

Министерство образования и науки Российской Федерации
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА

Методические указания к лабораторным работам

Составитель Ю. В. Минин

Волгоград
ВолгГАСУ
2015



© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», 2015

УДК 532.5+533.6](076.5)
ББК 22.253.3я73
Г464

Гидрогазодинамика [Электронный ресурс] : методические указания к лабораторным работам / М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т; сост. Ю. В. Минин. — Электронные текстовые и графические данные (00 Мбайт). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2015. — Учебное электронное издание. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0. — **Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета.** Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

Методические указания составлены в соответствии с ФГОС по специальности «Пожарная безопасность» и направлению «Техносферная безопасность», профиль подготовки «Защита в чрезвычайных ситуациях» всех форм обучения.

Разработаны лабораторные работы по следующим темам: устройство трубки Пито-Прандтля и микроманометра; определение расхода воздуха в воздуховодах; потери на трение в цилиндрических трубах; экспериментальное изучение струи; экспериментальная интерпретация уравнения Бернулли.

УДК 532.5+533.6](076.5)
ББК 22.253.3я73

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Лабораторная работа № 1.....	4
2.	Лабораторная работа № 2.....	10
3.	Лабораторная работа № 3.....	167
4.	Лабораторная работа № 4.....	25
5.	Лабораторная работа № 5.....	28
	Библиографический список.....	32

Лабораторная работа № 1

Устройство трубки Пито-Прандтля и микроманометра

1. Цель работы:

Изучение устройства трубки Пито-Прандтля, микроманометра и метода измерения давлений, а так же приобретение практических навыков при измерениях.

2. Содержание работы

Включают в работу установку, состоящую из вентилятора и воздуховода. Вводят трубку внутрь воздуховода через отверстие в воздуховоде и измеряют полное, статическое и динамическое давления с помощью микроманометра.

3. Теоретическая часть.

3.1. Трубка Пито-Прандтля

Трубка Пито-Прандтля показана на рис.1. Она состоит из наконечника 1 с полусферической головкой 2, державки 3, штуцеров 4 и 5. Внутри наконечника 1 и державки 3 расположена изогнутая трубочка 6 малого диаметра. Она запаяна одним своим концом в полусферической головке 2, как показано на рис.1; другим концом- к штуцеру 4. Через трубочку 6 полное давление P_p , воспринимаемое лобовой частью наконечника 1, передается к штуцеру 4. На боковой поверхности наконечника в определенном сечении просверлены отверстия, через которые воспринимается статическое давление P_c , передаваемое далее через внутреннюю кольцевую полость наконечника 1 и державку 3 к штуцеру 5.

Штуцеры 4 и 5 маркируются таким образом: штуцер 4-меткой «+», а штуцер 5-меткой «-».

3.2. Микроманометр типа ММН

Микроманометр является жидкостным прибором. Он предназначен для измерения избыточного давления и разности давлений, неагрессивных к стали, латуни, олову и полиэтилену газов в пределах до 2350 Па.

Устройство микроманометра показано на рис. 2. Он состоит из следующих элементов:

- 1-измерительная стеклянная трубка;
- 2-шкала;
- 3-установочная дуга;
- 4-резервуар;
- 5-основание;
- 6-уровень;
- 7-винт;

- 8-винт;
- 9-вытеснитель;
- 10-резиновая трубка;
- 11-трехходовой кран;

Измерительная стеклянная трубка 1 может быть установлена под различными фиксированными углами наклона к горизонтальной плоскости. Каждому фиксированному углу соответствует определенное значение постоянной прибора K (0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8)

Шкала прибора 2 предназначена для снятия отсчета измеряемой величины. Установочная дуга 3 служит для фиксации угла наклона α измерительной стеклянной трубки и имеет для этого отверстия. В резервуар 4 заливается спирт через отверстие в крышке. На основании 5 расположены узлы микроманометра. Уровень 6 и винт 7,8 используются для установки микроманометра в горизонтальное положение. Вытеснитель 9 предназначен для установки уровня жидкости в измерительной трубке против нулевой отметки шкалы. Трехходовой кран 11 предназначен для соединения каналов. Каналы в трехходовом кране расположены так, что при повороте его пробки против часовой стрелки до упора резервуар 4 и верхняя полость измерительной трубки сообщаются с атмосферой (положение 1). При повороте пробки по часовой стрелки до упора штуцер «а» сообщается с внутренней полостью резервуара 4, а штуцер «в» соединяется со штуцером «с» и далее через резиновую трубку 10 с верхней полостью измерительной трубки (положение 2)

При измерении давлении больше атмосферного, трехходовой кран устанавливается в положении 2, а измеряемое давление подается в штуцер «а».

При измерении давления меньше атмосферного трехходовой кран устанавливается в положение 2, а измеряемое давление подается в штуцер «в». На штуцер «с» надевается резиновая трубка 10.

Правила пользования:

1. Установить прибор на устойчивом столе
2. Отрегулировать винтами 7 и 8 горизонтальное положение микроманометра, используя уровень 6.
3. Установить измерительную трубку 1 в угловое положение, соответствующее коэффициенту $K=0,2$ (или в другое положение)
4. Пробку трехходового крана 10 повернуть по часовой стрелке до упора и произвести измерение. Значение измеряемого давления определяют по формуле:

$$P=9,8 \cdot \Delta h \cdot n, \text{ Па,}$$

где Δh показания по шкале, мм;

n коэффициент, учитывающий угол наклона шкалы микроманометра.

7. Во время работы периодически контролировать ноль прибора, а также следить за положением прибора по уровню.

3.3. Измерение полного избыточного давления во всасывающем воздуховоде

Во всасывающем воздуховоде полное абсолютное давление меньше атмосферного давления, поэтому измеренное полное избыточное давление будет отрицательным, т.е.

$$P_{\text{п}}=P_{\text{а}}-P_{\text{б}}, \text{ Па,}$$

Где $P_{\text{п}}$ - полное избыточное давление, Па;

$P_{\text{а}}$ - полное абсолютное давление, Па;

$P_{\text{б}}$ - атмосферное давление (барометрическое), Па.

Измерение полного избыточного давления осуществляют в такой последовательности. Подготавливают микроманометр к работе, как указано ранее. При этом штуцер микроманометра (с меткой «-») соединяют резиновой трубкой со штуцером 4 (см. рис.1) на трубке Пито-Прандтля (с меткой «+»). Производят измерение.

3.4. Измерение полного избыточного давления в нагнетательном воздуховоде

В нагнетательном воздуховоде полное абсолютное давление больше атмосферного давления, поэтому измеренное полное избыточное давление будет положительным, т.е.

$$P_{\text{п}}=P_{\text{а}}-P_{\text{б}}, \text{ Па,}$$

где $P_{\text{п}}$ - полное избыточное давление, Па;

$P_{\text{а}}$ - полное абсолютное давление, Па;

$P_{\text{б}}$ - атмосферное давление (барометрическое), Па.

Измерение полного избыточного давления осуществляют в такой последовательности. Подготавливают микроманометр к работе, как указано ранее. При этом штуцер «а» трехходового крана микроманометра (с меткой «+») соединяют резиновой трубкой со штуцером 4 (см.рис. 1) на трубке Пито-Прандтля (с меткой «+»). Производят измерение.

3.5. Измерение статического избыточного давления во всасывающем воздуховоде

Во всасывающем воздуховоде статическое абсолютное давление меньше атмосферного давления, поэтому измеренное статическое избыточное давление будет отрицательным, т.е.

$$P_{\text{с}}=P_{\text{а}}-P_{\text{б}}, \text{ Па,}$$

где $P_{\text{с}}$ - статическое избыточное давление, Па;

$P_{\text{а}}$ - статическое абсолютное давление, Па;

$P_{\text{б}}$ - атмосферное давление (барометрическое), Па.

Измерение статического избыточного давления осуществляют в такой последовательности. Подготавливают микроманометр к работе, как указано ранее. При этом штуцер «в» трехходового крана микроманометра (с меткой

«-») соединяют резиновой трубкой со штуцером 5 (см. рис. 1) на трубке Пито-Прандтля (с меткой «-»). Производят измерение.

