

УЧЕБНИКИ



А. В. Толстых
В. В. Пенявский
Ю. Н. Дорошенко

ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ

УДК 697 (075.5)
ББК 38.762я73

Серия «Учебники ТГАСУ» основана в 2013 году

Толстых, А.В. Отопление и вентиляция [Текст] : практикум / А.В. Толстых, В.В. Пенявский, Ю.Н. Дорошенко. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. – 186 с.
ISBN 978-5-93057-777-8

В практикуме представлены основные методы экспериментальных исследований гидравлических, аэродинамических и тепловых процессов, связанных с движением потоков жидкости и газа в трубопроводах и аппаратах систем отопления и вентиляции. Дан необходимый для расчетов справочный и нормативный материал, представленный в соответствующих разделах лабораторных работ и библиографии.

Практикум рекомендован Учебно-методическим советом ТГАСУ. Предназначен для подготовки бакалавров по профилю подготовки «Теплогазоснабжение и вентиляция» направления 08.03.01 «Строительство». Может быть полезен при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Вентиляция», «Отопление» и «Механика жидкости и газа».

УДК 697 (075.5)
ББК 38.762я73

Рецензенты:

д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение» ТГАСУ **Н.А. Цветков;**

д.ф-м.н., профессор, зав. кафедрой «Минералогия и геохимия» ТГУ **Д.В. Лычагин.**

ISBN 978-5-93057-777-8

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2017
© Толстых А.В., Пенявский В.В.,
Дорошенко Ю.Н., 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1. Лабораторный вентиляционный стенд	8
1.1. Назначение стенда.....	8
1.2. Описание лабораторного стенда.....	8
1.3. Порядок работы с измерительными приборами.....	12
1.3.1. Манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01А.....	12
1.3.2. Термометр цифровой Testo-108.....	22
2. Лабораторная работа № 1 «Измерение расхода воздуха в вентиляционных системах различными методами»	23
2.1. Измерение расхода по скорости потока на расстоянии $y_{0,233}$ от стенки круглого воздуховода.....	23
2.2. Измерение расхода по перепаду давления на длине трубы.....	24
2.3. Порядок проведения работы.....	27
2.4. Обработка опытных данных.....	28
2.5. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	33
2.6. Вопросы для контроля знаний.....	34
3. Лабораторная работа № 2 «Измерение коэффициентов гидравлического трения в воздуховодах вентиляционных систем»	35
3.1. Зависимости для обработки опытных данных.....	35
3.2. Порядок проведения работы.....	37
3.3. Обработка опытных данных.....	39
3.4. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	44
3.5. Вопросы для контроля знаний.....	45
4. Лабораторная работа № 3 «Измерение поля скоростей в воздуховодах»	46
4.1. Основные характеристики турбулентного течения в трубах.....	46
4.2. Формулировка метода равновеликих колец.....	49
4.3. Порядок определения профиля скорости.....	51
4.4. Порядок проведения работы.....	52
4.5. Обработка опытных данных.....	56
4.6. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	62
4.7. Вопросы для контроля знаний.....	63
5. Лабораторная работа № 4 «Определение коэффициентов местных сопротивлений»	64

5.1. Общие сведения о местных сопротивлениях.....	64
5.2. Сопротивления в приточных тройниках.....	65
5.3. Порядок проведения работы.....	67
5.4. Обработка опытных данных.....	74
5.5. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	87
5.6. Вопросы для контроля знаний.....	88
6. Лабораторная работа № 5 «Построение характеристик сети при последовательном и параллельном соединении воздухопроводов».....	89
6.1. Характеристика сети.....	89
6.2. Порядок проведения работы.....	93
6.3. Обработка опытных данных.....	96
6.4. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	103
6.5. Вопросы для контроля знаний.....	103
7. Лабораторная работа № 6 «Построение характеристики вентилятора».....	104
7.1. Характеристики вентиляторов.....	104
7.1.1. Виды аэродинамических характеристик вентиляторов.....	104
7.1.2. Законы подобия вентиляторов.....	105
7.2. Давление вентилятора, работающего в сети.....	106
7.3. Порядок проведения работы.....	107
7.4. Обработка опытных данных.....	109
7.5. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	114
7.6. Вопросы для контроля знаний.....	115
8. Лабораторная работа № 7 «Определение тепловой характеристики и потерь давления воздухонагревателя при различных режимах работы системы вентиляции».....	116
8.1. Канальные воздухонагреватели.....	116
8.2. Порядок проведения работы.....	118
8.3. Обработка опытных данных.....	123
8.4. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	126
8.5. Вопросы для контроля знаний.....	127
9. Комплект учебно-лабораторного оборудования «Тепловые и гидравлические характеристики приборов отопления».....	128
9.1. Назначение стенда.....	128
9.2. Описание лабораторного стенда.....	128

