

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(национальный исследовательский университет)»**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА**

Методические указания к лабораторной работе

САМАРА 2012

УДК 532.533

Составители: В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.Д. Кленина, А.М Цыганов

Лабораторный практикум по курсу механика жидкости и газа: Метод. указания/ Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.Д. Кленина, А.М Цыганов; Самара, 2012. 64 с.

В настоящем издании описаны конструкции лабораторных стендов, рабочих участков для проведения лабораторных работ, изложены методики проведения экспериментов и обработки их результатов с учетом специфики каждой лабораторной работы.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальностям 160700 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей, 151900 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 141100 – Энергетическое машиностроение, 151000 – Технологические машины и оборудование

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. П. Д а н и л ь ч е н к о,
д-р техн. наук, проф. А. Н. П е р в ы ш и н

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1

Конструкция, принцип работы и система измерений гидростенда.

Режимы течения жидкости в трубе..... 3

Лабораторная работа № 2

Движение жидкости в канале переменного сечения..... 27

Лабораторная работа № 3

Кавитация в потоке жидкости..... 34

Лабораторная работа № 4

Определение коэффициентов сопротивления трения и местных

гидравлических сопротивлений в трубе..... 42

Лабораторная работа № 5

Истечение жидкости из отверстия и насадков при

постоянном напоре..... 53

Лабораторная работа №1

Конструкция, принцип работы, системы измерений гидростендов, режимы течения жидкости в трубе

ГИДРОСТЕНД ГС-2

В качестве учебной установки для проведения лабораторных работ 1-5 используется универсальный гидростенд ГС-2, разработанный в Куйбышевском авиационном институте на кафедре «Теплотехника и тепловые двигатели» совместно с отраслевой научно-исследовательской лабораторией, №9. По гидростенду получено авторское свидетельство №521488. авторы: Меркулов А. П., Щербак В. Б.

Гидростенд может работать как с обычной водопроводной сети со сливом в канализацию, так и по собственной замкнутой схеме с насосной подачей воды из расходного бака и слива в него.

Основные конструктивные особенности гидростенда:

- малые габариты;
- безрасходная напорная колонка для поддержания постоянства напора;
- реверсивный механизм для изменения величины напора;
- наддув пьезометрического щита для удобства регистрации изменения давления воды на испытываемых участках;
- автоматическое измерение секундного объемного расхода воды с помощью мерной емкости на стационарном режиме;
- система для введения подкрашенной жидкости в исследуемый поток при визуальных наблюдениях;
- быстроразъемные соединения для удобства и ускорения смены исследуемого объекта;
- наличие лотка и координатных линеек для исследования свободных струй воды.

На рис. 1 дана конструктивная схема гидростенда ГС-2, включающего напорное и приемное устройства, измерительные приборы и рабочий участок.

Основными элементами напорного устройства являются напорный 10 и расходный 6 бачки. Положение напорного бачка по высоте может изменяться с помощью механизма подъема, состоящего из реверсивного электромотора 7, редуктора 9 и зубчатой рейки 14. Отсчет уровня воды в напорном бачке 10

относительно оси рабочего участка производится с помощью линейки 8. Напор может изменяться от 1,46 до 2,1 м. Напорный бак 10 с трубкой-шлангом помещен в трубу 11. Верхний конец бака 10 выполнен в виде воронки с выточками, через которые избыток воды переливается в трубу 11 и далее через кран 2 – в

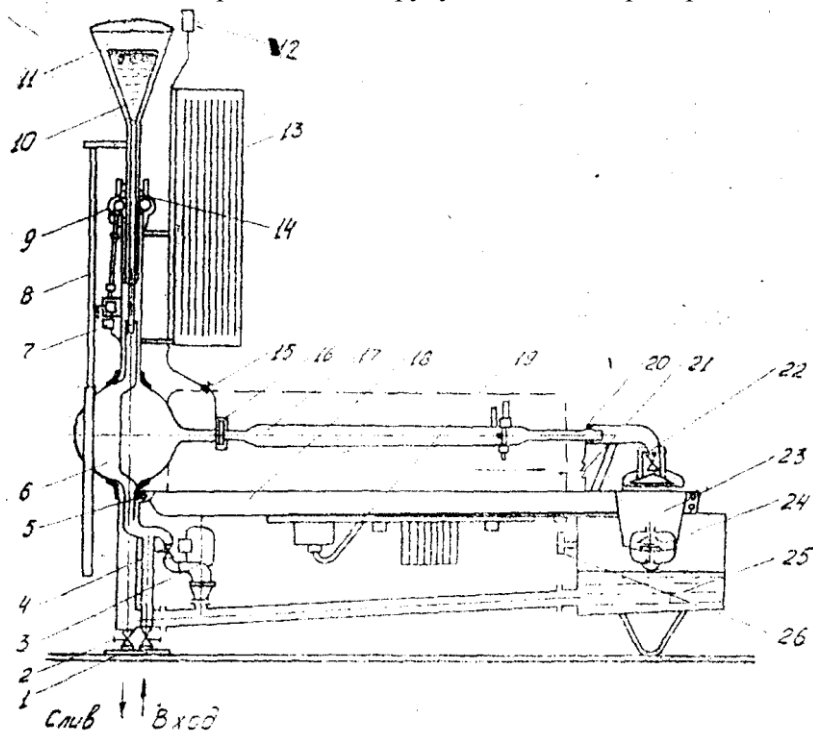


Рисунок 1 - Схема гидравлического стенда ГС-2

сливную магистраль. В результате напор поддерживается постоянным.

Расходный бак 6 выполнен из нержавеющей стали в виде сферы достаточно большого размера, позволяющего получить стационарный (установившийся) поток воды в рабочем участке 17.

Расходный бак имеет выходной патрубок, к которому с помощью накидной гайки 16 крепится рабочий участок для данной лабораторной работы. Другой конец рабочего участка укрепляется в патрубке с помощью резиновой манжеты 20.

В напорную магистраль вода поступает из водопроводной сети при открытии крана 1. Во время эксперимента сливной кран 2 должен быть открыт. Расход воды через рабочий участок регулируется краном 22 на выходе из рабочего участка и краном 1.

Приемное устройство представляет собой бак 25, связанный трубопроводом со сливной магистралью. Над приемным баком на подвижной консоли 18, левый конец которой имеет шарнирную опору 5, а правый подвешен на двух пружинах 21, смонтирован мерный бачок 23 для измерения расхода воды. Консоль 18 имеет форму лотка и в работах с коротким рабочим участком (истечение из отверстий, насадков и др.) используется для сбора воды и слива ее в мерный бачок 23. В днище мерного бачка имеется электромагнитный клапан 24, управляемый автоматически с помощью выключателя 26, смонтированного под подвижной консолью возле мерного бачка.

Измерительные приборы на стенде представлены пьезометрическим щитом 13, на котором смонтировано семь стеклянных трубок длиной 1000 мм. На подвижной стойке смонтирован баллончик 12 с подкрашивающей жидкостью для визуального наблюдения различных режимов течения жидкости в трубах (опыт Рейнольдса).

При отсутствии водопроводной сети предусмотрена работа гидростенда по замкнутой схеме. Для этого на магистрали, связывающей сливной бак 25 с напорным устройством, смонтирован гидронасос 3, подающий воду из бака 25 в напорное устройство при открытом кране 4 (краны 1 и 2 при этом закрыты). Регулирование расхода воды при работе по замкнутой схеме производится кранами 4 и 22. Общий объем воды в гидростенде при работе по замкнутой схеме 60 л.

Технические характеристики гидростенда: напряжение питания 27В; максимальный секундный расход воды — 1 л/с; регулируемый напор $H = (1-9) \cdot 10^6$ Па; длина рабочего участка 1000 мм.

Габариты: длина - 2240 мм, ширина — 800 мм, высота — 3290 мм, масса - 80 кг.

Различные лабораторные работы на гидростенде производятся за счет смены его рабочего участка 17 (рис. 1а).

ГИДРОСТЕНД ГС-3М

Для проведения лабораторных работ 1-5 используется также гидростенд ГС-3М, являющийся модификацией гидростенда ГС-2 (рис. 1б).

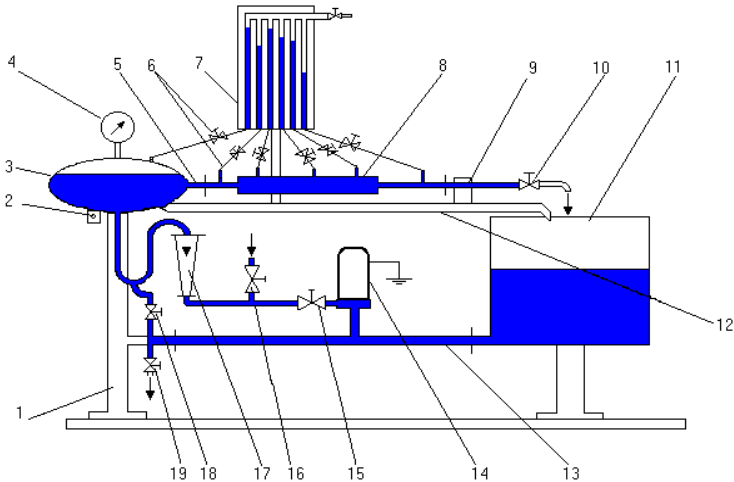


Рисунок 1а - Схема гидравлического стенда ГС-3М

Основным элементом напорного устройства является ресивер 3, выполненный из нержавеющей стали в виде эллипсоида и установленный на стойке 1. Достаточно большие размеры ресивера позволяют получить равномерный поток на входе в рабочий участок. Постоянный напор во время эксперимента поддерживается с помощью вентиля 16 подачи воды из водопроводной сети или вентиля 15 насоса.

Ресивер имеет выходной патрубок 5, к которому с помощью уплотнения крепится рабочий участок 8, необходимый для данной лабораторной работы. Другой конец рабочего участка уплотняется в патрубке с помощью резиновой манжеты, надвигаемой на рабочий участок механизмом крепления 9.

В напорную магистраль вода поступает из водопроводной сети при открытии вентиля 16, а вентиль 15 должен быть закрытым.

При режиме автономного питания водой от насоса 14 из сливного бака 11 вентиль 15 открывается, а вентиль 16 подачи воды от сети должен быть закрыт. Общий объем воды в баке 11 гидростенда при работе по замкнутой схеме составляет 60 литров.

Расход воды через рабочий участок регулируется вентилем 10 на выходе из рабочего участка 8 и вентилем 16 подачи воды из сети или вентилем 15 при насосной подаче воды из бака. Во время эксперимента с питанием от водопроводной сети вентиль слива воды 10 (основной) должен быть открыт, вентиль слива воды 18 (дополнительный) закрыт. При работе гидростенда в автономном режиме сливные вентили 19 и 18 должны быть закрыты.

Приёмное устройство представляет собой бак 11, связанный трубопроводом 13 со сливной магистралью.

Измерительные приборы на стенде представлены пьезометрическим щитом 7, на котором смонтированы семь стеклянных однотрубных пьезометров высотой 1000 мм. Пьезометрический щит установлен неподвижно на стойке стенда. Пьезометры соединены с приёмниками (датчиками) давления гибкими соединительными трубками 6 с зажимами.

Избыточное давление в ресивере 3 измеряется образцовым манометром 4.

В данной модификации гидростенда расход воды () измеряется промышленным счетчиком. В ходе эксперимента фиксируется также время измеренного объема воды при помощи секундомера. В других модификациях гидростенда для определения расхода воды может использоваться ротаметр.

Гидростенд (электродвигатель насоса) необходимо надежно заземлить.

Конструктивные особенности ГС-3М

- Малые габариты.
- Быстроразъёмные соединения для удобства и ускорения смены рабочего участка.
- Наддув пьезометрического щита для удобства регистрации показаний давления воды на испытываемых участках.
- Измерение объёмного расхода воды с помощью ротаметра.
- Контур с насосом и ёмкостью для работы стенда по замкнутой схеме.
- Система для введения подкрашенной жидкости в исследуемый поток воды при визуальных наблюдениях.
- Наличие лотка и координатных линеек для исследования свободных струй воды.

