



ОРГАНАМ ГОСУПРАВЛЕНИЯ
СИСТЕМОЙ ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

А. Н. Пехота

А. Б. Крутилин

И. М. Золотарёва

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Пособие

Минск
БНТУ
2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

А. Н. Пехота
А. Б. Крутилин
И. М. Золотарёва

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Пособие

для студентов очной и заочной форм обучения специальностей
1-08 01 01-05 «Профессиональное обучение (строительство)»,
1-27 01 01-04 «Экономика и организация производства
(коммунальное и водное хозяйство)»,
1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов»,
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2024

УДК 696/697(075.8)

ББК 38.762

ПЗ1

Р е ц е н з е н т ы:

заведующий кафедрой энергетики БГАТУ

канд. техн. наук *А. М. Кравцов,*

заведующий научно-исследовательским отделом

ограждающих конструкций РУП «Институт БелНИИС»

О. В. Сапоненка

Пехота, А. Н.

ПЗ1 Инженерные сети и оборудование. Методические указания к выполнению лабораторных работ: пособие для студентов очной и заочной форм обучения специальностей: 1-08 01 01-05 «Профессиональное обучение (строительство)» (дисциплина «Инженерные сети и оборудование»), 1-27 01 01-04 «Экономика и организация производства (коммунальное и водное хозяйство)» (дисциплина «Системы теплогазоснабжения и вентиляции»), 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» (дисциплина «Теплогазоснабжение и вентиляция»), 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» / А. Н. Пехота, А. Б. Крутилин, И. М. Золотарёва. – Минск : БНТУ, 2024. – 101 с.

ISBN 978-985-31-0025-9.

В пособии представлены методические указания и порядок выполнения экспериментальной и расчетных частей работы, приведены основные теоретические сведения по темам лабораторных работ; дано описание лабораторных установок, методик и порядка выполнения работ; приведены краткие сведения из области теплотехнических измерений физических величин и оценки погрешностей эксперимента.

УДК 696/697(075.8)

ББК 38.762

ISBN 978-985-31-0025-9

© А. Н. Пехота, А. Б. Крутилин,
И. М. Золотарёва

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	4
ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	7
Лабораторная работа № 1	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ СЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ НАРУЖНОЙ СТЕНЫ ЗДАНИЯ	38
Лабораторная работа № 2	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.....	51
Лабораторная работа № 3	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	64
Лабораторная работа № 4	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЕССТЕСТВЕННОЙ КАНАЛЬНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	88
Приложение А	89
Приложение Б.....	90
Приложение В	94
Приложение Г.....	98
Приложение Д.....	99

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторные работы предусматривают закрепление знаний, полученных на лекциях, приобретение практических навыков по измерению и контролю основных технологических параметров и теплотехнических измерений физических величин, обеспечивающих нормируемые показатели необходимого тепловлажностного и воздушного режимов помещения.

В ходе изучения студентами дисциплины предусмотрено ознакомление с конструкцией контрольно-измерительных приборов, лабораторное исследование основных положений теории и процесса переноса теплоты через ограждение, параметров и характеристик влажного воздуха, воздухопроницаемости различных строительных материалов и определение характеристик влияющих на производительность вытяжной вентиляции.

Лабораторный практикум содержит описание четырех лабораторных работ. Варианты работ и время, необходимое для их выполнения, выбираются ведущим преподавателем в зависимости от общего количества часов, отведенного учебным планом конкретной специальности.

Каждая работа содержит тему, цель, необходимые теоретические сведения, применяемые приборы, материалы, инструменты и оборудование, ход выполнения, содержание и порядок защиты отчета.

При проведении лабораторных работ следует соблюдать общие правила техники безопасности в лабораториях кафедры. Перед началом выполнения работ студенты проходят инструктаж по технике безопасности (с обязательной регистрацией в журнале). Вводный (повторный) инструктаж проводит преподаватель, ведущий лабораторный занятия, или заведующий лабораториями.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ, студенту необходимо ознакомиться с содержанием методики и порядком проведения лабораторной работы. Приступать к выполнению лабораторной работы без разрешения преподавателя, проводящего занятие, запрещается.

Студент должен знать правила пожарной безопасности и выполнять их.

Студент допускается к выполнению лабораторной работы только после изучения соответствующих методических указаний, ознаком-

ления с литературой по курсу, заготовки бланка отчета и собеседования с преподавателем.

Отчет по выполненной лабораторной работе должен включать следующие разделы: цель работы, краткое описание основных понятий и применяемых формул, схему экспериментальной установки и ее краткое описание, обработку результатов измерений, анализ полученных результатов и выводы. Рисунки и таблицы должны выполняться технически грамотно и аккуратно. Рукописный текст выполняется почерком, который должен читаться и быть каллиграфически понятным. Буквы должны быть достаточного размера для прочтения текста без использования увеличительных приспособлений.

Основные правила техники безопасности

Необходимо соблюдать следующий порядок работы в лаборатории:

1. К работе в лабораториях допускаются лица, прошедшие вводный (повторный) инструктаж.

2. Лица, допущенные к работе в лабораториях, должны соблюдать правила внутреннего распорядка БНТУ, расписание учебных занятий и графики отработки лабораторных работ.

3. Соблюдать правила охраны труда и пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения.

4. При неисправности оборудования, приспособлений и инструментов необходимо прекратить работу и немедленно сообщить лаборанту, преподавателю или заведующему лабораторией.

5. В процессе выполнения лабораторной работы соблюдать правила пользования средствами индивидуальной защиты и правила личной гигиены, содержать в чистоте рабочее место.

Категорически запрещается: проводить работы без разрешения руководителя или в его отсутствие; включать и выключать лабораторные установки без разрешения лаборанта и (или) преподавателя; вносить изменения в схему установки и переставлять приборы, агрегаты и другое оборудование; прикасаться к токоведущим частям, которые находятся или могут находиться под напряжением; производить переприсоединение электрических проводов на лабораторных установках; касаться нагретых поверхностей, движущихся частей оборудования.

При обнаружении неисправностей или повреждения лабораторного оборудования студент должен немедленно сообщить об этом лаборанту и (или) преподавателю.

Курение и использование открытого огня в лаборатории «СТРОГО ЗАПРЕЩЕНО!»;

В случае пожара следует немедленно принять меры по ликвидации возгорания.

В случае необходимости следует вызвать пожарную команду по телефону 101 или 112, скорую помощь – по телефону 103.

ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Понятие об измерениях и средствах их воспроизводства

Измерением называется процесс получения опытным путем числового соотношения между величиной и некоторым значением, принятым за единицу сравнения.

В зависимости от назначения и от предъявляемой к ним точности измерения делятся на лабораторные и технические.

Лабораторные измерения – это, как правило, многократно повторяемыми измерения, полученные в лабораторных условиях с помощью средств измерения повышенной точности, показания которых исключают систематические погрешности путем введения известных поправок. При этом необходимо иметь в виду, что даже при нормированных лабораторных условиях проведения измерений их точность не может быть выше точности поверки применяемых средств измерений.

Технические измерения – это совокупность операций, выполняемых с помощью технического средства, передающего единицу величины, которую можно сопоставить с измеряемой величиной ее единицы и получить значение величины.

Под принципом измерения понимается совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Под методом измерений понимается совокупность приемов использования принципов и средств измерений. По способу получения численных значений искомой величины измерения разделяют на два вида: прямые и косвенные.

К *прямым измерениям* относят результаты, полученные непосредственно из опытных данных (при этом значение искомой величины определяют с использованием измерительных приборов или путем непосредственного сравнения с мерами). При выполнении прямых измерений, получаемый результат выражается непосредственно в тех же единицах, что и измеряемая величина.

К *косвенным измерениям* относятся результаты, полученные на основании прямых измерений нескольких других величин, связанных с искомой определенной зависимостью.

