

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 15.05.2025 16:21:55

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df23711d6f1d0ca93df0c6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

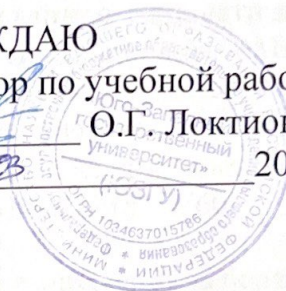
Кафедра инфраструктурных энергетических систем

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 30 » 03 2024 г.



**Лабораторный практикум по дисциплине
«Механика жидкости и газа»**

Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине
«Механика жидкости и газа» для студентов очной формы обучения
по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.05.01
«Строительство уникальных зданий и сооружений», 15.03.01 «Маши-
ностроение»

УДК 532.1; 532.2; 532.5

Составители: Т.В. Поливанова, Н.С. Перепелица

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры инфраструктурных энергетических систем Е.В. Умеренков

Лабораторный практикум по дисциплине «Механика жидкости и газа»: методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Механика жидкости и газа» для студентов очной формы обучения по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», 15.03.01 «Машиностроение» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Т.В. Поливанова, Н.С. Перепелица. – Курск, 2024. – 60 с.: – Библиогр.: с. 60.

Изложены основные сведения, необходимые выполнения лабораторных работ и представлены вопросы для самоконтроля и для защиты лабораторных работ по механике жидкости и газа, а также приведены справочные материалы.

Методические указания предназначены для студентов очной и очно-заочной форм обучения по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», 15.03.01 «Машиностроение».

Методические указания подготовлены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет-2030» №1.7.21/2-24-7.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 28.03. . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,16. Тираж 100 экз. Заказ 231 Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Введение	4
1. Лабораторная работа №1. «Тарирование приборов для измерения давления».....	5
2. Лабораторная работа №2. «Экспериментальная проверка основного уравнения гидростатики и закона Паскаля»	14
3. Лабораторная работа №3. «Исследование относительного покоя жидкости в цилиндре, вращающегося с постоянной угловой скоростью»	21
4. Лабораторная работа №4. «Определение режима течения жидкости».....	26
5. Лабораторная работа №5. «Определение потерь напора и коэффициента трения при движении жидкости в горизонтальной трубе».....	34
6. Лабораторная работа №6. «Определение коэффициентов местных сопротивлений»	39
7. Лабораторная работа №7. «Экспериментальная проверка уравнения Д. Бернулли»	44
8. Лабораторная работа №8. «Определение коэффициентов расхода при истечении жидкости через отверстия и насадки»	50
9. Лабораторная работа №9. «Параметрические испытания центробежного насоса».....	55

Введение

Механика жидкости и газа – это дисциплина, изучающая законы равновесия и движения жидкостей, а также законы взаимодействия жидкостей с окружающими их граничными поверхностями и с твердыми или упругими телами, погруженными (частично или полностью) в жидкость.

Целью проведения лабораторных работ по механике жидкости и газа является усвоение и закрепление теоретических знаний, выявление физической сущности гидромеханических явлений и опытное подтверждение их закономерностей, а также приобретение навыков по самостоятельному проведению и обработке результатов гидромеханических исследований.

В ходе выполнения лабораторных работ обучающийся овладевает теорией и техникой проведения эксперимента, получает практические навыки постановки экспериментальных исследований. При подготовке к каждой лабораторной работе студент должен изучить теоретический материал по теме работы и получить у преподавателя допуск к её выполнению на экспериментальной установке. После выполнения лабораторных работ студенты сдают зачёт по выполненным работам. При сдаче зачёта студент предъявляет тетрадь с пометкой преподавателя о выполнении работ, предусмотренных учебным планом. Для сдачи зачёта необходимо изложить ход лабораторной работы, объяснить наблюдаемые явления, уметь записать необходимые уравнения и соотношения, сделать вывод по проделанным опытам.

1. Лабораторная работа №1. «Тарирование приборов для измерения давления»

Цель работы:

1. Изучить приборы для измерения давления.
2. Провести тарировку пружинного манометра на грузопоршневом манометре МП-60.
3. Установить соответствие проверяемого манометра указанному классу точности.

Теоретическая часть

Сжимающее напряжение σ внутри покоящейся жидкости, взятое с обратным знаком, называют гидростатическим давлением ($p = -\sigma$). Давление определяют пределом отношения величины действующего по нормали к площадке усилия ΔF к площади ΔS элементарной площадки:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad (1.1)$$

Гидростатическое давление является скалярной величиной.

Давление может быть измерено и выражено в различных шкалах (рис.1.1). Абсолютная шкала имеет начало отсчета, равное нулевому давлению. Выраженное по этой шкале давление называют абсолютным ($p_{\text{абс}}$).

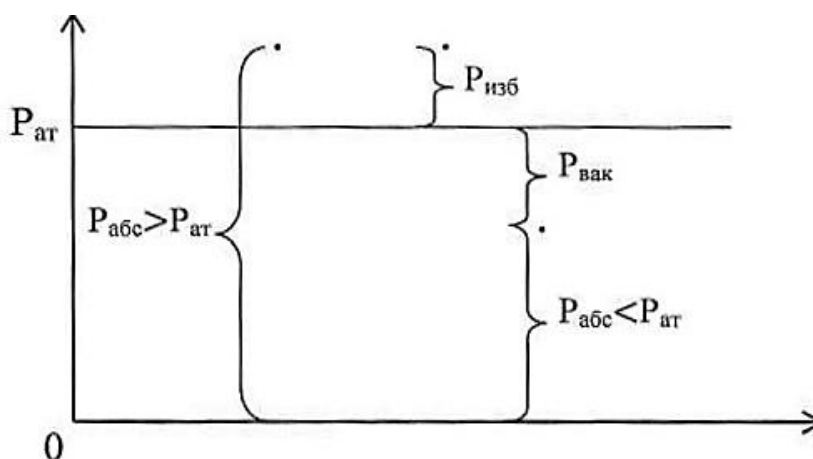


Рис. 1.1 – Шкалы измерений гидростатического давления

Превышение абсолютного давления над атмосферным называют избыточным (манометрическим) давлением ($p_{изб} = p_{абс} - p_{ат}$). Отсчет по шкале избыточных давлений производится от атмосферного давления ($p_{ат}$).

Недостаток абсолютного давления до атмосферного называют вакуумметрическим давлением ($p_{вак} = p_{ат} - p_{абс}$). Вакуумметрическое давление можно рассматривать как отрицательное избыточное (манометрическое) давление: $p_{вак} = -p_{изб}$.

Для измерения гидростатического давления применяют жидкостные и механические по принципу действия приборы.

Простейшим жидкостным прибором является пьезометр, измеряющий давление в жидкости высотой столба той же жидкости.

Пьезометр представляет собой стеклянную трубку диаметром не менее 5 мм, открытую с одного конца, а вторым концом присоединяемую к сосуду в точке измеряемого давления (рис.1.2). Предел измеряемого давления обычно не более $0,3 \cdot 10^5$ Па.

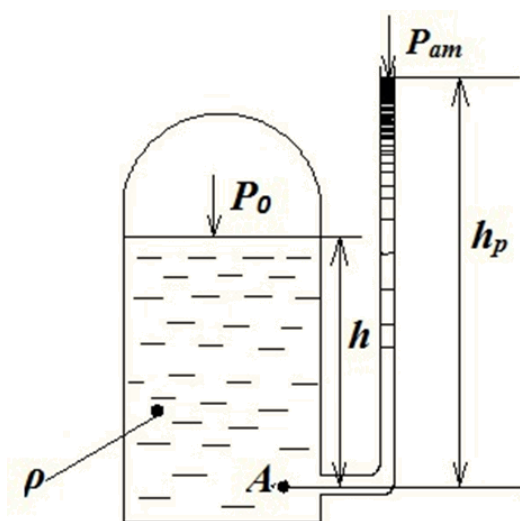


Рис. 1.2 – Пьезометр

Гидростатическое давление в т. А:

- со стороны пьезометра:

$$P_A = P_{ат} + \rho g h_p, \quad (1.2)$$

- со стороны сосуда:

$$P_A = P_0 + \rho g h. \quad (1.3)$$

Приравнивая правые части последних зависимостей, получают:

$$P_0 + \rho g h = P_{ат} + \rho g h_p, \quad (1.4)$$

откуда пьезометрическая высота в точке А соответствует избыточному давлению:

$$h_p = \frac{P_A - P_{ат}}{\rho g} = \frac{P_{избА}}{\rho g}. \quad (1.5)$$

Жидкостным манометром является ртутный манометр (рис. 1.3), который представляет собой U-образную стеклянную трубку, изогнутое колено которой заполнено ртутью. Так плотность ртути в 13,6 раза больше плотности воды, предел измеряемого давления увеличивается до $(3 \div 5)10^5$ Па.

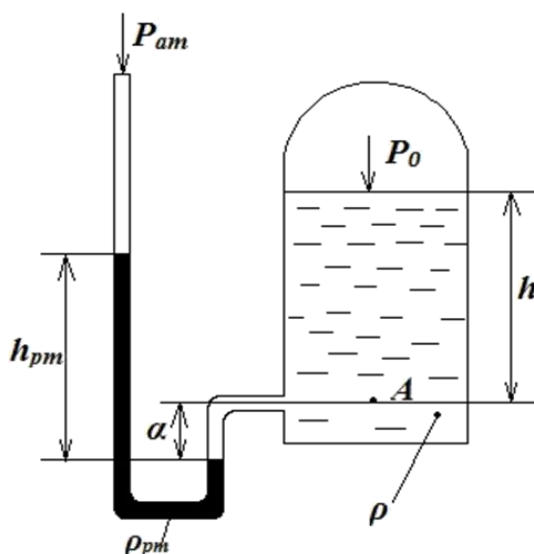


Рис. 1.3 – U-образный манометр

Избыточное гидростатическое давление в точке А:

$$P_{изб А} = (\rho_{рт} h_{рт} + \rho a)g \quad (1.6)$$

Недостатком прибора является необходимость двух отсчетов: высоты ртутного столба $h_{рт}$ и высоты a . Этому недостатка лишен чашечный манометр (рис. 1.4): при изменениях высоты столба ртути в узком пьезометре её уровень изменяется, а в широкой чашке остаётся практически постоянным.

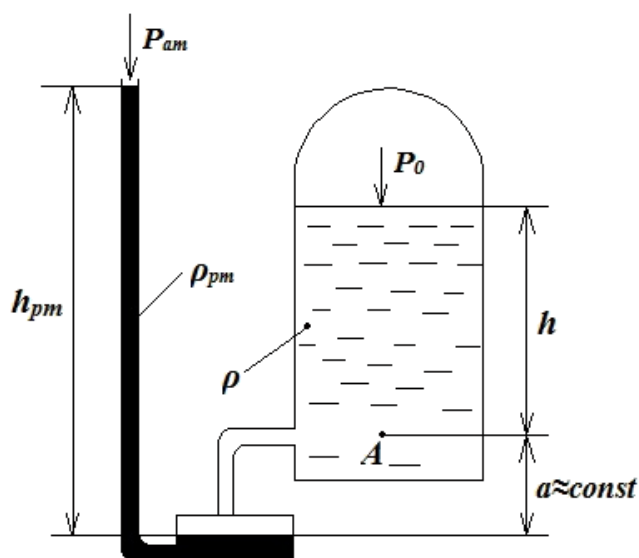


Рис. 1.4 – Чашечный манометр

Для измерения разности давлений в двух точках жидкости применяют дифференциальные ртутные манометры (рис.1.5).

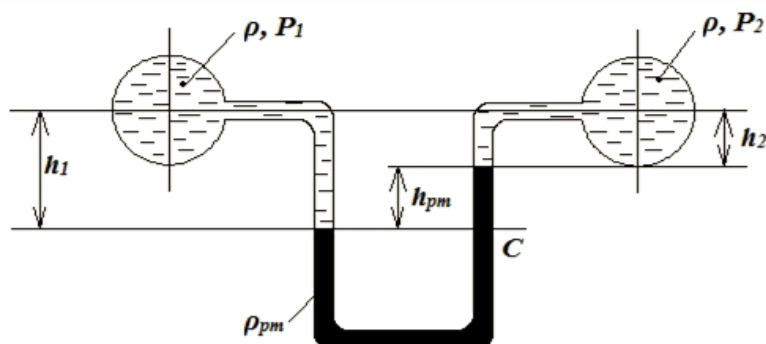


Рис. 1.5 – Дифференциальный манометр

Давление в точке С:

$$P_c = P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \rho g h_2 + \rho g h_{рт}. \quad (1.7)$$

Разность давлений в резервуарах:

$$P_1 - P_2 = (\rho_{рт} - \rho) g h_{рт}. \quad (1.8)$$

Для повышения точности измерений, а также при измерении незначительных давлений применяют микроманометры (рис.1.6).

