преодоление сопротивлений

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему с помощью виртуальной программы «ИнформГидро». В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер

Список литературы

1. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах. – Учебное пособие для студентов вузов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Из-во «Нефть и газ», 2008. – 254 с

ТЕМЫ 13,14. ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА И В МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Цель работы:

1. Изучить гидравлические сопротивления по длине трубопровода и в местных сопротивлениях.
2. Провести виртуальный эксперимент. Вычислить по данным опытов расчетные величины.

Исследованиями установлено, что при движении жидкости часть полного напора (энергии) затрачивается на преодоление работы вязкостных и инерционных сил, т.е. возникают **потери напора**.

При равномерном движении жидкости гидравлическое сопротивление, проявляющееся равномерно по всей длине потока, называют сопротивлением по длине, а вызываемые им потери напора, - **потерями напора по длине (h_l)**. Потеря напора по длине является частью полной удельной энергии потока, которая переходит в тепло и рассеивается благодаря работе сил трения, возникающих при движении реальной (вязкой) жидкости.

Потери по длине в круглых трубопроводах, работающих полным сечением, вычисляют по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_e = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (5.1)$$

где λ - безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом гидравлического трения (**коэффициентом Дарси**). Величина коэффициента λ характеризует гидравлическое сопротивление трубопровода и зависит в общем случае от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости Δ_s/d трубопровода, т.е. $\lambda=f(Re, \Delta_s/d)$; l , d – длина и внутренний диаметр трубопровода; v – средняя скорость движения потока жидкости.

Величину **абсолютной эквивалентной шероховатости** Δ_s при расчетах берут из справочной литературы в зависимости от материала трубопровода и состояния его внутренней поверхности. Например, для труб из органического стекла $\Delta_s=0,006$ мм, а для стальных водопроводных умеренно заржавленных труб $\Delta_s=0,20...0,50$ мм. Абсолютная шероховатость определяется как средняя высота выступов шероховатости.

Потеря напора по длине может быть представлена следующим выражением:

$$h_L = k v^m, \quad (5.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

m – показатель степени, величина которого находится в пределах $1 \div 2$.

Область гидравлического сопротивления при расчетах определяют или непосредственно по графикам $\lambda=f(Re, \Delta_s/d)$, полученным опытным путем для труб из различных материалов и приведенным в справочной литературе, например, по графику

Никурадзе (рис. 5.1), или же с помощью соотношений $\frac{10d}{\Delta_s}$ и $\frac{500d}{\Delta_s}$, предложенных А.

Д. Альтшулем на основе использования упомянутых графиков.

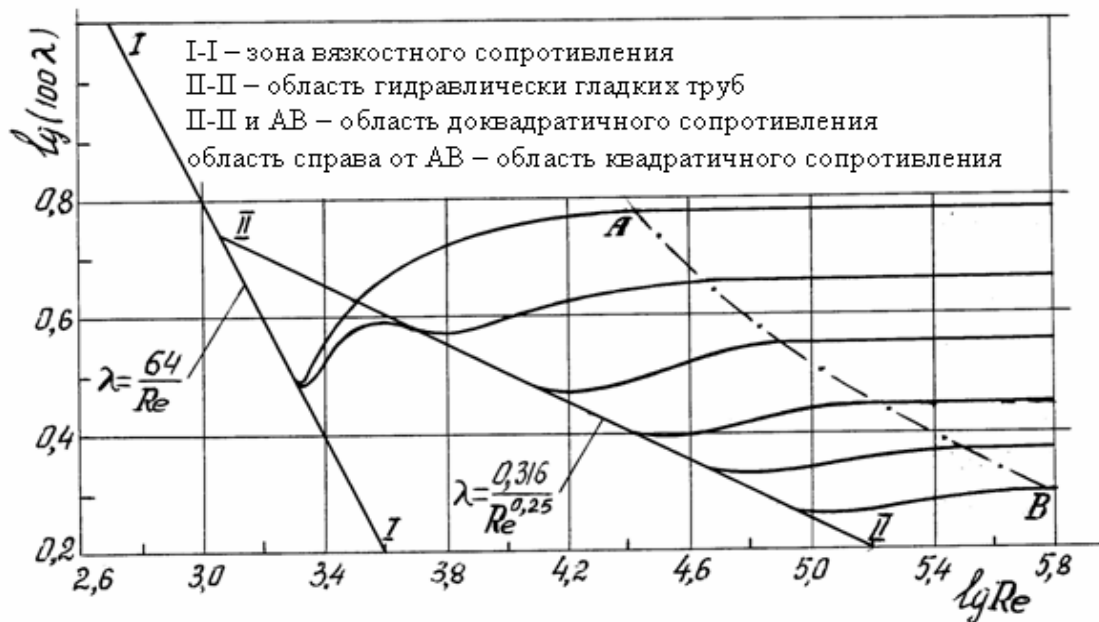


Рис.5.1. график зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re для труб с различной относительной шероховатостью Δ/d (график Никурадзе)

Следует иметь в виду, что для каждой области гидравлического сопротивления предложены и используются при гидравлических расчетах свои формулы для вычисления коэффициента λ .