Технические данные гидростенда

Напряжение питания – 220 В

Частота – 50 Гц

Мощность электродвигателя насоса – 750 Вт

Максимальный расход воды – 1 кг/с

Напор $H = (0,1...2,0) \cdot 10^5$ Па

Габариты: длина - 2240 мм
 ширина - 800 мм
 высота - 1820 мм
 масса - 80 кг

Большинство известных учебных гидравлических установок являются унифицированными по своим расходным и габаритным характеристикам, которые приближены к натурным. Изготовление гидростенда связано с большими материальными затратами и требованием достаточно больших площадей учебных помещений.

Гидростенд прост в управлении, удобен в эксплуатации, позволяет осуществлять быструю смену режимов и объектов исследования (рабочих участков), что важно при индивидуальной работе студентов на лабораторно-практических занятиях.

Гидростенд ГС-3М может работать как от водопроводной сети со сливом в канализацию, так и по собственной замкнутой схеме с насосной подачей воды из расходного бака и слива в него.

На рис. 1б приведена схема универсального гидравлического стенда ГС-3М, включающего напорное и приёмное устройства, измерительные приборы и рабочий участок.

Перенастройка гидростенда для проведения очередной лабораторной работы производится сменой рабочего участка 8 (рис. 1б). Описание рабочих участков гидростенда приводится в методических указаниях к каждой лабораторной работе.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Цель работы - ознакомление с понятиями и единицами измерений основных физических величин жидкости; измерение статического давления и давления торможения в поперечном сечении потока; определение скорости движения в точке потока, определение средней скорости в сечении потока, измерение расхода.

Теоретические основы эксперимента

Давлением в потоке (статическим давлением) p в данной точке потока жидкости называется предел отношения нормальной составляющей силы воздействия ΔP_n со стороны окружающей жидкости к поверхности элемента ΔS в окрестности данной точки:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P_n}{\Delta S}.$$

Если нормальные силы P_n распределены непрерывно и равномерно по площади поверхности S элемента жидкости, то плотность распределения их характеризуется средним гидростатическим давлением:

$$p = \frac{P_n}{S}.$$

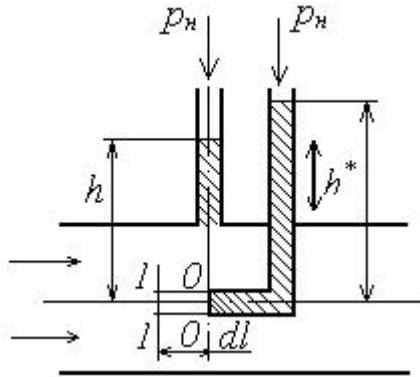


Рисунок 2 - Схема измерения скорости в центре потока жидкости

Давлением торможения p^* называется давление в точке (сечении) потока жидкости, скорость которой сведена к нулю. Соотношение между давлением p и давлением торможения p^* в точке потока несжимаемой жидкости определяется из уравнения Бернулли, записанного для горизонтальной элементарной струйки на участке 1-0 (рис. 2), где происходит процесс торможения жидкости. Участок 1-0 должен быть горизонтальным, чтобы исключить влияние сил тяжести на процесс торможения жидкости. Поскольку процесс торможения протекает почти мгновенно, то расстояние между сечениями 1-1 и 0-0 мало и влиянием вязкости можно пренебречь. Тогда

$$\frac{p_0^*}{\rho} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2}; \quad p_0^* = p_1 + \frac{\rho \cdot c_1^2}{2}.$$

Сечения 1-1 и 0-0 практически совпадают, поэтому давление торможения в произвольной точке определим из выражения:

$$p^* = p + \frac{\rho \cdot c^2}{2}, \quad (1.1)$$

где второй член в правой части формулы называется динамическим давлением (скоростным напором).

Из уравнения (1.1) следует, что давление торможения в точке потока несжимаемой жидкости равно сумме статического и динамического давления в той же точке. В покоящейся жидкости различия между p^* и p нет, так как при $c = 0$; $p^* = p$. В случае газа (сжимаемая жидкость) формула (1.1) неточна, так как в ней не учитывается увеличение плотности газа в процессе торможения.

Под влиянием сил вязкости жидкости скорость её в различных точках одного и того же сечения потока неодинакова: в центре сечения потока она максимальная, у стенки равна нулю. Закон распределения скоростей по сечению в большинстве случаев бывает неизвестен и определяется в результате эксперимента. Используя уравнение (1.1), получим формулу для вычисления скорости движения несжимаемой жидкости в точке потока

$$c = \sqrt{2 \frac{p^* - p}{\rho}}. \quad (1.2)$$

Если при измерении давлений жидкость в трубках пьезометров одинаковая с исследуемой жидкостью (рис. 2), то

$$\frac{p^* - p}{\rho g} = h^* - h, \quad (1.3)$$

где ρ – плотность исследуемой жидкости;
 g – ускорение свободного падения, $g = 9,8066 \text{ м/с}^2$.
 $h^* - h$ – разность высот столбиков жидкости в пьезометрах, измеряющих давление торможения и давление в потоке в одной и той же точке потока.

Тогда с учетом (1.3) формула (1.2) примет вид

$$c = \sqrt{2g(h^* - h)}, \quad (1.4)$$

В теории одномерных течений вводится понятие осредненной скорости в сечении потока. Обычно осреднение скорости делается по расходу.

Среднерасходной скоростью c_{cp} называется такая условная, но одинаковая во всех точках сечения скорость, при которой через сечение протекает такое же количество жидкости, как и при действительном распределении скоростей. При движении несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) нет различия между среднemasсовой и среднеобъемной скоростями, то есть $c_{cpG} = c_{cpQ} = c_{cp}$. Среднеобъемную скорость несжимаемой жидкости в сечении потока можно определять либо путем осреднения экспериментальной эпюры скорости в соответствии с формулой

$$c_{cp} = \frac{\int c_i ds}{S}, \quad (1.5)$$

либо по измеренному объемному секунднему расходу

$$c_{cp} = \frac{Q}{S}, \quad (1.6)$$

где S – площадь сечения потока жидкости; ds – площадь сечения элементарной струйки, соответствующая скорости c_i .

Расходом называется количество жидкости, протекающей через сечение потока в единицу времени. В зависимости от единиц измерения количества жидкости различают объемный расход G_v , m^3/c и массовый G $кг/c$, которые определяются соотношением $G = \rho \cdot G_v$, где ρ – плотность жидкости.

При установившемся движении несжимаемой жидкости её расход в любом произвольном сечении одного и того же потока сохраняется неизменным, то есть $Q = \text{const}$, при $\rho = \text{const}$, $G_c = \text{const}$.

Измерение давления. Широко используются приборы дистанционного типа, состоящие из приемника (датчика) и измерительного устройства. Приемник помещается в жидкость, а

измерительное устройство находится в удобном для наблюдения месте.

Схема расположения в жидкости приемников давления в потоке и давления торможения показана на рис. 3.

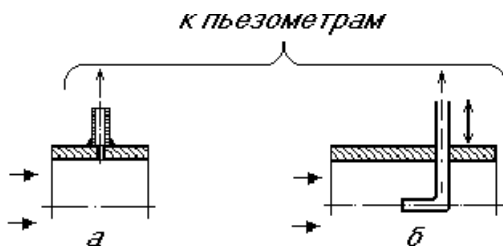


Рисунок 3 - Схема установки приемников для измерения в центре потока жидкости: *а* – давления в потоке; *б* – давления торможения

Для правильного измерения давления в потоке жидкости необходимо, чтобы плоскость отверстия приемника была касательной к линии тока. Часто отверстие приемника статического давления делают в стенке трубы. Приемник для измерения давления торможения обычно представляет собой изогнутую трубку, открытый конец которой устанавливается навстречу потоку в положение, когда его ось совпадает с направлением вектора скорости набегающей струйки жидкости.

Положение точки измерения можно изменять, перемещая приемник давления торможения в сечении трубы с помощью микрометрического винта.

Измерительным устройством является пьезометр 2 или манометр 4 (рис. 4).

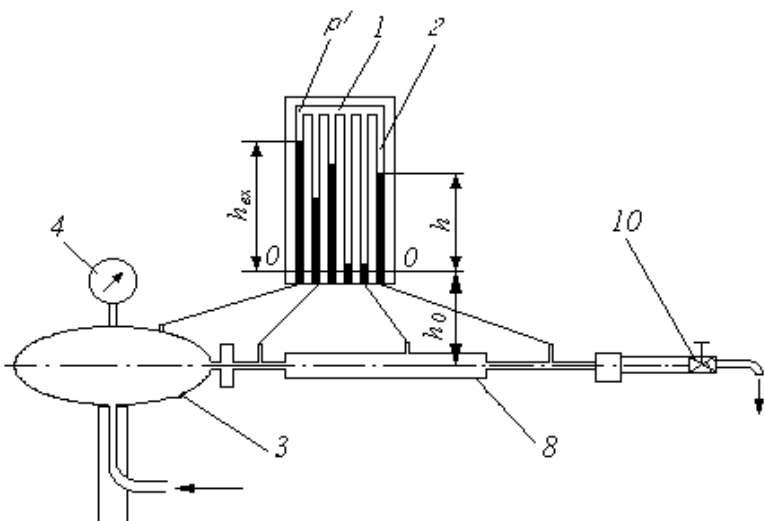


Рисунок 4-Схема измерения давлений.

Пьезометр - это вертикальная стеклянная трубка, один конец которой сообщен с окружающей газовой средой, в частности с атмосферой, а второй - гибкой трубкой соединен с приемником давления. Пьезометр обычно помещают на щите с миллиметровой шкалой для отсчета высоты h подъема жидкости.

Манометры бывают различных конструкций, но наиболее распространен пружинный. Принцип действия пружинного манометра основан на зависимости деформации одновитковой трубчатой пружины (трубки Бурдона) от избыточного давления внутри этой трубки. Трубчатая пружина (рис. 5) одним концом закреплена в держателе 2, оканчивающемся штуцером для присоединении к магистрали с измеряемым давлением. Другой, закрытый конец пружины 1 соединен с секторным передаточным механизмом, состоящим из поводка 3, сектора 4, трубки 5, на оси которой закреплена стрелка 6.

Избыточное давление вызывает перемещение конца пружины 1 и связанное с ним перемещение стрелки 6 вокруг своей оси. Показания прибора отсчитываются по шкале 7. Шкала у

образцового манометра разбита на число условных делений (100, 250 или 300), у простых (технических) манометров шкала градуируется в $кг/см^2$, $кПа$, $МПа$.

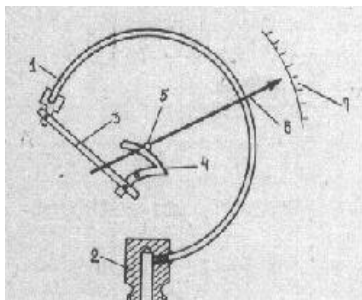


Рисунок 5 -. Схема пружинного манометра

Нуль шкалы манометра соответствует атмосферному давлению. Пружинные манометры должны периодически поверяться, так как с течением времени пружины деформируются, изменяя свою первоначальную форму.

Пьезометрами и манометрами измеряется избыточное давление, то есть разность между абсолютным давлением жидкости и давлением окружающей среды. Тогда абсолютное давление жидкости

$$p = p_n + p_{изб} ,$$

где p_n – атмосферное давление; $p_{изб}$ – избыточное давление, измеренное с помощью пьезометра или манометра.

Абсолютное давление торможения жидкости

$$p^* = p_n + p^*_{изб} ,$$

где $p^*_{изб}$ – избыточное давление торможения, измеренное с помощью пьезометра или манометра.

Для сокращения длины пьезометрических трубок и удобства отсчета уровней столбиков жидкости на гидростендах верхние концы всех трубок соединены общим коллектором 1 (рис. 4), который посредством крайней слева трубки соединен с ресивером 3. В этом случае в коллекторе и в верхних концах трубок давление воздуха выше атмосферного.

Размерность давления p , p^* в международной системе единиц измерения СИ – Паскаль ($Па$) или $Н/м^2$. Переводные единицы измерения давления $1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг/см}^2 = 7,356 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.} = 9,8066 \text{ Па}$.