3.6. Измерение статического избыточного давления в нагнетательном воздуховоде

В нагнетательном воздуховоде обычно статическое абсолютное давление больше атмосферного давления, поэтому измеренное статическое избыточное давление будет положительным. Измерение статического избыточного давления осуществляют в такой последовательности. Подготавливают микроманометр к работе, как указано ранее. При этом штуцер «а» на трехходовом кране микроманометра (с меткой «+») соединяют резиновой трубкой со штуцером 5 (см. рис. 1) на трубке Пито-Прандтля (с меткой «-»). Производят измерение.

3.7. Измерение динамического давления

Измерение динамического давления, представляющего собой разность полного и статического давлений, осуществляют одинаково для всасывающих и нагнетательных воздуховодов. Подготавливают микроманометр к работе, как указано ранее. При этом штуцер «а» на трехходовом кране микроманометра (с меткой «+») соединяют резиновой трубкой со штуцером 4 (см. рис. 1) на трубке Пито-Прандтля (с меткой «+»). Штуцер «в» на трехходовом кране микроманометра (с меткой «-») соединяют резиновой трубкой со штуцером 5 (см.рис.1) на трубке Пито-Прандтля (с меткой «-»). Производят измерение.

3.8. Содержание отчета

Отчет о выполненной работе включает:

- формулирование цели работы;
- результаты проведенных измерений полного статического и динамических давлений.

3.9. Перечень контрольных вопросов

- 1.Связь между полным, статическим и динамическим давлениями воздушного потока.
2. Устройство трубки Пито-Прандтля.
3. Устройство микроманометра.
4. Измерение полного, статического и динамического давлений.

3.10. Правила техники безопасности

1. Соблюдать осторожность при работе с микроманометром, так как он может быть заправлен ядовитой жидкостью.

2. Включение установки в работу производится преподавателем или лаборантом.

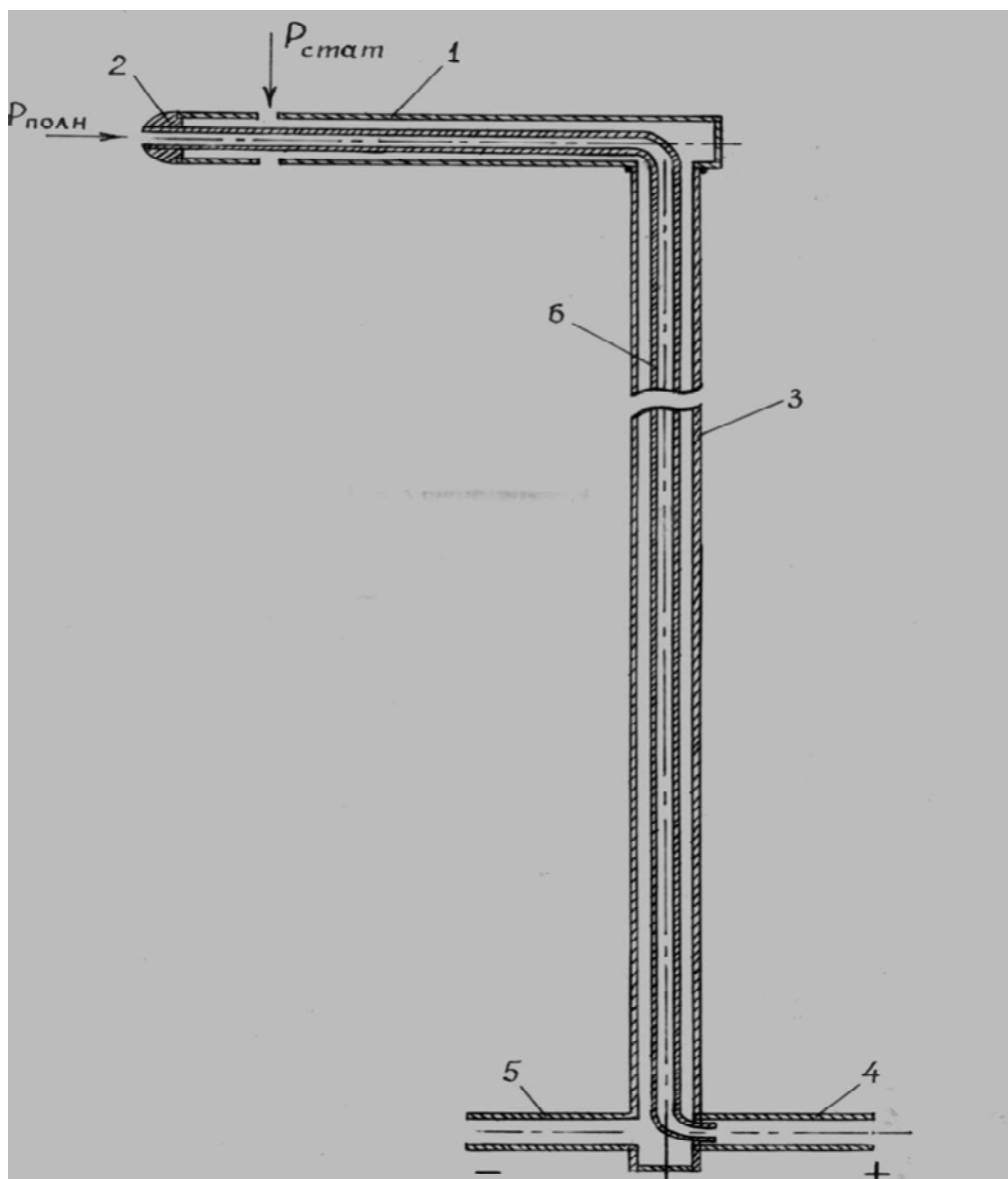
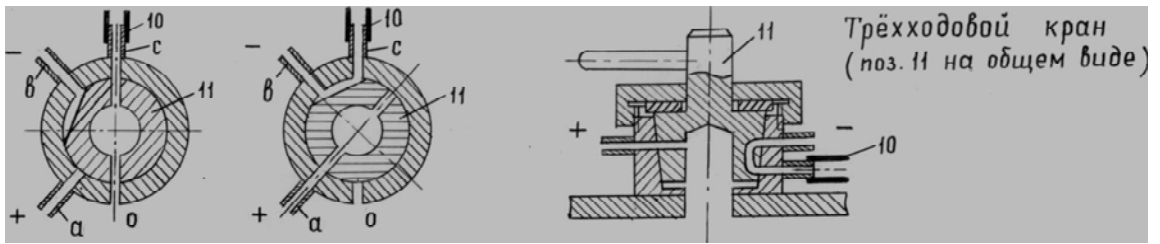


Рис. 1. Трубка Пито-Прандля: 1 – наконечник; 2 – полусферическая головка; 3 – держак; 4 – штуцер; 6 - трубочка



Положение 1 Положение 2

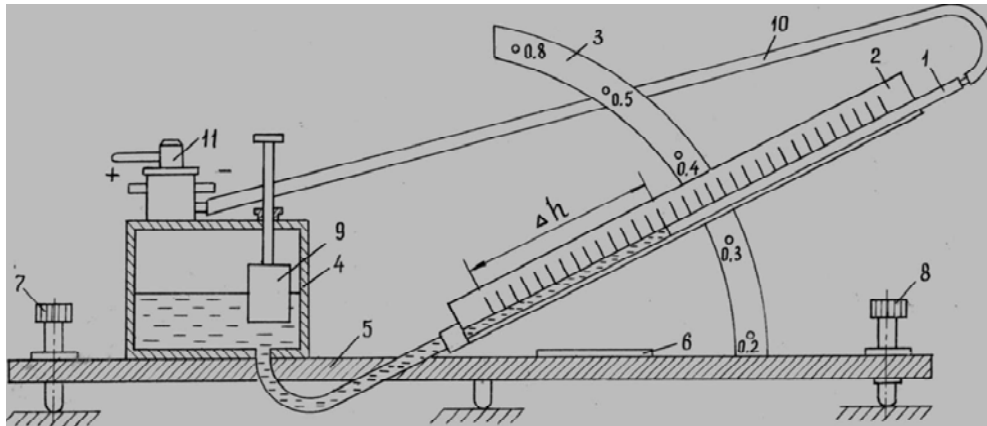


Рис. 2. Микроманометр ММН: 1 – измерительная трубка; 2 – шкала; 3 – установочная дуга; 4 – резервуар; 5 – основание; 6 – уровень; 7,8 – винты; 9 – вытеснитель; 10 – резиновая трубка; 11 – трёхходовой кран

Лабораторная работа № 2

Определение расхода воздуха в воздуховодах

2.1. Цель работы

Ознакомление студентов с методикой измерения поля скоростей в воздуховоде и определения расхода воздуха через него по методу равновеликих площадей.