В общем виде искомая величина y может быть определена представленной функциональной зависимостью:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (1)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – значения величин, измеряемых прямым способом, например, определение расхода газа по перепаду давления на сужающем устройстве.

Косвенные измерения используют в технике и научных исследованиях, когда искомую величину невозможно или сложно измерить непосредственно путем прямого измерения или в тех случаях, когда косвенное измерение позволяет получить более точные результаты.

Для воспроизводства измеряемых величин используют измерительные приборы, которые в науке и инженерии принято называть средствами измерения.

Средствами измерения называют технические средства, которые применяются при измерениях, имеют нормированные метрологические характеристики.

Основными видами средств измерения являются меры (мерники), измерительные приборы и преобразователи.

Мера – средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Меры применяются человеком с древнейших времен и задолго до появления первых измерительных приборов. Понятие меры ранее ассоциировалось с восприятием этой единицы как физической величины. Так в качестве первых видов меры использовались части тела человека, например, ладонь, ступня, локоть. С развитием торговых отношений начался переход к общеобязательным мерам и их реализации в материальной форме, так появились первые однотипные линейки, гири, песочные часы и т. д. Мера позволяет сравнивать одни объекты с другими и определять их количество в числовой форме. Единицы измерения классифицируются по определенным параметрам, таким как длина, масса, время, энергия и т. д.

Измерительным прибором называют средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, обработки и непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы бывают аналоговые и цифровые, показывающие и самопишущие.

Измерительным преобразователем называют средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной ин-

формации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки, но не поддающееся непосредственному восприятию наблюдателем.

Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, называется точностью измерения.

Погрешность измерения – отклонение результата измерения, т. е. разница между полученным и истинным значениями.

Погрешность измерения вызывается несовершенством средств измерения, непостоянством условий наблюдения и субъективными ошибками наблюдателя. На практике вместо истинного значения приближенно принимают действительное значение (находится экспериментально). Погрешности показаний средств измерения принято делить на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютная погрешность измерительного прибора определяется разностью между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины:

$$\Delta y = y_n - y, \quad (2)$$

где y_n – показания прибора,

y – действительное значение измеряемой величины;

Относительная погрешность измерительного прибора определяется отношением абсолютной погрешности к действительному значению физической величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y}. \quad (3)$$

Приведенная погрешность измерительного прибора определяется отношением абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению:

$$\delta = \frac{\Delta y}{y_n} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где y_n – нормирующее значение.

Нормирующее значение принимается равным:

– для средств измерения с односторонней шкалой – по верхнему пределу измерений;

– для средств измерения с двухсторонней шкалой – арифметической сумме модулей верхнего и нижнего пределов измерений;

– для средств измерения с безнулевой шкалой – разности верхнего и нижнего пределов, т. е. диапазону измерений.

Погрешности средств измерения принято разделять на основные и дополнительные.

Основной погрешностью средства измерения называется его погрешность при использовании в нормальных условиях. Под *пределом допускаемой основной погрешности* понимают наибольшую (без учета знака) основную погрешность средства измерения, при которой оно может быть признано годным и допущенным к применению. Эту погрешность называют допускаемой основной погрешностью. Под *нормальными условиями* применения средств измерения понимают условия, при которых величины, называемые влияющими (температура воздуха, влажность, атмосферное давление и т. д.) имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. В качестве нормальных значений или нормальной области значений влияющих величин принимают:

$$t_{\text{окр. среды}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad P_{\text{атм}} = 101,3 \text{ кПа};$$

относительная влажность – 60 %.

Дополнительной называют погрешность, возникающую при отклонении влияющих величин за пределы, установленные для нормальных их значений.

Класс точности средства измерения является обобщенной его характеристикой, определяемой пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими влияющими на точность свойствами средств измерения, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерения. Чаще всего класс точности принимают численно равным допускаемой приведенной основной погрешности, выражаемой в процентах:

$$K = \frac{Dy}{y_n} \cdot 100 \% = d. \quad (5)$$

Погрешности измерения в зависимости от характера причин, вызывающих их появление, принято разделять на случайные, систематические и грубые.

Под *случайной* погрешностью понимают погрешность измерения, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Они могут быть количественно определены с помощью теории вероятностей.

Под *систематической* погрешностью понимают погрешность измерения, остающуюся постоянной (аддитивная составляющая) или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины (мультипликативная составляющая). Если систематическая погрешность известна, то она может быть исключена путем внесения поправки.

Под *грубой* погрешностью понимается погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. Причина грубой погрешности – ошибки наблюдателя или неисправности устройств измерения.

Измерение температуры

Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Она является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Согласно молекулярно-кинетической теории температурой называется условная статическая величина, прямо пропорциональная средней кинетической энергии молекул. Она не поддается непосредственному измерению. О значении температуры судят по изменению некоторых физических свойств при изменении величины средней кинетической энергии поступательного движения молекул вещества, например, по изменяющемуся объему или давлению жидкости или газа, по величине электродвижущей силы, возникающей на спае двух разнородных металлов и т. д. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры, подобно тому, как созданы эталоны экстенсивных величин (длина, масса и др.).

Средство измерения температуры называют *термометром*. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу, которая обеспечивает функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства.

Для построения первых температурных шкал (Фаренгейт, Реомюр, Цельсий) выбирали две опорные (или реперные) точки t_1 и t_2 , представляющие собой температуры фазового равновесия химически чистых веществ. Разность температур $t_2 - t_1$ называли *основным температурным интервалом*. При построении шкалы основывались на допущении линейной связи между температурой t и расширением объема жидкости V . В шкалах Фаренгейта, Реомюра и Цельсия точке плавления льда t_1 соответствовали $+32^\circ$; 0° и 0° , а в точке кипения воды t_2 температура равна 212 ; 80 и 100° . Основной интервал $t_2 - t_1$, в этих шкалах делится соответственно на $N = 180$; 80 и 100 равных частей, и $1/N$ часть каждого из интервалов называют градусом Фаренгейта – $t^\circ F$, градусом Реомюра – $t^\circ R$ и градусом Цельсия – $t^\circ C$. Таким образом, градус не является единицей измерения, а представляет собой единичный промежуток – масштаб шкалы.

Для пересчета температуры из одной указанной шкалы в другую используют следующее соотношение:

$$t^\circ C = 1,25 t^\circ R = \left(\frac{5}{9}\right) \cdot (t^\circ F - 32). \quad (6)$$

Существует огромное множество различных устройств для измерения температуры. По способу взаимодействия средства измерения со средой при измерении температуры подразделяют на термометры контактные и бесконтактные. По физическим параметрам измерения термометры подразделяются на жидкостные, механические, электронные, оптические и газовые и др.

Жидкостные стеклянные термометры

Действие жидкостных термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термометрического вещества и оболочки, в которой оно находится (термометрического стекла или кварца). Такой термометр состоит из стеклянного баллона 1 , капиллярной трубки 3 , запасного резервуара 4 и термометрического вещества 2 (рис. 1, *а* и *б*). Баллон и капиллярная трубка частично заполняются термометрическим веществом, а свободное пространство в капиллярной трубке и запасном резервуаре заполняется инертным газом или находится под вакуумом (при измерении температур ниже 373 К).

Принцип работы жидкостных термометров *расширения* основан на использовании различных коэффициентов теплового расширения термометрической жидкости. В качестве рабочих веществ чаще всего применяют химически чистую ртуть, которая не смачивает стекло и остается жидкой в широком интервале температур (от 238 до 875 К).

Кроме ртути используются термометры с применением термометрической жидкости в виде: этилового и метилового спирта, толуола, эфира, пентана, гелия и др. Жидкостные термометры являются местными показывающими приборами, точность показаний которых во многом зависит от способа установки. Неправильная установка термометра приводит к большой потере тепла в окружающую среду и может вызвать занижение показаний на 10–15 %.