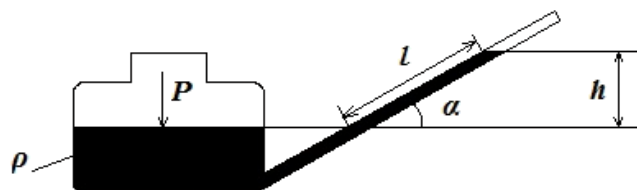


Рис. 1.6 – Схема микроманометра с наклонной трубкой

Давление на свободной поверхности жидкости в чашке:

$$p = \rho gh = \rho g \ell \sin \alpha. \quad (1.9)$$

По сравнению с обычным пьезометром микроманометр обладает значительно большей чувствительностью, так как он позволяет вместо малой высоты h отсчитывать длину ℓ тем большую, чем меньше угол α .

Промышленность выпускает микроманометры типа ММН для измерения давлений в диапазонах от 0 до 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 кПа классов точности 0,5 и 1. Для более точных измерений малых перепадов давлений используют микроманометры с оптическими устройствами.

Для измерения вакуума служат жидкостные вакуумметры, которые принципиально не отличаются от ртутных U-образных манометров.

Не всегда манометры и вакуумметры заполняют ртутью. В зависимости от назначений и условий работы для этой цели используют другие жидкости, которые не должны смешиваться с жидкостью в резервуаре.

Для измерения больших давлений используют механические приборы – пружинные и мембранные манометры (рис.1.7).

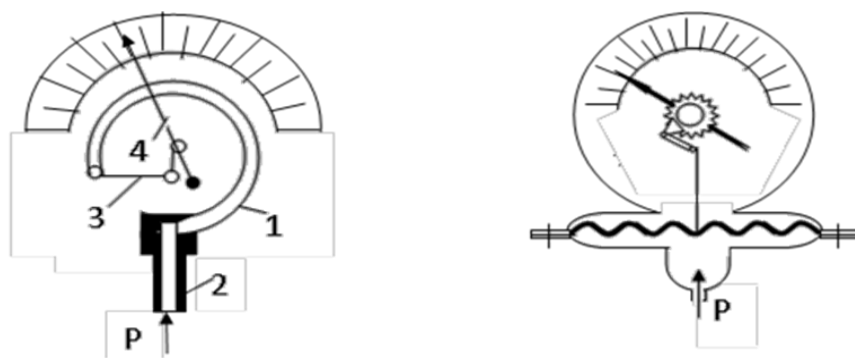


Рис. 1.7 – Пружинный и мембранный манометры

Основной деталью пружинного манометра является согнутая по окружности полая трубка 1, имеющая эллиптическое или овальное поперечное сечения, изготовленная из латуни или пружинной стали. Свободный конец трубки запаян, противоположный через штуцер 2 присоединяется к области измеряемого давления. Под действием дав-

ления трубка 1 частично распрямляется и посредством системы рычагов 3 приводит в движение стрелку 4, по отклонению которой судят о величине давления.

В мембранных манометрах давление среды воздействует на металлическую мембрану, деформация которой посредством системы рычагов передается стрелке, указывающей на шкале величину измеряемого давления.

Так как деформации трубки или мембраны являются упругими, шкалы приборов являются равномерными.

Применяя приборы с трубчатой пружиной или мембраной, следует иметь в виду, что в условиях переменной температуры изменяется модуль упругости чувствительного элемента. Кроме того, стабильность показаний пружинного манометра нарушается явлениями гистерезиса и остаточной деформации, поэтому манометры следует тарировать не реже 1 раза в год.

Основная задача периодической поверки манометров заключается в определении систематических ошибок при пользовании приборами.

Случайные ошибки связаны с человеческим фактором, имеют место, когда при последовательных измерениях постоянной величины получают различные числовые значения. Случайные ошибки устраняются выбраковкой ошибочных измерений.

Систематическая ошибка вызвана неисправностью прибора и наблюдается, когда среднее значение последовательных отсчетов отклоняется от известного точного значения не зависимо от числа измерений. Установить систематическую ошибку возможно только при поверке приборов.

По результатам поверки судят о пригодности манометра к дальнейшей эксплуатации. На пригодном к эксплуатации манометре устанавливается пломба и указывается дата следующей очередной поверки. Манометры с просроченной датой поверки к эксплуатации не допускаются.

При тарировании манометров производят сравнение полученных результатов с классом точности прибора. Классом точности манометра называется предельно допустимая относительная погрешность прибора в процентах при максимальном показании по шкале прибора.

По назначению к применению среди механических манометров выделяют образцовые типа МО классов точности 0,16; 0,25 и 0,4 на давления от 0,1 до 1000 МПа, контрольные (повышенной точности) типа МТИ классов точности 0,6 и 1 и технические (рабочие) классов точности 1; 1,6 и 2,5.

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

Схема грузопоршневого манометра МП-60 на максимальное давление 60 ат для тарирования механических манометров представлена на рис.1.8. Цилиндр прессового устройства 1 заполняют маслом из ванны 4 при открытом вентиле 5 и закрытых вентилях 6. Для этого поршень устанавливают в крайнее положение при полностью выдвинутом штоке. Затем при закрытом вентиле 5 и открытых вентилях 6 поверяемых манометров 2 медленным вращением маховика штока перемещают поршень прессового устройства, создавая в гидросистеме МП-60 давление P_0 . Грузы, соответствующие задаваемому давлению, помещают на тарелку грузопоршневого манометра 3. Поршень прессового устройства вводится вовнутрь цилиндра до тех пор, пока тарелка с грузами не поднимется до совмещения в свету торцов штока и цилиндра грузопоршневого манометра.

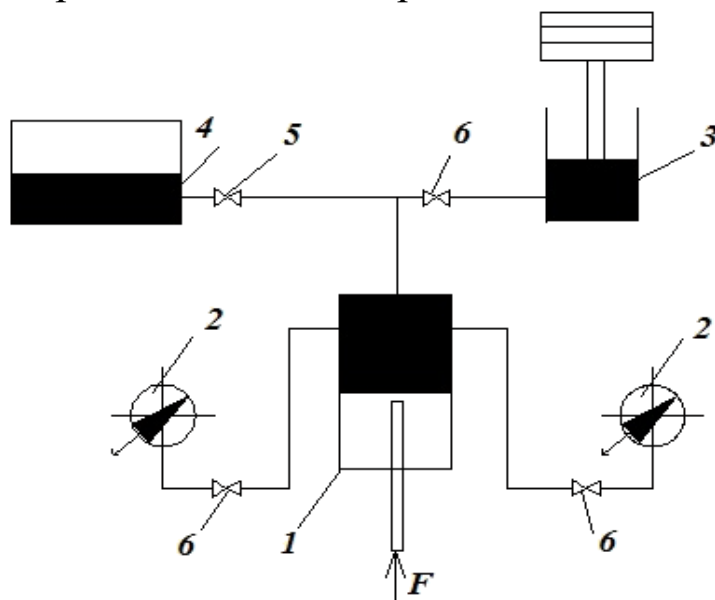


Рис. 1.8 – Схема стенда для тарирования манометров

Для устранения возможного импеданса (заедания) в плунжерной паре грузопоршневого манометра касательным усилием проворачивают на 1-2 оборота тарелку с грузами.

Снимают с точностью, равной половине цены наименьшего деления шкалы проверяемого манометра его показания. Измерения повторяют для всего ряда последовательно возрастающих величин давления. Затем манометр вентилем 6 отключают от гидросистемы, и проверяемый манометр выдерживают 5 минут, проверяя его герметичность. После этого поверку производят при тех же, но последовательно снижающихся величинах давления. Результаты измерений заносят в протокол испытаний манометра.

Примечание: стенд МП-60 имеет две позиции для подключения двух манометров и поверке, например, рабочего по контрольному, контрольного по образцовому. Грузопоршневой манометр является наиболее точным.

Обработка результатов испытаний

Для каждого значения давления вычисляется среднее арифметическое из показаний проверяемого прибора при повышении и понижении давления $p_{cp}=0,5(p_1+p_2)$, а также абсолютную погрешность измерения давления как разность среднеарифметического давления и давления p_0 по грузопоршневому манометру: $\Delta p=p_{cp}-p_0$.

Вычисляют фактическую относительную погрешность каждого измерения $\delta_f=(\Delta p/p_0)\cdot 100\%$ и приведенную допускаемую погрешность манометра $\delta_d=(\varepsilon p_{max}/p_0)\cdot 100\%$, где ε – класс точности проверяемого манометра.

Соответствие манометра своему классу точности осуществляют сравнением фактической относительной погрешности и приведенной допускаемой погрешностью. Если при поверке прибора фактическая погрешность в любой точке шкалы прибора не превышает допускаемую, то прибор признается годным к дальнейшему применению. В противном случае он должен быть подвергнут ремонту и послеремонтной поверке или списанию.

Протокол испытаний манометра

Тип манометра –

№ манометра –
 Год выпуска –
 Класс точности –
 Диапазон измерений –

Таблица 1.1 – Экспериментальные данные

№ за- мера	P_0 , кгс/см ²	P_1 , кгс/см ²	P_2 , кгс/см ²	$P_{ср}$, кгс/см ²	ΔP , кгс/см ²	$\delta_{ф}$, %	$\delta_{д}$, %
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Если $\delta_{д} > \delta_{ф}$ делается вывод о соответствии прибора указанному классу точности.

Контрольные вопросы

1. Что такое абсолютное, избыточное, вакуумметрическое давление?
2. Какие существуют единицы давления и связь между ними?
3. Понятие цены деления, класса точности прибора?
4. Опишите схему установки МП-60 и порядок работы на ней.
5. Какие существуют ошибки и погрешности измерений давления?

2. Лабораторная работа №2. «Экспериментальная проверка основного уравнения гидростатики и закона Паскаля»

Цель работы:

1. Определить величину гидростатического давления в любой точке рассматриваемой жидкости экспериментальным и расчетным способом.
2. Проверить основное положение закона Паскаля.
3. Проанализировать результаты расчетных и опытных данных. Сделать выводы.

Теоретическая часть

Гидростатика является разделом механики жидкостей и газа, в котором рассматривают равновесие покоящейся жидкости, распределение давления в ней, а также силовое воздействие жидкости на твердые тела.

Силы, действующие в покоящейся жидкости, подразделяют на массовые (их величина пропорциональна массе – сила тяжести, сила инерции, центробежная сила) и поверхностные (их величина зависит от площади воздействия – сила давления, сила поверхностного натяжения).

При изучении напряжений внутри покоящейся жидкости силами поверхностного натяжения обычно пренебрегают, а силы вязкого трения в покоящейся жидкости себя не проявляют.

Распределение давления p в покоящейся жидкости, находящейся под действием любых массовых сил, определяют интегрированием с учётом граничных условий дифференциального уравнения Л.Эйлера:

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz), \quad (2.1)$$

где ρ – плотность жидкости;

X, Y, Z – проекции результирующего вектора единичных ($m=1$) массовых сил на соответствующие оси пространственных координат x, y, z .

Поверхности равного давления определяют по уравнению (2.1), полагая $dp=0$.

При действии на покоящуюся жидкость лишь силы тяжести давление линейно возрастает с увеличением глубины h рассматриваемой точки:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (2.2)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости;
 g – ускорение свободного падения, а свободная поверхность жидкости является горизонтальной плоскостью $z = \text{const}$.

Для измерения давления в лабораторных условиях часто используют пьезометр – открытую стеклянную трубку диаметром около 5 мм, подсоединённую в точке, где измеряют величину давления:

$$p = p_0 + \rho gh = p_{\text{ат}} + \rho gh_p, \quad (2.3)$$

где $p_{\text{ат}}$ – атмосферное давление;
 h_p – пьезометрическая высота (высота столба жидкости в пьезометре, измеренная относительно точки его подключения).

Пьезометрическая высота соответствует избыточному давлению (превышению абсолютного давления над атмосферным):

$$h_p = \frac{p_{\text{абс}} - p_{\text{ат}}}{\rho g} = \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g}, \quad (2.4)$$

В открытом сосуде $p_0 = p_{\text{ат}}$ и пьезометрическая высота равна глубине погружения рассматриваемой точки жидкости ($h_p = h$). По этой же причине уровни покоящейся жидкости в открытых сообщающихся сосудах остаются одинаковыми (располагаются на одной горизонтали).

Для оценки положения в пространстве рассматриваемой точки жидкости вводят плоскость сравнения – любую горизонтальную плоскость, а также геометрическую высоту z – расстояние по вертикали от плоскости сравнения до рассматриваемой точки.