Эксперименты, посвященные изучению потерь напора по длине, позволили сделать вывод о существовании пяти зон сопротивления.

Первая зона – зона ламинарного режима. В эту зону попадают потоки с числами Рейнольдса $Re_d \leq 2320$.

Коэффициент гидравлического трения λ зависит только от числа Рейнольдса и может быть определен по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re_d} \quad (5.3)$$

Вторая зона – переходная (неустойчивая) зона, в которую попадают потоки с числами Рейнольдса

$$2320 < Re_d < 4000$$

В этой зоне для вычисления λ можно пользоваться формулой Френкеля

$$\lambda = \frac{2,7}{Re_d^{0,53}} \quad (5.4)$$

Третья зона – зона гладких гидравлических русел турбулентного режима. Сюда обычно попадают потоки с числами Рейнольдса

$$4000 \leq Re_d \leq Re'_{пред},$$

$$\text{где } Re'_{пред} \approx \frac{20}{\Delta}$$

$$\text{или } 4000 \leq Re_d \leq 10^5$$

Коэффициент гидравлического трения зависит только от числа Рейнольдса. Для определения λ используют различные формулы, но чаще всего формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (5.5)$$

Четвертая зона – зона доквадратичного сопротивления шероховатых русел турбулентного режима, к которой относятся потоки с числами Рейнольдса:

$$Re'_{пред} < Re_d < Re''_{пред}, \text{ где } Re''_{пред} = \frac{500}{\Delta},$$

$$\text{или } 10^5 \leq Re_d \leq 10^6$$

Показатель степени находится в пределах 1,75÷2,00. Коэффициент λ зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости и может быть определен по формуле Альтшуля:

$$\lambda_{докв.} = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (5.6)$$

Пятая зона – зона квадратичного сопротивления шероховатых русел турбулентного режима, в которую попадают потоки с числами Рейнольдса:

$$Re_d \geq Re''_{пред}$$

$$\text{или } Re_d \geq 10^6.$$

Коэффициент гидравлического трения зависит для этой зоны только от относительной шероховатости стенок трубы. Одна из формул, по которой можно определять λ – формула Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\Delta}. \quad (5.7)$$

При переходе от ламинарного движения к турбулентному слоистое (ламинарное) движение сохраняется у стенок трубы, образуя пристенный ламинарный слой толщиной δ_l . Беспорядочное движение в середине трубы, где максимальные скорости, образует турбулентное ядро. По мере развития турбулентности ядро 2 (рис. 3) увеличивается, а ламинарный слой δ_l уменьшается. При $\delta_l > \Delta$ трубу называют гидравлически гладкой. В этом случае шероховатость не влияет на движение жидкости. Если $\delta_l < \Delta$, то трубу называют гидравлически шероховатой, и шероховатость существенно влияет на движение жидкости.

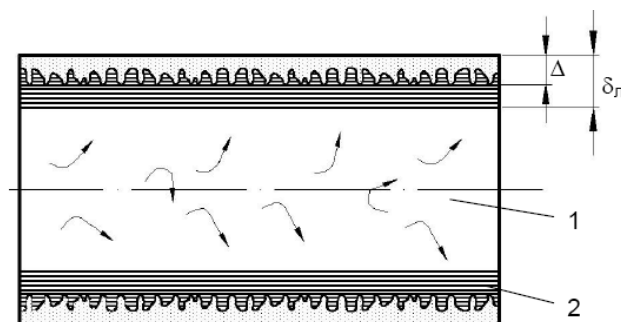


Рис. 5.2. Структура турбулентного потока: 1 – ядро потока; 2 – пристенный ламинарный слой δ_l

Другой вид гидравлических сопротивлений, возникающих в местах резкого изменения конфигурации потока, называют местным сопротивлением, а вызываемые ими потери напора, – **местными потерями напора** (h_m). Они представляют собой часть полной удельной энергии потока, переходящую в тепло, благодаря работе сил трения, сосредоточенных на участках потока небольшой длины. В потоках, где происходит местная потеря напора, обычно имеют место следующие явления:

- изменение площади живого сечения;

- искривление линий тока;
- образование вихревых областей.

В связи с этим местная потеря напора происходит чаще всего в вентилях, задвижках, тройниках, коленах и т.д.