Рис. 1. Жидкостные стеклянные термометры:
а – палочный; б – технический со сложной шкалой;
в – технические термометры

Стеклянные жидкостные термометры имеют разное исполнение и весьма широкое применение в быту, технике и на производстве (рис. 1, в), как правило, с допустимой погрешностью измерения не более одного деления шкалы.

Все виды термометров подлежат периодической поверке в аккредитованных метрологических лабораториях. Поверка показаний жидкостных термометров производится в термостатах путем сличения с образцовыми (эталонными) приборами более высокого класса.

Механические термометры

Принцип действия механических (манометрических) термометров основан на изменении давления рабочего термометрического вещества (жидкости или газа) в замкнутом объеме (термосистеме) при постоянном объеме за счет изменения температуры.

Устройство манометрического термометра представлено на рис. 2. Капиллярная трубка 2 соединяет термобаллон 1 с деформационным элементом 3, закрепленным на держателе 4 который под воздействием изменяющейся температуры меняет длину деформационного стержня, приводя в действие исполнительный механизм, состоящий тяги 5 взаимодействующей через компенсатор 9. Посредством зубчатого рычага 6 и пружины обратной связи 7 осуществляется воздействие на указатель 8. Термобаллон представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей.

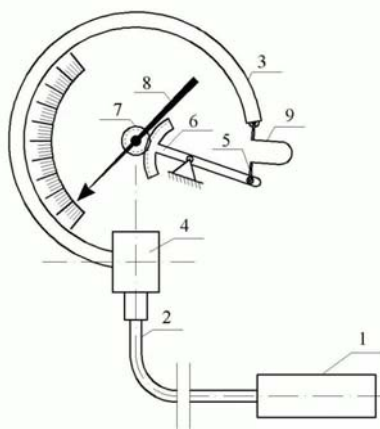


Рис. 2. Схема устройства механического (манометрического) термометра

Капилляр представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром 0,1–0,5 мм, а его длина может быть от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Цена деления шкалы технических термометров расширения находится в пределах от 0,5 до 10 °С. Для лабораторных термометров цена деления шкалы находится в пределах от 0,1 до 2 °С, а в термометрах с повышенной точности – от 0,01 до 0,1 °С. Допускаемая погрешность технических термометров не должна превышать цены деления шкалы.

Биметаллические термометры

Действие биметаллического термометра основано на свойстве теплового расширения и сжатия твердых тел. В термометрах такого типа в качестве чувствительного элемента используются пластинки

из двух слоев разнородных металлов или сплавов, обладающих различными коэффициентами теплового расширения. Чаще всего применяют биметаллические пластинки, состоящие из латуни (70 % Cu и 30 % Zn) и инвара (64 % Fe и 36 % Ni).

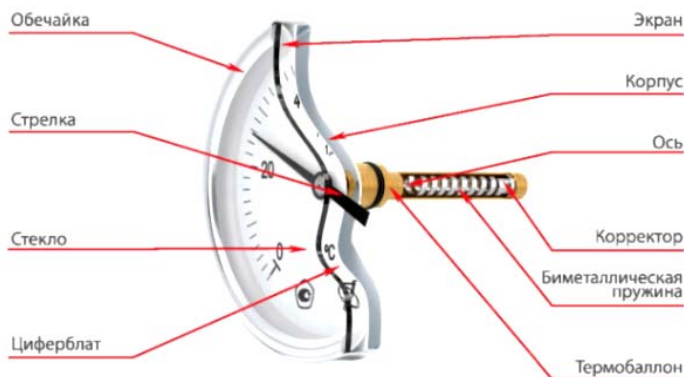


Рис. 3. Схема устройства биметаллического термометра

Биметаллический термометр (рис. 3) имеет стрелку и шкалу, с которой ведется отсчет показаний. Трубка биметаллического термометра служит в качестве контейнера, куда помещается стержень и биметаллический элемент, совмещенный со стрелкой. При нагреве биметаллическая пластинка деформируется. По величине деформации судят о величине температуры, так как при ее повышении стрелка будет двигаться пропорционально. Биметаллические термометры находят широкое применение в промышленной технике, так как способны противостоять температурам за пределами диапазона измерений.

Электронные термометры

Для измерения температуры с помощью электронных термометров используют современные устройства, работающие на различных физических принципах. Широкое применение находят такие измерительные приборы как термометры сопротивления, термоэлектрические термометры, пирометры, тепловизоры.

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на эффекте Зеебека (1821 г.), сущность которого состоит в следующем: если спаи двух разнородных проводников в электрической цепи поместить в среду с неоднородным температурным полем, то в цепи возникает разность электрических потенциалов ΔE , пропорциональная разности температур $T_1 - T_2$.

$$\Delta E = \alpha \cdot (T_1 - T_2), \quad (7)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. На рис. 4 представлено устройство стандартного термоэлектрического термометра. В жесткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 2 с надетыми на них изоляционными бусами 3. Чувствительный элемент 2 может касаться дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического порошка 4. К термоэлектродам в головке 7, доступ осуществляется с помощью крышки 8. Удлинительные провода через штуцер 9 для прокладки кабеля подсоединяются винтами на розетке 6. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нем с помощью штуцера 5.

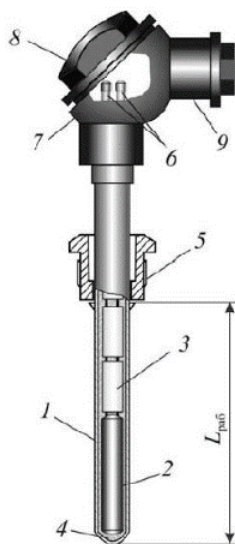


Рис. 4. Устройство термометра сопротивления

Работа термоэлектрических термометров основана на возникновении термо-ЭДС в двух разнородных проводниках при различных температурах мест их соединения. В качестве термоэлектродов может быть использовано множество различных металлов и сплавов из них. Например, для получения термопары выбирают два материала, которые образуют термопару с определенными термоэлектрическими свойствами. Соединенные между собой концы термоэлектродов, погружаемые в измеряемую среду, называют рабочим спаем. Наибольшее распространение получили термопары, приведенные в табл. 1.

Некоторые характеристики термопар

Наименование термопар	Условное обозначение градуировки	Верхний предел длительного применения термопары, К
Платино-родиевая	ПП	1 573
Хромель-алюмелевая	ХА	1 273
Хромель-копелевая	ХК	873

Иногда для измерения температуры применяют нестандартные термопары: медь-константановые, железо-константановые и другие, которые при низких температурах имеют большую величину термо-ЭДС. При использовании этих термопар следует иметь в виду, что величина возникающей термо-ЭДС сильно зависит от однородности материала термоэлектродов. Выпускаемые промышленностью медные, константановые и железные провода могут иметь различный химический состав и однородность по длине. Поэтому при использовании указанными термопарами перед началом измерений (после изготовления) их необходимо калибровать.

Термоэлектрические термометры имеют широкий диапазон измерения: от -200 до $+2\ 200$ °С (кратковременно до $+2\ 500$ °С). Они могут измерять температуру в точке объекта или среды, отличаются достаточно высокой точностью и стабильностью характеристик преобразования, но несколько уступают по этим показателям термометрам сопротивления.

Проверка термоэлектрических термометров, производится с целью определения ее погрешности и годности к применению. В качестве вторичного прибора для измерения величины термо-ЭДС используются милливольтметры и различного типа потенциометры.

Для точечного бесконтактного измерения температуры используется пирометр. Это устройство обеспечивает измерение температуры тел и сред разного рода (на основе измерения мощности теплового излучения объектов в диапазоне инфракрасного излучения, а также в области видимого света). Теоретически верхний предел измерения температуры пирометрами излучения не ограничен, но в современных приборах он составляет не более $3\ 500$ °С.