Сумму геометрической и пьезометрической высот рассматриваемой точки жидкости называют пьезометрическим напором:

$$H_p = z + h_p = z + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g}, \quad (2.5)$$

который во всех точках покоящейся жидкости, находящейся под действием силы тяжести, одинаков (рис. 2.1):

$$H_p = z_1 + h_{p1} = z_2 + h_{p2} = \dots = \text{const}. \quad (2.6)$$

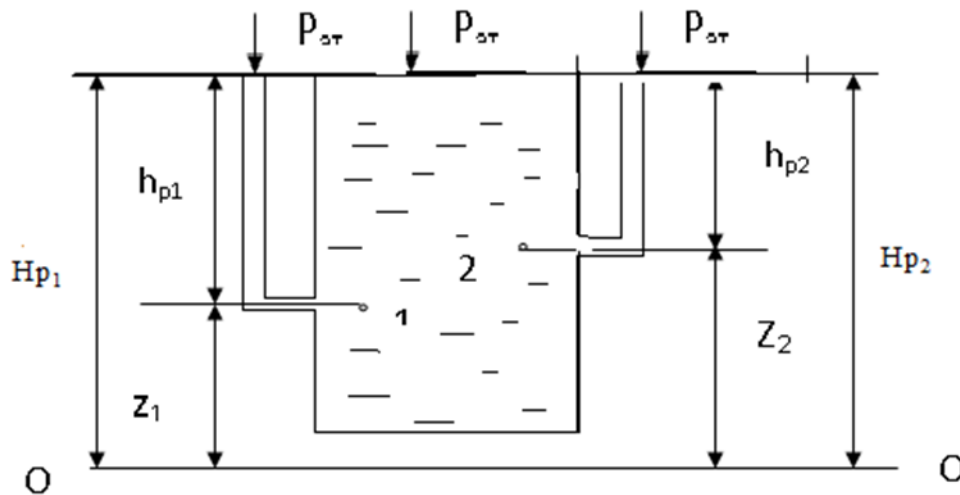


Рис. 2.1 – Обоснование постоянства напора в покоящейся жидкости

В этом заключается основное уравнение гидростатики. Оно имеет следующий физический смысл: во всех точках покоящейся жидкости удельная по отношению к весу жидкости потенциальная энергия является одинаковой.

Уравнение гидростатики справедливо и для полного гидростатического напора. Полным гидростатическим напором считают напор, учитывающий величину атмосферного давления на свободной поверхности жидкости, т.е:

$$H_r = H_p + \frac{p_{at}}{\rho g} \quad (2.7)$$

Если в одной точке покоящейся жидкости изменить давление на величину Δp_1 , то и в других точках жидкости давление изменится на ту же самую величину.

Действительно, записав основное уравнение гидростатики в виде:

$$z_1 + \frac{p_1 + \Delta p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2 + \Delta p_2}{\rho g}, \quad (2.8)$$

или:

$$H_{p1} + \frac{\Delta p_1}{\rho g} = H_{p2} + \frac{\Delta p_2}{\rho g}. \quad (2.9)$$

Последнее равенство возможно лишь при $\Delta p_1 = \Delta p_2$. Таким образом, изменение давления, производимое в любой точке покоящейся жидкости, передаётся по всем направлениям всем точкам жидкости

одинаково. Это свойство гидростатического давления называют законом Паскаля.

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

На лабораторном стенде (рис.2.2) измеряют давление в покоящейся жидкости на различных глубинах. Опытные данные сопоставляют с вычисленными по основному уравнению гидростатики.

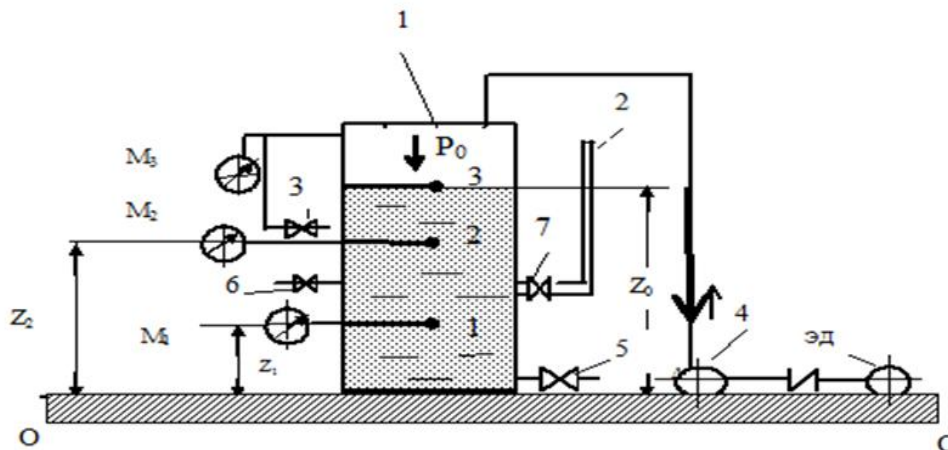


Рис. 2.2 – Схема стенда: 1 – резервуар; 2 – водомерная трубка; 3 – вентиль для связи с атмосферой; 4 – компрессор с электроприводом; 5 – вентиль для сброса воды в канализацию; 6 – вентиль для заполнения стенда водой; 7 – пробковый кран водомерной трубки

Вертикальный резервуар 1, заполненный водой и воздухом, позволяет измерить передачу давления от свободной поверхности к точкам жидкости на различных глубинах. Установка снабжена манометрами M_1 , M_2 , M_3 , вентилем 6 для подачи воды и вентилем 7 водомерной трубки 2. Сжатый воздух от компрессора 4 подается в верхнюю часть резервуара. Высоту уровня Z_0 определяют по шкале водомерной трубки при открытом вентиле 7 до начала подачи сжатого воздуха. После измерения Z_0 , вентиль 7 необходимо закрыть. Отсчет ведется от плоскости сравнения O-O, проходящей через днище резервуара.

При закрытом вентиле 5 и открытых вентилях 3,7 установку заполняют водой через вентиль 6 до отметки по водомерной трубке $Z_0=180-230$ см. После заполнения резервуара водой вентили 3, 6 и пробковый кран 7 необходимо закрыть.

Сжатый воздух подают в верхнюю часть резервуара компрессором до предельно-допустимого давления (p_0) на свободной поверхности не более 2 кг/см^2 . Снимают показания давления с манометров M_1 и M_2 . Затем сжатый воздух с помощью вентиля 3 постепенно сбрасывают из стенда до показаний давления p_0 по манометру M_1 . Вновь записывают показания нижних меньших манометров. Давление на свободной поверхности снижают ступенчато (три-четыре раза) до величины атмосферного. При определении показаний манометров необходимо учитывать их чувствительность при низких давлениях.

При определении величин полных напоров H_1 , H_2 и H_3 значения p_0 , p_1 , p_2 следует брать по показаниям приборов и учитывать, что манометры показывают давление на уровне своих осей, а не на уровнях подключения к резервуару. Для перевода полученных данных из одной системы единиц измерения в другую можно пользоваться следующими соотношениями: $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 736 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ м в. ст.} = 10^4 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,98 \text{ бар}$.

Обработка результатов эксперимента и их анализ проводится в таблице 2.1, принимая $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3 = 1 \text{ г/см}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2 = 981 \text{ см/с}^2$.

Контрольные вопросы

1. Формулировка основного уравнения гидростатики.
2. Как определяется абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление?
3. Что такое пьезометрическая высота, пьезометрический напор и полный гидростатический напор?
4. Способы и единицы измерения давления, соотношение единиц измерения давления.
5. Сформулируйте закон Паскаля.
6. Используя полученные данные, подтвердите действие закона Паскаля.

3. Лабораторная работа №3. «Исследование относительного покоя жидкости в цилиндре, вращающегося с постоянной угловой скоростью»

Цель работы:

1. Экспериментально определить свободную поверхность жидкости во вращающемся с постоянной угловой скоростью цилиндре относительно его вертикальной оси симметрии.
2. Отработать практические навыки экспериментального исследования.

Теоретическая часть

Уравнения равновесия покоящейся жидкости справедливы при ее абсолютном и относительном покое. При абсолютном покое частицы жидкости неподвижны относительно соседних частиц, стенок резервуара и связанной с ним системой координат. При относительном покое частицы жидкости также не смещаются относительно друг друга и стенок резервуара, но сам резервуар перемещается относительно системы отсчета.

Закономерности относительного покоя жидкости во вращающемся цилиндре характерны для работы сепараторов, центрифуг, жидкостных тахометров, установок центробежного литья под давлением и т.п.

При вращении цилиндра на жидкость действуют сила тяжести $G=mg$ и центробежная сила $F=m\omega^2r$ (рис.3.1).

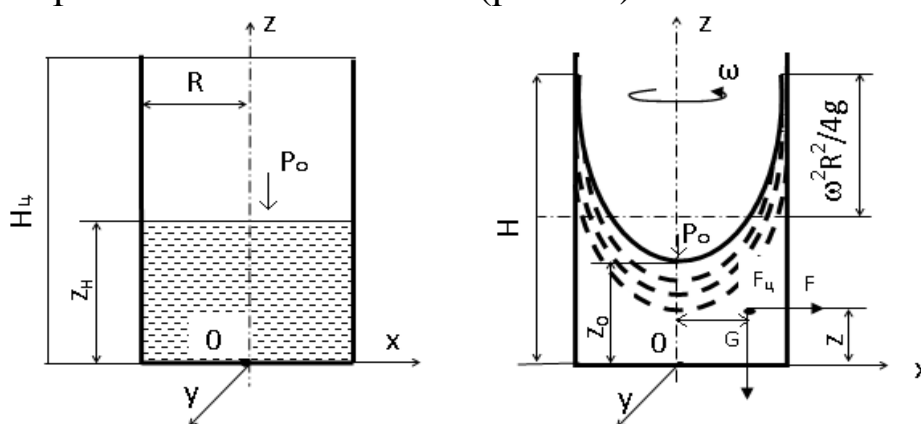


Рис. 3.1 – Абсолютный (а) и относительный (б) покой

В результате совместного действия указанных сил свободная поверхность жидкости принимает форму параболоида вращения:

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g}. \quad (3.1)$$

где z_0 - ордината свободной поверхности на оси вращения;

r – радиус вращения рассматриваемых точек жидкости ($r^2=x^2+y^2$).

Отметим, что форма свободной поверхности (3.1) не зависит от рода (вида) жидкости. Гидростатическое давление в слоях жидкости на удалении от оси вращения ($0 \leq r \leq R$) зависит от плотности жидкости и определяется выражением:

$$p = p_0 + \rho g(z_0 - z) + \rho \omega^2 r^2 / 2, \quad (3.2)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости,

ρ - плотность жидкости.

Таким образом, давление в произвольной точке жидкости с координатами r и z определяется воздействием на жидкость внешнего давления p_0 , давления столба жидкости над рассматриваемой точкой и давления, создаваемого центробежной силой.

Высоту подъема жидкости на периферии вращения ($r=R$) определяют из равенства объемов жидкости в цилиндре при покое и при вращении (рис. 3.1):

$$H = z_H + 0,25 \omega^2 R^2 / g. \quad (3.3)$$

При известной высоте цилиндра $H_{ц}$ можно определить угловую скорость вращения, при которой жидкость не выливается через край цилиндра:

$$\omega < 2 \sqrt{g(H_{ц} - z_H)} / R. \quad (3.4)$$

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

Установка (рис.3.2) представляет собой открытый сверху цилиндр 1 с жидкостью, который приводится во вращение электродвигателем 2 через червячную передачу 3. Координатник 4, закрепленный на раме 5, имеет направляющие, по которым с помощью винта 6 перемещается каретка 7 с измерительной иглой 9. По шкале 8 фиксируют положение иглы в горизонтальной плоскости и ведут отсчет радиуса r для выбранных в ходе эксперимента точек.

Перемещение иглы в вертикальной плоскости для измерения ординаты z осуществляют с помощью кремальеры 11.

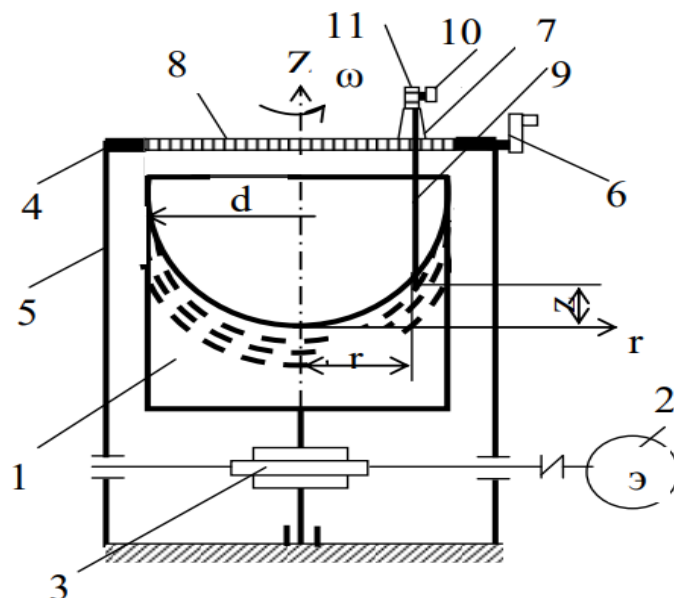


Рис. 3.2 – Схема установки ГТ-2

Устанавливают иглу 9 по оси симметрии цилиндра ($r = 0$) до контакта с поверхностью жидкости и снимают показание z_n по шкале 8.