Атмосферное давление измеряется с помощью прибора, называемого барометром.

Измерение скорости. Из множества способов измерения скорости жидкости наиболее распространенным в практике экспериментирования является пневмометрический. В основе этого способа лежит непосредственное воздействие движущейся жидкости или газа на приемные элементы приборов, измеряющих давление в потоке и давление торможения. Затем по величине этих давлений по формуле (2) или (4) вычисляется скорость в точке потока. Среднеобъемная скорость несжимаемой жидкости в сечении потока определяется по формулам (5) или (6).

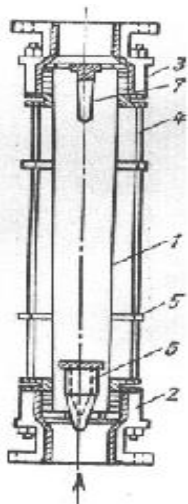


Рисунок 6 -
Ротаметр со
стеклянной

Измерение расхода. Приборы для измерения расхода называются расходомерами. Наиболее простым и точным способом измерения расхода жидкости является объемный (весовой), при котором определяется время t наполнения заданного объема V вытекающей жидкости. Объемный расход жидкости $G_v = V/t$. Этот способ измерения расхода используется при малых расходах, а также для градуировки (поверки) других типов расходомеров.

Ротаметр – является расходомером, принцип действия которого основан на восприятии динамического напора протекающей по трубопроводу жидкости чувствительным элементом прибора (поплавком), перемещение которого в потоке

служит мерой расхода.

На рис. 6 показано устройство ротаметра со стеклянной конусной трубкой 1, которая зажата в патрубках 2 и 3, снабженных сальниками. Оба патрубка между собой связаны тягами 4 с надетыми на них ребрами 5. Эта армировка придает прибору

необходимую прочность. Внутри патрубка 2 имеется седло, на которое опускается поплавок 6 при нулевом расходе жидкости или газа. Верхний патрубок 3 снабжен ограничителем хода поплавка 7. Для обеспечения устойчивой работы поплавок верхний его обод снабжен каналами с крутым наклоном. Под действием потока жидкости или газа поплавок вертикально перемещается и одновременно приходит во вращательное движение и центрируется в середине потока. Изменение расхода нарушает равновесие поплавка и вызывает его перемещение по трубке до тех пор, пока разность давлений до и после поплавка не будет его уравнивать. Для конкретного поплавка и измеряемой среды эта разность давлений имеет одно и то же значение. Положение поплавка, при котором будет выполняться условие равновесия, зависит от расхода и проходного сечения (кольцевого зазора между поплавком и трубкой) ротаметра. По вертикальному перемещению поплавка ротаметра вдоль его шкалы, нанесенной на конусной стеклянной трубке судят об объемном расходе в единицу времени ($л/с$, $м^3/ч$). Указателем у ротаметра со стеклянной трубой служит верхняя горизонтальная плоскость поплавка. К преимуществам ротаметров следует отнести простоту конструкции, возможность измерения малых расходов, практически равномерную шкалу. Недостатком стеклянных ротаметров является отсутствие автоматической записи показаний, зависимость показаний от вязкости, температуры и давления измеряемой среды.

Описание рабочего участка

Рабочий участок гидростенда для данной лабораторной работы представляет собой прозрачную трубу постоянного сечения с внутренним диаметром, $d = 17$ мм (рис. 7).

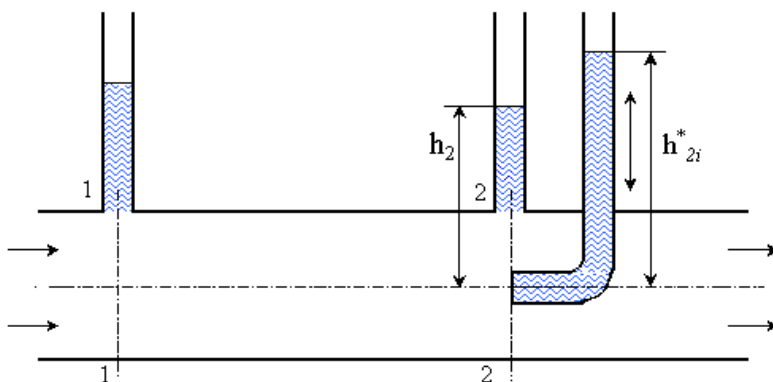


Рисунок 7- Схема прозрачной трубы для измерения давления и скоростей жидкости

На выходе из прозрачной трубы (сечение 2) установлены приёмники давления и давления торможения, соединённые гибкими трубками с пьезометрами. Приёмник давления торможения представляет собой изогнутую трубку, перемещаемую по радиусу сечения трубы при помощи микрометрического винта.

Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента.

2. Измерить давление p_n и температуру t_n воздуха в помещении лаборатории.

3. Проверить готовность установки к эксперименту. При этом сливной вентиль 16 должен быть полностью открыт, дополнительный сливной вентиль 18 и вентиль автономного режима 15 закрыты, трубопровод и рабочий участок заполнен водой, приёмник давления торможения в сечении 2 находится у стенки трубы.

4. Установить режим течения воды, открывая вентиль подачи воды 16 и регулируя расход её вентилем 10. На режиме

установившегося течения показания манометра 4 и пьезометров на щите 7 должны сохраняться постоянными во время эксперимента.

5. Измерить избыточное давление воды в ресивере p_m , высоту столбика жидкости $h_{вх}$ в пьезометре, соединенном с ресивером, а также высоту столбиков жидкости h_2 и h_{2i}^* в пьезометрах, соединенных с приёмниками давления в сечении 2.

6. Перемещая микрометрическим винтом трубку приёмника давления торможения от стенки трубы, произвести измерение давления в фиксированных точках сечения 2 потока воды.

7. Измерить объём воды $V(m^3)$ в контрольной ёмкости и время её заполнения $t(c)$.

8. Закрыть вентиль подачи воды.

9. Результаты всех измерений записать в протокол.

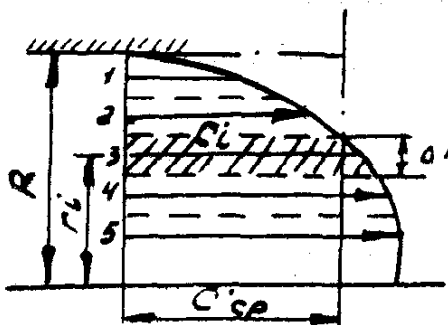


Рисунок 8- Осреднение скорости неравномерного потока в сечении трубы

Обработка результатов эксперимента

1. По результатам измерений избыточного давления в ресивере p_m и показаний пьезометров определить по формулам статическое давление p и давление торможения p^* в фиксированных точках сечения 2 потока воды.

2. По результатам измерений показаний пьезометров определить по формуле скорость движения воды c для каждой

координаты установки приемника давления торможения в сечении 2 трубы.

3. Подсчитать среднеобъемную скорость потока c_{cp} путём осреднения экспериментальной эпюры скорости

$$c_{cp} = \frac{2\Delta r(c_1r_1 + c_2r_2 + c_3r_3 + c_4r_4) + c_5\left(r_5 + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{R^2},$$

где r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 – радиусы точек измерения давления торможения в сечении 2 трубы; Δr – толщина слоя воды, соответствующая данной точки измерения; R – радиус в сечении 2 трубы.

4. Определить по формуле (1.6) среднеобъемную скорость потока c_{cpQ} , предварительно определив $Q=V/t$.

5. Записать в таблицу рассчитанных величин результаты расчетов, построить графики изменения c_{2i}, p_{2i}^* по радиусу сечения 2 потока жидкости.

Содержание отчета

1. Протокол эксперимента со схемой рабочего участка установки.
2. Графики изменения скорости и давления торможения по радиусу сечения 2 потока жидкости.
3. Сравнение средней скорости потока жидкости c_{cpQ} и c_{cp} в сечении 2.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы к работе

1. Почему движение воды на рабочем участке считается установившемся?
2. Как измеряется объемный расход воды в трубопроводе?

3. Почему расход воды измеряется за пределами рабочего участка, а в расчетах принимается равным расходу в сечении 2?

4. Почему в движущейся воде давление торможения больше давления потока в этой же точке?

5. Почему плоскость отверстия приемника давления торможения должна быть строго перпендикулярна вектору скорости набегающей струйки жидкости или газа?

6. Как определяют координаты точек установки приемника давления торможения?

7. Почему при движении воды по трубе её скорость на оси максимальная, а у стенки близка к нулю?

8. При каких условиях давление торможения было бы одинаковым для всего потока в сечении трубы?

9. Для чего определяется среднеобъемная скорость движения?

10. Как доказать постоянство среднеобъемной скорости воды во всех сечениях рабочего участка?

Режимы течения жидкости в трубе

Цель работы – ознакомление с ламинарным и турбулентным режимами течения жидкости в трубе, методами определения режимов: экспериментальным (визуальное наблюдение) и расчётным с помощью числа Рейнольдса (Re).

Теоретические основы эксперимента

Различают два вида движения жидкости в каналах: ламинарное (слоистое), когда отдельные струйки не перемешиваются, и турбулентное, когда имеются поперечные и продольные скорости и перемешиваются частицы жидкости из различных струек.

Критерием вида движения жидкости является число Рейнольдса. В частном случае при течении жидкости в трубах число Рейнольдса

$$Re = cd/\nu \quad (1)$$

Критическое число $Re_{кр}$, разделяющее потоки жидкости в трубах на ламинарные и турбулентные, равно 2320. При $Re > Re_{кр}$ - поток ламинарный, при $Re < Re_{кр}$ - поток турбулентный. Переход ламинарного течения жидкости в турбулентное происходит постепенно. Когда число Re незначительно превышает $Re_{кр}$, турбулентность потока слабая, соответствующий режим движения называют переходным. Физически число Re соответствует отношению сил инерции к силам вязкости, т.е. является безразмерным критерием динамического подобия потоков жидкости. Два или несколько потоков жидкости считаются подобными, если имеет место подобие: геометрическое (подобие каналов, по которым течёт жидкость), кинематическое (подобны эпюры скорости в сходственных сечениях) и динамическое (равны числа Re в сходственных сечениях).

У подобных потоков одноимённые безразмерные (относительные) параметры (отношение давлений p_2/p_1 ; плотностей ρ_2/ρ_1 ; скоростей c_2/c_1 ; коэффициенты гидравлических потерь ξ ; КПД и т.п.) одинаковы. Это позволяет моделировать течение жидкости и проводить исследование моделей, а не натуральных образцов, которые зачастую невозможно или трудно исследовать в силу сложности и большой стоимости эксперимента.

Описание рабочего участка

Рабочий участок данной лабораторной работы представляет собой прозрачную трубу постоянного сечения с внутренним диаметром $d = 17$ мм (рис. 8). На входе (сечение 1) в центральную

часть трубы по тонкой трубке подаётся подкрашенная жидкость из бачка 1 при открытии крана 2.

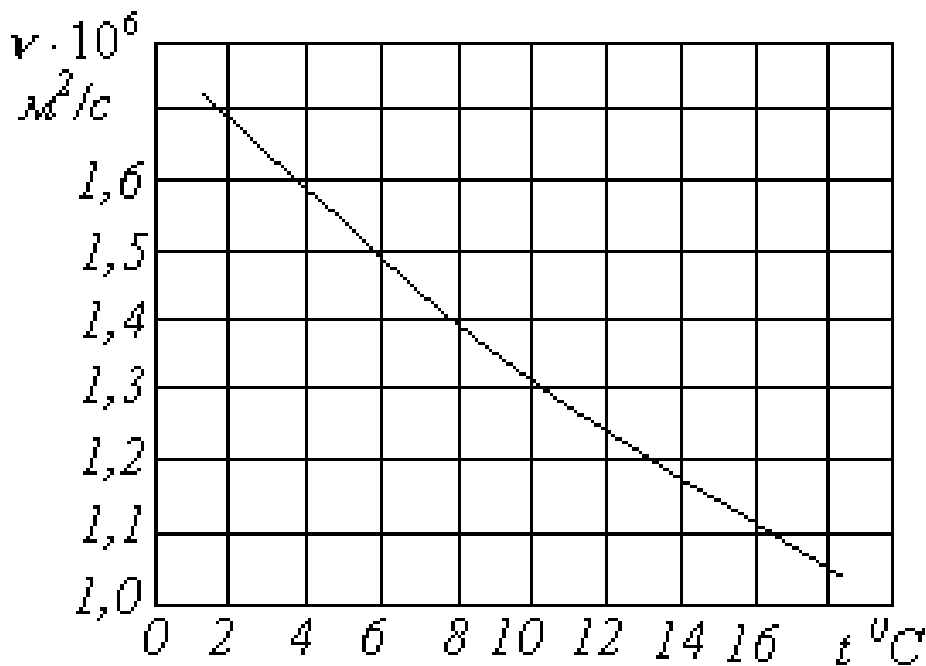


Рисунок 9. Зависимость кинематической вязкости воды от её температуры при $p_n = 101,325$ кПа.