9.3. Описание программного обеспечения.....	130
10. Лабораторная работа № 8 «Определение коэффициента теплопередачи отопительных приборов и труб системы отопления».....	135
10.1. Определение коэффициента теплопередачи отопительного прибора.....	135
10.2. Порядок проведения работы.....	137
10.3. Обработка опытных данных.....	140
10.4. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	146
10.5. Вопросы для контроля знаний.....	147
11. Лабораторная работа № 9 «Определение гидравлического сопротивления отопительных приборов».....	148
11.1. Сопротивление по длине.....	148
11.2. Местные гидравлические сопротивления.....	150
11.3. Порядок проведения работы.....	152
11.4. Обработка опытных данных.....	153
11.5. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	157
11.6. Вопросы для контроля знаний.....	158
12. Лабораторная работа № 10 «Сравнение эффективности отопительных приборов при различных режимах работы системы отопления».....	159
12.1. Эффективность приборов отопления.....	159
12.2. Методика теплового расчёта отопительных приборов.....	163
12.3. Порядок проведения работы.....	166
12.4. Обработка опытных данных.....	169
12.5. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	171
12.6. Вопросы для контроля знаний.....	172
13. Лабораторная работа № 11 «Определение коэффициента затекания в прибор отопления при наличии замыкающего участка».....	173
13.1. Осевые и смещенные замыкающие участки в системах отопления.....	173
13.2. Порядок проведения работы.....	177
13.3. Обработка опытных данных.....	178
13.4. Правила оформления отчета о лабораторной работе.....	182
13.5. Вопросы для контроля знаний.....	182
Заключение.....	184
Список рекомендуемой литературы.....	185

1. ЛАБОРАТОРНЫЙ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ СТЕНД

1.1. Назначение стенда

Лабораторный стенд предназначен для проведения лабораторных работ по изучению элементов систем вентиляции, способов регулирования и контроля параметров в вентиляционных системах. Стенд позволяет провести измерения полей скоростей в воздуховодах круглого и квадратного сечений с использованием напорных трубок модификации Пито, расхода воздуха различными методами, а также коэффициентов гидравлического трения и коэффициентов местных сопротивлений. Кроме того, стенд позволяет снять аэродинамические характеристики отдельных участков вентиляционной сети и вентилятора.

1.2. Описание лабораторного стенда

Общий вид стенда, схема вентиляционной системы и размещение приборов на рабочем столе показаны на рис. 1, 2, 3. Стенд состоит из металлической рамы с полимерным покрытием, на которой смонтированы воздуходувка, система трубопроводов, стол с измерительными приборами, система нагрева воздуха, датчики температуры, штуцера для подключения датчиков давления, регулируемые задвижки. На выходе из вентиляционных каналов установлены жалюзийные пластиковые решетки круглой формы.

Воздуховоды имеют разные формы и размеры – круглые, прямоугольные. В комплекте есть и гибкий круглый воздуховод.

Вентилятор и канальный нагреватель установлены в системе труб и закреплены на раму.

Заслонки имеют дополнительные уплотнители. Закрытие и открытие заслонок осуществляется с помощью поворотов специальных рычагов.