С помощью тумблера включают электродвигатель установки и примерно через одну минуту (жидкость приобретает состояние относительного покоя) перемещают иглу 9 по оси симметрии до контакта с поверхностью жидкости, снимая показание z и записывая его значение в таблицу 3.1.

Задавая значения r_i (точки 1,2 и т.д.) и обеспечивая касание иглы о свободную поверхность жидкости, производят отсчеты ординат z_i для каждой из точек. Результаты измерений заносятся в таблицу 3.1. Рекомендуется при приближении иглы к стенке цилиндра осуществлять замеры радиуса r через меньшие промежутки, так как на периферии вращения резко увеличивается крутизна свободной поверхности жидкости.

С помощью вертикальной полоски, нанесенной на цилиндр и секундомера определяют число оборотов цилиндра за минуту $n = N/t$ и угловую скорость вращения цилиндра $\omega = \frac{\pi n}{30} \approx 0,1n$.

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные

Показатель	1	2	3	4	5	6	7	8
Отсчеты r_i , см								
Ордината z_i , см								
$z = z_i - z_H$, см								
Расчетная ордината $z_{\text{расч.}}$, см								
Абсолютная погрешность $\Delta z = z_{\text{расч.}} - z$, см								
Относительная погрешность $\delta_z = \frac{\Delta z}{z}$								
Количество оборотов цилиндра, N								
Продолжительность измерения оборотов t мин								
Угловая скорость, ω , рад/с								

Для каждого кольцевого слоя r_i , ($0 \leq r < R$), вычитая текущие значения z_i из первоначального z_H (при $r=0$), получают величины ординат z_i для всех r_i .

По формуле $z_{\text{расч.}} = \frac{\omega^2 r^2}{2g}$ при значении $g=9,81 \text{ м/с}^2 = 981 \text{ см/с}^2$, следует определить расчетные значения ординаты свободной поверхности.

В одинаковом масштабе и в одной системе координат следует построить графики экспериментальной и теоретической формы свободной поверхности жидкости.

Оценить сходимость экспериментальной и теоретической кривых свободной поверхности жидкости с учетом абсолютных Δz и относительных погрешностей проведенных измерений.

Контрольные вопросы

1. Опишите порядок выполнения эксперимента, основные параметры измерений.
2. Какие силы, действуют на жидкость при абсолютном и относительном покое?

3. Как происходит изменение давлений по вертикали и горизонтали во вращающейся жидкости?
4. Как определяется допустимая угловая скорость (отсутствие выплескивания жидкости из цилиндра)?
5. Какие параметры, влияют на вид свободной поверхности жидкости при относительном покое?

4. Лабораторная работа №4. «Определение режима течения жидкости»

Цель работы:

1. Провести экспериментальное исследование режима течения жидкости в горизонтальной трубе, установленной на гидростенде ГС-3.
2. Провести визуальное наблюдение за сменой режимов течения.
3. Определить критерии гидродинамического подобия и сравнить его с критическим значением.

Теоретическая часть

При течении жидкости в потоке действуют сила вязкого трения (T) и сила инерции потока (F).

Сила вязкого трения определяется законом Ньютона-Петрова:

$$T = \mu s \left| \frac{du}{dr} \right|, \quad (4.1)$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с;

s – площадь трения соседних слоёв, м²;

du/dr – градиент скорости в поперечном направлении потока, с⁻¹.

Сила инерции потока:

$$F = am, \quad (4.2)$$

где a – ускорение, м/с²;

m – масса рассматриваемого объёма жидкости, кг.

Английский физик О. Рейнольдс опытным путем доказал и теоретически обосновал наличие двух режимов движения жидкости, получивших названия «ламинарный» и «турбулентный». Наличие того или иного режима определяется средней скоростью v потока, характерным линейным размером L сечения потока и кинематической вязкостью ν жидкости. Параметр, определяющий режим движения потока, определяется отношением сил (4.1) и (4.2), действующих в потоке, и получивший в дальнейшем название число Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{F}{T} = \frac{am}{\mu s \left| \frac{du}{dr} \right|} \sim \frac{(v/t) \rho w}{\mu s (v/r)} \sim \frac{(v/t) L^3}{(\mu/\rho) L^2 (v/L)} \sim \frac{vL}{\nu}, \quad (4.3)$$

где $\nu = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость, м²/с;

v – средняя скорость потока, м/с;

L – линейный размер потока, м.

В качестве линейного размера используют диаметр трубы или гидравлический радиус R_r . Гидравлический радиус чаще всего используют в случаях русел некруглой формы. В общем случае гидравлический радиус является отношением площади поперечного сечения потока к длине смоченного периметра этого сечения. По смоченному периметру сечения поток жидкость соприкасается с твердыми стенками русла.

Таким образом, для любого потока:

$$Re = vR_r/\nu. \quad (4.4)$$

Число Рейнольдса является критерием гидродинамического подобия потоков, находящихся под действием сил вязкого трения.

Режимы течения жидкостей получили названия «ламинарный» (от латинского «ламина» – слой, пластина) и «турбулентный» (от латинского «турбо» – вихрь). Смена режимов течения происходит при критических значениях числа Рейнольдса $Re_{кр}=580$.

Смена режимов наблюдается при критической скорости $v_{кр}=Re_{кр} \cdot \nu/R_r$, соответствующей критическому значению числа Рейнольдса. Если $Re < Re_{кр}$ - режим ламинарный; при $Re > Re_{кр}$ - режим турбулентный. Такая рекомендация подтверждается многочисленными данными многих исследователей.

Вместе с тем, установлено, что смена режимов возможна и при более низких или высоких значениях числа Рейнольдса. В отдельных случаях смена режимов наблюдалась и при $Re \approx 100000$ (полированные трубы, термоконстантные условия, виброзащита установки и др.).

Кроме того, смена режимов зависит от порядка их формирования. Если развивать турбулентный режим из ламинарного, например, постепенно увеличивая скорость потока, то критическое значение Re будет превышать, примерно, в пять раз критическое значение Re для случая формирования ламинарного потока из турбулентного. Это объясняется свойством потока «по инерции» сохранять предшествующее состояние.

В ламинарном потоке силы трения стабилизируют течение, подавляя возмущения, вихри. В результате наблюдается течение слоистое, упорядоченное, без перемешивания жидкости.

В турбулентном потоке вследствие образования вихревых течений жидкость неупорядоченно перемешивается.

Теоретический анализ позволил выявить параболический профиль эпюры скоростей по сечению ламинарного потока в круглой цилиндрической трубе (рис.4.1), а также соответствующую аналитическую зависимость:

$$u/u_{\max}=1-r^2/R^2, \quad (4.5)$$

где u_{\max} – наибольшая скорость на оси потока;

r – радиальная координата рассматриваемого слоя ($0 \leq r \leq R$);

R – внутренний радиус трубы.

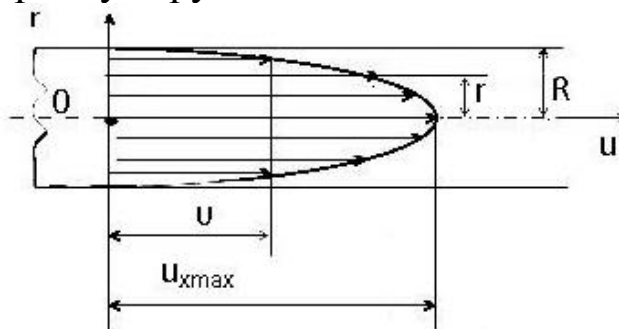


Рис. 4.1 – Профиль скоростей по сечению напорного потока в круглой цилиндрической трубе при ламинарном режиме течения

Жидкость прилипает к внутренней поверхности трубы ($v=0$ при $r=R$), а средняя скорость v равна половине наибольшей на оси потока ($v=0,5u_{\max}$).

Многочисленные экспериментальные данные подтверждают приведенные аналитические соотношения для ламинарного потока.

В каждой точке турбулентного потока продольная скорость пульсирует – случайным образом изменяется во времени, так что $u = u(t)$.

Мгновенное значение скорости продольного течения в фиксированной точке турбулентного потока можно представить следующим образом:

$$u(t) = \bar{u} + u', \quad (4.6)$$

где \bar{u} – осредненная скорость течения в продольном направлении; u' – пульсация скорости продольного течения.

Осредненная скорость – это средняя арифметическая величина из мгновенных значений скорости за базовый промежуток времени T :

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (4.7)$$

Наряду с пульсациями u' продольной скорости в турбулентном потоке существуют и поперечные перемещения частиц жидкости. Скорости поперечных перемещений также имеют свои пульсации u' .

Указанные особенности значительно усложняют анализ турбулентного течения, а отсутствие стройной теории вызывает необходимость использования различных гипотез. Наиболее распространенная из них – гипотеза Л. Прандтля о длине пути смешения, которая позволяет касательные напряжения силы гидравлического трения представить в виде:

$$\tau_T = \rho \ell^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dr} \right| \frac{d\bar{u}}{dr}. \quad (4.8)$$

Здесь ℓ - длина пути смешения, т.е. расстояние в поперечном направлении потока, на котором частица жидкости сохраняет своё количество движения до попадания в слой с иным значением скорости, а, следовательно, и другим количеством движения. Изменения количества движения у частиц жидкости и вызывают напряжения τ_T силы инерционного трения, которые значительно превышают напряжения силы вязкого трения. С учетом наличия в турбулентном потоке пристенного ламинарного слоя напряжения силы гидродинамического трения определяют суммированием указанных напряжений:

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dr} \right) + \tau_T. \quad (4.9)$$

Принципиально важным является и то, что турбулентное движение всегда является неустановившимся.

При использовании гипотезы Прандтля исследователями получены полуэмпирические формулы распределения по сечению турбулентного потока осредненных скоростей, в частности закон «одной седьмой»:

$$\mu / \mu_{\max} = (1 - r / R)^{1/7}. \quad (4.10)$$

Профиль осредненных скоростей по сечению напорного турбулентного потока в круглой цилиндрической трубе представлен на рис.4.2.

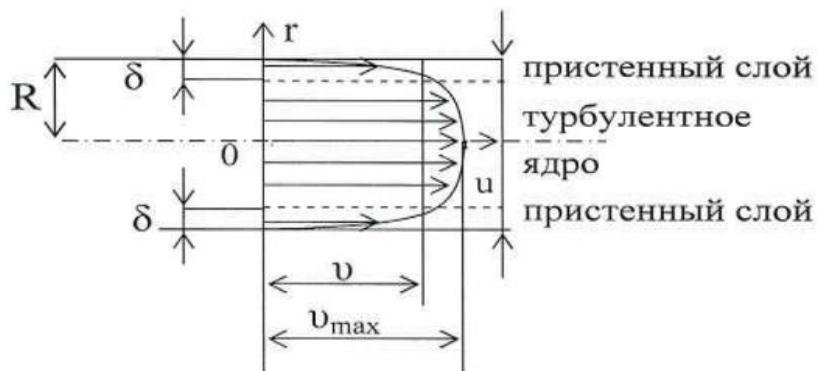


Рис. 4.2 – Профиль осредненных скоростей по сечению турбулентного потока в круглой цилиндрической трубе

Несмотря на наличие мощных вихревых областей (турбулентного ядра потока), вблизи стенки существует ламинарный слой, толщина которого δ уменьшается с развитием турбулентности ($\delta \sim Re^{-1}$), а градиент скорости в поперечном направлении потока резко увеличивается.

В отличие от ламинарного потока величина средней скорости в поперечном сечении турбулентного потока не является постоянной, а изменяется в пределах $v = (0,7 \div 0,9)u_{\max}$ и с развитием турбулентности ($Re \rightarrow \infty$) приближается к максимальной ($v \rightarrow u_{\max}$).

В инженерной практике для напорных потоков в круглых цилиндрических трубах в качестве характерного линейного размера применяют не гидравлический радиус, а внутренний диаметр трубы d . Нетрудно подсчитать, что в этом случае: $R_r = \pi R^2 / (2\pi R) = R/2 = d/4$, а число Рейнольдса $Re = vd/\nu$ оказывается в 4 раза большим, следовательно, и критическое значение числа Рейнольдса $Re_{кр} = 4 \cdot 580 = 2320$.

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

Схема лабораторной установки представлена на рис.4.3. Установленный на стойке 4 буферный бак 2 выполнен в виде сферы и обеспечивает установившийся поток воды в рабочем участке 12. Рабочий участок установлен над лотком 9 и крепится к выходному патрубку 3 с помощью уплотнения. Другой конец рабочего участка укрепляется в патрубке 11.