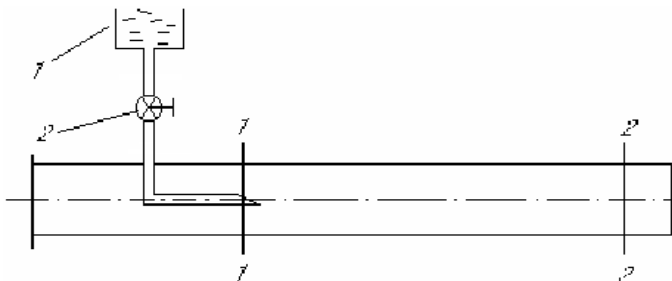


Рисунок 10 - Схема прозрачной трубы
для наблюдения режимов течения жидкости

Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента.

2. Измерить давление p_n и температуру воды, подаваемой в гидростенд.

3. Проверить готовность установки к эксперименту. При работе с ГС-3М сливной вентиль 5 должен быть полностью открыт, дополнительный вентиль 6 и вентиль автономного режима 9 закрыт, трубопровод и рабочий участок заполнен водой.

4. При работе с ГС-3М установить режим течения воды, открывая вентиль подачи воды 8 и регулируя расход вентилем 18. Во время эксперимента, регулируя вентилем 8, поддерживать постоянным давление в ресивере p_m , т.к. движение жидкости должно быть установившимся. При работе с ГС-2 открыть 1 (рис 1а) подачи воды, регулируя расход таким образом, чтобы при установленном режиме течения в рабочем участке при помощи крана 22 (рис 1а) наблюдался небольшой перелив воды через внутренний конус.

5. Плавно открыть кран 2 (рис.8), чтобы струйка подкрашенной жидкости оставалась тонкой.

6. Наблюдать за поведением подкрашенной струйки в потоке воды.
7. Закрыть кран 2.
8. Измерить расход воды расходомер-секундомер.
9. Измерить температуру воды ртутным термометром, помещая его в вытекающую струю воды.
10. Повторить пункты 4, 5, 6, 7, 8, 9 для каждого следующего опыта.
11. Закрыть вентили подачи воды и регулирования расхода.
12. Результаты всех измерений записать в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. Определить площадь сечения потока жидкости: $S = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$,

где d - внутренний диаметр прозрачной трубы.

2. Определить расход воды Q в $м^3/с$ по результату измерения его ротаметром.

3. Определить по объёмному расходу воды среднюю скорость $c_{ср}$ в $м/с$.

4. Определить кинематический коэффициент вязкости ν в $м^2/с$ по измеренной температуре t , °С воды в соответствии с графиком зависимости кинематической вязкости воды от ее температуры при $p_n = 101,325 \text{ кПа}$.

5. Подсчитать по формуле число Рейнольдса Re , сравнить со значением критического числа $Re_{кр}$ и определить режим течения воды.

6. Расчёты по пунктам 2, 3, 4, 5 повторить для каждого следующего опыта.

7. Записать в таблицу вычисляемых величин протокола результаты расчётов.

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой рабочего участка установки.
2. Эскизы картины течения жидкости при ламинарном и турбулентном движении.
3. Сравнение режимов течения жидкости, определённых при помощи числа Рейнольдса с визуально наблюдаемыми в опытах.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Почему при турбулентном режиме течения эпюра скорости в поперечном сечении более равномерная, чем при ламинарном?
2. Как определяется режим течения жидкости при отсутствии возможности визуального наблюдения?
3. Почему вязкость воды зависит от её температуры?
4. Почему число Рейнольдса является критерием динамического подобия потоков жидкости?
5. При каких условиях движение воды в трубе считается установившимся?
6. Почему объемный расход воды в различных сечениях трубы постоянен?
7. Почему при турбулентном режиме течения потери энергии на преодоление сопротивления трения больше, чем при ламинарном?

Лабораторная работа № 2

Движение жидкости в канале переменного сечения

Цель работы - экспериментальное подтверждение закона сохранения и превращения механической энергии с использованием уравнения Бернулли для потока несжимаемой жидкости. При этом измеряются давление в потоке и давление торможения по длине канала переменного сечения; время заполнения водой фиксированного объёма. Рассчитываются объёмный расход жидкости, скорость потока жидкости в характерных сечениях трубы. Устанавливаются закономерности изменения вдоль потока несжимаемой жидкости давления и давления торможения, скорости движения и гидравлических потерь.

Теоретические основы эксперимента

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения и превращения энергии в механической форме для потока жидкости. Для участка 1-2 элементарной струйки вязкой несжимаемой жидкости

(рис. А.2.1) при установившемся одномерном движении уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} + h_{r(1-2)}, \quad (2.1)$$

где z – удельная потенциальная энергия положения (работа силы тяжести);

$p/\rho g$ – удельная потенциальная энергия давления;

$c^2/2g$ – удельная кинетическая энергия;

h_r – удельная суммарная потеря энергии жидкости на преодоление гидравлических сопротивлений на участке между сечениями 1–2.

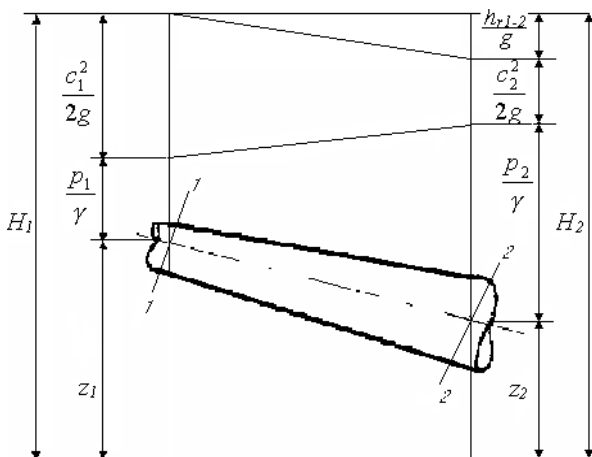


Рисунок 11 - Изменение напоров на участке элементарной струйки

В параметрах торможения уравнение (1) примет вид

$$z_1 + \frac{p_1^*}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2^*}{\rho g} + h_{r(1-2)}. \quad (2.2)$$

В частном случае горизонтальной элементарной струйки ($z_1 = z_2$), имеем:

$$\frac{p_1^*}{\rho g} = \frac{p_2^*}{\rho g} + h_{r(1-2)}. \quad (2.3)$$

При протекании жидкости в трубе в слагаемое кинетической энергии уравнения (2.1) следует ввести поправочный множитель - коэффициент α , учитывающий неравномерность эпюры скорости в поперечном сечении потока. Тогда для участка 1-2 трубы уравнение Бернулли запишем следующим образом:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{c_{1cp}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{c_{2cp}^2}{2g} + h_{r(1-2)}, \quad (2.4)$$

где

$$\alpha = \frac{\int \frac{c_i^2 dG}{2}}{G c_{cp}^2} = \frac{\int c_i^2 dS}{c_{cp}^2 S}; \quad G = \rho \cdot c_{cp} S.$$

Уравнения (2.2) и (2.3) для течения в трубе остаются без изменения, только p^* вычисляется по среднemasсовой скорости, т.е.

$$p_{cp}^* = p + \frac{\rho \cdot c_{cp}^2}{2}. \quad (2.5)$$

При ламинарном движении жидкости в трубах $\alpha_n = 2$, при турбулентном движении $\alpha_n = 1,02 \dots 1,04$. На практике чаще наблюдается турбулентное движение жидкости в трубах, в инженерных расчётах приближённо принимают $\alpha_n = 1$.

Из уравнения (2.3) следует, что в горизонтальных трубах давление торможения p^* изменяется только под влиянием гидравлических сопротивлений; при наличии сопротивления p^* уменьшается по направлению движения, при отсутствии сопротивления (идеальная жидкость) p^* остаётся постоянным.

Из уравнения (4) следует, что давление p изменяется не только под влиянием гидравлического сопротивления h_f , но и в результате изменения скорости c , т.е. изменения площади сечения трубы, поскольку при установившемся движении несжимаемой жидкости $Q = c_{cp} S = \text{const}$ и

$$c_{cp} = \frac{Q}{S}. \quad (2.6)$$

При небольшом сопротивлении (в трубах без внезапного расширения или сужения) в плавно сужающихся трубах скорость возрастает, а статическое давление убывает; в плавно расширяющихся трубах, наоборот, скорость уменьшается, а статическое давление возрастает.

Описание рабочего участка

Рабочий участок гидростенда для данной лабораторной работы представляет собой горизонтальную трубу переменного сечения (рис. 10).

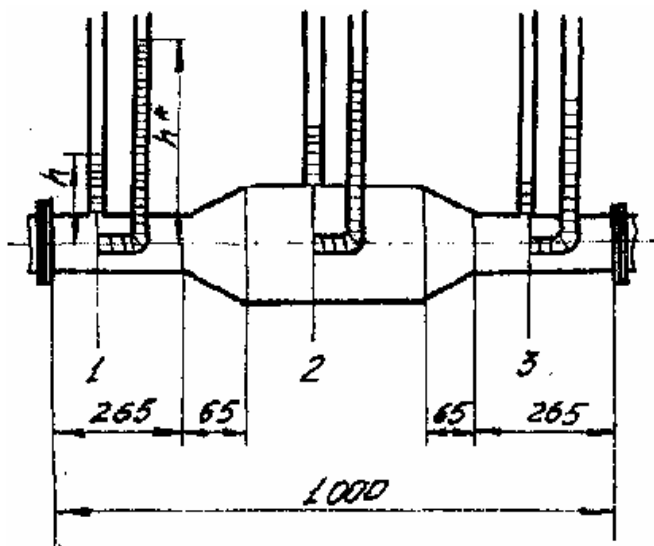


Рисунок 12 - Схема измерения давлений в трубе переменного сечения

Для измерения давления жидкости в трёх сечениях (сечения 1, 2, 3) в стенке трубы имеются отверстия с трубками, соединёнными с пьезометрами. Для измерения давления торможения на оси трубы в тех же сечениях установлены изогнутые навстречу потока трубки, также соединённые с соответствующими пьезометрами.

Разница столбиков жидкости ($h^* - h$) в пьезометрах для измерения давления торможения и давления соответствует максимальной скорости в центре потока жидкости (на оси трубы).

Внутренний диаметр трубы в сечениях 1 и 3 одинаков и равен $d_1 = d_3 = 14$ мм, в сечении 2 - $d_2 = 28$ мм. Расстояния сечений 1, 2, 3 от входа трубы равны $l_1 = 135$ мм; $l_2 = 510$ мм; $l_3 = 890$ мм.

Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента.

2. Измерить давление p_n воздуха в помещении лаборатории.

3. Проверить готовность установки к эксперименту. При этом сливной вентиль 5 должен быть полностью открыт, дополнительный сливной вентиль 6 и вентиль автономного режима 9 закрыты, трубопровод и рабочий участок заполнен водой.

4. При работе с ГС-3М установить режим течения воды, открывая вентиль подачи воды 8 и регулируя расход вентилем 18. Во время эксперимента, регулируя вентилем 8, поддерживать постоянным давление в ресивере p_m , т.к. движение жидкости должно быть установившимся. При работе с ГС-2 открыть вентиль 1 (рис 1а) подачи воды, регулируя расход таким образом, чтобы при установленном режиме течения в рабочем участке при помощи крана 22 (рис 1а) наблюдался небольшой перелив воды через внутренний конус.