По классификации пирометры делятся на оптические, цветовые и радиационные.

Оптические пирометры визуально определяют, как правило, без использования специальных устройств, температуру нагретого тела, путем сравнения его цвета с цветом эталонной накаливаемой электрическим током металлической нити в специальных измерительных лампах накаливания.

Радиационные пирометры оценивают температуру посредством пересчитанного показателя мощности теплового излучения. Если пирометр измеряет в широкой спектральной полосе излучения, то такой пирометр называют пирометром полного излучения.

Цветовые пирометры (мультиспектральные, спектрального отношения) позволяют измерить температуру объекта, основываясь на результатах сравнения его теплового излучения в различных участках спектра.

По температурному диапазону пирометры делятся на низкотемпературные и высокотемпературные. По способу исполнения подразделяются на переносные и стационарные. Вне зависимости от классификации, пирометры могут снабжаться дополнительными источниками питания, а также средствами передачи информации и связи с компьютером или специализированными устройствами.

Также для бесконтактного измерения температуры различных объемных объектов широкое применение находят тепловизоры. Принцип работы этого средства измерения основан на определении температуры по тепловому излучению объекта. Функционально тепловизор определяет широкий диапазон значений температуры и преобразовывает эти данные в визуальную картину (термограмму) распределения тепловых полей по поверхности объекта в реальном времени.

Тепловое излучение от исследуемого объекта через оптическую систему тепловизора передается на приемник, представляющий собой неохлаждаемую матрицу ячеек (термоэлектрических детекторов), которая преобразует тепловое излучение в видеосигнал. Видеосигнал оцифровывается и отображается на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) тепловизора.

В настоящее время тепловизор находит широкое применение в промышленности как один из наиболее точных измерительных приборов бесконтактного измерения температуры и технической диагностики различных объектов контроля.

Области применения тепловизоров: энергетика и энергоаудит; экспертиза и сертификация промышленных объектов на соответствие требованиям безопасности; нефтяная и химическая промышленность; строительство; машиностроение; системы охраны и пожарной безопасности.

Измерение давления

Единицей давления в системе СИ является Паскаль (по имени французского ученого Б. Паскаля (1623–1662 г.)). 1 Паскаль – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м².

Все приборы для измерения давления условно можно классифицировать по следующим признакам: роду измеряемой величины, принципу действия, классу точности.

По роду измеряемой величины приборы подразделяются на:

а) манометры – приборы для измерения положительного избыточного давления (p_m);

б) вакуумметры – приборы для измерения отрицательного избыточного давления (p_b);

в) мановакуумметры – приборы, позволяющие измерять, как положительное избыточное давление, так и отрицательное p_m (p_b);

г) дифференциальные манометры – приборы для измерения разности давлений в двух точках (Δp);

д) барометры – приборы для измерения атмосферного давления (p_0).

По принципу действия приборы для измерения давления подразделяются на следующие виды:

– жидкостные, основанные на гидростатическом принципе действия, то есть измеряемое давление уравновешивается давлением столба жидкости, высота которого определяется непосредственно или путем расчета. Впервые идея измерения давления по величине столба жидкости была высказана итальянским ученым Торричелли в 1640 г., а осуществлена итальянским механиком Вивiani в 1642 г. и французским ученым Паскалем в 1646 г. Жидкостные приборы не утратили своего значения. Это объясняется тем, что принцип действия этих приборов очень прост, они точны, надежны и просты в изготовлении;

– механические, принцип действия которых заключается в том, что под воздействием давления происходит деформация некоторого

упругого элемента. Величина этой деформации служит мерой измеряемого давления. Механические приборы в свою очередь подразделяют на технические и образцовые. *Образцовые* используют для целей поверки, так как они сверяются с эталонными приборами. *Технические* используют непосредственно для измерения давления;

– грузопоршневые манометры, в которых измеряемое давление, действуя на одну сторону поршня, уравнивается внешней силой, приложенной с его противоположной стороны. В качестве уравнивающей силы используют грузы. Масса груза, отнесенная к площади поршня, определяет величину измеряемого давления;

– электрические, принцип действия которых основан на изменении электрических свойств некоторых материалов или каких-либо электрических параметров под воздействием давления;

– комбинированные манометры, принцип действия которых носит смешанный характер.

По классу точности все выпускаемые серийно приборы делятся на классы. *Классом точности прибора* называется основная наибольшая допустимая приведенная погрешность. Установленные классы точности для приборов давления соответствуют следующему ряду: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Жидкостные манометры

Приборы этого типа, благодаря своей простоте, дешевизне и относительно высокой точности измерения, достаточно широко используются при исследовательских и наладочных работах, в лабораторной практике. В жидкостных манометрах давление измеряется по величине столба жидкости, уравнивающего это давление.

В качестве рабочей уравнивающей жидкости используются ртуть, дистиллированная вода, спирт, керосин, толуол. Преимуществом ртути перед другими жидкостями является то, что она при комнатной температуре имеет небольшое давление пара и обладает малой способностью растворять газы. Однако большое поверхностное натяжение ртути приводит к тому, что ее мениск, даже в достаточно широких трубках, склонен к заметному капиллярному понижению, которое в общем может быть учтено с точностью примерно 10 %. На ртутный мениск оказывает заметное влияние при длительном воздействии кислорода. Поэтому при точных измерениях иногда используют приспособ-

собрание (острие Бунзена), которое способствует тому, что при подъеме уровня ртути поверхность ее становится чистой. Поскольку плотность ртути и длина шкалы изменяются с температурой, необходимо обращать внимание на t манометра, чтобы можно было по таблицам пересчитать давление на 0° . Простейшим прибором для измерения небольших давлений является U-образный жидкостный манометр, схема которого представлена на рис. 5. Избыточное давление определяется по формуле:

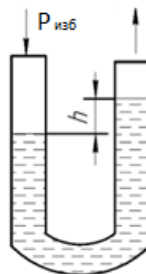


Рис. 5. U-образный жидкостный манометр

$$P_{\text{изб}} = h\rho g, \quad (8)$$

где h – высота столба жидкости, м;

ρ – плотность манометрической жидкости, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Модификацией U-образного манометра является чашечный манометр (рис. 6).

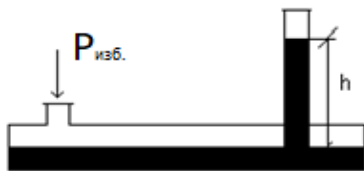


Рис. 6. Чашечный жидкостный манометр

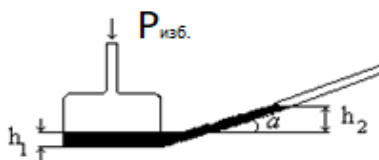


Рис. 7. Дифференциальный манометр с наклонной трубкой

При измерении малых давлений жидкостей и газов, обычно не более $+40$ кПа, используются дифференциальные манометры с наклонной U-образной трубкой и резервуаром (микроманометр). Они бывают с постоянным и переменным углом наклона измерительной трубки (рис. 7). В этом случае избыточное давление определяется по формуле:

$$P_{\text{изб}} = (h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot \sin \alpha, \quad (9)$$

где h_1 – высота уровня жидкости в резервуаре, м;

h_2 – высота уровня в измерительной трубке, считываемая по шкале, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

α – угол наклона трубки, град.

Вследствие большой разности объемов резервуаров и трубки изменение h_1 настолько незначительно, что его не учитывают. Обычно микроманометры заполняются спиртом. Микроманометры с постоянным углом наклона измерительной трубки называются тягонапорометрами.

Большей точности отсчетов можно добиться применением U-образных манометров с двумя жидкостями (рис. 8).