Основные виды местных потерь напора можно условно разделить на следующие группы:

- потери, связанные с изменением живого сечения потока (или, что тоже, его средней скорости); сюда относятся случаи расширения и сужения (внезапного или постепенного) потока;
- потери, вызванные изменением направления потока, его поворотом (движение жидкости в коленах, угольниках, отводах на трубопроводах);
- потери, связанные с протеканием жидкости через арматуру различного вида (краны, обратные клапаны, сетки, дроссели и т.д.);
- потери, возникшие вследствие отделения одной части потока от другой или смешения двух потоков в один общий (движение жидкости в тройниках, крестовинах и отверстиях в боковых стенках трубопроводов при наличии транзитного расхода).

Местные потери напора при гидравлических расчетах вычисляют по формуле Вейсбаха :

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.8)$$

где ζ - безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом местного сопротивления; v - средняя скорость потока в сечении за местным сопротивлением, т.е. ниже по течению (если скорость v , как исключение, принимается перед местным сопротивлением, это обязательно оговаривается).

Величина коэффициента ζ зависит в общем случае от числа Рейнольдса Re и от конфигурации, т.е. формы проточной части местного сопротивления. В частном случае, когда трубопровод, на котором расположено местное сопротивление, работает в области квадратичного сопротивления, величина коэффициента ζ от Re не зависит.

Величину ζ для каждого вида местного сопротивления определяют по данным гидравлических экспериментов, пользуясь формулой (5.9), полученные таким образом значения коэффициентов ζ для различных видов местных сопротивлений (обычно при квадратичной области сопротивления) приводятся в справочной и специальной литературе, откуда и берутся при гидравлических расчётах.

В случае местных потерь при резком расширении и весьма резком сужении потока величины ζ можно определить теоретически (рис 2).

Внезапное расширение трубопровода. Потери на внезапное расширение согласно закону Борда находят по формуле

$$h_{e.p} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}, \quad (5.9)$$

где v_1 – скорость до расширения; v_2 – скорость потока после расширения потока. Используя универсальную формулу Вейсбаха, получим

$$h_{e.p} = \zeta_1 \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_2 \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5.10)$$

где v_1 и v_2 – скорости до и после расширения соответственно; ζ_1 и ζ_2 – коэффициенты, отнесенные к скоростному напору до и после расширения.

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2, \zeta_2 = \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1\right)^2, (5.11)$$

Т.к. $v_1 > v_2$, следовательно, $\zeta_1 < \zeta_2$

Внезапное сужение трубопровода. Для практических расчетов можно пользоваться полуэмпирической формулой И.Е. Идельчика

$$\zeta_{в.с} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot 0,5 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2}\right), (5.12)$$

где $n = \frac{d_1^2}{d_2^2}$ – степень сужения; d_1 , d_2 – диаметры трубопроводов до и после сужения. Потеря напора определяется согласно (5.13) долей скоростного напора после сужения, т.е.

$$h_{в.с} = \zeta_{в.с} \frac{g^2}{2g} = 0,5 \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right) \cdot \frac{g^2}{2g}, (5.13)$$

Для определения суммарных потерь напора в трубопроводе применяют так называемый принцип наложения потерь, согласно которому суммарная потеря напора в трубопроводах равна сумме отдельных потерь, т.е.

$$\begin{aligned} \sum h &= h_{от} + \sum h_m = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{g^2}{2g} + \zeta_1 \frac{g^2}{2g} + \zeta_2 \frac{g^2}{2g} \dots = \\ &= \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 + \dots \right) \frac{g^2}{2g} = \zeta_c \frac{g^2}{2g}, \end{aligned} \quad (5.14)$$

Коэффициент сопротивления при резком сужении трубопровода ($\zeta_{р.с.}$) принято относить к скорости после сужения. При этом

$$\zeta_{р.с} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2, (5.15)$$

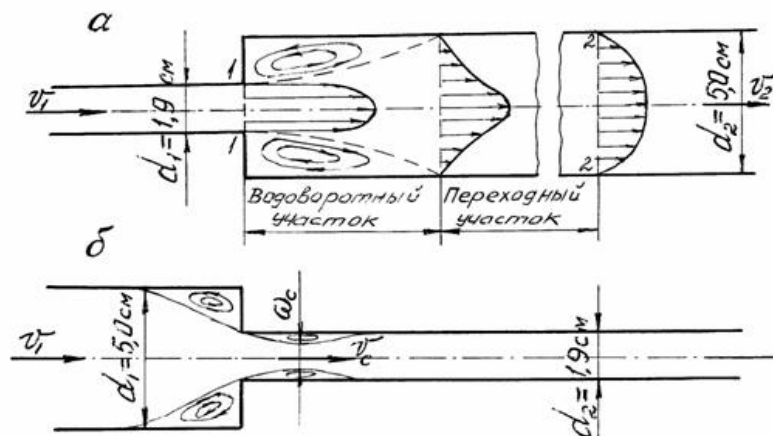


Рис.5.3. Схемы движения жидкости при резком (внезапном) изменении сечения трубопровода:

- а) резкое расширение трубопровода;
- б) резкое сужение трубопровода

Поворот без скругления. Для гладких стенок труб с круглым и квадратным поперечным сечением при $Re \geq 2 \cdot 10^5$ коэффициент сопротивления $\zeta_{пов.}$ находят в зависимости от угла поворота.