В напорную магистраль вода поступает от насоса 6 при открытии вентиля 5. В процессе эксперимента расход воды регулируется вентилями 5 и 10. Насос 6 подает воду из бака 7 в буферный бак. В верхней части бака 7 крепится мерный бачок 8, ёмкость которого 3600 см^3 . В

дно мерного бачка установлен клапан, управляемый рычажным механизмом. При закрытии клапана включается электросекундомер, расположенный на панели установки. После наполнения мерного бака осуществляется остановка секундомера. Избыточное давление в буферном баке контролируется образцовым манометром 1.

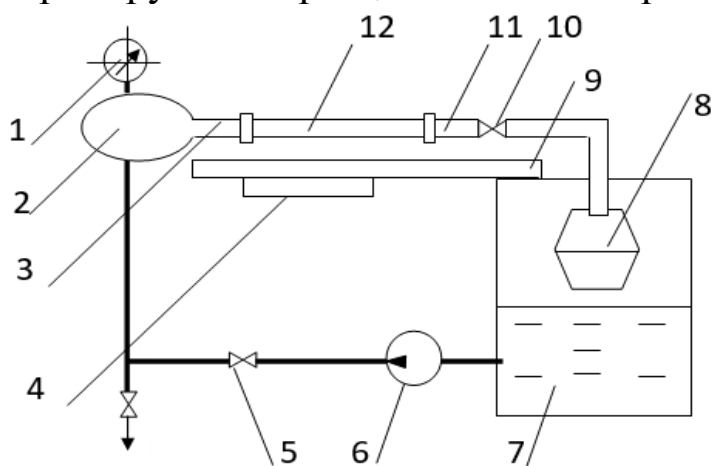


Рис. 4.3 – Схема лабораторной установки ГС-3

Техническая характеристика установки:

напряжение питания насоса - 220 В;

частота – 50 Гц;

максимальный секундный расход воды – 1 л/с;

регулируемый напор $H=0 \div 10$ м вод.ст..

Рабочий участок стенда представляет собой стеклянную трубку с внутренним диаметром $d=2,1$ см и длиной ~ 100 см.

На вход трубки с помощью шприца подаётся подкрашенная жидкость (индикатор). Это позволяет визуально наблюдать ламинарное течение, когда струйки индикатора не перемешиваются с основным потоком воды, а при увеличении расхода воды - наблюдать переход от ламинарного режима к турбулентному. Дальнейшее увеличение расхода воды приводит к тому, что окрашенная струйка (индикатор) размывается вследствие перемешивания потока воды и поток в стеклянной трубке становится окрашенным.

Наряду с визуальным наблюдением используется и расчетный метод.

С помощью секундомера при работающем насосе и фиксированном положении вентиля 10 измеряется продолжительность наполнения мерного бачка. Расход воды Q определяется отношением объёма

мерного бака w к продолжительности его наполнения t . Средняя скорость потока вычисляется как отношение расхода к площади поперечного сечения потока в стеклянной трубке: $v=Q/(\pi d^2/4)$. Измерив с помощью термометра температуру воды, по графику (рис.4.4) можно определить значение кинематической вязкости и вычислить число Рейнольдса.

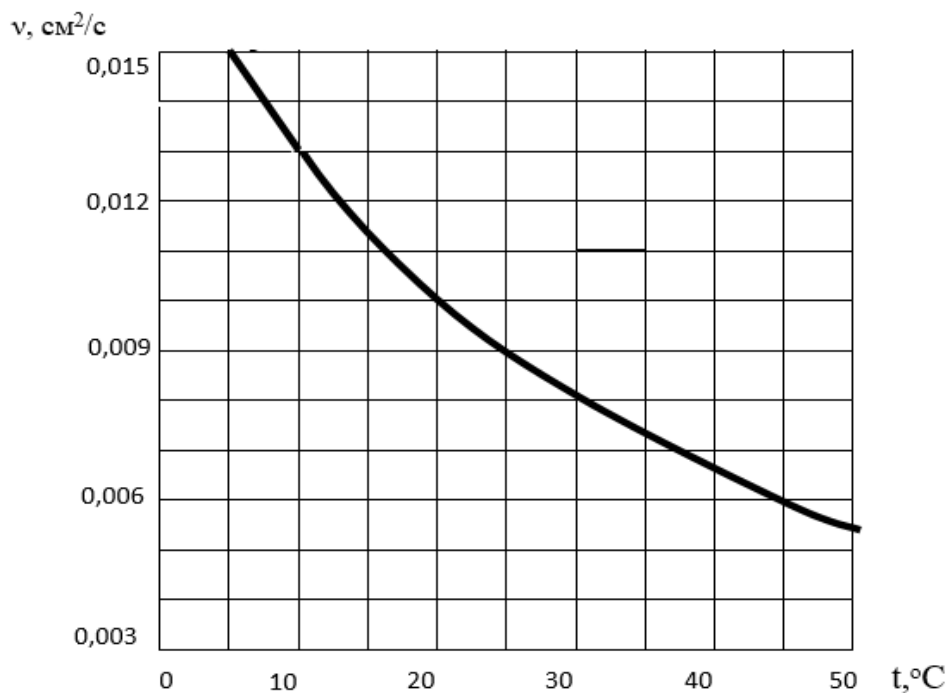


Рис. 4.4 – Зависимость кинематической вязкости от температуры

Сравнив полученное значение числа Рейнольдса с его критическим значением, следует сделать вывод о режиме течения. С помощью вентиля 10 можно регулировать расход и скорость потока, что позволяет получить другие значения числа Re .

Внимание: пуск и остановка насоса производится при полностью закрытом вентиле 5.

Полученные результаты оформляются в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные

Измерения		Вычисления					Наблю- дения	Вы- воды
Продолжи- тельность заполнения мерного бачка t , с	Тем- пера- тура воды T , °C	Вяз- кость ν , см ² /с	Пло- щадь се- чения потока, см ²	Рас- ход Q , см ³ /с	Скоро- сть по- тока v , см/с	Чис- ло Re	Описа- ние ха- рактера течения	Режим тече- ния

Контрольные вопросы

1. Расскажите об особенностях ламинарного течения жидкости.
2. Расскажите об особенностях турбулентного течения жидкости.
3. Каков физический смысл числа Рейнольдса и как с его помощью определяется режим течения?
4. Изобразите профили скоростей по сечению круглой цилиндрической трубы для ламинарного и турбулентного напорных потоков, каковы их отличия?
5. Как определяется число Re при проведении эксперимента?

5. Лабораторная работа №5. «Определение потерь напора и коэффициента трения при движении жидкости в горизонтальной трубе»

Цель работы:

1. Измерить потери напора на горизонтальном участке ламинарного и турбулентного потоков жидкости.
2. Рассчитать соответствующие значения коэффициентов трения и сравнить полученные значения со справочными.

Теоретическая часть

При движении жидкости в горизонтальной трубе происходят потери энергии (напора), связанные с проявлением свойства вязкости жидкости и действием сил инерционного трения между слоями жидкости, а также при контакте жидкости со стенками трубы.

Уравнение Д. Бернулли для двух сечений напорного потока в цилиндрической трубе имеет вид:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{тр}}. \quad (5.1)$$

Если плоскость отсчета проходит через центры тяжести живых сечений 1 и 2 и жидкость движется в трубе постоянного диаметра, уравнение (5.1) приобретает вид:

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} + h_{\text{тр}} \quad \text{или} \quad h_1 = h_2 + h_{\text{тр}}. \quad (5.2)$$

Потери напора $h_{\text{тр}}$ условились выражать как долю (λ) скоростного напора потока с учётом очевидных соотношений: потери напора прямо пропорциональны длине и обратно пропорциональны диаметру напорного потока, т.е.:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (5.3)$$

где λ - безразмерный коэффициент гидравлического трения;
 v - среднерасходная скорость потока.

Установлено, что коэффициент гидравлического трения в общем случае зависит от числа Рейнольдса Re (критерия гидродинамического подобия потоков, находящихся под действием вязкого трения) и

абсолютной шероховатости Δ (средней высоты выступов неровностей внутренней поверхности трубы), т.е.:

$$\begin{cases} \lambda = f(\text{Re}, \Delta), \\ \text{Re} = \frac{dV}{\nu}, \end{cases}, \quad (5.4)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости.

Аналитически доказано, что для ламинарного потока ($\text{Re} < 2320$):

$$\lambda = 64/\text{Re}. \quad (5.5)$$

Для турбулентных потоков исследователи рекомендуют эмпирические формулы, например:

формула Блазиуса при $2320 < \text{Re} < 10d/\Delta$:

$$\lambda = 0,3164/\text{Re}^{0,25} \quad (5.6)$$

формула Филоненко при $\text{Re} > 500d/\Delta$:

$$\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25} \quad (5.7)$$

Современные нормы и правила рекомендуют к применению универсальную формулу А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11(68/\text{Re} + \Delta/d)^{0,25} \quad (5.8)$$

Универсальность последней формулы заключается в том, что для режима гидравлически гладких труб (пристенная ламинарная плёнка покрывает выступы шероховатостей) формула (5.8) даёт удовлетворительный по точности результат формулы (5.6), а для развитого турбулентного течения – формулы (5.7).

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на универсальном гидравлическом стенде ГС-3 (рис.5.1).

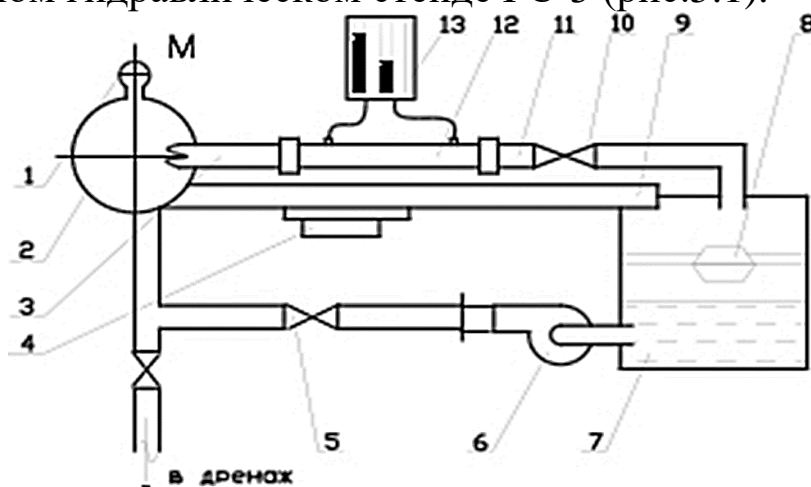


Рис. 5.1 – Универсальный гидравлический стенд

Основными элементами стенда является буферный бак 2, закрепленный на стойке и позволяющий получить установившееся течение воды в рабочем участке 12. Буферный бак имеет выходной патрубок 3, к которому крепится рабочий участок 12 для данной лабораторной работы. Другой конец рабочего участка укрепляется в патрубке 11.

В напорную магистраль вода поступает от центробежного насоса 6 при открытии вентиля 5. Расход воды через рабочий участок регулируется вентилем 10 на выходе из рабочего участка и вентилем 5.

Приемное устройство представляет собой бак 7, связанный всасывающим трубопроводом с насосом 6.

Над приемным баком смонтирован мерный бачок 8 для измерения расхода воды. Под рабочим участком установлен лоток 9, который используется для сбора воды и слива ее в бак 7. В днище мерного бачка имеется клапан, управляемый с помощью рычажного механизма (на схеме не указаны).

При замере расхода воды одновременно с закрытием клапана на пульте управления 4 включается секундомер. После заполнения водой мерного бачка происходит замыкание контакта уровня с одновременной остановкой электросекундомера.

Потери напора на трение в горизонтальной трубе исследуются на горизонтальном участке трубы диаметром d мм и длиной L . Для измерения статического давления в двух сечениях установлены пьезометрические трубки (рис.5.2).

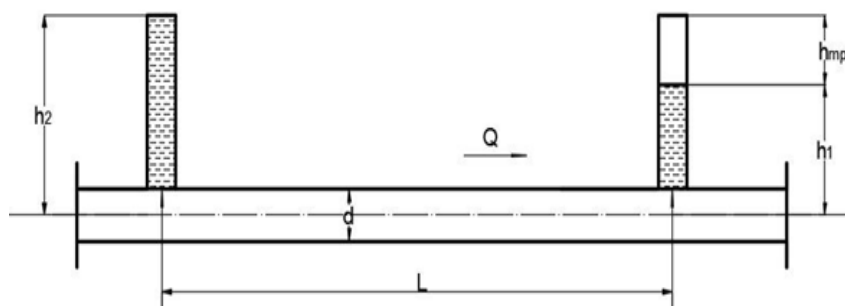


Рис. 5.2 – Рабочий участок установки

Экспериментальную часть выполняют в следующей последовательности:

- Измеряют расстояние между сечениями и внутренний диаметр трубопровода.

- С помощью вентилях 5 и 10 формируют поток жидкости на рабочем участке.