Рис. 1. Общий вид стенда

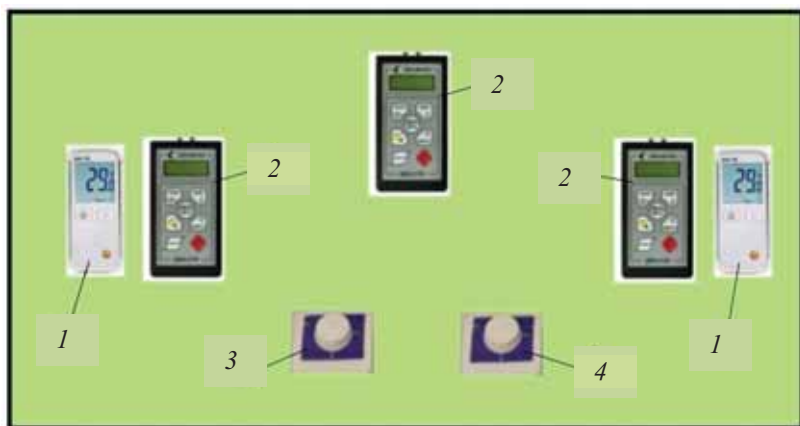


Рис. 2. Размещение приборов на рабочем столе:

- 1 – термометр цифровой;
- 2 – дифференциальный манометр;
- 3 – регулятор частоты вращения рабочего колеса вентилятора;
- 4 – регулятор мощности воздушонагревателя

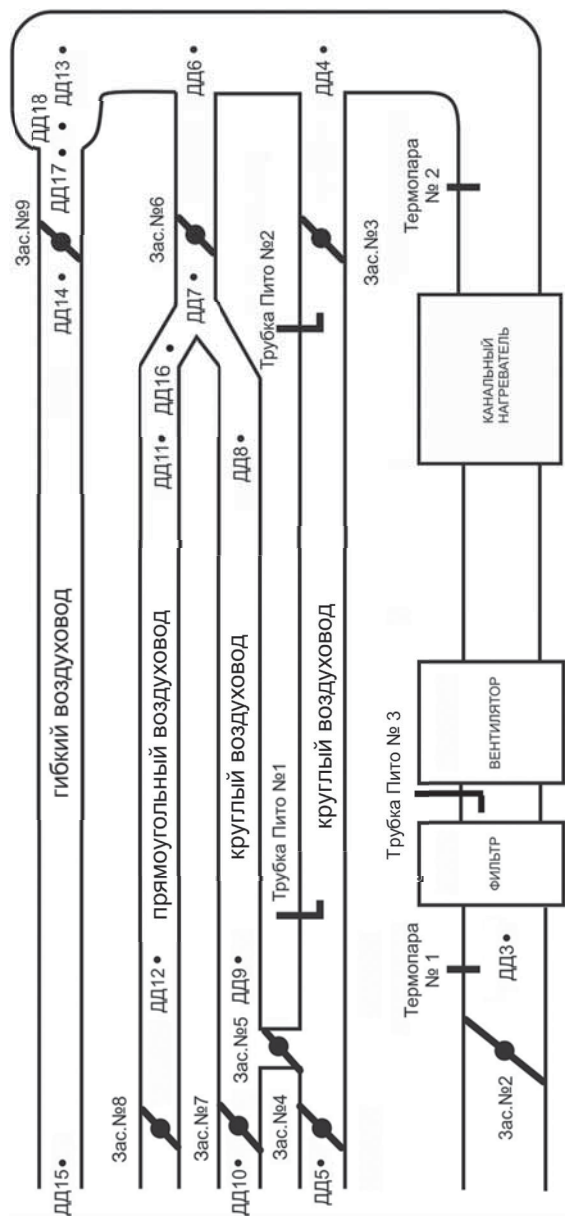


Рис. 3. Схема вентиляционной системы, смонтированной на лабораторном стенде:
Зас. № 3–9 – заслонки; ДД3–ДД18 – штуцера для подключения датчиков давления

На рабочем столе (рис. 2) размещены следующие приборы:

- дифференциальные манометры – 2 шт.;
- термометры цифровые – 2 шт.;
- регулятор частоты вращения рабочего колеса вентилятора (используется для изменения расхода и скорости воздушного потока);
- регулятор мощности воздушонагревателя (используется для изменения температуры воздуха).

Напряжение питания стенда – 220 В.

Схема стенда представлена на рис. 3. Конструкция стенда позволяет задавать и определять температуру, давление и расход воздуха, протекающего по трубопроводам, установленным на стенде.