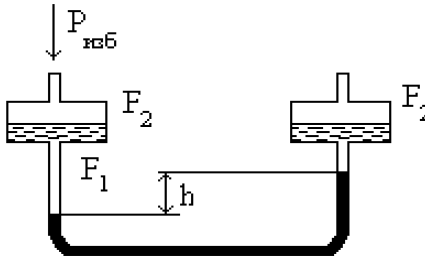


Рис. 8. U-образный манометр с двумя жидкостями

Избыточное давление находится по формуле:

$$P_{\text{изб}} = (h - h_0) \cdot \left(\rho_2 - \rho_1 + \frac{F_1}{F_2} \rho_1 \right) \cdot g, \quad (10)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения колена, образующего U-образную трубку, м²;

F_2 – площадь поперечного сечения резервуаров, м²;

ρ_1 – плотность более легкой жидкости, кг/м³;

ρ_2 – плотность более тяжелой жидкости, кг/м³;

h – показание манометра, м;

h_0 – показание манометра при нулевой разности давлений, м.

Обычные жидкостные манометры могут быть использованы как эталоны для тарировки других манометров.

Механические манометры

Механические приборы получили наибольшее распространение, так как они характеризуются следующими преимуществами: простота устройства и его использования, портативность, универсальность, практически неограниченный диапазон измерения, начиная от нескольких кПа и до сотен МПа.

В механических манометрах давление измеряется по величине вызываемой им деформации упругой детали. Они делятся на трубчатые, мембранные и пружинные.

В *трубчатом* манометре указательная стрелка движется за счет деформации трубчатой пружины при изменении давления жидкости внутри нее. Точность этих манометров ограничена наличием остаточных деформаций трубки, появляющихся в процессе работы.

Чувствительным элементом *мембранных* манометров служат плоские или гофрированные мембраны, связанные с указательной стрелкой. Повышение чувствительности мембранных манометров достигается заменой простых мембран анероидными коробками или применением гармоникообразных мембран – сильфонов.

На рис. 9 показан манометр с гофрированной мембраной. На нижнем фланце манометра имеется ниппель 1 для подключения к сосуду, в котором измеряется давление. Верхний фланец составляет одно целое с корпусом манометра. Между фланцами находится гофрированная мембрана 2. Фланцы плотно стянуты болтами. В центре мембраны закреплена стойка, шарнирно соединенная с зубчатым сектором передаточного механизма.

По величине деформации мембраны судят о давлении. Мембраны для измерения различных давлений отличаются толщиной, диаметром, видом материала и т. д.

Пределы измеряемых давлений для мембранных манометров ограничены и составляют от 20 кПа до 30 МПа. Мембранные манометры используют при измерении давлений в высоковязких средах, так как прямой и широкий канал в ниппеле обеспечивает более свободный проход жидкости, чем в трубчатом манометре. Для измерений в химически агрессивных средах нижнюю сторону мембраны покрывают тонкой пленкой защитного материала.

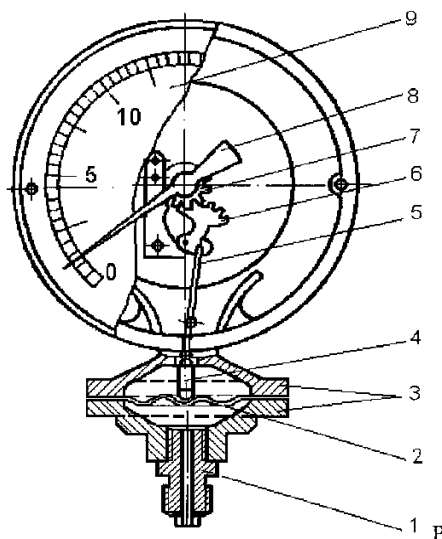


Рис. 9. Манометр с гофрированной мембраной:
 1 – ниппель; 2 – мембрана; 3 – фланцы; 4 – стержень; 5 – тяга;
 6 – сектор; 7 – шестерня (трибка); 8 – стрелка; 9 – шкала

Принцип действия мембранного манометра позволяет использовать его и для измерения разрежения. Если мембранный манометр присоединить к полости с разрежением, то мембрана, испытывая атмосферное давление снаружи, будет прогибаться вовнутрь, что вызывает поворот стрелки в сторону, обратную по сравнению с манометром.

Сильфонные приборы для измерения давления являются еще одной разновидностью механических приборов. В качестве упругого элемента в них используется сильфон, который представляет собой гофрированную коробку, выполненную в виде цилиндра с равномерными складками (гофрами). Если такой сильфон подвергнуть воздействию избыточного давления снаружи или изнутри, то он сожмется или растянется по высоте так, что его горизонтальные поверхности будут перемещаться параллельно друг другу. Величина перемещения пропорциональна величине измеряемого давления. Сильфонные манометры применяются для измерения давлений от 40 кПа до 0,5 МПа. Изменение пределов измерения достигается за счет толщины мембраны, диаметра и размера гофр, а также жесткостью винтовой пружины, размещенной внутри полости сильфона.

Пружинные приборы появились на двести лет позднее жидкостных (1846–1848 гг.). Основной деталью пружинных манометров является полая трубка с поперечным сечением в виде овала или эллипса, которая по имени автора одного из первых манометров и называется трубкой Бурдона. Один конец трубки заканчивается ниппелем с резьбой для подключения к сосуду, в котором измеряется давление, а второй запаян. Свободный запаянный конец трубчатой пружины при помощи тяги шарнирно соединяется с зубчатым сектором, находящимся в зацеплении с маленькой шестеренкой (трибкой). На ось трибки насажена стрелка, которая указательным концом подходит к шкале, нанесенной на циферблате (рис. 10).

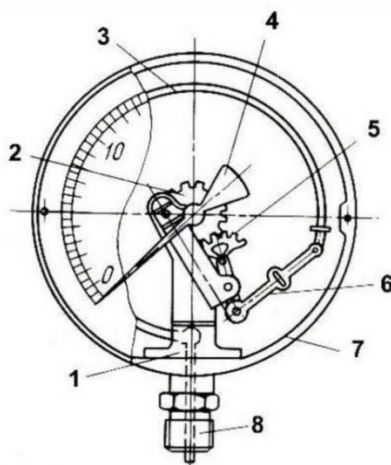


Рис. 10. Манометр с одновитковой трубчатой пружиной:
 1 – основание манометра; 2 – шестерня (трибка);
 3 – трубчатая пружина; 4 – стрелка; 5 – зубчатый сектор;
 6 – тяга; 7 – корпус манометра; 8 – присоединительный ниппель

Манометры с многовитковой трубчатой пружиной являются, как правило, регистрирующими манометрами. Чувствительным элементом в них является многовитковая пружина, которая представляет собой полую трубку овального сечения с 5–9 витками, расположенными по винтовой линии.

Трубчатая пружина может быть использована и в вакуумметре. Если пружину соединить с пространством, в котором имеет место разрежение, то под действием внешнего атмосферного давления она деформируется. Причем свободный конец перемещается не вверх, как у манометра, а вниз. Соответственно и стрелка поворачивается в противоположную сторону. Шкала вакуумметра размечается в мм рт. ст. Предельное значение шкалы 760 мм рт. ст. наносится условно, так как полный вакуум практически недостижим.

Если в одном и том же месте по условиям работы экспериментальной установки возможно и избыточное давление и вакуум, то используется комбинированный прибор, называемый мановакуумметром. Предельное значение шкалы манометрического давления может быть любым и зависит лишь от использованной в данном манометре трубки. Зная, на какое избыточное давление рассчитана трубка мановакуумметра, можно найти соотношение между длинами манометрической и вакуумметрической шкал. Так, если манометрическая шкала рассчитана на 1,0 МПа, вакуумметрическая шкала будет занимать 1/10 от шкалы давления, если на 2,0 МПа, то 1/20 и так далее. Чем больше избыточное давление, на которое рассчитан мановакуумметр, тем меньше размер вакуумметрической шкалы и ниже точность измерения вакуума.