Внимание: пуск и остановка лопастного насоса 6 производится при закрытом вентиле 5. Давление в буферном баке 2 контролирует манометр 1.

- С помощью пьезометров измеряют пьезометрические высоты.
- Измеряют температуру жидкости и определяют ее вязкость (по справочнику).

- С помощью мерного бачка 8 и электросекундомера измеряют расход жидкости $Q=w/t$, где $w=386 \text{ см}^3$ – объем мерного бачка, t – продолжительность его заполнения, с.

- Из уравнения неразрывности определяют среднюю скорость потока v ($Q=v_1 \times S_1 = v_2 \times S_2$), S – площадь живого сечения, см^2 .

- С помощью вентилях 5 и 10 изменяют расход на рабочем участке и измерения повторяют.

- Считают потери напора для каждого значения расхода $h_{\text{тр}}=h_1-h_2$.

- Из формулы (5.3) определяют значение коэффициента трения λ . (в физической системе единиц измерения $g=981 \text{ см/с}^2$).

- Результаты эксперимента и расчетные данные заносят в табл.5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерений и расчетов

Наименование величин	Условные обозначения	Номер замера	
		1	2
Показания пьезометров	$h_1, \text{ см}$ $h_2, \text{ см}$		
Потери напора	$h_{\text{тр}}=h_1-h_2, \text{ см}$		
Объем наполнения мерного бака	$w, \text{ см}^3$		
Продолжительность замера	$t, \text{ с}$		
Расход	$Q, \text{ см}^3/\text{с}$		
Средняя скорость	$v, \text{ см/с}$		
Кинематическая вязкость при $t=0^\circ\text{C}$	$\nu, \text{ см}^2/\text{с}$		
Число Рейнольдса	Re		
Коэффициент трения	(эксп.)		
	(расч.)		

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физическая сущность потерь напора на линейных участках трубопроводов?
2. Какая существует зависимость потерь напора от режима течения?
3. Что такое гидравлически гладкие и шероховатые трубы?
4. Напишите формулу для определения коэффициента трения (А.Д. Альтшуль).
5. Напишите формулу для линейных потерь напора.
6. Опишите порядок выполнения работы.
7. Поясните отличия в зависимости $h_{\text{тр}}=f(Q)$ для ламинарного и турбулентного течения.

6. Лабораторная работа №6. «Определение коэффициентов местных сопротивлений»

Цель работы:

1. Изучить виды местных сопротивлений.
2. Определить потери напора и коэффициенты местных сопротивлений.

Теоретическая часть

Местные гидравлические сопротивления - это короткие участки трубопроводов или каналов, в которых происходит изменение скоростей потока по величине и(или) направлению.

Потери напора (удельной энергии) в местных сопротивлениях называют местными потерями напора и определяют в долях удельной кинетической энергии по формуле Вейсбаха:

$$\Delta h_m = \xi \frac{V^2}{2 \cdot g}, \quad (6.1)$$

где V - средняя скорость в сечении трубопровода или канала, расположенном, обычно, за местным сопротивлением;

ξ - безразмерный коэффициент местного сопротивления.

Величина ξ зависит от вида местного сопротивления, числа Рейнольдса Re , в некоторой мере от шероховатости стенок, а для запорных устройств (кранов, вентилях, задвижек, клапанов и т.п.) – от степени их открытия.

В связи со сложностью структуры потока в местных сопротивлениях только в отдельных случаях (например, внезапное расширение потока) Δh_m и ξ могут быть определены теоретически, в преобладающем большинстве случаев коэффициенты ξ определяют экспериментально.

Исследования показывают, что ξ зависит от числа Рейнольдса лишь при ламинарном режиме течения. При турбулентном режиме течения при достаточно больших числах Re влияние последних на коэффициент ξ незначительно, поэтому значения ξ считают зависящими только от вида и конструктивного исполнения местного сопротивления.

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на гидравлическом стенде ГС-3.

На рис.6.1 дана конструктивная схема стенда, включающего напорное и приемное устройства, измерительные приборы и рабочий участок (рис.6.2).

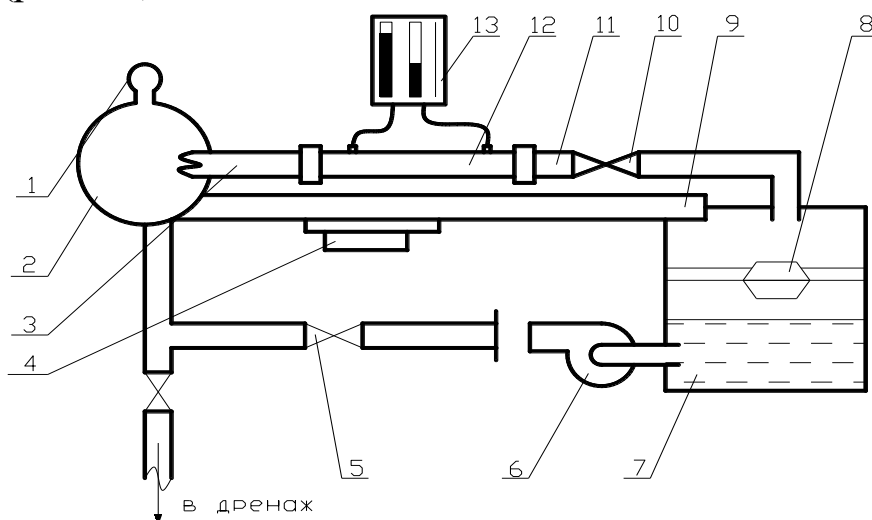


Рис. 6.1 – Универсальный гидравлический стенд

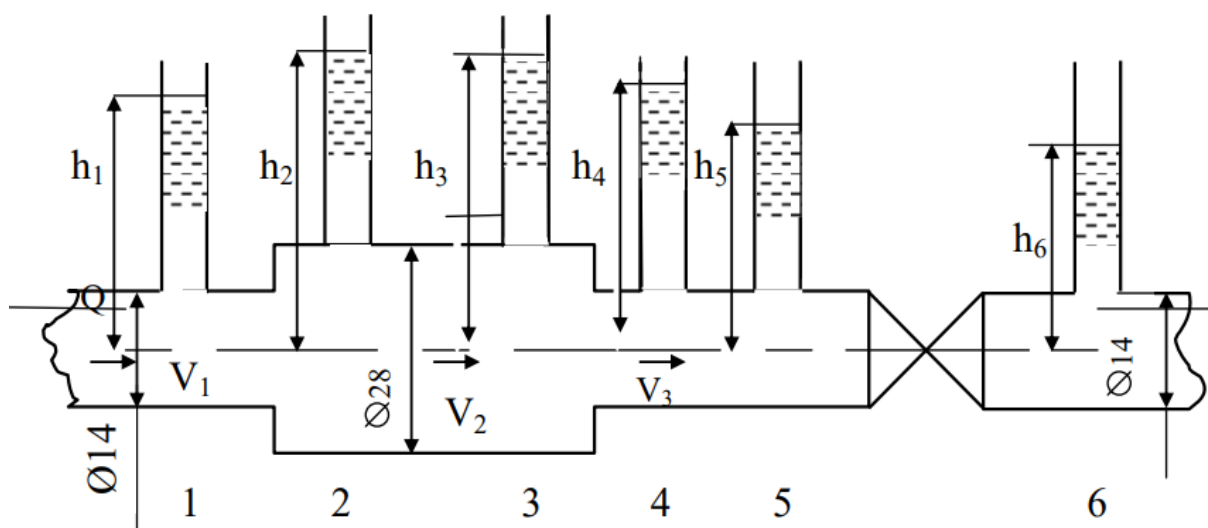


Рис. 6.2 – Рабочий участок экспериментальной установки

Основными элементами установки является буферный бак 2, закрепленный на стойке и позволяющий получить установившееся течение воды в рабочем участке. Буферный бак имеет выходной патрубок 3, к которому крепится рабочий участок 12 для данной лабораторной работы. Другой конец рабочего участка укрепляется в патрубке 11.

В напорную магистраль вода поступает от центробежного насоса 6 при открытии вентиля 5. Расход воды через рабочий участок регулируется вентилем 10 на выходе из рабочего участка и вентилем 5.

Приемное устройство представляет собой бак 7, связанный всасывающим трубопроводом с насосом 6.

Над приемным баком смонтирован мерный бачок 8 для измерения расхода воды. Под рабочим участком установлен лоток 9, который используется для сбора воды и слива ее в мерный бачок. В днище мерного бачка имеется клапан, управляемый с помощью рычажного механизма (на схеме не указаны).

При замере расхода воды одновременно с закрытием клапана на пульте управления 4 включается секундомер. После заполнения мерного бачка происходит замыкание контакта уровня с одновременной остановкой электросекундомера.

Измерительные приборы на стенде представлены щитом 13 с пьезометрическими трубками 13. Избыточное давление в расходном баке измеряется образцовым манометром 1.

С целью стабилизации режима и экономии воды гидростенд работает по циркуляционной схеме.

В лабораторной работе определяют коэффициенты различных местных сопротивлений. Рабочий участок установки представляет собой трубу переменного сечения, включающую участки с внезапным расширением (1-2), внезапным сужением (3-4), дроссельным сопротивлением (вентилем) (5-6).

В работе исследуются местные потери на участках 1-2; 3-4; 5-6.

Экспериментальная часть выполняется в следующей последовательности:

1. С помощью вентиля устанавливают расход потока на рабочем участке.

Внимание: пуск и остановку лопастного насоса 6 производят при закрытом вентиле 5.

2. С помощью пьезометров измеряют пьезометрические высоты до и после местного сопротивления h_n .

3. С помощью мерного бака и электросекундомера измеряют расход воды:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6.2)$$

где W - объём мерного бака ($W=3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$);

t - продолжительность замера, с.

4. Измеряют температуру T °С и определяют её вязкость ν воды по справочникам или путём линейной интерполяции следующих данных: $T=10$ °С $\nu=1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, при $T=20$ °С $\nu=1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

5. Из уравнения неразрывности определяют средние скорости напорного движения воды до и после каждого местного сопротивления:

$$V_n = Q/S_n, \quad (6.3)$$

где S - площадь живого сечения, м^2 .

6. Гидродинамический напор в каждом сечении определяют по формуле:

$$H_n = h_n + \frac{\alpha V_n^2}{2g}, \quad (6.4)$$

где α - коэффициент неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока (при ламинарном течении $\alpha=2,0$; при турбулентном течении $\alpha=1,05 \div 1,1$).

7. Потери напора на каждом сопротивлении определяют по формуле:

$$\Delta h_M = H_n - H_{n+1}. \quad (6.5)$$

8. Из формулы (6.1) рассчитывают коэффициенты местного сопротивления:

$$\xi = 2g \Delta h_M / v^2. \quad (6.6)$$

9. Результаты эксперимента и расчётные данные заносят в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и вычислений

№ п.п.	Наименование величин	Условные обозначения	Результаты испытаний		
			внезапное расширение	внезапное сужение	дроссель
1	Вид сопротивления	-			
2	Показание пьезометров	$h_n, \text{ м}$ $h_{n+1}, \text{ м}$			
3	Продолжительность заполнения мерного бака	$t, \text{ с}$			

№ п.п.	Наименование величин	Условные обозначения	Результаты испытаний		
			внезапное расширение	внезапное сужение	дроссель
4	Расход	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$			
5	Средняя скорость	$V_n, \text{ м/с};$ $V_{n+1}, \text{ м/с}$			
6	Скоростной напор	$V_n^2/2g, \text{ м}$ $V_{n+1}^2/2g, \text{ м}$			
7	Гидродинамический напор	$H_n, \text{ м}$ $H_{n+1}, \text{ м}$			
8	Потери напора	$\Delta h_m, \text{ м}$			
9	Вязкость при $T= \text{ }^\circ\text{C}$	$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$			
10	Число Рейнольдса	Re			
11	Коэффициент местного сопротивления	ξ			

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физическая сущность потерь напора на местных сопротивлениях?
2. Как экспериментально определить коэффициент местных сопротивлений?
3. Как зависит коэффициент местных сопротивлений от различных факторов?
4. По какой формуле определяется гидродинамический напор в каждом сечении?

7. Лабораторная работа №7. «Экспериментальная проверка уравнения Д. Бернулли»

Цель работы:

1. Выявить закономерности течения жидкости в трубе с переменной площадью поперечного сечения.
2. Отработать навыки экспериментальных исследований.

Теоретическая часть

Уравнение Д.Бернулли выражает законы сохранения энергии и является фундаментальной основой механики жидкости и газа. С его помощью решают разнообразные задачи в технических приложениях, например: измеряют скорости потока, выявляют распределения гидродинамического давления по поверхностям тел, изучают процессы истечения из отверстий, определяют допустимую высоту всасывания насосной установки и т.д.