Угол поворота ⁰	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
$\zeta_{пов.}$	0,125	0,16	0,32	0,56	0,81	1,19	1,56	2,16	2,67	3,00

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему с помощью виртуальной программы «ИнформГидро». В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер

Список литературы

1. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах. – Учебное пособие для студентов вузов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Из-во «Нефть и газ», 2008. – 254 с

Контрольные вопросы

1. Напишите и поясните формулы Дарси-Вейсбаха и Вейсбаха.
2. Поясните, как опытным путем определяют величины коэффициентов λ и ξ .
3. Что характеризуют коэффициенты λ и ξ , от каких факторов в общем случае они зависят и как их определяют при гидравлических расчетах?
4. Объясните, что такое Δ , и Δ/d , как найти величину Δ , при гидравлических расчетах.
5. Назовите области гидравлического сопротивления трубопроводов и объясните, как определяют область сопротивления при гидравлических расчетах.
6. Изобразите схемы движения жидкости при резком повороте трубы на 90° , а также при резком расширении и резком сужении трубопровода.
7. Дайте пояснения, что характерно для движения потока при протекании его через любое местное сопротивление.

ТЕМЫ 15,16. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

Цель работы: Изучить тему занятия, ответить на контрольные вопросы. Провести лабораторную работу. Определить по опытным данным величины коэффициентов: μ , φ , ϵ , ζ , при истечении через малое отверстие и величины коэффициентов μ_n , φ_n , ζ_n для насадок при постоянном напоре в атмосферу. Сравнить значения расходов, полученных в опытах, с теоретическими и подсчитать относительные отклонения.

Малым называется отверстие, когда его высота не превосходит 0,1 напора h над центром отверстия. При этом напор в отверстии постоянен по всему сечению с-с (рис.6.1).

Стенку считают тонкой, если ее толщина $\delta < (1,5...3,0)d$. При выполнении этого условия величина δ не влияет на характер истечения жидкости из отверстия, так как вытекающая струя жидкости касается только острой кромки отверстия.

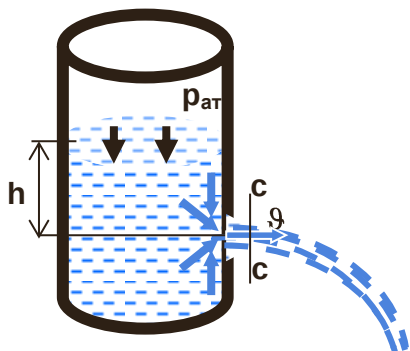


рис. 6.1 Истечение жидкости из отверстия

Поскольку частицы жидкости движутся к отверстию по криволинейным траекториям сил инерции струя, вытекающая из отверстия, сжимается. Благодаря действию сил инерции струя продолжает сжиматься и после выхода из отверстия. Наибольшее сжатие струи, как показывают опыты, наблюдается в сечении на расстоянии примерно $(0,5...1,0)d$ от входной кромки отверстия. Это сечение называют сжатым. Степень

сжатия струи в этом сечении оценивают **коэффициентом сжатия** ε :

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (7.1)$$

где ω_c и ω соответственно площадь сжатого живого сечения струи, площадь отверстия.

Полное сжатие – характеризуется тем, что струя вытекающей жидкости испытывает сжатие по всему периметру отверстия.

Неполное сжатие – происходит, когда струя подвергается сжатию только на некоторой части периметра.

Совершенное сжатие – характеризуется наибольшей кривизной траектории крайних струек вытекающей струи и соответственно максимальным сжатием струи.

Несовершенное сжатие – наблюдается при более близком, чем $l_1 > 3a; l_2 > 3b$, расположении отверстия к направляющим поток стенкам резервуара (рис 6.2).