Пружинные манометры применяют при температуре до 65 °С, так как выше этой температуры механические свойства металлической пружины частично изменяются. Для измерения давления при более высоких температурах трубку манометра заполняют жидкостью, предохраняющей ее от воздействия высокой температуры.

Лучшие пружинные манометры имеют класс точности 0,2 или 0,35.

К механическим манометрам относятся и поршневые манометры, которые считаются образцовыми приборами для измерения высокого давления.

Измерение влажности воздуха

Для определения относительной влажности воздуха ϕ применяют различные методы: психрометрический, гигроскопический, точки росы, весовой и т. д.

Психрометрический метод основан на открытии русского ученого Рихмана (XVIII), заключающегося в следующем: если шарик ртутного

термометра обернуть влажной тканью, то, находясь в ненасыщенном воздухе, этот термометр (мокрый) покажет более низкую температуру, чем обычный (сухой) термометр. Это объясняется тем, что при соприкосновении ненасыщенного воздуха с поверхностью тонкой пленки воды начинается испарение последней и перенос ее в воздух. Интенсивность испарения воды определяется разностью парциальных давлений водяного пара у поверхности влажной ткани P_n и в окружающем влажном воздухе P_n . Фазовый переход «жидкость – пар» сопровождается поглощением теплоты парообразования, отбираемой, в первую очередь, от самой жидкости. Вследствие происходящего тепло- и влагообмена температура воды во влажной ткани будет понижаться, и, если бы не было притока теплоты к мокрому термометру извне, то температура воды снизилась бы до температуры точки росы t_p для данного парциального давления водяного пара P_n во влажном воздухе. В действительности же снижение температуры влажной ткани сопровождается возникновением потока теплоты к ней от влажного воздуха за счет разности температур $t_n - t_c$. Температура влажной ткани повышается, испарение воды возрастает. Наступает такой момент времени, когда между потоком теплоты от воздуха к поверхности влажной ткани и потоком теплоты, необходимой для испарения воды, устанавливается термодинамическое равновесие, но не при температуре точки росы t_p , а при более высокой t_m . Характерно, что при этом энтальпия воздуха мало изменяется, так как отданная воде теплота возвращается обратно в воздух в скрытом виде вместе с испаренной влагой. Такой процесс испарения условно называют адиабатическим.

Температура, соответствующая наступлению термодинамического равновесия между влажным воздухом и водой, содержащейся во влажной ткани, называется температурой мокрого термометра, определяемая по формуле:

$$t_m = t_c - \frac{r_m \cdot (d_m - d)}{c_{p,v} + c_{p,l} \cdot d}, \quad (11)$$

где r_m и d_m – соответственно теплота парообразования и влагосодержание насыщенного воздуха при температуре мокрого термометра.

В технике измерения влажности воздуха нашли применение психрометр Августа и психрометр Ассмана (рис. 11).

Основным элементом как одного, так и другого являются два термометра. Шарик одного из них, с поверхности которого происходит испарение, обернут влажной тканью. В момент, когда наступает термодинамическое равновесие между потоком теплоты от воздуха к поверхности и потоком теплоты, необходимой для ее испарения, мокрый термометр психрометра регистрирует температуру t_m , а сухой – температуру окружающего влажного воздуха t_c .

Для получения более точных данных необходимо чтобы шарик термометра во время опыта был смочен водой, а приток за счет лучеиспускания к нему был минимальным. В связи с изложенным, посредством психрометра Августа нельзя точно определить относительную влажность ϕ . Причин несколько:

1) шарик мокрого термометра не защищен от теплового воздействия окружающих поверхностей, температура которых может отличаться от его температуры;

2) температура столбика ртути в термометре по высоте неодинакова и поэтому возникает теплообмен между различными частями самого термометра;

3) скорость воздуха, омывающего смоченную поверхность шарика, оказывает влияние на величину $(t_c - t_m)$;

4) на процесс испарения оказывает влияние барометрическое давление; следует вводить поправку P_c/ρ_0 ($\rho_0 = 101\,325$ Па).

Психрометр Ассмана – более совершенный прибор. Оба термометра заключены в металлические, отполированные трубки, по которым проходит исследуемый воздух со скоростью 2,5–3,0 м/с. Движение воздуха вдоль термометров обеспечивает вентилятор, который вмон-

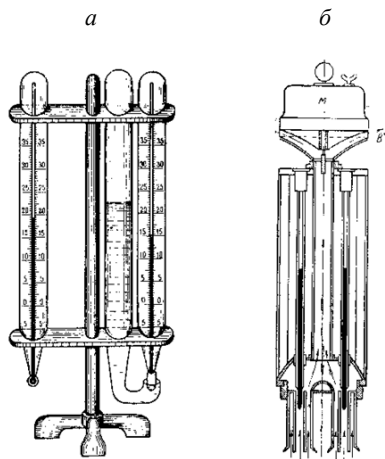


Рис. 11. Психрометры:
а – Августа; б – Ассмана

тирован в корпус психрометра. Показания мокрого термометра более точны, чем у психрометра Августа, и ближе к пределу охлаждения.

По соответствующим таблицам (приложение А и Б) или по h-d диаграмме влажного воздуха, зная значения t_c и t_m , определяется относительная влажность воздуха ϕ .

Гигроскопический метод основан на способности некоторых материалов приводить свою влажность в равновесное состояние с влажностью воздуха (результат поглощение влаги из воздуха). Изменение влажности гигроскопического материала сопровождается изменением его свойств, например, электропроводности. Обезжиренный человеческий волос, древесное волокно, капроновая нить и др. при изменении ϕ воздуха деформируются, что отражает движение стрелки гигрометра. Его шкала отградуирована в величинах ϕ .

На рис. 12 представлен электропсихрометр с гигроскопической солью LiCl. Когда воздух сухой, то соль не проводит электрический ток. При повышении влажности воздуха соль насыщается влагой и становится проводником. Чем больше влаги абсорбируется солью, тем выше проводимость. Если элемент включить в систему моста, то можно измерить силу тока и, следовательно, влажность воздуха.

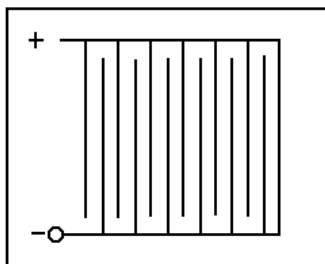


Рис. 12. Электропсихрометр с гигроскопической солью

Для определения влажности воздуха методом точки росы применяют гигрометр, состоящий из двух термометров, шарики которых заключены в металлические резервуары (рис. 13).

Наружные поверхности резервуаров отполированы (защита от теплового облучения), свободное пространство левого резервуара заполнено эфиром. В верхнюю крышку его впаяны две трубки, одна из которых не достигает дна. В трубку нагнетается воздух. Пузырьки воздуха вызы-

вают интенсивное испарение эфира и, следовательно, его охлаждение. Воздух, прошедший через слой эфира, выходит через другую трубку.

Когда температура наружной поверхности резервуара понизится до значения точки росы t_p воздуха, на поверхности образуются капли выпавшего конденсата. Показания левого термометра в момент начала затуманивания отполированной поверхности и есть точка росы воздуха t_p . По приложению А находят величину упругости насыщенного пара для температур t_p и t_n (показания термометров) и определяют относительную влажность воздуха:

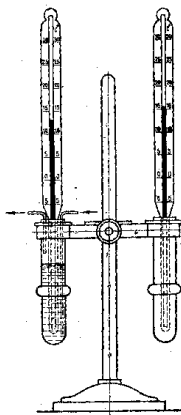


Рис. 13. Гигрометр

$$\phi = \frac{\rho_p}{\rho_n} \quad (12)$$

Метод точки росы менее точен, чем психрометрический.