5. Измерить избыточное давление воды в ресивере p_m , высоту столбика жидкости $h_{вх}$ в пьезометре, соединённом с ресивером, а также высоту столбиков жидкости h и h^*_{max} в пьезометрах, соединённых с приёмниками давления в трёх сечениях трубы (рис. 10).

6. Измерить расход воды системой расходомер-секундомер.

7. Закрыть вентили подачи воды и регулирования расхода через рабочий участок.

8. Результаты всех измерений записать в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. По результатам измерений определить давление p в $kПа$ и давление торможения в центре потока p^*_{max} в трёх сечениях потока в трубе

2. Определить площадь S потока жидкости в трёх сечениях

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

где d - внутренний диаметр трубы в сечении.

3. Определить объемный расход воды Q по результатам измерения контрольного расхода воды и времени его измерения.

4. Определить средние скорости движения $c_{\text{ср}}$ по формуле (2.6) в трёх сечениях потока жидкости.

5. Определить по формуле (5) осреднённое давление торможения $p^*_{\text{ср}}$ в трёх сечениях потока жидкости.

6. Подсчитать из формулы (4) потери энергии на участке трубы между сечениями 1 и 2 (h_r)₁₋₂, суммарные потери энергии на участке трубы между сечениями 1 и 3 (h_r)₁₋₃. Принимается плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, а коэффициент $\alpha = 1,0$.

7. Записать в таблицу вычисляемых величин протокола результаты расчётов и построить графики изменения p , $p^*_{\text{ср}}$, $c_{\text{ср}}$ по длине трубы (сечения 1-3).

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой рабочего участка установки.

2. Графики изменения давления p и осреднённого давления торможения жидкости $p^*_{\text{ср}}$ по длине трубы переменного сечения.

3. График изменения среднеобъемной скорости движения жидкости $c_{\text{ср}}$ по длине трубы переменного сечения.

4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы к работе

1. Когда поток жидкости в трубе можно считать энергоизолированным?

2. Под действием каких сил поток жидкости ускоряется в плавно сужающейся трубе и тормозится в плавно расширяющейся?

3. Какие преобразования энергии жидкости происходят при движении в энергоизолированных плавно сужающихся и расширяющихся трубах?

4. Почему давление торможения для сечения потока вычисляется по среднеобъемной скорости?

5. Как изменяется давление торможения в поперечном сечении потока жидкости?

6. Как изменяется давление торможения в поперечном сечении потока, если оно вычислено по среднemasсовой скорости жидкости?

7. Почему давление торможения жидкости уменьшается вдоль горизонтальной трубы?

8. Как изменяется статическое давление в плавно сужающихся и расширяющихся трубах?

9. Почему давление торможения, измеренное в центре потока, больше давления торможения, вычисленного по среднemasсовой скорости?

10. Почему среднemasсовая скорость вдоль горизонтальной трубы одинакового диаметра сохраняется постоянной, а статическое давление уменьшается?

11. Когда показания пьезометров для измерения давления на рабочем участке будут одинаковыми?

12. Как изменяется среднеобъемная скорость в плавно сужающихся и расширяющихся трубах?

Лабораторная работа №3

Кавитация в потоке жидкости

Цель работы: визуальное наблюдение кавитации жидкости в трубке Вентури; ознакомление с экспериментальным и расчётным методами определения кавитационного режима течения жидкости; экспериментальное определение критического кавитационного числа $\chi_{кр}$ при движении жидкости в трубке Вентури.

Теоретические основы эксперимента

Кавитация (*от лат.* кавитас - пустота) – нарушение сплошности жидкости вследствие образования в ней пустот (пузырьков, пузырей, каверн), заполненных выделившимся из жидкости паром.

В движущейся жидкости кавитация возникает и развивается в том месте потока, где давление уменьшается до давления насыщенного пара. Возникновение кавитации начинается с образования в потоке кавитационных пузырьков, внутрь которых выделяются растворённые в жидкости газы. При дальнейшем развитии кавитации происходит выделение пара из-за «холодного» кипения жидкости. Образующиеся кавитационные пузырьки перемещаются, увлекаемые потоком жидкости, увеличиваются в размерах, укрупняются и объединяются, что приводит к образованию крупных кавитационных пузырей и каверн. Но так как в потоке жидкости за зоной кавитации давление повышается, рост кавитационных пузырей и каверн, в связи с повышением давления, прекращается, пар в них конденсируется, пузыри и каверны практически мгновенно исчезают – «схлопываются».

Непрерывное схлопывание многочисленных кавитационных пузырей и каверн сопровождается характерным кавитационным шумом и колебаниями давления жидкости. Колебания давления распространяются в потоке жидкости и передаются стенкам,

окружающим поток, вызывая вибрацию гидравлических агрегатов и систем.

Так как пузыри и каверны схлопываются практически мгновенно, то окружающая их жидкость с большой скоростью устремляется вовнутрь исчезающих полостей. В результате в центре этих полостей в момент их схлопывания возникают гидравлические микроудары с большими повышениями давления (на десятки мегапаскалей) и температуры жидкости (на сотни градусов). Многочисленные непрерывные гидравлические микроудары усиливают колебания и вибрации, а воздействие этих микроударов на стенки каналов приводит к их кавитационной эрозии – разрушению материала стенок в зоне схлопывания. Кроме того, по мере развития кавитации интенсивно возрастают гидравлические потери в потоке жидкости на участке в зоне кавитации и за ней. Кавитация в потоке жидкостей обычно не допускается, так как при кавитации нарушаются расчётные режимы работы гидравлических агрегатов и систем, ухудшаются показатели их работы, уменьшаются КПД, появляются недопустимые колебания давления в потоке и вибрации, кавитационная эрозия приводит к недопустимым разрушениям материала стенок в зоне схлопывания. Однако имеются случаи, когда кавитация специально организуется и полезно используется.

Для расчётной оценки отсутствия или наличия кавитации в потоке жидкости используется кавитационное число:

$$\chi = 2(p_1 - p_{н.п}) / (\rho c_1^2), \quad (3.1)$$

где ρ – плотность жидкости, $p_{н.п}$ – давление насыщенного пара жидкости, p и c – давление насыщенного пара жидкости перед местом возможного возникновения и развития кавитации.

Значение χ , при котором в этом месте возникает и развивается кавитация, называется критическим кавитационным числом $\chi_{кр}$. При $\chi > \chi_{кр}$ кавитации не будет, при расчётных $\chi \leq \chi_{кр}$ кавитация

будет возникать и развиваться. Значения $\chi_{кр}$ определяются опытным путём и даются в соответствующих справочниках. Иногда эти значения можно оценить расчётом по теоретическим зависимостям для потока жидкости.

Схема трубы Вентури представлена на рис.11.

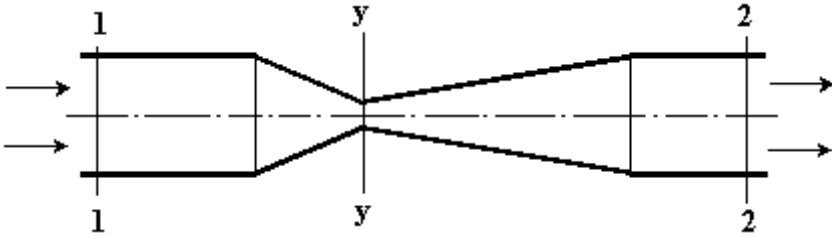


Рисунок 13 - . Схема трубы Вентури

Для потока жидкости в полностью заполненной трубе Вентури основными зависимостями, составленными соответственно для участков потока 1-у, у-2, являются

уравнения Бернулли:

$$\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_y}{\rho} + \alpha_y \frac{c_y^2}{2} + h_{(1-y)} \quad (3.2)$$

$$\frac{p_y}{\rho} + \alpha_y \frac{c_y^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{c_2^2}{2} + h_{(y-2)} \quad (3.3)$$

уравнения расхода:

$$c_{1cp}S_1 = c_{2cp}S_2 = Q, \quad (3.4)$$

формулы для расчёта потерь удельной энергии потока:

$$h_{(1-y)} = \xi_{(1-y)} \cdot \frac{c_{ycp}^2}{2}, \quad (3.5)$$

$$h_{(y-2)} = \xi_{(y-2)} \frac{c_{2cp}^2}{2}, \quad (3.6)$$

где p – статическое давление жидкости,
 c_{cp} – средняя скорость в сечении потока,
 η – коэффициент, учитывающий неравномерность
распределения скоростей в соответствующем поперечном сечении
потока,
 ξ – коэффициент гидравлических потерь удельной энергии
потока,
 S – площадь поперечного сечения потока,
 Q – объёмный расход жидкости в потоке.

При следующих допущениях:

$\eta_1 = \eta_y = \eta_2 = 1,0$ (турбулентный режим течения),

$p_{н.п} = 0$, (для воды при температурах $0 \dots 20$ °С давление
 $p_{н.п} = 6 \dots 23$ ГПа),

$h_{(1-y)} = 0$,

используя уравнения (3.1)–(3.6), получаются расчётные
зависимости для потока жидкости в трубе Вентури:

$$\chi = \frac{2p_1 S_1^2}{\rho \cdot Q^2}, \quad (3.7)$$

$$\chi_{кр}^{pac} = \left(\frac{S_1}{S_y} \right)^2 - 1, \quad (3.8)$$

$$Q_{max} = \sqrt{\frac{2P_1}{\left[\rho \left(1/S_y^2 - 1/S_1^2 \right) \right]}}, \quad (3.9)$$

где $\chi_{кр}^{pac}$ – расчётное значение $\chi_{кр}$ для потока жидкости в трубе
Вентури,

Q_{max} – максимально возможный объёмный расход жидкости
через трубу Вентури при давлении p_1 (устанавливается при
наличии кавитации в потоке).

Описание рабочего участка

Рабочий участок гидростенда для данной лабораторной работы представляет собой горизонтальную трубу постоянного сечения (внутренний диаметр $d = 20$ мм), ко входу которой присоединена прозрачная трубка Вентури (рис. 12).

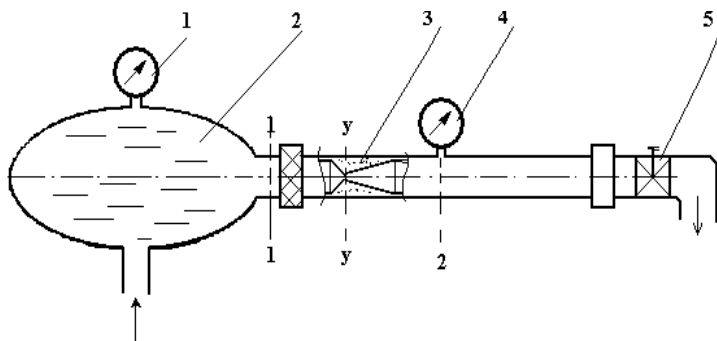


Рисунок 14 - Схема измерения давления в трубе Вентури

Вода из ресивера 2 проходит через трубу Вентури 3 и затем сливается в бак. Статическое давление воды в потоке перед трубой Вентури (сечение 1–1) и за трубой Вентури (сечение 2–2) измеряются манометрами 1 и 4 (давление воды в сечении 1–1 принимается равным давлению в ресивере 2). Смена режимов течения воды в трубе Вентури производится с помощью вентиля подачи воды в ресивер или регулировочного вентиля 5 на выходе.

Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента

2. Измерить давление p_n и температуру t_n воздуха в помещении лаборатории.

3. Проверить готовность установки к эксперименту. При этом сливной вентиль 5 должен полностью открыт, дополнительный

сливной вентиль 6 и вентиль автономного режима 9 закрыты (для ГС-3М).

4. Открыть полностью регулировочный вентиль 5 (рис. 12).