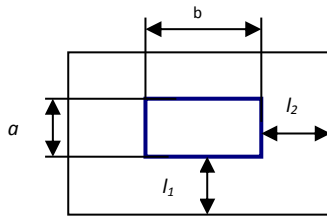


рис. 6.2 Отверстие

Среднюю скорость струи V_c в сжатом сечении с-с (рис. 6.1) при $p_0 = p_{ат}$ вычисляют по формуле, полученной из уравнения Д. Бернулли:

$$V_c = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (7.2)$$

где φ - коэффициент скорости отверстия.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \quad (7.3)$$

где α - коэффициент Кориолиса, ζ - **коэффициент сопротивления отверстия**.

Поскольку напор теряется главным образом вблизи отверстия, где скорости достаточно велики, при истечении из отверстия во внимание принимают только **местные потери напора**.

Расход жидкости Q через отверстие равен :

$$Q = V_c \omega_c = \varphi \sqrt{2gH} \varepsilon \omega = \varphi \varepsilon \omega \sqrt{2gH}, \quad (7.4)$$

где

$$\mu = \varphi \varepsilon$$

Здесь μ - **коэффициент расхода отверстия**, учитывающий влияние гидравлического сопротивления и сжатия струи на расход жидкости. С учетом выражения для μ формула (1.24) принимает вид:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (7.5)$$

Величины коэффициентов ε , ζ , φ , μ для отверстий определяют опытным путем. Установлено, что они зависят от формы отверстия и числа Рейнольдса. Однако при больших числах Рейнольдса ($Re \geq 10^5$) указанные коэффициенты от Re не зависят и для круглых и квадратных отверстий при совершенном сжатии струи равны: $\varepsilon = 0,62 \dots 0,64$, $\zeta = 0,06$, $\varphi = 0,97 \dots 0,98$, $\mu = 0,60 \dots 0,62$.

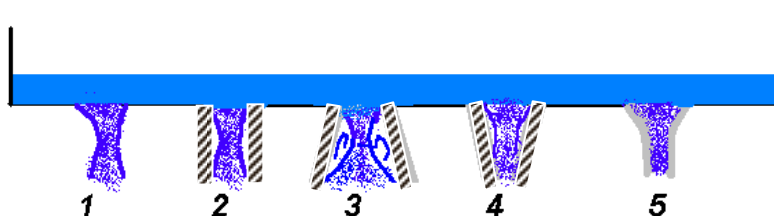
Насадкой называют патрубок длиной $2,5d \leq L_H \leq 5d$, присоединенный к малому отверстию в тонкой стенке с целью изменения гидравлических характеристик истечения (скорости, расхода жидкости, траектории струи).

Насадок – короткая трубка, приставленная к отверстию в стенке, внутренний диаметр которой равен диаметру отверстия. В насадке возникают дополнительные (по сравнению с отверстием) потери энергии на вихреобразование. Давление внутри насадка меньше атмосферного.

Насадки бывают цилиндрические (внешние и внутренние), конические (сходящиеся и расходящиеся) и коноидальные, т.е. очерченные по форме струи, вытекающей из отверстия.

Использование насадок любого типа вызывает увеличение расхода жидкости Q благодаря вакууму, возникающему внутри насадка в области сжатого сечения и обуславливающему повышение напора истечения.

Виды насадок и области их применения



1. Отверстие;

2. **Внешний цилиндрический насадок.** Из-за разницы площадей выходного и сжатого сечения появляется всасывающий эффект – (давление $p_c < p_{atm}$) и увеличение расхода по сравнению с отверстием;

3. **Диффузор** – расходящийся насадок. Больше разницы площадей сжатого и выходного сечений, больше разницы скоростей и давлений. Минимальное давление в сжатом сечении – $p_c = p_{c.min}$ и максимальный расход при истечении;

4. **Конфузор** – увеличивает выходную скорость;

5. **Конoidalный насадок** – очерчен по форме вытекающей струи. Нет потерь и сжатия струи. Трудности изготовления.

Среднюю скорость истечения жидкости из насадка V и расход Q определяют по формулам, полученным из уравнения Д. Бернулли:

$$V = \varphi_H \sqrt{2gH} \quad (7.6)$$

Здесь $\varphi_H = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_H}}$ - коэффициент скорости насадки,

ζ_H - коэффициент сопротивления насадки.

Для выходного сечения коэффициент сжатия струи $\varepsilon=1$ (насадка в этой области работает полным сечением), поэтому коэффициент расхода насадки $\mu_H = \varphi_H$.