Уравнение Д. Бернулли для установившегося потока вязкой жидкости (рис.7.1) имеет вид:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{тр}, \quad (7.1)$$

где Z_1, Z_2 - расстояние от плоскости сравнения о-о до центров тяжести сечений потока;

$\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}$ - пьезометрические высоты в рассматриваемых сечениях;

$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$ - высоты скоростных напоров в сечениях;

α - коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей в сечениях потока (при ламинарном течении $\alpha=1$, при турбулентном $\alpha \approx 1,05 \div 1,10$);

$h_{тр}$ - потери гидродинамического напора при перемещении потока жидкости между сечениями.

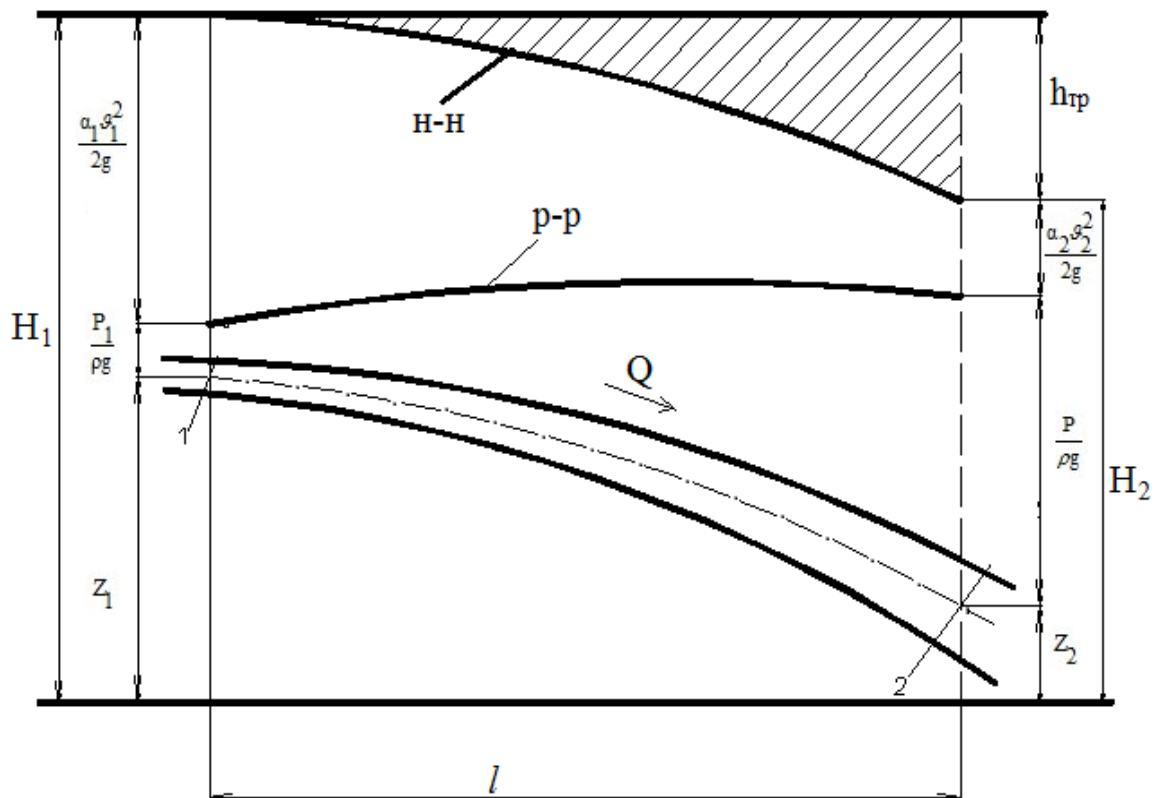


Рис. 7.1 – Геометрическая интерпретация уравнения Д. Бернулли:
н-н - напорная линия; р-р - пьезометрическая линия

В любом поперечном сечении потока дает гидродинамический напор H дает сумма слагаемых:

$$H = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} = H_p + \frac{\alpha v^2}{2g}, \quad (7.2)$$

где H_p - пьезометрический напор.

Слагаемые гидродинамического напора с энергетической точки зрения имеют следующий физический смысл:

z - удельная потенциальная энергия положения центра тяжести сечения;

$\frac{P}{\rho g}$ - удельная потенциальная энергия давления в сечении;

$\frac{\alpha v^2}{2g}$ - удельная кинетическая энергия в сечении.

Гидродинамический напор H выражает удельную энергию потока в рассматриваемом сечении. Указанные энергии являются удельными по отношению к весу жидкости.

Мощность потока жидкости в любом его сечении $N = \rho g Q H$, потери мощности потока на преодоления гидравлического трения $N_{\text{тр}} = \rho g Q h_{\text{тр}}$.

Уравнение неразрывности $Q = v_1 S_1 = v_2 S_2$ показывает, что скорость в узком сечении увеличивается. Уравнение Д. Бернулли, как баланс энергии для сечений, показывает, что с увеличением скорости в узком сечении давление в этом сечении уменьшается.

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

На рис. 7.2 дана конструктивная схема универсального гидравлического стенда ГС-3, на рис.7.3 - схема рабочего участка стенда для данной лабораторной работы.

Основными элементами стенда являются буферный бак 2, закрепленный на стойке и позволяющий получить установившееся течение воды в рабочем участке, буферный бак имеет выходной патрубок 3, к которому крепится рабочий участок 12 для данной лабораторной работы. Другой конец рабочего участка укрепляется в патрубке 11.

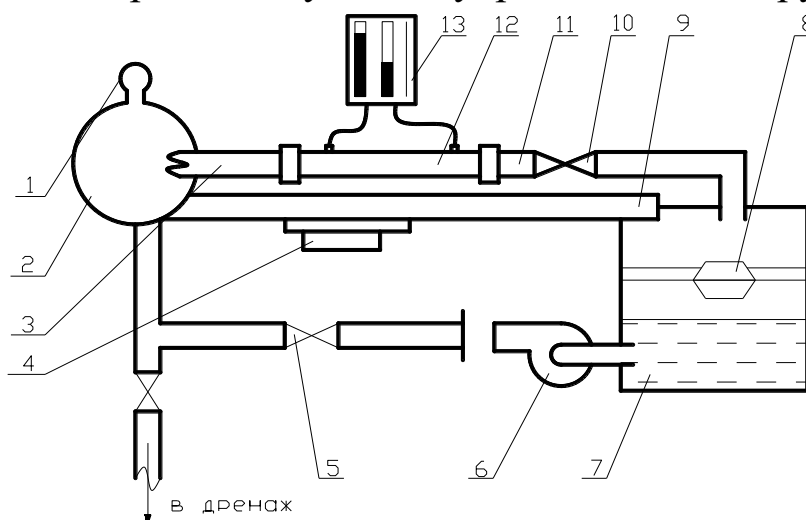


Рис. 7.2 – Универсальный гидравлический стенд

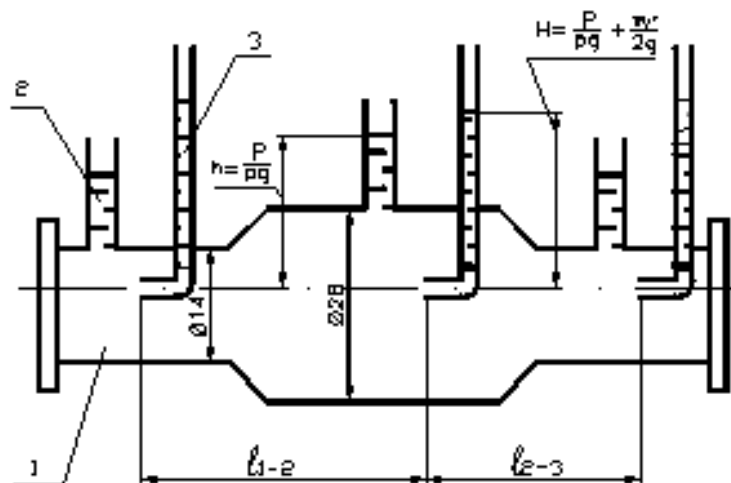


Рис. 7.3 – Рабочий участок гидравлического стенда

В напорную магистраль вода поступает от центробежного насоса 6 при открытии вентиля 5. Расход воды через рабочий участок регулируется вентилем 10 на выходе из рабочего участка и вентилем 5.

Приемное устройство представляет собой бак 7, связанный всасывающим трубопроводом с насосом 6.

Над приемным баком смонтирован мерный бачок 8 для измерения расхода воды. Под рабочим участком установлен лоток 9, который используется для сбора воды и слива ее в бак 7. В днище мерного бачка имеется клапан, управляемый с помощью рычажного механизма.

Для замера расхода воды одновременно с переключением рычага включаются электрический секундомер на пульте управления 4. При заполнении мерного бачка происходит замыкание контакта датчика уровня воды и остановка электросекундомера.

Расход потока определяют обычным способом:

$$Q = w/t, \quad (7.3)$$

где $w = 3600 \text{ см}^3$ - объем мерного бачка;

t - продолжительность его заполнения, с.

Измерительные приборы на стенде представлены щитом 13 с пьезометрическими трубками. Избыточное давление в буферном баке измеряется манометром 1.

В процессе работы гидростенда ГС-3 при постоянном давлении в буферном баке на рабочем участке (рис.7.3) измеряют пьезометрические высоты h_{p1} , h_{p2} , h_{p3} и гидродинамические напоры H_1 , H_2 , H_3 с помощью трубок Пито.

Скоростной напор определяют по разности гидродинамического и пьезометрического напоров в каждом сечении:

$$\frac{\alpha v_{cp}^2}{2g} = H - h_p, \quad (7.4)$$

откуда:

$$v = \sqrt{\frac{2g(H-h_p)}{\alpha}}, \quad (7.5)$$

Чтобы обосновать величину α следует оценить режим течения жидкости. Для этого следует сравнить измеренную скорость v с критической скоростью смены режимов $v_{кр} = 2320v/\alpha$. При $v > v_{кр}$ режим течения является турбулентным и коэффициент Кориолиса $\alpha \approx 1$. При $v < v_{кр}$ режим течения является ламинарным и среднерасходную скорость v следует уточнить по выражению (7.5), полагая $\alpha = 2$.

Экспериментальные данные заносят в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты вычисления и измерения

Сечение	Диаметр трубы d , см	Пьезометрическая высота h_p , см	Гидродинамический напор H , см	Скоростной напор $\frac{\alpha v^2}{2g}$, см	Средняя скорость v см/с	Потери напора $\sum h_n$, см
1						
2						
3						

Так как измеряемые величины H и h_p отсчитываются в сантиметрах столба жидкости, то ускорение силы тяжести следует принять $g = 981 \text{ см/с}^2$.

По разности показаний трубок Пито определяют потери гидродинамического напора:

$$h_{i+1} = H_i - H_{i+1}. \quad (7.6)$$

Индексы гидродинамическому напору и пьезометрическим высотам присваивают соответственно индексам сечений.

Для заполнения таблицы 7.2 пьезометрические высоты берут из таблицы 7.1 для каждого из трех сечений.

На основании экспериментальных и расчетных данных следует построить пьезометрическую и напорную линии, приняв длину между сечениями 1 и 3 равной $15 \div 20$ см.

Таблица 7.2 – Результаты измерений и вычислений

Сечение	Пьезометрическая высота h_p , см	Объем мерного бачка, см ³	Продолжительность замера t , с	Расход, Q , см ³ /с	Скорость v , см/с	Скоростной напор $\frac{\alpha v^2}{2g}$, см	Гидродинамический напор H , см	Потери напора $\sum h_n$, см
1								
2								
3								

Контрольные вопросы

1. Опишите устройство стенда ГС-3.
2. Что такое гидродинамический напор, его слагаемые, их физический смысл?
3. В чем отличия уравнения Д. Бернулли для реальной и идеальной жидкости?
4. В чем состоит физический смысл коэффициента Кориолиса?
5. Геометрическая интерпретация уравнения Д. Бернулли.
6. Какие существуют способы определения скорости и расхода потока жидкости?

8. Лабораторная работа №8. «Определение коэффициентов расхода при истечении жидкости через отверстия и насадки»

Цель работы:

1. Определить коэффициент расхода при истечении жидкости из насадков с использованием гидравлического стенда ГС-3.
2. Изучить сущность процесса и выработать навыки экспериментальных исследований.

Теоретическая часть

Истечение жидкостей через отверстия и насадки наблюдается в разнообразных технических устройствах, гидротехнических сооружениях, агрегатах гидро- и пневмосистем и является одной из классических задач механики жидкости и газа.

Экспериментально установлено, что истечения через малые отверстия в тонкой стенке и через насадки имеют различия. Отверстие в тонкой стенке, размеры которого менее одной десятой напора, считается малым.

При истечении жидкости через малое отверстие в тонкой стенке происходит сжатие струи. Количественно сжатие струи оценивают коэффициентом сжатия – отношением площади сжатого сечения струи к площади отверстия:

$$\varepsilon = \omega_c / \omega_o = d_c^2 / d_o^2. \quad (8.1)$$

Истечение жидкости сопровождается её торможением в районе отверстия, которое учитывают коэффициентом скорости:

$$\varphi = 1 / (\sqrt{1 + \xi}), \quad (8.2)$$

где ξ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления отверстия.