Образец протокола эксперимента

Измеряемые величины				Вычисляемые величины									
№ сеч.	$p_{м1}$, Дел	$p_{м2}$, кг/см ²	Q , л/с	p_1 , кПа	p_2 , кПа	p_2/p_1	Q , м ³ /с	S_1 , м ²	$\chi^{от}$	S_y , м ²	d_y , мм	Q_{max} , м ³ /с	$\frac{Q}{Q_{max}}$
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													

5. Плавно открывая вентиль подачи воды в ресивер наблюдать возникновение и развитие кавитации в трубе Вентури, зафиксировать показание манометра 1 при появлении кавитации.

6. Установить режим течения воды без кавитации, постепенно закрывая вентиль подачи воды в ресивер. Во время эксперимента давление воды в ресивере необходимо сохранять неизменным.

7. Измерить избыточное давление воды $p_{м1}$ в ресивере и в потоке за трубой Вентури ротаметром.

8. Измерить расход воды ротаметром.

9. Повторить пункты 6, 7, 8, для каждого следующего опыта (устанавливая последовательно ещё два режима течения воды в трубе Вентури без кавитации, режим появления кавитации и три режима с кавитацией).

10. Закрывать вентиль подачи воды в ресивер.

11. Результаты всех измерений записать в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. Определить абсолютное давление воды в потоке за трубой Вентури p_1 и за ней p_2 в кПа : $p_1 = p_n + p_{м1}$, $p_2 = p_n + p_{м2}$

2. Определить отношение давления воды в потоке за трубой Вентури к давлению перед ней p_2/p_1 .

3. Определить расход воды в трубе Вентури Q в $\text{м}^3/\text{с}$ по результату измерения контрольного объёма и времени его замера.

4. Определить площадь сечения потока воды перед трубой Вентури $S_1 \text{ м}^2$

$$S_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2,$$

где d_1 – внутренний диаметр выходного патрубка ресивера, $d_1 = 20 \text{ мм}$.

5. Подсчитать по формуле (3.7) кавитационное число χ .

6. Расчёты по пунктам 1, 2, 3, 5 повторить для каждого следующего опыта.

7. Определить площадь узкого сечения потока воды в трубе Вентури из формулы (3.8), принимая $\chi_{кр}^{pac} = \chi_{кр}^{on}$.

П р и м е ч а н и е: значение $\chi_{кр}^{on}$ определяется как среднеарифметическое из значений χ на режимах течения воды в трубе Вентури с кавитацией.

8. Подсчитать диаметр узкого сечения трубы Вентури d_y в мм

$$d_y = \sqrt{\frac{4S_y}{\pi}}, \text{ где } \pi = 3,14.$$

9. Подсчитать по формуле (3.9) значения $Q_{\text{макс}}$ в $\text{м}^3/\text{с}$.

10. Определить отношение секундного объёмного расхода воды в трубе Вентури к максимально возможному расходу в ней при давлении p_1 , то есть $Q/Q_{\text{макс}}$.

11. Расчёты по пунктам 9, 10 повторить для каждого следующего опыта.

12. Записать в таблицу вычисляемых величин протокола результаты расчётов.

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой рабочего участка гидростенда.

2. Кавитационная характеристика трубы Вентури, то есть график экспериментальной зависимости Q/Q_{\max} от p_2/p_1 .

3. Выводы по работе.

Контрольные вопросы к работе

1. При каких условиях в потоке жидкости возникает и развивается кавитация?

2. Чему равно давление жидкости в зоне кавитации?

3. Почему кавитация в потоке жидкости возникает в узком сечении и развивается от этого сечения вниз по потоку?

4. Почему кавитация возникает и развивается у стенок, с которыми соприкасается поток жидкости?

5. Почему давление жидкости в потоке за зоной кавитации повышается?

6. Почему в потоке жидкости происходит схлопывание кавитационных пузырьков, пузырей, каверн?

7. В каком месте потока жидкости происходит схлопывание кавитационных пузырьков, пузырей, каверн?

8. Как доказать, что при $\chi > \chi_{\text{кр}}$ кавитации не должно быть?

9. Как изменяются значения χ для потока жидкости до возникновения кавитации и с момента её возникновения при дальнейшем развитии кавитации?

10. Как доказать, что расход жидкости в потоке с кавитацией является максимально возможным?

11. Почему значение Q_{\max} в лабораторной работе изменяется при изменении p_1 и не изменяется при изменении p_2 ?

12. Как определяются значения p_1 , p_2 , Q в лабораторной работе?

Лабораторная работа № 4

Определение коэффициентов сопротивления трения и местных гидравлических сопротивлений в трубе

Цель работы:

1. Экспериментальное определение коэффициента сопротивления трения по длине трубы постоянного сечения, сравнение опытных значений коэффициента с вычисленными значениями по эмпирическим формулам.

2. Экспериментальное определение коэффициента местных сопротивлений в трубах, сравнение их значений со справочными данными.

Теоретические основы эксперимента

В уравнении Бернулли для потока вязкой жидкости (4.1) слагаемое h_r представляет собой удельную суммарную потерю энергии (потерю части напора) на преодоление гидравлических сопротивлений на участке между сечениями 1 и 2.

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{c_{1cp}^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{c_{2cp}^2}{2} + h_{r(1-2)} \quad (4.1)$$

Гидравлические потери обычно подразделяют на два вида: потери на трение (путевые потери) и местные потери.

Потери на трение обусловлены проявлением вязкости жидкости и могут наблюдаться в чистом виде при движении её по горизонтальной трубе постоянного сечения.

Местные потери наблюдаются в отдельных местах трубопровода, где возникает отрыв жидкости от твёрдых стенок и образуются вихревые зоны. Последнее происходит вследствие резкого изменения сечения трубопровода, его поворота, а также установки в потоке жидкости различных регулирующих и измерительных устройств. Элементы трубопровода, приводящие к местным потерям энергии, называются гидравлическими

сопротивлениями. Так как эти элементы имеют некоторую протяжённость, то местные потери, вызванные ими, связаны не только с завихрениями и изменением скорости потока, но включают в себя и потери на трение.

Гидравлические потери на выделенном участке потока жидкости экспериментально определяются по измеренным статическим давлениям и расходу с помощью уравнений (4.1) и (4.2).

$$Q = c_{cp}S = \text{const} \quad (4.2)$$

При практических расчётах потери на трение и местные потери определяются по общей формуле с помощью коэффициентов ξ .

$$h_r = \xi \left(\frac{c_{cp}^2}{2} \right)$$

Таким образом, h_r определяется в долях от кинетической энергии. Для участка трубы с переменным сечением h_r определяется по большей скорости c_{cp} , то есть по меньшему сечению s .

В частном случае, при большом гидравлическом сопротивлении, может быть $\xi > 1$. При местных сопротивлениях $\xi = \xi_m$, сопротивлениях трения $\xi = \xi_{тр}$. Однако, исходя из физической картины сопротивления трения, коэффициент $\xi_{тр}$ целесообразно выразить через относительную длину трубы l/d посредством формулы

$$\xi_{mp} = \lambda \frac{l}{d}. \quad (4.3)$$

Здесь $\lambda = \xi_{mp}$ при $l/d = 1$, то есть λ – это коэффициент трения для участка трубы длиной, равной диаметру трубы. В итоге гидравлические потери при местных сопротивлениях определяются по формуле

$$h_m = \xi_m \frac{c_{cp}^2}{2}, \quad (4.4)$$

а при сопротивлениях трения (формула Дарси)

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{c_{cp}^2}{2}. \quad (4.5)$$

Определение местных потерь энергии по формуле (4.4) представляет значительные трудности, так как коэффициент местного сопротивления ξ_m зависит от вида сопротивления и многих других факторов. Обычно значения ξ_m определяются опытным путем или берутся по справочным данным.

Коэффициент λ является безразмерной переменной величиной, зависящей от ряда характеристик: диаметра и шероховатости стенок трубы, вязкости и скорости движения жидкости. Влияние этих характеристик на величину λ проявляется по разному при ламинарном и турбулентном режимах течения в трубе. В одном диапазоне чисел Рейнольдса на величину λ влияет в большей степени скорость, в другом диапазоне преобладающее воздействие оказывают геометрические характеристики; диаметр и шероховатость трубы.

В связи с этим различаются четыре области сопротивления, в которых изменение λ имеет свою закономерность.

Под тормозящим действием стенок трубы профиль скоростей деформируется: нарастает кольцевой пограничный слой δ_i , который постепенно захватывает всё сечение трубы, т.е. слои, прилежащие к противоположным стенкам, смыкаются на оси трубы.

Уменьшение центральной части потока (ядра) с равномерным распределением скоростей сопровождается непрерывным увеличением самих скоростей, что обусловлено постоянством расхода жидкости в трубе. Входной участок трубы, где происходит перестройка профиля скорости, называется начальным. За пределами начального участка, то есть на основном участке, наблюдается стабилизированное течение, при котором профиль скорости в поперечном сечении потока жидкости остаётся неизменным.

При ламинарном течении относительная длина начального участка l_n / d определяется по формуле

$$l_n / d = 0,065Re.$$

В случае турбулентного режима течения эта длина сокращается и приближенно оценивается по соотношению

$$l_n / d = (3...3,5) Re^{0,25}.$$

Перестройка профиля скорости и ускорение потока в пределах начального участка сопровождаются дополнительной потерей энергии по сравнению со стабилизированным течением.

Степень влияния начального участка на трение зависит от длины трубы. При большой длине трубы ($l > 5...10l_n$) начальный участок можно из рассмотрения исключить и оценить потери энергии по коэффициенту λ , определённого по формулам (4.6)–(4.10) стабилизированного течения. Для коротких труб длиной $l < 5l_n$ необходимо учитывать особенности течения жидкости на начальном участке.

Описание лабораторной установки

Рабочий участок гидростенда для данной лабораторной работы представляет собой горизонтальную трубу переменного сечения, включающую участки с внезапным расширением и сужением, изгибом и дроссельным сопротивлением (краном).

Внутренний диаметр трубы в сечениях 1, 2, 4, 5, 6 одинаков и равен $d_1 = d_2 = d_4 = d_5 = d_6 = 14$ мм, диаметр $d_3 = 28$ мм. Длина участка трубы между сечениями 1 и 2 $l_{1-2} = 180$ мм.

Первая область сопротивления – область устойчивого ламинарного течения. В этой области λ зависит только от числа Рейнольдса (рис. 13, линия 1) и определяется по формуле Пуазейля

$$\lambda = 64 / Re, \quad (4.6)$$

где $Re = c_{cp}d/v$ – число Рейнольдса.

При этом значении λ , то есть при ламинарном течении, гидравлические потери на трение пропорциональны первой степени скорости:

$$h_{mp} = \frac{64 l c_{cp}^2}{Re d 2} = \frac{32\nu \cdot l}{d^2} c_{cp}$$

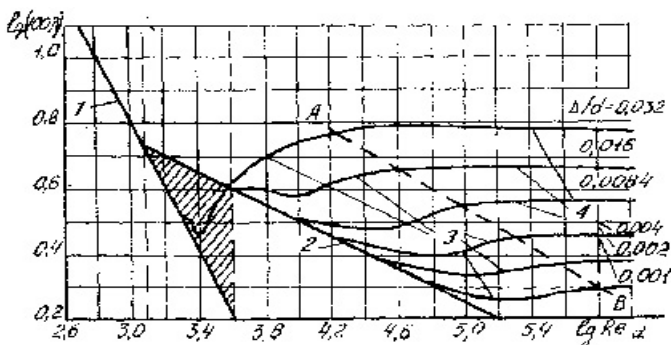


Рисунок 15- Зависимость коэффициента сопротивления трения λ от числа Re и шероховатости трубы (по данным И. Никурадзе)

Остальные области сопротивления находятся в зоне турбулентного течения.

Опыты исследователей И. Никурадзе и других показали, что в турбулентном потоке непосредственно у стенки трубы имеется ламинарный подслоя толщиной δ_n . Приблизительно величина δ_n определяется по формуле

$$\delta_n = \frac{30d}{Re \sqrt{\lambda}},$$

из которой видно, что с увеличением скорости движение жидкости в трубе (соответственно числа Re) толщина подслоя уменьшается.

В зависимости от соотношения между δ_n и средней высотой выступов шероховатости поверхности Δ (рис. 14), называемой абсолютной шероховатостью, различают трубы гидравлически гладкие и шероховатые.