2.2. Содержание работы

Включают в работу установку, состоящую из вентилятора и воздуховода. С помощью трубки Пито измеряют динамическое давление в расчетных точках воздуховода. По уравнению неразрывности подсчитывают расход воздуха.

2.3. Теоретическая часть

Объемный расход воздуха L , в воздуховоде определяют по уравнению неразрывности:

$$L = V_{\text{ср}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.1)$$

где $V_{\text{ср}}$ - средняя скорость воздушного потока по площади поперечного сечения воздуховода, м/с;

F - площадь поперечного сечения воздуховода, м².

Средняя скорость $V_{\text{ср}}$ определяется по формуле:

$$V_{\text{ср}} = \sum \frac{V_i}{n}, \text{ м/с}, \quad (2.2)$$

где V_i - скорость воздуха в точке замера, м/с;

n - число точек замера.

Формула (2.2) справедлива, если расход воздуха определяется по методу равновеликих площадей. Суть его заключается в том, что сечение круглого воздуховода делится на 3-6 колец (рис. 2.1), равновеликих по площади. Количество колец зависит от диаметра воздуховода. На каждые 100 мм диаметра - одно кольцо, но не менее трех колец - для относительно небольших диаметров. В середине каждого кольца производят измерение скорости V_i . Точки измерения скорости воздуха 2 в данном сечении (рис.1) назначаются по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Расстояние точек замера от центра подсчитывают по формуле:

$$r_n = 0,5D \cdot \sqrt{\frac{2m-1}{2n}}, \text{ мм}, \quad (2.3)$$

где D - диаметр воздуховода, мм;
 m - порядковый номер кольца (считая от центра);
 n - число колец.

ПРИМЕР 1

Разделим поперечное сечение воздуховодов диаметром 300 мм на три равновеликие площади (рис. 2.1).

$$r_1 = 0,5 \cdot 300 \sqrt{\frac{2 \cdot 1 - 1}{2 \cdot 3}} = 61,2, \text{ мм},$$

$$r_2 = 0,5 \cdot 300 \sqrt{\frac{2 \cdot 2 - 1}{2 \cdot 3}} = 106, \text{ мм}, \quad (2.4)$$

$$r_3 = 0,5 \cdot 300 \sqrt{\frac{2 \cdot 3 - 1}{2 \cdot 3}} = 137, \text{ мм}.$$

Скорость газа V в общем виде рассчитывают по формуле

$$V_i = \sqrt{\frac{2 \cdot K_T \cdot P_{\text{дин}}}{\rho}}, \text{ м/с}, \quad (2.5)$$

где $P_{\text{дин}}$ - динамическое давление, Па;
 ρ - плотность среды, кг/м³;
 K_T - коэффициент трубки Пито-Прандтля, пневмометрической трубки конструкции НИИОГАЗ (приведен в свидетельстве о поверке).

Преобразуя формулу (2,5), получим

$$V_i = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot 2 \cdot K_T \cdot P_{\text{дин}}}, \text{ м/с}. \quad (2.6)$$

При проведении эксперимента полученные результаты приводят к нормальным условиям (атмосферное давления – $P_0 = 101,325$ кПа, плотность $\rho_0 = 1,2946$ кг/м³, температура – $T_0 = 273$ К). Это приведение к нормальным условиям необходимо, учитывая то, что эксперимент может быть длительным во времени и изменяются такие параметры, как атмосферное давление, плотность, температура.

Согласно уравнению Клапейрона-Менделеева для нормальных условий

$$\frac{P_0}{\rho_0} = R \cdot T_0, \text{ м/с},$$

$$\text{или } R = \frac{P_0}{T_0 \cdot \rho_0},$$
(2.7)

для рабочих условий

$$\frac{P}{\rho} = R \cdot T,$$

или

$$R = \frac{P}{T \cdot \rho}.$$
(2.8)

Приравнявая значения R из формул (2.7) и (2.8), получим

$$\frac{P_0}{T_0 \cdot \rho_0} = \frac{P}{T \cdot \rho}.$$
(2.9)

Преобразуя формулу (2.9), получим

$$\frac{1}{\rho} = \frac{T \cdot P_0}{P \cdot T_0 \cdot \rho_0}.$$
(2.10)

Подставляя (2.10) в (2.6), получим

$$V = \sqrt{\frac{T \cdot P_0}{P \cdot T_0 \cdot \rho_0} \cdot 2 \cdot K_T \cdot P_{\text{дин}}}, \text{ м/с},$$
(2.11)

где P - абсолютное статическое давление, Па; $P = \pm P_{\text{ст}} + P_{\text{атм}}$;
 $P_{\text{ст}}$ - статическое избыточное давление, определяемое с помощью микроманометра, Па;
 $P_{\text{атм}}$ - атмосферное давление в рабочих условиях, Па.

Скорости в поперечном сечении воздуховода распределяются неравномерно. Неравномерность распределения скоростей характеризуется коэффициентом неравномерности C :

$$C = \frac{C_{\Gamma} + C_{\text{в}}}{2},$$
(2.12)

где C_{Γ} - коэффициент неравномерности поля скоростей по горизонтальному направлению сечения воздуховода;
 $C_{\text{в}}$ - коэффициент неравномерности поля скоростей по вертикальному направлению сечения воздуховода.

Коэффициенты V_Γ и V_B определяются по формулам:

$$C_\Gamma = \frac{V_\Gamma^{\text{cp}}}{V_0^{\text{cp}}}, \quad (2.13)$$

$$C_B = \frac{V_B^{\text{cp}}}{V_0^{\text{cp}}}, \quad (2.14)$$

где $V_B^{\text{cp}}, V_\Gamma^{\text{cp}}$ - средние скорости, соответственно, по горизонтальному и вертикальному направлениям сечения воздуховода, м/с;
 V_0^{cp} - средняя скорость по двум измерениям в точке "О" на оси воздуховода,

$$V_0^{\text{cp}} = \frac{V_{\Gamma 0} + V_{B 0}}{2}, \quad (2.15)$$

где $V_{\Gamma 0}$ - скорость воздуха, измеренная в точке "О" на оси воздуховода в горизонтальном направлении сечения воздуховода, м/с;
 $V_{B 0}$ - скорость воздуха, измеренная в точке "О" на оси воздуховода в вертикальном направлении сечения воздуховода, м/с.

Расход воздуха с учетом коэффициента неравномерности C определяется по формуле:

$$L_0 = V_0^{\text{cp}} \cdot C \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.16)$$

Измерение поля скоростей в прямоугольных воздуховодах проводится аналогично. Сечение воздуховода разделяют на равновеликие по площади прямоугольные элементы.

Определение скорости необходимо производить в тех сечениях, где нет влияния на поток местных сопротивлений. Однако практически осуществить это очень сложно. Обычно вблизи мерного сечения имеется возмущение потока. При измерениях мерный участок должен быть расположен на расстоянии не менее шести гидравлических диаметров за местом возмущения потока (отводы, диафрагмы, шиберы и т.д.) и не менее двух гидравлических диаметров перед ним.

2.4. Перечень приборов и описание лабораторной установки

Для определения скорости воздуха применяются трубка Пито-Прандтля и микроманометр многопредельный с наклонной трубкой типа ММН.

Установка состоит из радиального вентилятора с электродвигателем, всасывающего воздуховода с коллектором, трубки Пито-Прандтля.

2.5. Порядок проведения работы

Измерить внутренний диаметр воздуховода.