Подогрев воздуха осуществляется канальным электрическим нагревателем.

Температура воздуха измеряется с помощью термоэлектрического преобразователя с вторичным прибором – цифровым индикатором.

Давление измеряется с помощью дифференциальных манометров ДМЦ-01А с цифровой индикацией показаний, которые можно подключать к специальным штуцерам (ДДЗ–ДД18).

Расход воздуха определяется по скоростному напору, измеряемому с помощью трубок модификации Пито, и по перепадам давления, определяемым по показаниям дифференциальных датчиков давления.

Конструкция системы трубопроводов и заслонок позволяет осуществлять движение воздуха по различным схемам с уменьшением и увеличением гидравлического сопротивления потоку с помощью изменения степени открытия заслонок. Предусмотрена также возможность работы системы вентиляции в условиях последовательного и параллельного соединения воздухопроводов.

1.3. Порядок работы с измерительными приборами

1.3.1. Манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01А

Описание прибора. Прибор ДМЦ-01А, технические характеристики которого приведены в табл. 1, предназначен для измерения давления, разрежения и разности давлений неагрессивных, негорючих газов. Прибор может использоваться для проверки фильтрующих устройств, контроля перепада давления в чистых помещениях, подпора воздуха в системах противопожарной защиты и дымоудаления, аэродинамических исследований и т. п.

Прибор выполняет следующие функции: автоматическая установка нуля, измерение давления (разрежения), разности давлений, удержание показаний на дисплее, расчет среднего, минимального и максимального значений, а также выбор единиц измерения: Па или мм вод. ст.

Таблица 1

Технические характеристики манометра ДМЦ-01А

№ п\п	Величина	Значение
1	Диапазон измерений, Па (мм вод. ст.)	0...500 (0...50)
2	Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений Δ , Па (мм вод. ст.), не более	$\pm 1,5$ ($\pm 0,15$)
3	Предел допускаемой вариации показаний, Па (мм вод. ст.), не более	предела основной абсолютной погрешности – Δ
4	Предел допускаемой дополнительной погрешности при отклонении температуры окружающего воздуха на каждые 5 °С от нормальной (20 $\pm$ 5 °С), Па (мм вод. ст.), не более	0,1 (0,01)

№ п/п	Величина	Значение
5	Цена единицы наименьшего разряда индикации, Па (мм вод. ст.)	0,1 (0,01)
6	Допустимая перегрузка по перепаду давления, Па (мм вод. ст.), не более	5000 (500)
7	Номер версии встроенного ПО	1,09
8	Время непрерывной работы без подзарядки аккумуляторной батареи, без подсветки дисплея, ч, не менее	8
9	Время установления рабочего режима, с, не более	100
10	Номинальное напряжение питания, В	8,4
11	Потребляемая мощность, ВА, не более	1,0
12	Габаритные размеры, мм, не более	165 × 85 × 35
13	Масса в комплекте, кг, не более	1,0
14	Средний срок службы, лет, не менее	6
15	Содержание драгметаллов	нет

Устройство и работа. Прибор состоит из четырех основных функциональных частей: полупроводникового датчика дифференциального давления, аналого-цифрового преобразователя, микропроцессора и панели управления работой прибора. Прибор собран в пластмассовом корпусе, на лицевой стороне которого расположены жидкокристаллический дисплей и панель со следующими функциональными кнопками (рис. 4) управления работой прибора:

кнопка  – фиксация показаний;

кнопка  – установка нуля;

- кнопка  – включение/выключение режима усреднения;
- кнопка  – выбор единиц измерения;
- кнопка  – включение/выключение подсветки дисплея;
- кнопка  – включение/выключение прибора;
- кнопка  – включение/выключение режима автоматической установки нуля.

На торцевой панели расположены штуцеры для подключения к источникам давления. Штуцер « + » предназначен для подключения полного давления, штуцер « – » – статического, а также разъем, обозначенный надписью «RS-232», – для подключения интерфейсного кабеля.

На боковой панели расположен разъем для подключения зарядного устройства (ЗУ) или сетевого блока питания.

На задней панели расположена подставка для размещения прибора на ровной горизонтальной поверхности. Под крышкой, прикрученной двумя винтами, имеется отсек для аккумуляторной батареи.