Скорость истечения определяют по формуле:

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2(\Delta p / \rho)}. \quad (8.3)$$

Здесь H – гидродинамический напор, которому соответствует перепад давления Δp , а ρ – плотность жидкости.

Расход жидкости через отверстие можно рассчитать по уравнению неразрывности:

$$Q = v_c \cdot \omega_c = \varepsilon \cdot \omega_c \cdot \varphi \cdot \sqrt{2(\Delta p / \rho)} = \mu \cdot \omega_o \cdot \sqrt{2(\Delta p / \rho)}, \quad (8.4)$$

где μ – безразмерный коэффициент расхода ($\mu = \varepsilon\varphi$).

Отсюда следует, что коэффициент расхода:

$$\mu = Q/[\omega_0\sqrt{2(\Delta p/\rho)}], \quad (8.5)$$

Коэффициенты истечения ε , φ , μ зависят от числа Рейнольдса:

$$Re \approx [d_0\sqrt{2 \cdot (\Delta p/\rho)}]/\nu, \quad (8.6)$$

где ν кинематическая вязкость жидкости.

При $Re > 10^5$ осредненные значения коэффициентов истечения находятся на уровне $\varepsilon = 0,64$, $\varphi = 0,97$, $\mu = 0,62$, $\zeta = 0,065$.

Насадок – короткий участок трубы, обычно длиной $\ell=2\div 4 d_0$, присоединяемый к отверстию в стенке.

Наибольшее распространение получили внешние насадки: цилиндрические, конические (сходящиеся и расходящиеся), коноидальные, комбинированные.

Характер истечения жидкости через насадки отличается от истечения через отверстия. Возможны два случая истечения.

1. Поперечное сечение струи в насадке сужается, как и при её истечении через отверстие. Сжатое сечение струи находится на расстоянии, примерно, $0,5d$ от входного сечения. К выходному сечению струя расширяется, жидкость смыкается с внутренней поверхностью насадка, так что в выходном сечении насадок «работает» полным сечением, по отношению к которому коэффициент сжатия струи $\varepsilon=1$, коэффициенты скорости и расхода насадка становятся равными ($\varphi = \mu$).

При истечении через насадок скорость струи в сжатом сечении превышает её скорость в выходном сечении. При истечении в атмосферу давление в сжатом сечении внутри внешнего цилиндрического насадка оказывается меньшим атмосферного (образуется вакуум), пропускная способность насадка увеличивается, примерно на 33%, несмотря на большее, чем у отверстия гидравлическое сопротивление (см. табл. 8.1).

Таблица 8.1 – Значение коэффициентов истечения при $Re > 10^5$

Тип отверстия или насадка	Значения коэффициентов			
	ξ	ε	φ	μ
Круглое отверстие	0,06	0,64	0,97	0,62
Внешний цилиндрический насадок	0,5	1,00	0,82	0,82
Внутренний цилиндрический осадок	1,0	1,00	0,71	0,71

Тип отверстия или насадка	Значения коэффициентов			
	ξ	ε	φ	μ
Конический расходящийся насадок $\theta = 5^\circ \div 7^\circ$	4,0÷3,0	1,00	0,45÷0,5	0,45÷0,5
Конический сходящийся насадок $\theta = 13^\circ 24'$	0,09	0,98	0,96	0,945
Коноидальный насадок	0,04	1,00	0,98	0,98

2. Вместе с тем, значительное увеличение скорости струи приводит к снижению давления в сжатом сечении вплоть до давления насыщенных паров. Выделение в сжатом сечении паровоздушных пузырьков провоцирует прорыв атмосферного воздуха в насадок.

Струя отрывается от стенок насадка и истечение через него становится похожим на истечение через отверстие: в тонкой стенке.

Для конических сходящихся насадков коэффициенты сечения зависят от угла конусности θ . Наибольшее значение коэффициентов наблюдаются при $\theta = 13^\circ 21''$, когда $\omega_c \approx \omega_b$.

В коническом расходящемся насадке давление по мере продвижения струи к выходному сечению нарастает. Выходное сечение остается заполненным жидкостью при относительно небольших значениях Δp и $\theta < 15^\circ$. Для насадка $\theta = 6^\circ$ и $\ell = 8d_0$ (без скругления на входе) $\mu = \varphi = 0,46$, скругление на входе позволяет повысить значение коэффициента расхода до величины $\mu = 0,71$.

Форма коноидальных насадков для истечения высоковязких жидкостей близка к форме струи на подходе к отверстию и вытекающей из отверстия, поэтому потери энергии на гидравлическое трение в насадке минимальны (табл.8.1).

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

Эксперимент проводят на гидравлическом стенде ГС-3 (рис.8.1).

Насадки вворачивают в выходной патрубок буферного бака.

Для всех насадков диаметр $d_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

Расходящийся насадок из-за большого угла раствора работает как отверстие, так как струя отрывается от его стенок после прохождения через сжатое сечение струи.

Особенностью проведения эксперимента является поддержание постоянным избыточного давления ($\Delta p = \text{const}$) для трех насадков, что

Вид насадка (отверстия)	Диаметр d_0 , м	Площадь, S_0 , м ²	Время t , с	Расход Q , м ³	Перепад давлений, Δp , Па	Коэффициенты						
						μ		φ		ξ		ε
						табл.		табл.		табл.		

Полученные значения коэффициентов истечения сравнивают с табличными данными (табл.8.1) и делают выводы о причинах возможных расхождений.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют особенности истечения жидкости из отверстия?
2. Какие существуют особенности истечения жидкости из внешнего цилиндрического насадка?
3. Как определяются коэффициенты сжатия, скорости и расхода при истечении из насадков?
4. Расскажите о сравнительных качественных и количественных преимуществах при истечении из насадков.
5. Какие измеряются параметры при проведении эксперимента?

9. Лабораторная работа №9. «Параметрические испытания центробежного насоса»

Цель работы:

1. Провести параметрические испытания центробежного насоса.
2. Освоить принцип построения характеристик насоса.

Теоретическая часть

Насосы относятся к группе энергетических машин и служат для преобразования механической энергии привода в гидравлическую энергию перемещаемого потока жидкости.

Насосы представляют собой наиболее распространенный класс гидромашин, они используются в системах теплоснабжения и водоснабжения. Отрасль насосостроения России выпускает более 3000 типоразмеров насосов, отличающихся принципом действия, конструктивным исполнением и назначением.

Характеристиками насоса называют графически выраженные зависимости напора, мощности и к.п.д. от подачи насоса при постоянном числе оборотов вала насоса, то есть зависимости, $H=f(Q)$, $N=f(Q)$, $\eta=f(Q)$ при $n=\text{const}$.

Лабораторный стенд и методика выполнения работы

Экспериментальная установка для испытания центробежного насоса (см.рис.9.1) выполнена по циркулярной схеме. Стенд оборудован одноступенчатым консольным насосом 1, напорно-всасывающим резервуаром 2, всасывающим 3 и напорным 4 трубопроводами. Задвижка 5 используется для изменения подачи насоса.

Для снятия параметров используют контрольно-измерительные приборы: манометр 6, расходомер 7, амперметр 8, вольтметр 9.

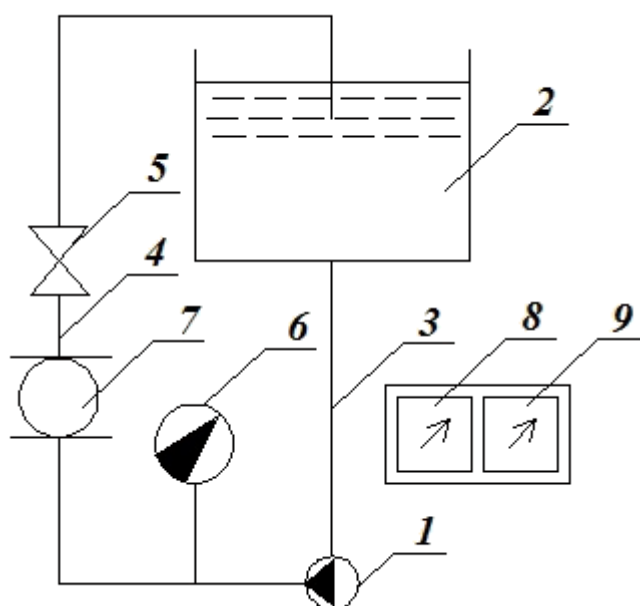


Рис. 9.1 – Схема стенда для испытания насоса

В процессе проведения испытаний должны быть получены значения подачи, развиваемого напора и потребляемой мощности для различных режимов работы насоса.

Испытания проводятся в следующей последовательности.

1. Снимаются показания приборов (манометра, расходомера, амперметра, вольтметра) при работе насоса с закрытой задвижкой 5 на напорном трубопроводе.

2. Последующие режимы работы насоса устанавливают постепенным открытием задвижки 5. На каждом режиме работы снимаются показания приборов.

3. Испытания проводят до полного открытия задвижки 5. Должно быть получено не менее 8 экспериментальных точек. Результаты измерений заносят в таблицу.

4. Остановка насоса производится выключением электропитания привода насоса после полного закрытия задвижки 5.

Обработка результатов испытаний

1. С помощью секундомера измеряют продолжительность прохождения определенного объема воды через расходомер 7 и определяют подачу насоса:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (9.1)$$

По результатам испытаний строят графические характеристики насоса, т.е. зависимости $H=f(Q)$, $N=f(Q)$, $\eta=f(Q)$ при постоянном числе оборотов вала насоса, $n=\text{const}$.

Контрольные вопросы

1. Опишите схему установки и порядок проведения работы.
2. Опишите устройство и назначение центробежного насоса?
3. Как определяется подача насоса, способы ее измерения?
4. Что называют напором и как его определяют по показаниям приборов?
5. Что такое полезная мощность насоса?
6. Что такое общий к.п.д. насоса. Какие потери он учитывает?
7. Что называют рабочей характеристикой насоса?
8. Как осуществляют регулирование работы центробежного насоса?
9. Порядок запуска и остановки лопастного насоса?

Библиографический список

1. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости) [Текст]: учебник для вузов / Р. Р. Чугаев. - Изд. 6-е, репринтное. - Москва: Бастет, 2013. - 672 с.
2. Лапшев, Н. Н. Гидравлика [Текст]: учебник / Н. Н. Лапшев. - 3-е изд., стер. - М.: Академия, 2010. - 272 с.
3. Беленков, Ю. А. Гидравлика и гидропневмопривод [Текст]: учебник / Ю. А. Беленков, А. В. Лепешкин, А. А. Михайлин. - Москва: Бастет, 2013. - 406 с.
4. Алымов, Ю. Г. Гидравлика [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Ю. Г. Алымов, В. А. Морозов; Минобрнауки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Юго-Западный государственный университет". - Курск: ЮЗГУ, 2013. - 98 с.
5. Попов, Д. Н. Гидромеханика [Текст]: учебник для вузов/ Д.Н. Попов, С.С. Панайотти, М.В. Рябинин. 3-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Бумана, 2014. -384с.
6. Метревели, В. Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями [Текст]: учебное пособие / В. Н. Метревели. - М.: Высшая школа, 2007. - 192 с.
7. Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / под ред. В. Д. Журина. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 2004. - 198 с.
8. Теплотехнические измерения и приборы / Г.И.Иванова, Н.Д.Кузнецов, В.С.Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. 450с.
9. Ерофеев В.А., Семёнов П.Д., Пряхин А.С. Теплотехника/Под ред. В.П.Ерофеева. -М.: Академкнига, 2006. 456 с.
10. Теплотехника [Текст]: учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2003. - 671 с.
11. Гудилин, Н. С. Гидравлика и гидропривод [Текст]: учебное пособие / Н. С. Гудилин, Е. М. Кривенко, Б. С. Маховиков; Под общ. ред. И. Л. Пастоева. - 3-е изд., стер. - М.: МГГУ, 2001. - 519 с.
12. Гидравлика и гидропривод [Текст]: учеб. для горн. спец. вузов / В. Г. Гейер и др. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1981. - 295 с.

13. Пазушкина, О.В. Гидравлика и гидропневмопривод [Электронный ресурс]: учебно-практическое пособие / О.В. Пазушкина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет", д.и. Институт. - Ульяновск: УлГТУ, 2012. - 135 с. // Режим доступа - <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=363457>.

14. Соловьев, А. А. Механика жидкости : лабораторный практикум : [16+] / А. А. Соловьев, А. В. Исаков ; Московская государственная академия водного транспорта. – Москва : Альтаир : МГАВТ, 2018. – 129 с. : схем., табл., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=682073> (дата обращения: 22.03.2024). – Библиогр. в кн. – Текст : электронный.