Работу проводить в такой последовательности:

1. В точках замера измерить динамическое давление.
2. Определить скорость воздуха V_i в точках замера по формуле (2.5).
3. Определить среднюю скорость V_{cp} по формуле (2.2).
4. Определить коэффициенты неравномерности C_r , C_b , C по формулам (2.12, 2.13, 2.14).
5. Определить среднюю скорость V_o^{cp} на оси воздуховода по формуле (2.15).
6. Определить расход воздуха L по формуле (2.16).

Результаты измерений и расчетов сводят в таблицу 2.1.

2.6. Правила техники безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторных работ и расписавшиеся в журнале.

Запуск, остановку вентилятора могут производить только лаборант или преподаватель.

2.7. Оформление отчета

В отчете необходимо привести:

- описание лабораторной установки;
- заполнить таблицу 2.1;
- эпюру скоростей.

2.8. Контрольные вопросы

1. Принцип действия микроманометра.
2. Принцип действия трубки Пито-Прандтля.
3. Определение средней скорости.
4. Определение объемного расхода воздуха в воздуховоде.

2.9. Список литературы

1. Наладка и регулирование систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Справочное пособие / Б. А. Журавлев, Г. Я. Загальский, Р. Н. Гобза и др.; под ред. Б. А. Журавлева. М.: Стройиздат, 1980. 448 с.

2. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 703 с.

Таблица 2.1. Протокол испытаний

Расчетные величины	Размерность	Вертикальное направление							Горизонтальное направление							
		точки замера							точки замера							
№		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	
r_n	мм															
$P_{\text{ДИН}}$	Па															
V_i	м/с															
V_{Γ}^{CP}	м/с															
V_B^{CP}	м/с															
V_O^{CP}	м/с															
C_{Γ}	—															
C_B	—															
C	—															
F	м ²															
L	м ³ /с															
L_0	м ³ /с															

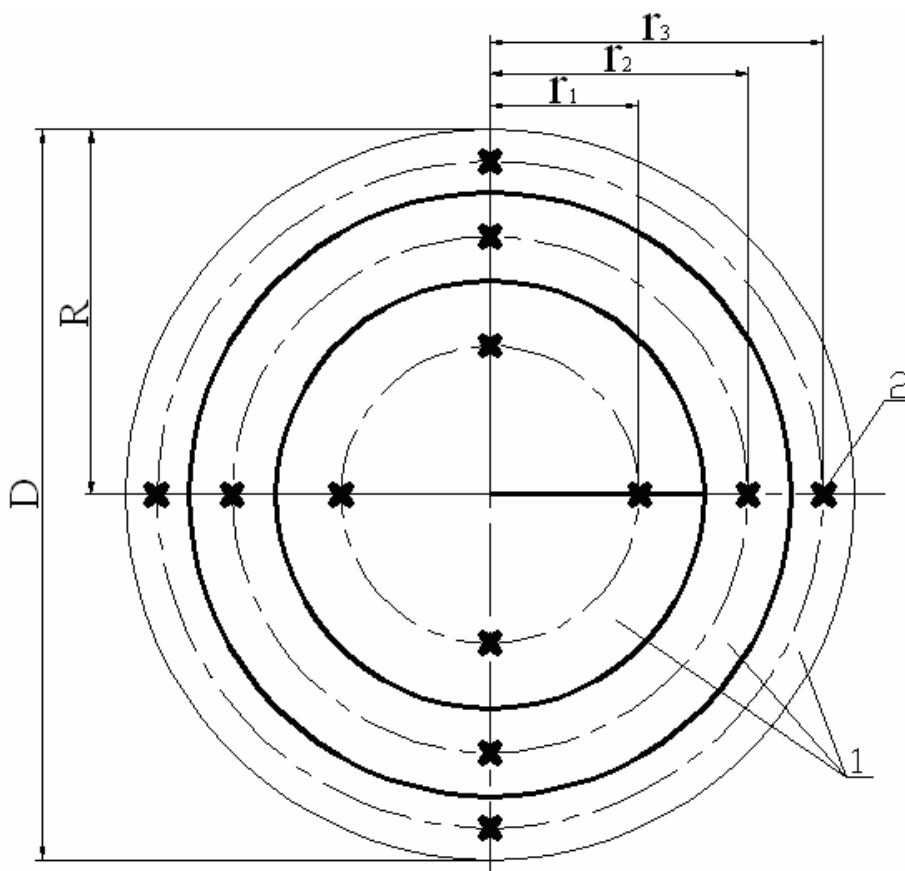


Рис. 2.1. Деление поперечного сечения воздуховода на кольца, равновеликие по площади

Лабораторная работа № 3

Потери на трение в цилиндрических трубах

1. Цель работы

Экспериментальное определение коэффициента гидравлического сопротивления λ .

2. Содержание работы

При работающем вентиляторе определяют полные давления в горизонтальном воздуховоде в двух сечениях, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Определяют разность полных давлений и коэффициент гидравлического сопротивления λ .

3. Теоретическая часть

3.1. Сопротивление трения

При движении жидкости (или газа) по трубопроводу (воздуховоду) возникают силы сопротивления, в результате чего частицы жидкости, воздуха, прилегающие к поверхности трубопровода (воздуховода), тормозятся. Это торможение благодаря вязкости передается следующим слоям.

При этом скорость движения частиц по мере удаления их от оси постепенно уменьшается.

Равнодействующая сила сопротивления T направлена в сторону, противоположную движению, и параллельна направлению движения (рис. 3.1).

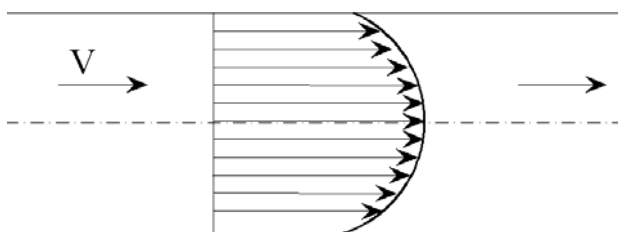


Рис. 3.1

Это и есть сила гидравлического трения (сопротивления гидравлического трения). Для преодоления сопротивления трения и поддержания поступательного движения жидкости необходимо, чтобы на жидкость действовала сила, направленная в сторону ее движения и равная силе сопротивления, т.е. необходимо затрачивать энергию. Энергия или напор, необходимые для преодоления сил сопротивления, называется потеряннй энергией или потеряннм напором. Если рассматривается движение воздуха или газа, то говорят о потере давления. Потери давления, затрачиваемые на преодоление сопротивления трения, носят название потерь давления на трение или потерь давления по длине потока.

Потери давления на трение возникают по всей длине воздуховода. При данных геометрических размерах и расходе они зависят от режима течения и состояния поверхности трения. Такую линейную потерю давления на трение в общем виде можно подсчитать по формуле

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{4R} \cdot \frac{\rho V^2}{2}, \text{ Па}, \quad (3.1)$$

где λ - коэффициент сопротивления трения;
 l - длина воздуховода, м;
 R - гидравлический радиус поперечного сечения воздуховода (отношение площади его поперечного F к периметру u), м;
 $\frac{\rho V^2}{2}$ - динамическое давление потока.

Для наиболее распространенного круглого поперечного сечения воздуховода гидравлический радиус будет

$$R = \frac{F}{u} = \frac{\pi d^2 / 4}{\pi d} = \frac{d}{4}, \text{ м}, \quad (3.2)$$

где d - диаметр воздуховода, м.

После подстановки (3.2) в (3.1) получим

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho V^2}{2}. \quad (3.3)$$

Для расчета по полученной формуле воздуховодов не только круглого, но и всякого другого поперечного сечения введено понятие эквивалентного диаметра. Так, для наиболее распространенного прямоугольного поперечного сечения размером $a \times b$ имеем

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{4R} \cdot \frac{\rho V^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{4 \frac{a \cdot b}{2(a+b)}} \cdot \frac{\rho V^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{d_3} \cdot \frac{\rho V^2}{2}. \quad (3.4)$$

Отсюда, при условии равенства скоростей V (а также λ , l , ρ) получим значение эквивалентного диаметра

$$d_3 = \frac{2a \cdot b}{a+b}. \quad (3.5)$$

Однако в этом случае площади поперечных сечений получаются разными. Например, для квадратного поперечного сечения, когда $d_3 = 2a^2 / 2a = a$, действующая площадь a^2 будет больше эквивалентной $\pi d_3 / 4 = 0,785 a^2$, а это означает, что и расходы будут разными.