Прибор работает следующим образом: измеряемое давление, приложенное к полупроводниковому датчику, преобразуется в электрический сигнал, величина которого пропорциональна измеряемому давлению. Этот сигнал преобразуется аналого-цифровым преобразователем и передается в микроконтроллер, который в соответствии с заложенной в память градуировочной

характеристикой, выводит на дисплей прибора значения измеренного давления.

Питание прибора осуществляется от аккумуляторной батареи, установленной в батарейном отсеке, или от сетевого блока питания (опция).

Подготовка к работе. При подготовке к работе необходимо расположить прибор в горизонтальном или вертикальном (но не боковом) положении, или опереть его на подставку, расположенную на задней панели. К штуцерам прибора необходимо герметично подключить источник давления (например, трубку напорную), используя соединительные шланги необходимой длины.

При этом полное давление подается в штуцер, обозначенный знаком « + », а статическое давление подается в штуцер, обозначенный знаком « – ». Для подключения необходимо использовать резиновые, поливинилхлоридные или силиконовые шланги с внутренним диаметром 4–5 мм.

ВНИМАНИЕ! Шланги должны быть герметичными и плотно надеты на штуцеры прибора. Следует избегать резкого локального сдавливания и перегиба с малым радиусом шлангов, соединяющих источник давления (напорную трубку) и прибор. Нарушение данного требования приводит к резкому скачку давления и разрыву мембраны датчика, что влечет за собой снятие прибора с гарантийного обслуживания.

Перед началом работы необходимо зарядить аккумуляторную батарею. При необходимости подключить прибор с помощью интерфейсного кабеля (опция) к ПК.



Включить прибор нажатием кнопки

На дисплее последовательно появятся короткие сообщения:

ДМЦ-01А

ВЕРСИЯ: 1.09

ЭКО-ИНТЕХ
www.eco-intech.com



Рис. 4. Дифференциальный манометр цифровой ДМЦ-01А

Затем прибор начнет прогрев и тестирование.
На дисплее будет индцироваться сообщение:

Прогрев: 59

При этом на экране производится обратный отсчет оставшегося времени прогрева, а также высвечивается индикатор заряда аккумулятора.

По окончании прогрева прибор автоматически установит нуль и на дисплее появится:

Установка нуля
ПОДОЖДИТЕ

Затем на дисплее появится следующее сообщение:

0.00 мм
H₂O или 0.0 Па



Кнопка  – выбрать необходимую единицу измерений: мм водяного столба (мм H₂O) или Паскаль (Па).

Прибор готов к проведению измерений.

Работа прибора. Измерения полного, статического и динамического давлений производятся в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5. Показания давления в Па (мм H₂O) выводятся на дисплей, при этом можно зафиксировать измеренное

значение давления на дисплее, нажав кнопку



В верхней строке дисплея появится надпись «ФИКС»:

0.0 ФИКС Па



Повторное нажатие кнопки  позволит продолжить измерения.