Рисунок 16 - Схема неравномерной шероховатости поверхности трубы.

Если $\delta_d > \Delta$, поток не испытывает дополнительных завихрений от шероховатости поверхности, такая труба называется гидравлически гладкой. Если же $\delta_d < \Delta$, выступы шероховатости оголяются и в обтекающую их жидкость вносятся дополнительные возмущения (вихри), увеличивающие потери энергии; в этом случае труба называется гидравлически шероховатой. Деление труб (поверхностей) на гидравлически гладкие и шероховатые является условным, так как одна и та же труба при малых Re может быть гидравлически гладкой, а с увеличением Re может стать гидравлически шероховатой.

Вторая область сопротивления – область гидравлически гладких труб. Коэффициент λ , так же как и при ламинарном течении, не зависит от состояния поверхности трубы и при $2320 < Re \leq 10^5$ определяется по формуле Блазиуса (рис.13, линия 2)

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (4.7)$$

или в более широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса $2320 < Re \leq 10^7$ по формуле Никурадзе

$$\lambda = 0,032 + 0,221 Re^{-0,237} . \quad (4.8)$$

Как видно из рисунка 13, переход из области, соответствующей ламинарному течению, в область, соответствующую турбулентному течению, происходит скачкообразно.

При значении λ по формуле (4.7) потери на трение в области гладких труб пропорциональны скорости в степени 1,75:

$$h_{mp} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \frac{l}{d} \frac{c_{cp}^2}{2} = \frac{0,1582 \cdot v^{0,25} l}{d^{1,25}} c_{cp}^{1,75} .$$

Третья область является переходной от области гидравлически гладких труб к области сопротивления шероховатых труб. На рисунке. 13 эта область изображена между линиями 2 и АВ. Коэффициент λ в этой области зависит и от числа Re , и от

относительной шероховатости Δ/d , определяется по формуле Френкеля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[0,27 \frac{\Delta}{d} + \left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right]. \quad (4.9)$$

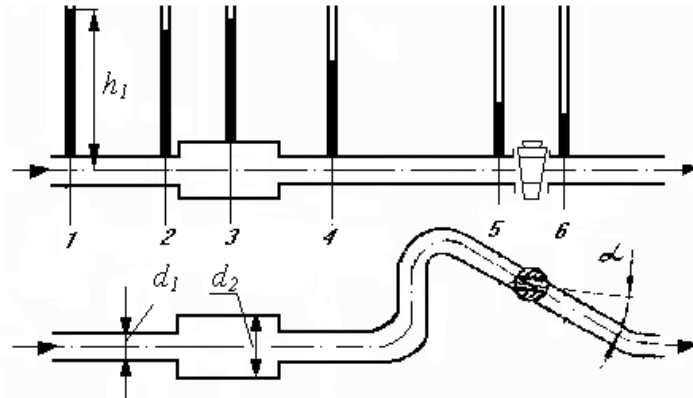


Рисунок 17-Трубка с различными гидравлическими сопротивлениями

Четвертая область сопротивления – область гидравлически шероховатых труб или квадратичного сопротивления (на рисунке 13 область, расположенная от линии AB вправо), когда практически отсутствует ламинарный подслой. Коэффициент λ в этой области зависит только от относительной шероховатости Δ/d и определяется, например, по формуле Прандля

$$\lambda = \frac{0,25}{\left(\lg \frac{3,7d}{\Delta} \right)^2}. \quad (4.10)$$

Так как в этой области для заданной относительной шероховатости Δ/d коэффициент λ является постоянной величиной, то потери энергии в трубе пропорциональны квадрату скорости:

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{c_{cp}^2}{2}.$$

Поэтому эта область сопротивления называется квадратичной.

Значения коэффициентов сопротивления трения λ в рассмотренных областях соответствуют участкам прямых труб со стабилизированным изотермическим трением жидкости. Такие участки труб называются основными. В длинных прямых трубах постоянного сечения различают кроме основных ещё и входные (начальные) участки.

Жидкость при втекании из неограниченной ёмкости во входной участок трубы вначале имеет равномерное распределение скоростей в поперечном сечении (рис. 16).

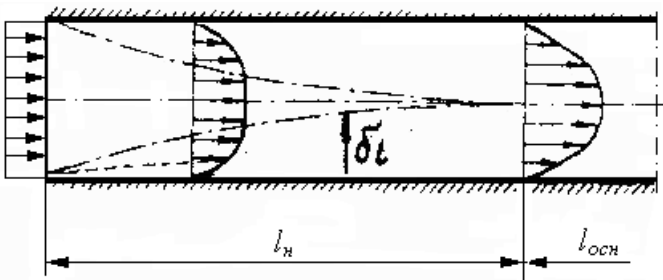


Рисунок 18 - Схема развития течения жидкости на начальном участке трубы

Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента.

Образец протокола эксперимента

Измеряемые величины				Вычисляемые величины									
№ сеч	h , мм вод. ст.	Q , л/с	t_{H_2O} °C	Q , м ³ /с	S , м ²	c_{cp} , м/с	Участки	h_r^{on} , Дж/кг	ξ_{on}	λ^o	v , м ² /с	Re	λ^{pac}
1							1-2						

2						2-3			-		-	-
3						3-4			-		-	-
4						4-5			-		-	-
5						5-6			-		-	-

2. Измерить давление p_n и температуру t_n воздуха в помещении лаборатории.

3. Проверить готовность установки к эксперименту. При работе с ГСЗ-М сливной вентиль должен полностью открыт, дополнительный сливной вентиль б и вентиль автономного режима 9 закрыты, трубопровод и рабочий участок заполнены водой.

4. При работе с ГС-3М установить режим течения воды, открывая вентиль подачи воды 8 и регулируя расход вентилем 18. Во время эксперимента, регулируя вентилем 8, поддерживать постоянным давление в ресивере p_m , т.к. движение жидкости должно быть установившимся. При работе с ГС-2 открыть вентиль 1 (рис 1а) подачи воды, регулируя расход таким образом, чтобы при установленном режиме течения в рабочем участке при помощи крана 22 (рис 1а) наблюдался небольшой перелив воды через внутренний конус

5. Измерить высоты h столбиков жидкости в пьезометрах, соединённых с приёмниками статического давления в шести сечениях трубы рабочего участка гидростенда.

6. Измерить расход воды системой расходомер-секундомер.

7. Измерить температуру воды ртутным термометром, помещая его в струю вытекающей воды из рабочего участка гидростенда.

8. Закрыть вентиль 8 подачи воды и вентиль регулирования расхода].

9. Результаты всех измерений записать в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. Определить площадь потока жидкости $S \text{ м}^2$ в шести сечениях

$$S = \pi d^2/4 ,$$

где d - внутренний диаметр трубы в сечении.

2. Определить расход воды Q в $м^3/с$ по результату измерения его ротаметром.

3. Подсчитать из формулы (4.2) среднюю скорость потока жидкости в каждом сечении в отдельности.

4. Подсчитать из формулы (4.1) экспериментальные значения потерь энергии на трение h_{mp}^{on} в Дж/кг на участке 1-2 и местных потерь h_m^{on} в Дж/кг на каждом участке в отдельности.

5. Подсчитать из формулы (4.5) экспериментальное значение коэффициента сопротивления трения λ^{on} на участке 1-2, принимая $h_{тр} = h_{mp}^{on}$.

6. Подсчитать из формулы (4.4) экспериментальное значение коэффициента местного сопротивления ξ_m^{on} для участков 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 трубы.

7. Определить кинематический коэффициент вязкости ν в $м^2/с$ при измеренной температуре t° С воды в соответствии с графиком (см. ЛР № 1).

8. Подсчитать число Рейнольдса, $Re = c_{cp}d/\nu$, и определить режим течения воды на участке 1-2.

9. Подсчитать коэффициент сопротивления трения λ^{pac} по одной из формул (4.6)-(4.10), предварительно определив по числу Рейнольдса область сопротивления. Сравнить полученное расчётное значение λ^{pac} с экспериментальным λ^{on} .

10. Подсчитать длину начального участка потока воды l_n в мм и оценить степень влияния её на величину потерь энергии h_{mp}^{on} на участке 1-2.

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой рабочего участка гидростенда.

2. Сравнение опытного значения коэффициента сопротивления трения с расчётным, определённым по эмпирической формуле.

3. Результаты вычислений опытных коэффициентов местных сопротивлений.

4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как определяются скорости движения в поперечном сечении потока?

2. Почему гидравлические потери на трение в турбулентном потоке больше, чем в ламинарном?

3. Каким образом определяются гидравлические потери при эксперименте?

4. Как определяются гидравлические потери на трение и местные потери при отсутствии возможности проведения эксперимента?

5. Как определяется коэффициент трения при практических расчётах?

6. Почему одна и та же труба в одном случае может быть гидравлически гладкой, а в другом случае – гидравлически шероховатой?

7. Какие области сопротивления соответствуют турбулентному течению жидкости?

8. Почему при ламинарном режиме потери на трение пропорциональны первой степени среднеобъемной скорости движения жидкости?

9. Почему при турбулентном режиме в области квадратичного сопротивления потери на трение пропорциональны квадрату среднеобъемной скорости движения?

10. Как изменяется профиль (эпюра) скорости при движении жидкости по начальному участку трубы?

11. Почему при движении жидкости по начальному участку трубы её центральные струйки ускоряются?

12. Как влияет начальный участок трубы на гидравлические потери при движении жидкости?

Лабораторная работа № 5

Истечение жидкости из отверстия и насадков при постоянном напоре

Цель работы:

1. Ознакомление с методами определения скорости и расхода жидкости при истечении при постоянном напоре из отверстия и различных форм сопел.

2. Экспериментальное определение коэффициентов скорости φ ; расхода μ и сужения струи ϵ при истечении.

Теоретические основы эксперимента

Истечение жидкости из резервуара через отверстие или сопло в пространство, заполненное газом или той же жидкостью, характеризуется преобразованием запаса потенциальной энергии жидкости в резервуаре с большими или меньшими потерям в кинетическую энергию струи. Часть энергии необратимо расходуется на преодоление сопротивления кромок отверстия или сопла. Основной задачей является определение скорости истечения и расхода жидкости.

Истечение может быть из малого отверстия в тонкой или толстой стенке. Отверстие считается малым, если его диаметр d_0 (рис.17) значительно меньше, чем располагаемый напор H в м, $d_0 \leq 0,1H$.

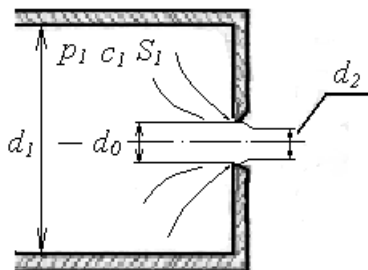


Рисунок 19 - Истечение жидкости через отверстие

Под термином «тонкая» следует понимать такую толщину стенки, при которой она не оказывает влияния на истечение, т.е. жидкость, протекая через отверстие, не касается его боковой поверхности. Толщина тонкой стенки не должна превышать $(2,0 \dots 2,5)d_0$. Отверстие может быть выполнено в тонкой стенке, но с заострением входной кромки с внешней стороны (рис. 17).

При истечении из отверстия, вследствие перехода от различных направлений движения жидкости в резервуаре к осевому движению, под действием инерционных сил происходит сужение струи жидкости. Минимальное сечение струи 2-2 образуется на расстоянии $(0,5 \dots 1,0)d_0$ от стенки резервуара. Сужение струи оценивается коэффициентом сужения ε .

$$\varepsilon = \frac{S_2}{S_0} \quad (5.1)$$

где S_2 – площадь минимального сечения струи жидкости,
 S_0 – площадь отверстия.

Для круглого отверстия

$$\varepsilon = \left(\frac{d_2}{d_0} \right)^2$$

где d_2 – диаметр суженной струи жидкости,
 d_0 – диаметр отверстия

При истечении жидкости из отверстия, используя уравнение Бернулли и уравнения расхода, можно получить расчётные формулы скорости истечения и расхода.