Если скорости представить в виде расходов, деленных на площади поперечных сечений, то для эквивалентного круглого и прямоугольных поперечных сечений получим

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d_L} \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{L}{\pi d_L^2 / 4} \right)^2 = \lambda \cdot \frac{L}{4ab/2(a+b)} \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{L}{ab} \right)^2. \quad (3.6)$$

Отсюда при условии равенства расходов (а также λ , l и ρ) получим

$$d_L = 1,27 \sqrt{\frac{a^3 b^3}{a+b}}. \quad (3.7)$$

Для точного расчета потерь давления на трение необходимо правильно определять сложный по своей природе коэффициент сопротивления λ , в общем случае зависящий от состояния стенок (относительной шероховатости ε) и режима течения (числа Рейнольдса Re).

3.2. Шероховатость стенок

Труб с абсолютно гладкими поверхностями стенок в природе не существует. Все они в той или иной степени шероховаты. Шероховатость различают по ее величине, а также по характеру неровностей и их распределению. Для стальных воздухопроводов характерна неравномерная шероховатость, обусловленная недостаточной обработкой поверхностей, механическими повреждениями и коррозией.

Средняя высота выступов определяет собой величину абсолютной шероховатости k , а отношение средней высоты выступов к диаметру трубы d – величину – относительной шероховатости, т.е. $\varepsilon = k/d$. В расчетных формулах в качестве абсолютной обычно принимают гидравлическую (эквивалентную) шероховатость, учитывающую не только среднюю высоту выступов, но также их форму и расположение.

Значения этих эквивалентных абсолютных шероховатостей для материалов, используемых при изготовлении воздухопроводов, приведены в табл. 1.

Следует отметить, что в стальных – винтовых трубах коэффициент трения несколько меньше, чем у цельнотянутых. Это можно объяснить совпадением направления небольшого внутреннего шва с частью наблюдаемым винтовым движением потока.

3.3. Режим течения

Течение потока в трубах может быть ламинарным или турбулентным. При ламинарном течении струйки движутся параллельно, обтекая выступы шероховатости плавно, без срывов. Поэтому потери давления на трение не зависят от шероховатости.

При турбулентном режиме преобладают силы инерции, вследствие чего струйки срываются с выступов шероховатости, появляются поперечные составляющие скорости, и поток интенсивно перемешивается. При турбулентном течении потери давления на трение в основном зависят от обмена количества движения беспорядочно движущихся масс воздуха. Они резко возрастают по сравнению с ламинарным режимом течения. При определенных условиях потери зависят также и от шероховатости. При турбулентном движении, однако, около самых стенок сохраняется тончайший ламинарный пограничный слой.

Режим течения потока в соответствии с законами подобия наиболее полно определяется критериям Рейнольдса

$$Re = V \cdot d / \nu ,$$

где V - скорость, м/с;
 d - характерный геометрический размер (для труб - диаметр), м;
 ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Опытами установлено, что в трубах при $Re < 2300$ режим течения потока устанавливается ламинарный, а при больших значениях в связи с накоплением инерционных сил происходит скачкообразный переход к турбулентному режиму течения, причем толщина остающегося ламинарного пограничного слоя уменьшается по мере увеличения числа Re .

Каждый режим течения характеризуется своим полем скоростей. Поле скоростей – это график, выражающий изменение скорости по оси поперечного сечения потока (рис. 3.2). Для круглой трубы в качестве такой оси выбирают её диаметр. При ламинарном течении в круглой трубе поле скорости можно построить в соответствии с уравнением

$$V = V_{\max} \left[1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2 \right], \text{ м/с,} \quad (3.8)$$

где V_{\max} - максимальная скорость потока, м/с;
 y - расстояние от центра до координаты вычисляемой скорости, м;
 r - радиус трубы, м.

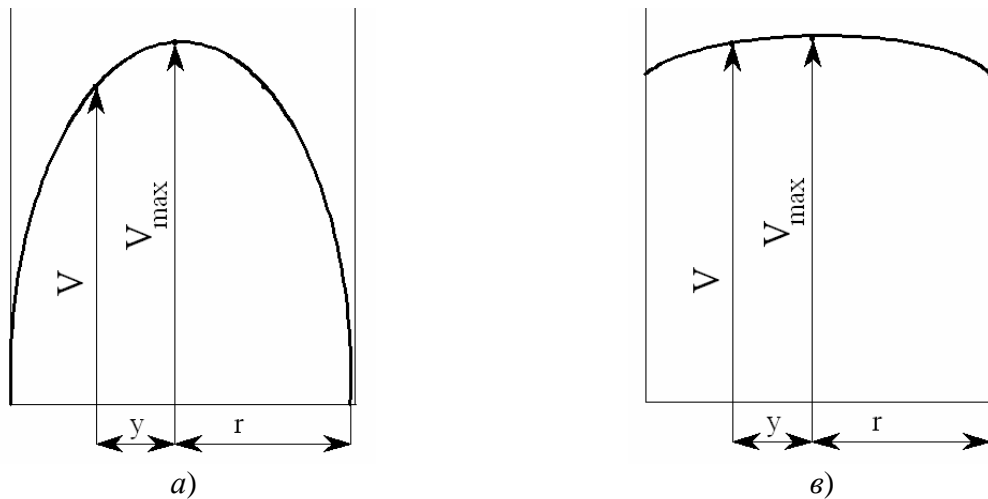


Рис. 3.2. Поля скоростей *a* – при ламинарном движении; *в* – при турбулентном движении

Анализируя уравнение (3.8) следует отметить, что поле скорости характеризуется параболой с максимальным значением скорости на оси трубы ($y = 0$ имеем V_{\max}). У самых стенок скорость равна нулю (при $y = r$ получаем $V = 0$).

Поле скорости при турбулентном течении можно построить в соответствии с приближенным уравнением

$$V = V_{\max} (1 - y/r)^{1/m}.$$

При обычно применяемых значениях знаменателя $m = 7$ поле скорости принимает вид прямоугольника с резким падением скоростей потока вблизи стенок трубы.

3.4. Коэффициент сопротивления трения

Если для какого-либо воздуховода с неизменной шероховатостью определить коэффициент сопротивления трения λ в зависимости от измерения числа Re , то получим график, представленный на рис. 3.3.

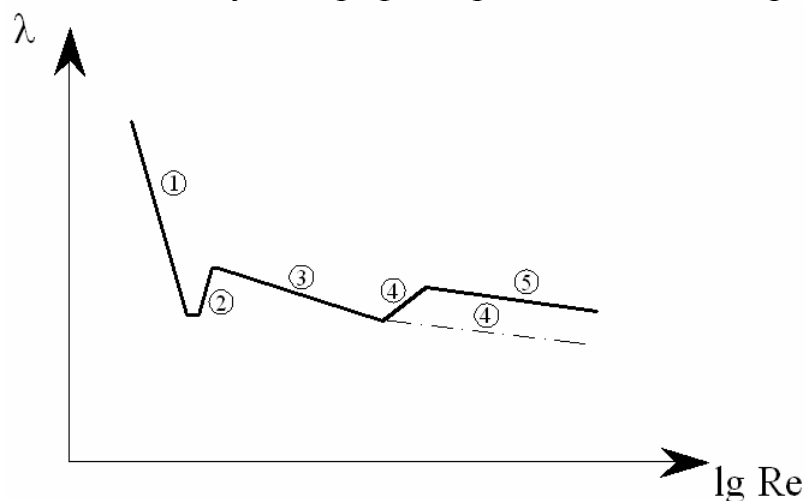


Рис. 3.3. График зависимости от λ от Re

При ламинарном движении (на рис. 3.3, участок 1) коэффициент λ уменьшается в зависимости от увеличения Re . Его можно подсчитать по зависимости

$$\lambda = 64 / Re . \quad (3.9)$$

Подставляем это значение в формулу трения и получим

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho V^2}{2} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho V^2}{2} = \frac{64}{V \cdot d / \nu} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho V^2}{2} = \frac{32 \cdot \nu \cdot l \cdot \rho}{d^2} \cdot V . \quad (3.10)$$

Значит, при ламинарном движении для воздуховодов заданных геометрических размеров ($d = \text{const}$ и $l = \text{const}$) и при неизменных физических константах потока (ν и ρ постоянны) потеря давления пропорциональна первой степени изменения скорости.