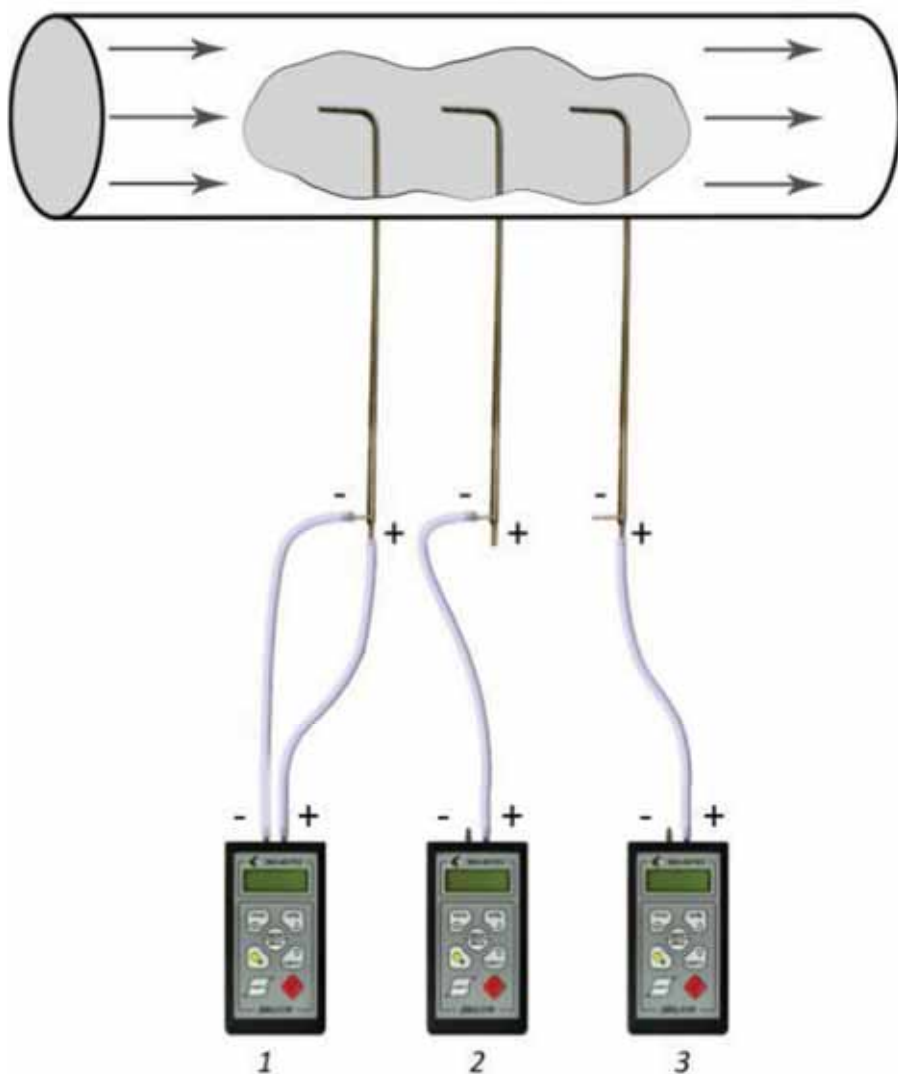
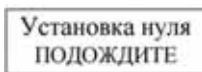


Рис. 5. Схема подключения трубки модификации Пито:
 1 – измерение динамического давления, скорости потока; 2 – измерение статического давления; 3 – измерение полного давления

При проведении длительных измерений для компенсации дрейфа нуля полупроводникового датчика, который происходит из-за неизбежного изменения ориентации прибора в пространстве и окружающей температуры, рекомендуется через каждые 10–15 минут работы производить установку нуля, нажав кнопку



. После сообщения прибор продолжит измерения.

Прибор оснащен встроенным электромагнитным клапаном для переключения измерительного тракта полупроводникового датчика давления между источником измеряемого давления и атмосферным давлением, по которому прибор корректирует нуль. В связи с этим нет необходимости отключать прибор от источника давления (отсоединять шланги от штуцеров прибора или источника) при установке нуля.

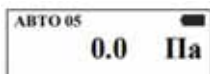
Для уменьшения влияния дрейфа нуля на погрешность измерений в приборе предусмотрен также режим автоматической установки нуля с предустановленными временными интервалами срабатывания электромагнитного клапана при стационарном использовании прибора.



Режим включается нажатием кнопки и имеет следующие интервалы: 1 минута, 5 минут, 10 минут, 30 минут. Выбор временного интервала между автоматической установкой нуля осуществляется последовательными нажатиями кнопки



. При этом в верхней строке дисплея появляется условное обозначение включенного режима, соответственно «АВТО 01», «АВТО 05», «АВТО 10», «АВТО 30». Например:



При этом непосредственно в момент установки нуля, на дисплее дополнительно отобразится слово «НУЛЬ» и значения давления не будут изменяться:



После автоматической установки нуля прибор перейдет в режим измерения с выбранным ранее временным интервалом автоматической установки нуля.

При выключенном режиме автоматической установки нуля условные обозначения в верхней строке дисплея отсутствуют. Установка нуля должна производиться в ручном режиме нажа-



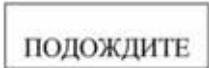
тием кнопки .