Расход жидкости, вытекающий из насадки, вычисляется по формуле, аналогичной формуле (1.27),

$$Q = \mu_H \omega \sqrt{2gH}. \quad (7.7)$$

После проведения лабораторной работы при обработке данных, заполняют таблицу отчета, для чего вычисляют следующие величины:
теоретический расход

$$Q_m = \omega \sqrt{2gH}; \quad (7.8)$$

расход воды, полученный опытным путем

$$Q = W/t \quad (7.9)$$

где W – объем мерного бака, t – время заполнения мерного бака;
коэффициент расхода отверстий или насадок

$$\mu_o = \mu_n = \frac{Q}{Q_m}; \quad (7.10)$$

коэффициент местного сопротивления по формуле, которая получена из выражения (3.3)

$$\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - 1 ; (7.11)$$

для насадок коэффициенты расхода и скорости равны $\mu_H = \varphi_H$;

для отверстий примем $\varphi_0 = 0,97$;

коэффициент сжатия отверстий (для насадок коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 1$)

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi} . (7.12)$$

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему с помощью виртуальной программы «ИнформГидро». В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер

Список литературы

1. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах. – Учебное пособие для студентов вузов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Из-во «Нефть и газ», 2008. – 254 с

Контрольные вопросы

1. Что понимают под малым отверстием в тонкой стенке при истечении жидкости из отверстий?
2. Сжатое сечение, причины сжатия струи, чем оценивают величину сжатия струи?
3. Что называют насадкой, типы насадок, их назначение?
4. Коэффициент скорости. Что он учитывает, как определяется?
5. Коэффициент расхода. Что он учитывает, как определяется?
6. Коэффициент сопротивления (отверстия, насадка). Как он определяется по опытным данным?
7. Объясните, почему при истечении из насадок расход жидкости больше, чем при истечении из малого круглого отверстия в тонкой стенке?
8. Напишите и поясните формулы для определения скорости и расхода при истечении жидкости из отверстий и насадок в атмосферу при постоянном напоре.

ТЕМЫ 16,17. ОБУЧАЮЩАЯ ПРОГРАММА «РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ГИДРОДИНАМИКЕ»

При решении некоторых простейших задач о движении жидкостей часто в первом приближении делают допущение о том, что движущаяся жидкость является идеальной. Под идеальной понимают жидкость, лишенную выше перечисленных свойств, т.е. жидкость абсолютно несжимаемую и не расширяемую, неспособную сопротивляться растяжению и сдвигу, а также лишенную свойства испаряемости ($\alpha = 2$). Главное, чем отличается жидкости идеальная от жидкости реальной, - это отсутствие у нее вязкости, вызывающей способность сопротивления сдвигу, т.е. возникновению касательных напряжений (трения в жидкости).

Следовательно, в движущейся идеальной жидкости возможен лишь один вид напряжений – напряжение сжатия, т.е. давления p , а касательное напряжение $\tau = 0$.

Основными уравнениями, позволяющими решать простейшие задачи о движении идеальной жидкости, являются уравнения расхода и Бернулли.

Уравнение расхода представляет собой условие неразрывности (сплошности) потока несжимаемой жидкости, или, что то же самое, равенство объемных расходов в каких-то

двух поперечных сечениях одного и того же потока, например 1 и 2, т.е. $Q_1 = Q_2$ или $v_1 S_1 = v_2 S_2$. Отсюда следует, что

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (10.1)$$

т.е. скорости обратно пропорциональны площадям поперечных сечений потоков. При этом предполагается, что скорость во всех точках данного сечения одинакова.

Уравнение Бернулли для потока идеальной жидкости выражает собой закон сохранения удельной энергии жидкости вдоль потока. Под удельной понимают энергию, отнесенную к единице веса, объема или массы жидкости. Обычно удобнее бывает относить энергию к единице веса. В этом случае уравнение Бернулли, записанное для сечений 1 и 2 элементарной струйки или потока идеальной жидкости, имеет вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H \quad (10.2)$$

где z – вертикальные координаты центров тяжести сечений или удельная энергия положения;

$p/(\rho g)$ – пьезометрическая высота или удельная энергия давления;

$v^2/(2g)$ – скоростная высота (напор) или удельная кинетическая энергия;

H – полный напор или полная удельная энергия жидкости.

Если энергию жидкости отнести к единице ее объема, то члены уравнения Бернулли будут иметь размерность давления, а само уравнение (2.2) примет вид, которым также часто пользуются:

$$z_1 \rho g + p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} = H \rho g$$

Если же энергию жидкости отнести к единице массы, то можно получить 3-ю формулу записи уравнения (2.2):

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

Для потока реальной (вязкой) жидкости уравнение Бернулли следует писать в таком виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_{cp1}}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_{cp2}}{2g} + \sum h \quad (10.3)$$

где v_{cp} – средняя по сечению скорость, равная $v_{cp} = Q/S$;

α – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечениям и равный отношению действительной кинетической энергии потока к кинетической энергии того же потока, но при равномерном распределении скоростей;

$\sum h$ – суммарная потеря полного напора между сечениями 1 и 2 обусловленная вязкостью жидкости.