При достижении потока критического числа Re (в зависимости от условий входа потока в трубу это число находится в пределах 2000-8000) режим течения начинает быстро скачкообразно изменяться (рис. 3.3, участок 2). Ламинарное течение преобразуется в турбулентное.

Для случая турбулентного течения ввиду сложности явлений до сих пор нельзя дать точного аналитического выражения λ , как это получено для ламинарного течения. При турбулентном движении значение коэффициента трения λ кроме Re может зависеть и от шероховатости стенок.

При малых Re , когда пограничный ламинарный слой покрывает выступы шероховатости, воздуховод работает как гидравлически гладкий (рис. 3.3, участок 3).

Для расчёта гидравлически гладких воздуховодов можно применять формулу Блазиуса

$$\lambda = 0,3164 Re^{-0,25} = \frac{0,3164}{\sqrt{\sqrt{Re}}} . \quad (3.11)$$

Для расчёта аналогичных воздуховодов можно также применять следующие формулы:

Никурадзе

$$\lambda = 60,0032 + 0,221 Re^{-0,237} . \quad (3.12)$$

Шевелева

$$\lambda = 0,25 Re^{-0,225} . \quad (3.13)$$

Мурина

$$\lambda = \frac{1,01}{(\lg Re)^{2,5}} . \quad (3.14)$$

Последнюю формулу рекомендуется применять при условии

$$2000 < Re < \left(\frac{120}{\varepsilon} \right)^{9/8} ,$$

где ε - относительная шероховатость.

При увеличении Re толщина пограничного слоя убывает и может оказаться меньше выступов шероховатости, в связи, с чем возможно возрастание значение λ (рис. 3.3, участок 4). Дальнейшее повышение числа Re , при котором толщина пограничного слоя уменьшается до такого предела, что выступы шероховатости почти полностью открываются, не влияет на изменение коэффициента λ . В этом случае он зависит от шероховатости – воздухопровод работает как гидравлически шероховатый (рис. 3.3, участок 5).

По данным некоторых исследований, проводивших испытание труб с естественной шероховатостью возрастание λ (на участке 4) не наблюдается, а за участком 3 следует участок 4, изображенный на рис. 3.3 индуктором.

Для приближенного расчета гидравлически шероховатых воздухопроводов применяется формула Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \varepsilon^{0,25}.$$

Гидравлически шероховатые воздухопроводы можно также рассчитывать по формуле

Никурадзе

$$\lambda = 1 / \left(1,74 + 2 \lg \frac{1}{\varepsilon} \right)^2. \quad (3.15)$$

Шевелева

$$\lambda = 0,021 / d^{0,3}. \quad (3.16)$$

Мурина

$$\lambda = 1 / \left(1,14 + 2 \lg \frac{1}{\varepsilon} \right)^2. \quad (3.17)$$

Представляет интерес формула А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (3.18)$$

Таблица 3.1. Протокол испытаний

Полное давление $P_{п}$, мм вод. ст, по направлению		Статическое давление $P_{ст}$, мм вод. ст, по направлению		Динамическое давление $P_{дин}$, мм вод. ст, по направлению	
вертикаль- ному	горизонталь- ному	вертикаль- ному	горизонталь- ному	вертикаль- ному	горизонталь- ному
$P_1 =$	$P_1 =$	$P_1 =$	$P_1 =$	$P_1 =$	$P_1 =$
$P_2 =$	$P_2 =$	$P_2 =$	$P_2 =$	$P_2 =$	$P_2 =$
$P_3 =$	$P_3 =$	$P_3 =$	$P_3 =$	$P_3 =$	$P_3 =$
$P_4 =$	$P_4 =$	$P_4 =$	$P_4 =$	$P_4 =$	$P_4 =$
$P_5 =$	$P_5 =$	$P_5 =$	$P_5 =$	$P_5 =$	$P_5 =$
$P_6 =$	$P_6 =$	$P_6 =$	$P_6 =$	$P_6 =$	$P_6 =$
$P_7 =$					
$P_8 =$					
$P_9 =$					
$P_{10} =$					
$P_{11} =$					

3.4. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представлена на рис. 3.4.

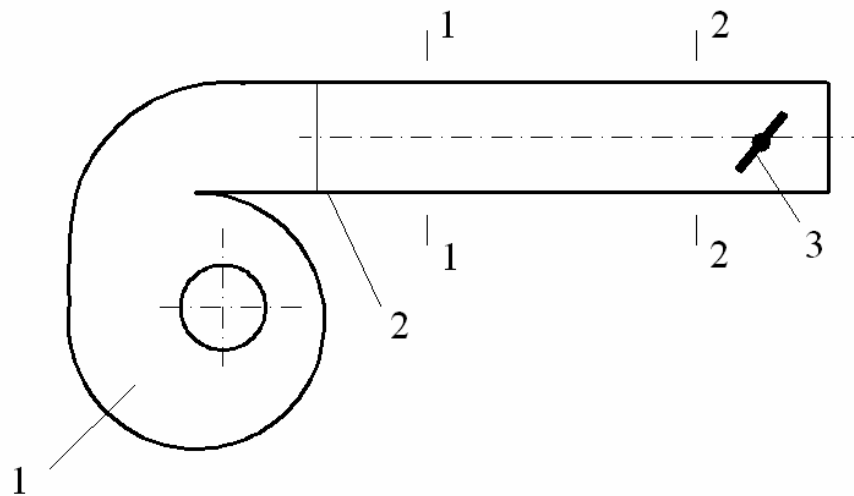


Рис. 3.4. Схема экспериментальной установки

Она состоит из следующих элементов: радиального вентилятора 1, напорного воздуховода 2, дроссельной заслонки 3, трубки Пито-Прандтля, микроманометра.

3.5. Методика проведения эксперимента и обработка результатов

Устанавливают заслонку 3 в положении – «закрыто» полностью. Включают в работу вентилятор 1 и устанавливают заслонку 3 в положение – «открыто полностью». Измеряют полное давление и статическое в сечениях 1 и 2. Для этого в поперечном сечении 1 и 2 в вертикальном направлении измеряют полное, статическое и динамическое давления через каждые 10 мм, считая от оси воздуховода. Затем аналогичную процедуру проводят в горизонтальном направлении поперечного сечения. Результаты измерения записывают в таблицу 3.1.

После измерений производят обработку результатов измерений. Значения давлений в сечениях 1 и 2 находят как среднее арифметическое из ряда измерений

$$P_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^n P_i / n,$$

где P_i - значение давлений в точках измерения;
 n - число измерений.

Затем определяют разность ΔP_n полных давлений в сечениях 1 и 2.

$$\Delta P_n = P_{\text{cp.n1}} - P_{\text{cp.n2}}. \quad (3.19)$$

Согласно формуле (3.3) определяют значения λ

$$\lambda = \frac{\Delta P_n}{l/d \cdot \rho V^2 / 2} = \frac{\Delta P_n \cdot 2 \cdot d}{l \cdot \rho \cdot V^2}, \quad (3.20)$$

где l - расстояние между сечениями 1 и 2, м;
 d - диаметр воздуховода, м;
 ρ - плотность воздуха, кг/м³ (принимают 1,2 кг/м³).

3.6. Содержание отчета

Отчет о выполненной работе включает в себя:

- формулирование цели работы;
- описание лабораторной установки;
- кратное изложение методики проведения эксперимента;
- обработку результатов эксперимента.

3.7. Правила техники безопасности

1. Включение установки в работу производится преподавателем или лаборантом.
2. О всех неисправностях сообщают преподавателю или лаборанту.

Лабораторная работа № 4

Экспериментальное изучение струи

4.1. Цель работы

Изучение опытным путем распределения скоростей потока в поперечном сечении струи на различном расстоянии от места истечения.