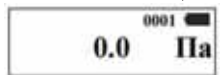
Выбранное значение временного интервала, а также единицы измерения, запоминаются и активируются автоматически при последующих включениях прибора.

Расчет среднего, максимального/минимального измеренного значения. Для расчета среднего, максимального и минимального значений измеренного давления необходимо нажать



кнопку .

После сообщения  на дисплее отобразится:

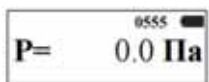


Цифрами в верхней строке отображается количество измерений.

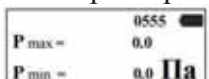
Через необходимый промежуток времени, после нажатия



кнопки , на дисплее отобразится рассчитанное среднее значение давления:



После повторного нажатия кнопки  на дисплее отобразятся максимальное и минимальное значения измеренной величины за время работы в этом режиме:



Если кнопка  не была нажата, то по достижении 9999 измерений прибор прекратит усреднение и автоматически выведет на дисплей среднее значение давления.

Для продолжения работы необходимо два раза нажать



кнопку

Подсветка дисплея. Включение и выключение подсветки

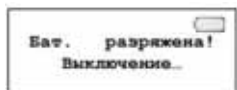


дисплея производится нажатием кнопки  на лицевой панели прибора. Прибор также снабжен функцией автоотключения подсветки. Подсветка выключается через 15 с после включения.

Питание прибора. Питание прибора осуществляется от аккумуляторной батареи типа GP20R8H с номинальным напряжением 8,4 В, емкостью 200 мАч или от сетевого блока питания (опция).

Полный заряд аккумулятора индицируется значком «». Приближение к полной разрядке аккумулятора индицируется значком «» и периодическим коротким звуковым сигналом. Полная разрядка аккумулятора индицируется значком «»,

непрерывным звуковым сигналом и следующим сообщением на дисплее:



После этого прибор автоматически выключится и его необходимо поставить на зарядку.

Для зарядки аккумуляторной батареи необходимо вставить штекер зарядного устройства в разъем для ЗУ, находящийся на боковой панели прибора, и подключить зарядное устройство к сети переменного тока напряжением 220 В, 50 Гц. Время полного заряда аккумулятора составляет около 16 часов, но не более 24 часов.

1.3.2. Термометр цифровой Testo-108

Термометр цифровой Testo-108 (рис. 6) предназначен для измерения и цифровой индикации температуры жидкостей, паров и газов. По защищенности от воздействия пыли и воды термометр имеет исполнение IP67.



Рис. 6. Общий вид термометра Testo-108

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Цель лабораторной работы заключается в приобретении студентами навыков практического измерения расхода в воздуховодах вентиляционных систем. В качестве примера на лабораторном стенде измерение расхода в рамках задания настоящей лабораторной работы осуществляется в воздуховодах круглого и прямоугольного поперечных сечений с использованием трубки модификации Пито по скорости потока на расстоянии от стенки, равном $0,233$ радиуса круглого воздуховода, и путем измерения перепада давления на длине гидравлически гладкого воздуховода. При одинаковых режимах течения воздуха в системе вентиляционного стенда проводится сравнение результатов измерения расходов предлагаемыми методами.

2.1. Измерение расхода воздуха по скорости потока на расстоянии $y_{0,233}$ от стенки круглого воздуховода

Если турбулентный поток в круглой гидравлически гладкой трубе стабилизированный, то его скорость $u_{0,233}$ в точке любого сечения трубы на расстоянии $y_{0,233} = 0,233(d/2)$ от стенки равна средней скорости v [1]. Скорость потока $u_{0,233}$ по измерениям трубкой модификации Пито динамического давления равна (м/с):

$$u_{0,233} = \xi \sqrt{\frac{2\Delta P_{0,233 \text{ дин}}}{\rho_v}}, \quad (2.1)$$

где ξ – калибровочный коэффициент трубки; $\rho_{0,233}$ – плотность воздуха в точке измерения скорости $u_{0,233}$, которую можно найти по соответствующему статическому давлению;

$\Delta P_{0,233 \text{ дин}}$ – динамическое давление, измеряемое трубкой модификации Пито (№ 1 или № 2, рис. 3) в точке $y_{0,233}$ от стенки при присоединении трубок дифференциального манометра ДМЦ-01А, согласно схеме, показанной на рис. 5 (1).