Различают два вида гидравлических потерь напора: местные потери и потери на трение по длине.

Местные потери напора происходят в так называемых местных гидравлических сопротивлениях, т.е. в местах изменения формы и размеров русла, где поток так или иначе деформируется – расширяется, сужается, искривляется – или имеет место более сложная деформация. Местные потери выражают формулой Вейсбаха

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g} \quad (10.4)$$

где v – средняя скорость потока в сечении перед местными сопротивлениями (при расширении) или за ним (при сужении) и в тех случаях, когда рассматривают потери напора в гидроарматуре различного назначения;

ζ_m - безразмерный коэффициент местного сопротивления.

Числовое значение коэффициента ζ в основном определяется формой местного сопротивления, его геометрическими параметрами, но иногда влияет также число Рейнольдса, которое для труб диаметром d выражается формулой

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu} \quad (10.5)$$

Здесь ν - кинематическая вязкость жидкости, выражаемая в $\text{м}^2/\text{с}$ или $\text{см}^2/\text{с}$. Для некруглых труб $Re = (vD_g)/\nu$, где D_g - гидравлический диаметр, равный отношению площади сечения трубы к $1/4$ периметра сечения.

Число Рейнольдса определяет режим движения жидкостей (и газов) в трубах.

При $Re < Re_{кр}$, где $Re_{кр} \approx 2300$, режим движения ламинарный, т.е. слоистый – без перемешивания жидкости и без пульсации скоростей и давлений.

При $Re > Re_{кр}$ режим турбулентный, т.е. с перемешиванием жидкости и с пульсациями скоростей и давлений.

Можно считать, что при турбулентном режиме коэффициенты местных сопротивлений ζ от числа Рейнольдса не зависят и, следовательно, как видно из формулы (2.4), потеря напора пропорциональна квадрату скорости (квадратичный режим сопротивления). При ламинарном режиме считают, что

$$\zeta = \frac{A}{Re} + \zeta_{кв} \quad (10.6)$$

где A – число, определяемое формой местного сопротивления;

$\zeta_{кв}$ - коэффициент местного сопротивления на режиме квадратичного сопротивления, т.е. при $Re \rightarrow \infty$.

При турбулентном режиме в случае внезапного расширения трубы происходят вихреобразования и потеря напора определяется формулой Борда

$$h_{расш} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = \zeta \frac{v_1^2}{2g} \quad (10.7)$$

где v_1 и v_2 - скорости до и после расширения трубы;

$\zeta_{расш}$ - коэффициент сопротивления, равный для данного случая

$$\zeta_{расш} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (10.8)$$

где S_1 и S_2 - площади сечений трубы до и после внезапного расширения.

При внезапном сужении трубы без закругления коэффициент сопротивления определяют по формуле Идельчика

$$\zeta = 0.5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) \quad (10.9)$$

где S_1 и S_2 - площади сечений трубы до и после сужения.

Коэффициенты сопротивлений для постепенно расширяющихся (конических) труб – диффузоров, плавно сужающихся труб – сопл, поворотов и других, более сложных местных гидравлических сопротивлений (кранов, фильтров и т.п.) – находят в справочной литературе.

Потери напора на трение по длине l определяются общей формулой Дарси

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (10.10)$$

где безразмерный коэффициент сопротивления трения λ определяется в зависимости от режима течения:

при ламинарном режиме λ_λ однозначно определяется число Рейнольдса, т.е.

$$\lambda_\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (10.11)$$

при турбулентном режиме λ_T помимо числа Рейнольдса зависит еще от относительной шероховатости Δ/d т.е.

$$\lambda_T = f(\text{Re}, \Delta/d)$$

Распределение скоростей по поперечному сечению круглой трубы радиусом r при ламинарном режиме течения выражается параболическим законом

$$v = \frac{h_{mp} g}{4\eta l} (r_0^2 - r^2) \quad (10.12)$$

причем максимальная скорость на оси трубы два раза больше средней.

При ламинарном течении в зазоре δ между двумя плоскими стенками вместо (2.11) используют

$$\lambda_\lambda = \frac{96}{\text{Re}} \quad (10.13)$$

где число Рейнольдса $\text{Re} = 2\delta v / \nu$.

Формула (2.13) справедлива также для зазора, образованного двумя соосными цилиндрическими поверхностями при условии, что зазор δ весьма мал по сравнению с диаметром этих поверхностей. Наличие эксцентриситета этих поверхностей уменьшает потерю напора при том же расходе (или увеличивает расход при том же напоре). При максимальном эксцентриситете (при касании поверхностей) уменьшение напора будет в 2.5 раза.