Рассмотрим случай истечения через малое отверстие в тонкой стенке (рис.18), когда давление жидкости в резервуаре p_1 превышает давление её на выходе p_2 , которое равно давлению окружающей среды p_n , $p_2 = p_n$. Расположение осей резервуара и струи жидкости вблизи отверстия горизонтально и они совпадают, поэтому $z_1 = z_2$.

Уравнение Бернулли, составленное для сечения 1-1 потока жидкости в резервуаре и 2-2 струи (рис. 18)

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \alpha_1 \frac{C_{1cp}^2}{2} = \frac{p_H}{\rho} + \alpha_2 \frac{C_{2cp}^2}{2} + h_{M(1-2)} \quad (5.2)$$

Уравнение расхода

$$C_{1cp} S_1 = C_{2cp} S_2 \quad (5.3)$$

В уравнении (3) площадь сечения струи S_2 можно определить по площади отверстия, используя коэффициент сужения струи ε . Тогда

$$\begin{aligned} C_{1cp} S_1 &= C_{2cp} \cdot \varepsilon \cdot S_0, \\ C_{1cp} &= C_{2cp} \cdot \varepsilon \frac{S_0}{S_1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Выражая потери энергии $h_{M(1-2)}$ в уравнении (5.2) формулой (5.4)

$$h_{M(1-2)} = \xi_M \cdot \frac{C_{2cp}^2}{2}$$

после преобразований с учётом (4) получим формулу скорости истечения

$$C_{2cp} = \varphi \cdot \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_H)}{\rho}} \quad (5.5)$$

где

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \varepsilon^2 \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^2 + \xi_M}} - \text{коэффициент скорости.}$$

При истечении идеальной (невязкой) жидкости и без сужения струи коэффициенты $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$; $\xi_M = 1,0$; $\varphi = 1,0$, а теоретическая скорость истечения

$$C_{2ид} = \sqrt{2 \left(\frac{p_1 - p_H}{\rho} \right)} \quad (5.6)$$

Из формулы (5.5) с учётом (5.6) следует, что коэффициент скорости есть отношение действительной скорости истечения жидкости к теоретической

$$\varphi = \frac{C_{2\text{ср}}}{C_{2\text{ид}}} \quad (5.7)$$

Действительная скорость истечения $C_{2\text{ср}}$ вследствие гидравлических потерь всегда несколько меньше теоретической. Поэтому коэффициент скорости φ всегда меньше единицы.

Объёмный расход жидкости $Q_2 = C_{2\text{ср}} S_2$. Используя уравнения (1) и (5), получим расчётную формулу секундного объёмного расхода

$$Q_2 = \mu \cdot S_0 \sqrt{2 \left(\frac{P_1 - P_H}{\rho} \right)} \quad (5.8)$$

где μ – коэффициент расхода жидкости.

$$\mu = \varepsilon \varphi \quad (5.9)$$

Для идеальной жидкости без сужения струи

$$Q_{2\text{ид}} = S_0 \sqrt{2 \left(\frac{P_1 - P_H}{\rho} \right)} = S_0 \cdot C_{2\text{ид}} \quad (5.10)$$

Из уравнений (5.8) и (5.10) следует, что коэффициент расхода есть отношение действительного расхода при истечении к теоретическому

$$\mu = \frac{Q_2}{Q_{2\text{ид}}} \quad (5.11)$$

и всегда меньше единицы вследствие влияния двух факторов: сужения струи и гидравлического сопротивления.

Величины коэффициентов ε , φ , μ зависят от формы отверстия, отношения площадей S_0/S_1 и от числа Рейнольдса.

Несовершенное сужение струи наблюдается в том случае, когда на истечение жидкости через отверстие и на формирование струи оказывает влияние близость боковых стенок резервуара (рис. 13). Боковые стенки частично направляют движение жидкости при подходе к отверстию, струя по выходе из отверстия сужается в меньшей степени, чем при истечении из резервуара неограниченных размеров. Вследствие уменьшения сужения струи

возрастает коэффициент сужения ϵ , а следовательно, и коэффициент расхода μ .

Короткие трубки длиной l , равной $(3-4)d_0$, присоединённые к отверстию в тонкой стенке (рис. 18) или трубопроводу, называют насадками (соплами). Насадки делятся на три основных типа: цилиндрические, конические, коноидальные.

Цилиндрические насадки бывают внешние и внутренние, конические – сходящиеся и расходящиеся, коноидальные – комбинированные.

При движении жидкости в цилиндрическом сопле (рис. 18) струя вначале сужается примерно так же, как и при истечении из отверстия в тонкой стенке, а затем расширяется и заполняет всё сечение насадки.

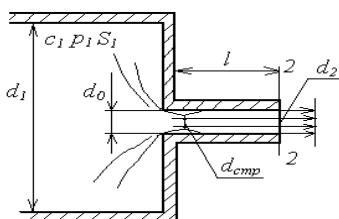


Рисунок 20- Истечение жидкости из внешнего цилиндрического сопла

Зона между струёй и внутренней поверхностью сопла в области минимального сечения струи характеризуется понижением в сравнении с окружающим давлением p_n и вихревым движением жидкости. При одинаковых значениях площади S_0 и напоре $\frac{p_1 - p_2}{\rho}$ расход через сопло будет больше, чем расход через отверстие. Увеличение расхода жидкости Q через сопло объясняется увеличением скорости в суженном сечении вследствие вакуума.

Скругляя кромку при входе в сопло, можно избежать сужение струи, что будет способствовать уменьшению сопротивления сопла и увеличению расхода жидкости.

Формулы скорости и расхода для сопел те же, что и для отверстия в тонкой стенке, но при этом коэффициенты ε , φ , μ имеют другие значения.

При экспериментальном определении коэффициентов ε , φ , μ , кроме напора $\frac{P_1 - P_2}{\rho}$ и расхода воды Q , необходимо измерить в сечении 2 площадь струи S_2 или скорость истечения C_{2cp} . Проще определить скорость C_{2cp} по измеренным координатам x , y на оси струи произвольного сечения (рис. 19).

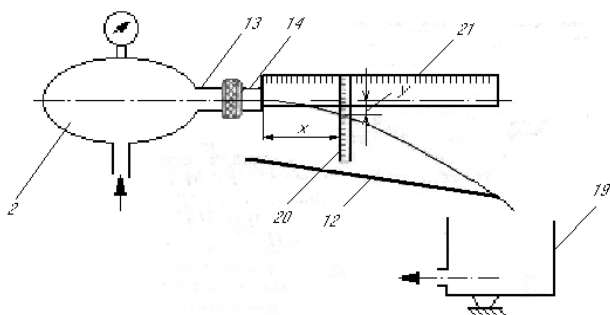


Рисунок 21 - Схема измерения координат струи при истечении жидкости

При свободном истечении струи её траектория имеет форму параболы. Пренебрегая трением струи о воздух, можно предположить, что каждая частица струи жидкости движется как свободная материальная точка, на которую действует только сила тяжести. Тогда движение жидкости после истечения из отверстия (сопла) рассматривается как сумма равномерно ускоренного движения по вертикали ($y = gt^2/2$) и равномерного движения по горизонтали

($x = C_{2cp}t$).

Исключив время t , получим $C_{2cp} = x\sqrt{\frac{g}{2y}}$

Из-за перекоса сопла при истечении возможно некоторое отклонение оси струи жидкости от горизонтального направления.

С учётом этого отклонения более точный расчёт скорости истечения C_{2cp} производится с помощью координат x_1, y_1 и x_2, y_2 , измеренных в двух сечениях струи:

$$C_{2cp} = \sqrt{\frac{g}{2} \cdot \frac{x_2 x_1 (x_2 - x_1)}{x_1 y_2 - x_2 y_1}}, \quad (5.12)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

При практических расчётах значениями коэффициентов $\varepsilon, \varphi, \mu$ задаются, исходя из рекомендаций справочных материалов.

Описание лабораторной установки

В качестве лабораторной установки используется универсальный гидравлический стенд ГС-3М [4]. К напорному выходному патрубку гидростенда 13 (рис. А.5.3) с помощью накидной гайки присоединяется исследуемое сопло 14. Вода из сопла по лотку 12 попадает в сливной бак 19. Координирование траектории оси струи производится вертикальной линейкой 20, перемещающейся по горизонтальной линейке 21. Набор сопел представлен на рис. 19. Сопло 1 соответствует отверстию в тонкой стенке.

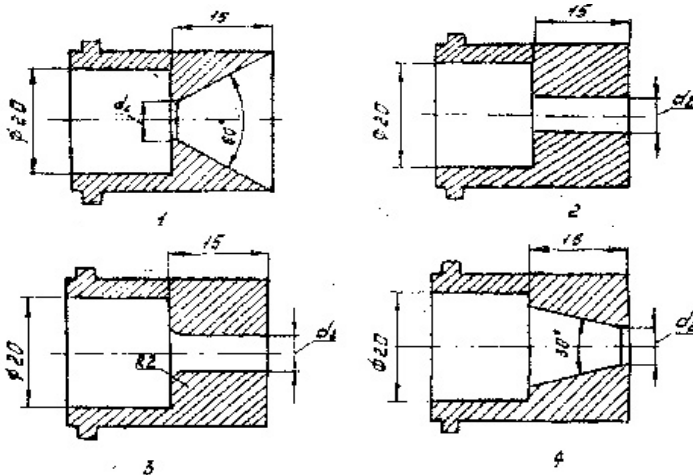


Рисунок 22- Набор исследуемых сопел

Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента.

Образец протокола эксперимента

Измеряемые величины							
№ сопла	d_0 мм	p_m дел.	X_1 мм	X_2 мм	Y_1 мм	Y_2 мм	Q_2 л/с
1							
2							
3							
4							

Вычисляемые величины								
№ сопла	C_{2cp} м/с	$C_{2ид}$ м/с	S_0 м ²	$Q_{2ид}$ м ³ /с	Q_2 м ³ /с	μ	φ	ε
1								
2								
3								
4								

2. Измерить давление p_n и температуру t_n воздуха в помещении лаборатории.

3. Проверить готовность установки к эксперименту. При этом сливной вентиль 5 (для ГС-3М) должен быть полностью открыт, дополнительный сливной вентиль 6 и вентиль автономного режима 9 закрыты.

4. Измерить расстояние X_1 и X_2 от выходного сечения отверстия, сопел до измерительной кромки вертикальных линеек.

5. Установить режим истечения по избыточному давлению p_m ресивера 2 для ГС-3М, регулируя вентилем подачи воды так, чтобы струя не выходила за пределы сливного лотка 12. Во время эксперимента давление p_m поддерживать постоянным. При работе с

ГС-2 открыть вентиль подачи воды и поддерживать небольшой перелив воды через внутренний конус.

6. Измерить вертикальные координаты Y_1 и Y_2 по оси струи.
7. Измерить расход воды системой расходомер-секундомер.
8. Закрыть вентиль подачи воды. Для ускорения слива воды из ресивера открыть дополнительный сливной вентиль.
9. После слива воды закрыть сливной вентиль, затем отсоединить сопло от напорного выходного патрубка 13.
10. Повторить пункты 4, 5, 6, 7, 8, 9 для каждого следующего сопла.
11. Результаты измерений для всех сопел записать в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. По результатам измерений координат X и Y на оси струи в двух сечениях определить по формуле (5.12) действительную скорость истечения воды C_{2cp} в м/с.
2. Подсчитать по формуле (5.6) теоретическую скорость истечения $C_{2ид}$ в м/с, имея ввиду, что $p_1 = p_n + p_m$
3. Подсчитать по формуле (5.10) объёмный расход идеальной воды без сужения струи $Q_{2ид}$ в м³/с. Здесь $S_0 = \pi d_0^2/4$, в м².
4. Определить действительный расход воды при истечении Q_2 в м³/с по результату измерения его ротаметром.
5. Подсчитать по формулам (5.11), 5.(7), (5.9) коэффициенты ϵ , φ , μ .
6. Расчёты по пунктам 1, 2, 3, 4, 5, повторить для всех сопел.

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой измерения координат струи при истечении жидкости и с эскизами набора исследуемых сопел.
2. Сравнение величин коэффициентов ϵ , φ , μ для отверстия и различных сопел.