При измерении динамического давления $\Delta P_{0,233 \text{ дин}}$ необходимо настроить манометр ДМЦ-01А так, чтобы он показывал величину измеряемого давления в Па (см. п. 1.2.2, С. 12).

Плотность ρ_v определяется по формуле (кг/м^3):

$$\rho_v = 3,457 \cdot 10^{-3} \frac{P_A}{T_B} = 3,457 \cdot 10^{-3} \frac{13,6 \cdot 9,81 \cdot B}{273 + t_B}, \quad (2.2)$$

где B – барометрическое давление во время проведения измерений (можно использовать данные ближайшей метеостанции), мм рт. ст.; t_B – температура воздуха, определяемая по показаниям цифровых термометров Testo-108, °С.

Калибровочный коэффициент ξ напорной трубки Пито, согласно эксплуатационному паспорту, во всем диапазоне измерения скоростей составляет 0,95–1,05. Предел допускаемой относительной погрешности определения коэффициента преобразования напорной трубки для всего диапазона скоростей – δ , %, не более ± 3 %. Таким образом, при выполнении данной лабораторной работы можно принять, что $\xi = 1$.

2.2. Измерение расхода по перепаду давления на длине трубы

В гидравлически гладких трубах любого поперечного сечения на стабилизированном участке при турбулентном течении коэффициент трения λ одинаков для одних и тех же значений числа Рейнольдса, выраженного через гидравлический диаметр,

$$\text{Re} = \frac{d_r u}{\nu}, \quad (2.3)$$

где $d_r = 4S/\Pi$; S – площадь поперечного сечения канала; Π – смо-

ченный периметр; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, зависящий от температуры и определяемый по графику (рис. 7).

$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$

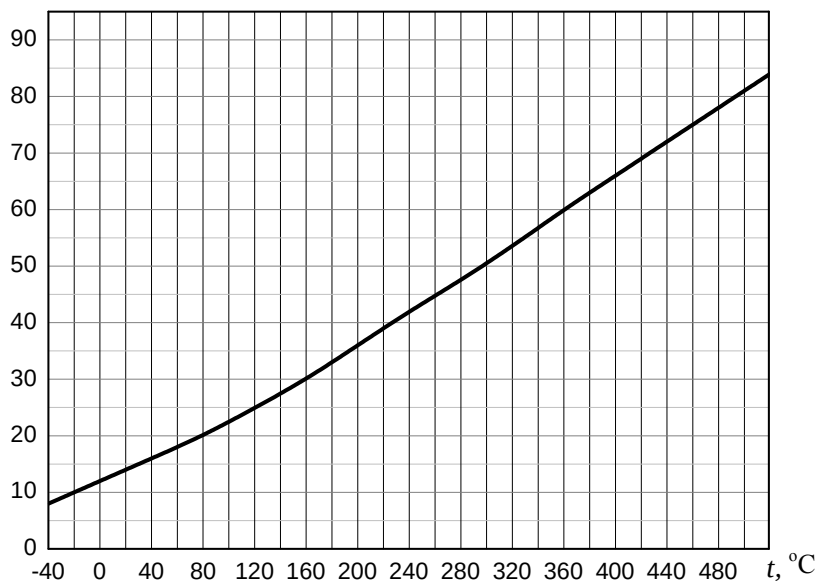


Рис. 7. Зависимость коэффициента кинематической вязкости сухого воздуха при $P = 101325 \text{ Па}$ от температуры

Для круглой трубы $S = \pi d^2/4$, $\Pi = \pi d$, следовательно, $d_r = d$. Для трубы прямоугольного поперечного сечения $a \times b$ – $S = ab$, $\Pi = 2(a + b)$ и $d_r = 2ab/(a + b)$.

Для гидравлически гладких труб в широком диапазоне чисел Re коэффициент трения для турбулентного течения можно описать обобщенной зависимостью вида

$$\lambda = \frac{A}{Re^m}. \quad (2.4)$$

Для чисел $Re < 10^5$ $A = 0,3164$, $m = 0,25$ (закон Блазиуса).