При ламинарном течении в трубке квадратного сечения вместо (2.11) и (2.13) можно принимать

$$\lambda_\lambda = \frac{57}{\text{Re}} \quad (10.14)$$

УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

Часть задач данного раздела рассчитана на применение уравнения Бернулли для струйки идеальной жидкости (10.2), т.е. без учета гидравлических потерь (потерь напора) и неравномерности распределения скоростей (коэффициента Кориолиса). Другая часть задач решается с помощью уравнения Бернулли для потока реальной жидкости (10.3) в общем случае с учетом указанных выше обстоятельств.

Однако коэффициент Кориолиса следует учитывать лишь при ламинарном режиме течения, когда $\alpha = 2$. Для турбулентных потоков можно принять $\alpha=1$.

При применении уравнения Бернулли важно правильно выбрать те два сечения, для которых оно записывается.

В качестве сечений рекомендуется брать:

свободную поверхность жидкости в резервуаре (баке), где $v=0$;

выход в атмосферу, где $p_{изб} = 0; p_{абс} = p_a$;

сечение, где присоединен тот или иной манометр, пьезометр или вакуумметр;

неподвижный воздух вдалеке от входа в трубу, в которую происходит всасывание из атмосферы.

Уравнение Бернулли рекомендуется сначала записать в общем виде, а затем переписать с заменой его членов заданными буквенными величинами и исключить члены, равные нулю.

При этом необходимо помнить следующее:

вертикальная ордината z всегда отсчитывается от произвольной координаты вверх;

давление p , входящее в правую и левую части уравнения должно быть задано в одной системе отсчета (абсолютной или избыточной);

суммарная потеря напора $\sum h$ всегда пишется в правой части уравнения Бернулли со знаком «+»;

величина $\sum h$ в общем случае складывается из местных потерь, которые можно выражать формулой Вейсбаха (10.4) и потерь на трение по длине, определяемых формулой Дарси (10.9);

если в том или ином канале (например, трубе) имеется внезапное расширение, то при турбулентном режиме необходимо учитывать потерю напора по теореме Борда (2.7).

В частном случае, когда жидкость подводится к резервуару, баку и т.п., можно считать, что теряется вся кинетическая энергия жидкости. В случае ламинарного режима при этом необходимо учесть коэффициент α .

При выражении и подсчете гидравлических потерь по формуле Вейсбаха следует обращать внимание на указание относительно того, к какой скорости (или какой площади) отнесены заданные коэффициенты сопротивления ζ .

Значения коэффициентов для гидроагрегатов задачах приведены с учетом потерь напора на вход и выход.

Задачи:

1. Определить расход воды при истечении из малого отверстия в стенке открытого бака при совершенном сжатии и истечении под уровень, если перепад уровней воды $z=3$ м, а диаметр отверстия 6 см. Расход определить в л/с.
2. Два открытых бака соединены простым длинным трубопроводом постоянного диаметра 100 мм (модуль расхода $K=160,62$ л/с). Определить скорость жидкости в трубопроводе, если длина трубы составляет 60 м, а перепад уровней в баках равен 2 м.
3. Определить диаметр малого отверстия, расположенного в стенке открытого бака при истечении под уровень и совершенном сжатии, если расход воды равен 20 л/с, а перепад уровней составляет 6 м.

4. Два открытых бака соединены простым длинным трубопроводом постоянного диаметра 110 мм (модуль расхода $K=150,52$ л/с). Определить скорость жидкости в трубопроводе, если длина трубы составляет 100 м, а перепад уровней в баках равен 1 м.
5. Определить диаметр малого отверстия, расположенного в стенке открытого бака при истечении под уровень и совершенном сжатии, если расход воды равен 30 л/с, а перепад уровней составляет 4 м.
6. Определить перепад уровней воды при истечении из малого отверстия, расположенного в стенке открытого бака при истечении под уровень и совершенном сжатии, если расход воды 12 л/с, диаметр 5 см.
7. Определить перепад уровней воды при истечении из малого отверстия, расположенного в стенке открытого бака при истечении под уровень и совершенном сжатии, если расход воды 10 л/с, диаметр 6 см.
8. Определить время опорожнения бака прямоугольной формы, если диаметр отверстия в дне бака 5 см, площадь бака 100 м^2 , уровень воды в баке 0,7 м.
9. Определить время опорожнения бака прямоугольной формы, если диаметр отверстия в дне бака 6 см, площадь бака 150 м^2 , уровень воды в баке 1 м.

Методика проведения занятия

Студенты изучают тему с помощью виртуальной программы «ИнформГидро». В конце занятия устный опрос.

Оборудование

Компьютер

Список литературы

1. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах. – Учебное пособие для студентов вузов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Из-во «Нефть и газ», 2008. – 254 с