Весовой метод является самым точным, но трудоемким (рис. 14). Исследуемый воздух просасывается вентилятором 1 через несколько последовательно соединенных U-образных трубок 2, заполненных гигроскопическим веществом (хлористый кальций, фосфорный ангидрид). Трубки с наполнителем предварительно взвешивают. Затем после прохождения воздуха их снова взвешивают уже с водяным паром. Разность масс Δm и есть количество водяного пара, содержащегося в пропущенном через трубки объеме воздуха, который измеряется газовым счетчиком 3.

Объемная влажность воздуха определяется из отношения

$$\rho_n = \frac{\Delta m}{V}, \quad (13)$$

где Δm – разность масс, кг;
 V – объем воздуха, м³.

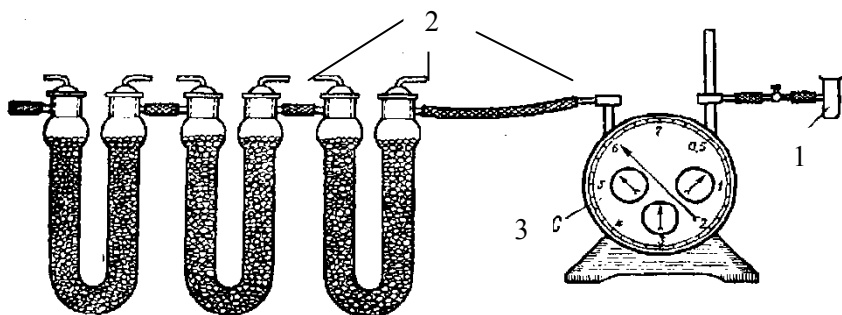


Рис. 14. Схема установки измерения влажности воздуха весовым методом

Измерение расхода

Для измерения расходов и количества воздуха, газов и жидкостей используются расходомеры. Они имеют большое значение в самых различных областях науки и техники. Расходомеры необходимы для проведения научных исследований, для управления технологическими процессами почти во всех отраслях промышленности, для контроля работы стационарных и транспортных энергетических установок, для управления самолетами и космическими кораблями. Помимо этого, расходомеры необходимы для коммунального и сельского хозяйства.

Без расходомеров невозможно обеспечить оптимальный технологический режим важнейших технологических процессов в таких отраслях промышленности, как энергетическая, металлургическая, нефтяная, химическая, целлюлозно-бумажная, пищевая и мн. др. Без этих приборов нельзя также и автоматизировать соответствующие процессы, и получить у них максимальный КПД.

Прибор, измеряющий расход, т. е. количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени, называют *расходомером*.

Прибор, измеряющий количество вещества, протекающее через данное сечение трубопровода за некоторый промежуток времени, называют *счетчиком количества*.

Количество вещества выражают в единицах объема или массы:

- объемный расход ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, л/ч);
- массовый расход (кг/с, кг/ч, т/ч).

Основными методами измерения расхода вещества являются:

1. Метод измерения расхода среды по перепаду давления в сужающем устройстве (расходомеры переменного перепада давления).

2. Метод измерения расхода среды напорной трубкой (расходомеры типа Анньюбар).

3. Метод измерения электропроводных сред, основанный на законе электромагнитной индукции (индукционные расходомеры).

4. Метод преобразования поступательного движения измеряемой среды в вихревую дорожку Кармана с помощью установленного поперек потока тела обтекания и далее измерения частоты срыва вихрей (вихревые расходомеры).

5. Метод измерения расхода среды на основе доплеровского метода определения средней скорости потока (ультразвуковые расходомеры).

6. Метод измерения расхода среды, основанный на эффекте Кориолиса (кориолисовые расходомеры).

Все эти типы делятся на две основные группы расходомеров: на извлечении энергии из измеряемой среды и на передаче энергии измеряемой среде.

Расходомеры переменного перепада давления на сужающем устройстве

Сужающее устройство выполняет функции первичного преобразователя, устанавливается в трубопроводе и создает в нем местное сужение, вследствие чего при протекании среды повышается скорость в суженном сечении по сравнению со скоростью потока до сужения. Соответственно статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства, т. е. создается перепад давления $\Delta P = P_1 - P_2$, зависящий от скорости потока и расхода среды. Здесь ΔP служит мерой расхода среды, протекающей в трубопроводе (ΔP измеряется дифманометром). В качестве сужающих устройств для измерения расхода воздуха, жидкостей, газов и пара применяют диафрагмы, сопла, сопла Вентури.

Диафрагма – тонкий диск I с отверстием круглого сечения (рис. 15, *a*). В мертвой зоне возникает обратное движение жидкости, приводящее к образованию вихрей (вследствие разности давлений, вид в сечении *B*). На вихреобразование затрачивается часть энергии и имеет место потеря давления (рис. 15, *a*). Давление струи около

трубопровода P_1 несколько возрастает за счет подпора перед диафрагмой. Стандартная диафрагма может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром > 50 мм при $0,05 \leq m \leq 0,7$. Отбор давления производится через кольцевые камеры 2 или отдельные отверстия.

Сопло (рис. 15, б). выполнено в виде насадки с круглым концентрическим отверстием, имеющим плавно сужающуюся часть на входе и развитую цилиндрическую часть на выходе. Вихреобразование за соплом вызывает меньшую потерю энергии, чем у диафрагмы.

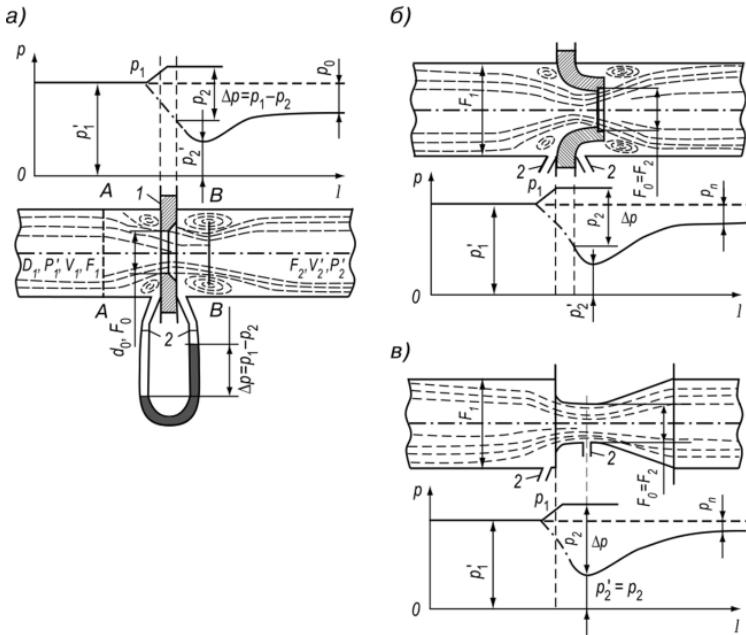


Рис. 15. Схема формирования потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе сужающего устройства:
 а – диафрагмы; б – сопла; в – сопла Вентури

Измерение ΔP такое, как и у диафрагмы. Сопло менее чувствительно к загрязнению и коррозии чем диафрагма. При измерении расхода пара и газа сопло обеспечивает более высокую точность.

Сопло Вентури состоит из цилиндрического входного участка, плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический

участок диффузора (рис. 15, в). Сопла Вентури позволяют получать минимальные потери напора P_n ($P_n^{\text{вент}} < P_n^{\text{сопл}}$) (рис. 5.4, б). Потери напора P_n снижаются с уменьшением угла конусности φ . Сопло Вентури может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром ≥ 50 мм при $0,05 \leq m \leq 0,6$. Отбор давления производится через кольцевые камеры 2.

Электромагнитные расходомеры

Электромагнитные расходомеры применяют для измерения в трубопроводах объемного расхода электропроводных сред с удельной электрической проводимостью в пределах от 10^{-3} до 10 см/м. Принцип действия расходомеров основан на законе электромагнитной индукции Фарадея, согласно которому наведенная в проводнике ЭДС пропорциональна скорости движения проводника, а при известном сечении трубы, по которой движется среда – пропорциональна ее расходу.