4.2. Содержание работы

Воздуходувка создает поток воздуха, вытекающий из насадки. С помощью термоанемометра определяют эпюру скоростей в поперечном сечении струи на различном расстоянии от места истечения.

4.3. Теоретическая часть

В технике имеются потоки, относящиеся к области свободной турбулентности, главная особенность которой – полное отсутствие стенок, ограничивающих течение жидкости или газа.

Рассмотрим свободную затопленную струю. Она возникает при истечении жидкости (газа) из отверстия или насадки. Вследствие турбулентности свободная струя частично смешивается с окружающей её неподвижной жидкостью (газом) и увлекает прилегающие слои жидкости (газа) за собой. Поэтому расход через поперечное сечение струи по мере удаления от источника возрастает.

Под затопленными понимают струи, физические свойства вещества которых одинаковы или мало отличаются от физических свойств среды, в которую они вытекают. Струя воды в воздухе и воздуха в воде – незатопленные струи.

Схема движения жидкости (газа) в затопленной струе показана на рис. 4.1.

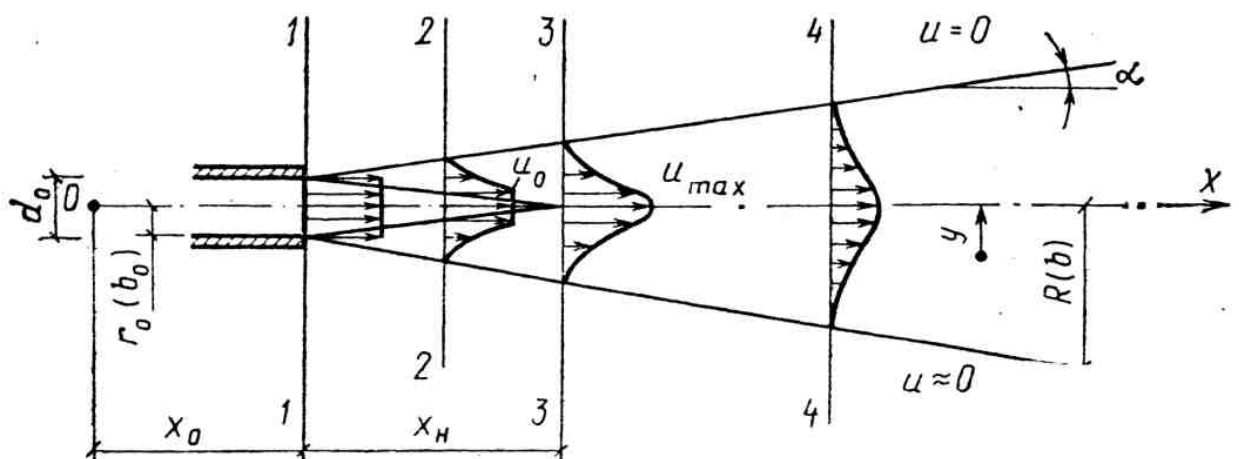


Рис. 4.1. Схема движения свободной затопленной турбулентной струи

Предполагается, что в начальном, или выходном сечении струи величина и направление скорости постоянны по всему сечению. Далее по потоку ядро струи (зона постоянных скоростей) с постоянной скоростью убывает, а с краев образуется область заторможенной жидкости (газа). Эту область называют пограничным слоем струи.

При движении струи толщина ядра течения уменьшается, в то время как толщина пограничного слоя возрастает. На некотором расстоянии от начального сечения ядро течения полностью исчезает. Участок от начального сечения до окончания ядра струи, т.е. до переходного сечения, называется начальным участком. За переходным сечением идет основной участок, в котором область постоянных скоростей отсутствует. В основном участке струя с ростом продольной координаты X по прежнему расширяется, а скорость на оси струи убывает.

Границы струи с невозмущенной средой для круглой струи диаметром d_0 представляют собой коническую поверхность с вершиной в полюсе O струи. Угол расширения струи α обычно равен $12^\circ - 14^\circ$ и зависит от степени турбулентной струи на выходе из насадка.

4.4. Описание лабораторной установки

Установка для исследования движения свободной затопленной турбулентной струи состоит из пылесоса, сопла в виде сужающегося усеченного конуса, ЛАТРа, координатника, термоанемометра, линейки.

4.5. Методика проведения эксперимента и обработка результатов

При выполнении лабораторной работы необходимо определить:

- 1 - длину начального участка струи;
- 2 - изменение осевой скорости на основном участке струи;
- 3 - изменение скорости в поперечном сечении струи на основном участке струи и построить эпюру скоростей.

Для решения этих задач применяют координатник и термоанемометр. Датчик термоанемометра устанавливают на оси струи и проводят измерение скорости, сначала, в плоскости истечения струи и потом на расстоянии 0,1 м; 0,2 м; 0,3 м... и до тех пор, пока осевая скорость не станет равной подвижности воздуха в помещении.

В произвольном поперечном сечении основного участка струи измеряют термоанемометром скорость воздуха на оси и далее на расстоянии по оси $y = 0,1; 0,2; \dots$ до места, где скорость равна подвижности воздуха в помещении.

4.6. Содержание отчета

1. Формулирование цели работы.
2. Описание лабораторной установки.
3. Изложение методики проведения эксперимента.
4. Обработка результатов эксперимента.
5. Вывод по результатам эксперимента.

4.7. Перечень контрольных вопросов

1. Прибор для измерения скорости потока.
2. Основной участок струи.
3. Начальный участок струи.
4. Ядро струи.
5. Полнос струи.

4.8. Правила техники безопасности

1. Включение установки в работу производит преподаватель или лаборант.
2. О всех неисправностях следует сообщать преподавателю или лаборанту.
3. О всех неисправностях сообщать лаборанту или преподавателю.

Лабораторная работа № 5

Экспериментальная интерпретация уравнения Бернулли

5.1. Цель работы

Экспериментальное определение потерь напора при движении жидкости в трубопроводе.

5.2. Содержание работы

Заполняют водой расходный бак, питающий резервуар, в котором поддерживают постоянный уровень воды с помощью регулятора уровня. Открывают вентиль и вода из резервуара течет по трубопроводу. Измеряют напор в двух сечениях и по их разности определяют потери напора.

5.3. Теоретическая часть

Рассмотрим течение реальной жидкости, для которой свойственна вязкость. Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу. Все реальные жидкости обладают определенной вязкостью, которая проявляется в виде внутреннего трения при относительном перемещении смежных частиц жидкости. При течении реальной жидкости силы, которые определяются вязкими напряжениями, производят работу, превращающуюся в тепловую энергию.

Рассмотрим баланс энергии массы жидкости в произвольном канале между двумя сечениями. При этом считаем, что движение жидкости установившееся, скорость в любой точке каждого сечения одинаковы, тепло и механическая энергия не подводятся и не отводятся.

Согласно закону сохранения энергии сумма механической и внутренней энергии единицы массы движущейся жидкости равна постоянному значению. При течении жидкости от одного поперечного сечения трубопровода к другому происходит процесс необратимого превращения части механической энергии во внутреннюю (тепловую). Поэтому, при отсутствии подвода тепла или механической энергии извне вдоль потока механическая энергия потока снижается, а внутренняя энергия увеличивается.

Между двумя сечениями потока происходит работа сил вязкости. Если отнести эту работу к единице массы, веса или объема движущейся жидкости, то это называется потерями механической энергии или гидравлическими потерями. Если отнести эту работу к единице веса, то гидравлические потери называют потерями напора h .

Проведём произвольную плоскость сравнения О-О (рис. 5.1). Расстояние от центров тяжести сечений 1 и 2 до плоскости сравнения О-О обозначим через Z_1 и Z_2 . Обозначим в сечениях 1 и 2 давления, соответственно, P_1 и P_2 .

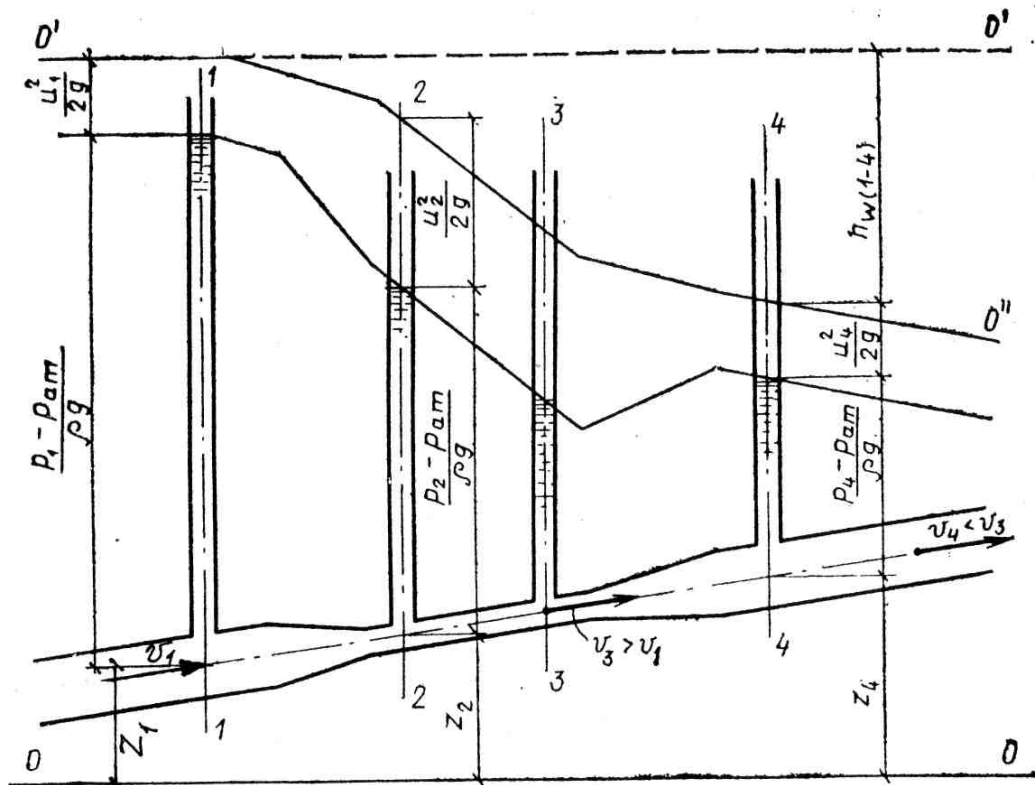


Рис. 5.1. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли для струйки вязкой жидкости

Механическая энергия потока в сечении 1, отнесенная к единице веса будет

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где U_1 - скорость потока в сечении 1, м/с;
 ρ - плотность потока, кг/м³;

а в сечении 2

$$Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g}, \quad (5.2)$$

где U_2 - скорость потока в сечении 2, м/с.

Уравнение баланса механической энергии между сечениями 1 и 2 имеет вид

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + h, \quad (5.3)$$

где h - потери напора (м) при движении потока от сечения 1 до сечения 2.

Если отнести механическую энергию и её потери к единице массы, то получим

$$g Z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{U_1^2}{2} = g Z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{U_2^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho}, \quad (5.4)$$

где ΔP - потери давления (Па) при движении потока от сечения 1 до сечения 2.

Если отнести механическую энергию и ее потери к единице объема, то получим

$$\rho g Z_1 + P_1 + \frac{\rho U_1^2}{2} = \rho g Z_2 + P_2 + \frac{\rho U_2^2}{2} + \Delta P. \quad (5.5)$$

В этих уравнениях $\frac{\Delta P}{\rho}$ и ΔP - работа сил вязкости, отнесенная к единице, соответственно, массы и объема.

5.4. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5.2. Она состоит из резервуара с водой 1, поднятого на некоторую высоту, что создаёт движение воды по горизонтальному трубопроводу 2. Давление воды в сечениях «а» и «в» измеряется с помощью стеклянных трубок 3 и 4. Слив воды происходит в сливной бак 5. Вентиль 6 предназначен для изменения скоростного режима в трубопроводе 2. Расходный бак 7 предназначен для питания водой резервуара 1. Регулятор 8 обеспечивает постоянный уровень воды в резервуаре 1.

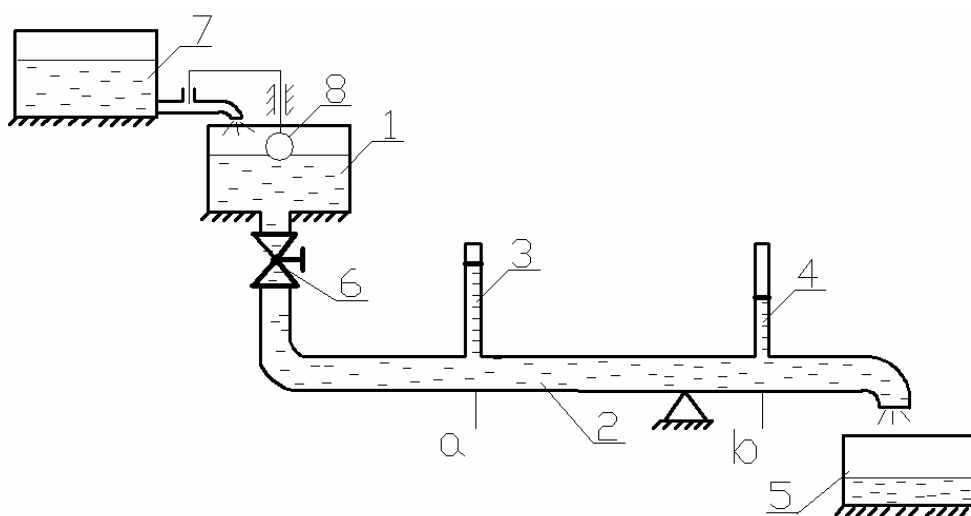


Рис. 5.2. Экспериментальная установка: 1 – резервуар; 2 – трубопровод; 3, 4 – стеклянные трубки; 5 – сливной бак; 6 – вентиль; 7 – расходный бак; 8 – поплавок-регулятор уровня

5.5. Методика проведения эксперимента и обработка результатов

Предварительно заливают воду в расходный бак 7, вентиль 6 при этом закрыт. Уровень воды в резервуаре 1 повышается и, когда достигает максимального значения, то регулятор уровня 8 прекратит перетекание воды из расходного бака 7 в резервуар 1. Далее уровень воды в резервуаре 1 остается постоянным. Это обеспечивает регулятор уровня 8.

Открывают вентиль 6, устанавливая необходимый режим течения воды в трубопроводе 2. Измеряют высоту столба воды в стеклянных трубках 3 и 4. Разность уровней в трубках 3 и 4 определяет потери напора h между сечениями «а» и «в». Пересчитывают потери напора h на потери давления – ΔP по формуле

$$\Delta P = \rho g h, \text{ Па}, \quad (5.6)$$

где ρ - кг / м³;

ΔP - Па;

$g = 9,8$ м/с²;

h - м.

С помощью вентиля 6 создают 5 режимов течения. По результатам эксперимента графически строят зависимость потерь напора « h » от скорости потока в трубопроводе.

5.6. Содержание отчета

1. Формулирование цели работы.
2. Описание экспериментальной установки.
3. Краткое изложение методики проведения эксперимента.
4. Обработка результатов эксперимента.
5. Вывод по результатам эксперимента.

5.7. Перечень контрольных вопросов

1. Измерение напора.
2. Определение потерь напора (давления) на определенном участке.

5.8. Правила техники безопасности

1. Включение установки в работу производит преподаватель или лаборант.
2. О всех неисправностях следует сообщить преподавателю или лаборанту.

Библиографический список

1. Поляков В. В., Скворцов Л. С. Насосы, вентиляторы. М.: Стройиздат, 1990. 336с.
2. Калинушкин М. П. Вентиляторные установки. М.: Высшая школа, 1979. 222 с.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат. 1987. 414 с.

План выпуска учеб.-метод. документ. 2015 г., поз. 32

Публикуется в авторской редакции

Подписано в свет 28.12.2015.

Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 1,0. Объем данных 0,7 Мбайт

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
<http://www.vgasu.ru>, info@vgasu.ru