Например, для круглой трубы:

$$Q_0 = v \frac{\pi d^2 V}{4}, \quad (14)$$

где π – константа;

Q_0 – расход среды, м³/с;

d – внутренний диаметр трубы, м;

V – средняя скорость движения; жидкости, м/с;

v – скорость движения среды, м/с.

Электромагнитные расходомеры бывают с постоянным и переменным магнитным полем. Выходная ЭДС для электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем определяется как:

$$E = VDB, \quad (15)$$

где D – внутренний диаметр трубы (расстояние между электродами), м;

B – магнитная индукция, Тл.

Так, преобразуя выражение 14 и 15, получим выходную ЭДС в виде:

$$E = \frac{4BQ_o}{\pi D}, \quad (16)$$

Выходная ЭДС электромагнитных расходомеров с переменным магнитным полем определяется как:

$$E = \frac{4Q_o}{\pi D} \cdot B_{\max} \cdot \sin \omega t, \quad (17)$$

при этом имеет место значительно меньшая поляризация электродов. Погрешность измерения для этих расходомеров составляет 0,5–1 %, а диапазон измерения 1:20 и даже 1:100. Рабочее давление – до 100 МПа.

Схема работы электромагнитного расходомера представлена на рис. 16.

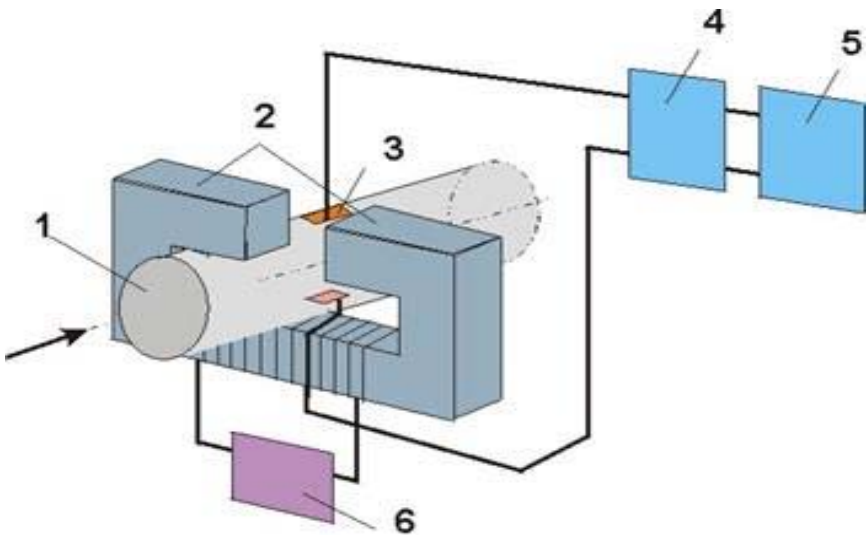


Рис. 16. Принципиальная схема работы электромагнитного расходомера:
 1 – трубопровод; 2 – полюса магнита; 3 – электроды для съема ЭДС;
 4 – электронный усилитель; 5 – отсечная система; 6 – источник питания магнита

Достоинством электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем можно отнести отсутствие источника питания преобразователя расхода, безопасность измерения расхода, большое быстродействие, помехозащищенность, отсутствие потери напора. К недостаткам – поляризацию электродов, приводящую к нарушению стабильности работы преобразователя.

Ультразвуковые расходомеры

Применяются для измерения расхода жидкостей и газов. Метод измерения основан на явлении смещения звукового колебания движущейся средой (рис. 17).

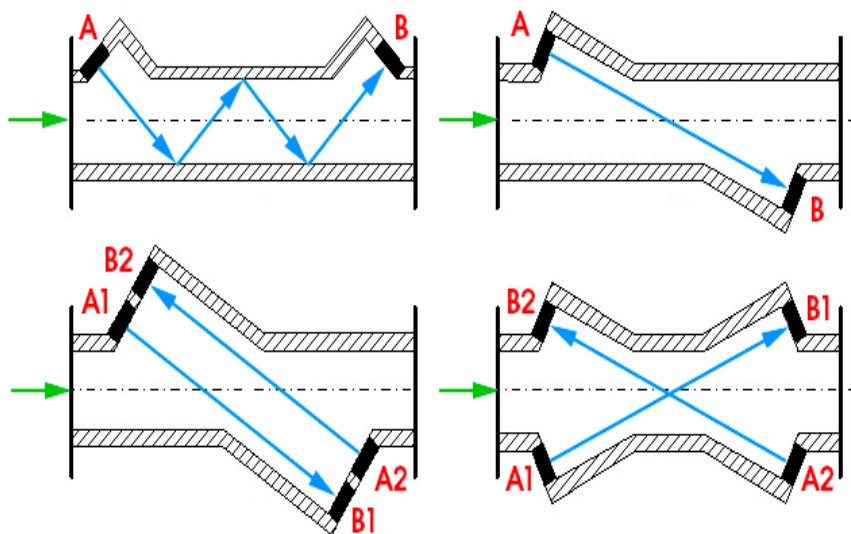


Рис. 17. Принципиальная схема работы ультразвукового расходомера:
A, B – ультразвуковые датчики; *1, 2* – номер пары ультразвуковых датчиков

К достоинствам ультразвуковых расходомеров можно отнести: возможность измерения расхода любых жидкостей; возможность измерения расходов, близких к 0; высокое быстродействие; отсутствие контакта со средой; отсутствие потери давления.

Вихревые расходомеры

В основу работы расходомеров положен принцип преобразования поступательного движения измеряемой среды в вихревую дорожку Кармана с помощью установленного поперек потока тела обтекания. Применяются для измерения расхода пара, газа и жидкости с вязкостью не более 2 сСт (рис. 18).

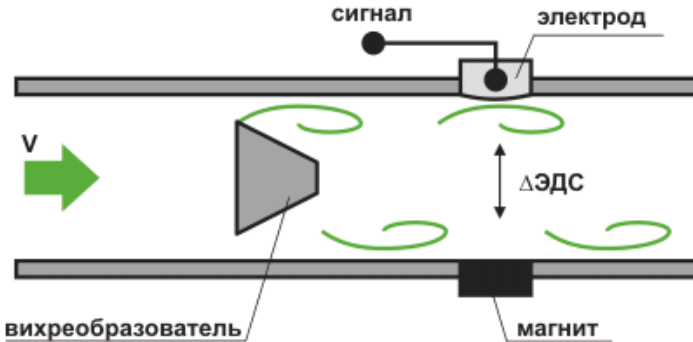


Рис. 18. Принципиальная схема работы вихревого расходомера

К достоинствам вихревых расходомеров относится: простота изготовления; низкая стоимость; высокая надежность; стабильность метрологических характеристик во времени; линейность характеристики; широта диапазона измерения; незначительное влияние физических параметров измеряемой среды на показания прибора. К недостаткам необходимо отнести: неприменимы для жидкостей с высокой вязкостью; ограничены по диаметру (на трубопроводах ≤ 25 мм).

Лабораторная работа № 1
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ СЛОЕВ
МАТЕРИАЛОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ
НАРУЖНОЙ СТЕНЫ ЗДАНИЯ**

Цель работы: исследование стационарного одномерного температурного поля и изучение влияния взаимного расположения конструктивных слоев на теплозащитные характеристики и температурный режим наружной стены здания.

Теоретические сведения

В процессе переноса теплоты через ограждение в нем формируется температурное поле – совокупность значений температур во всех точках рассматриваемого ограждения в данный момент времени. В общем виде температурное поле без внутренних источников теплоты описывается уравнением Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (18)$$

где t – температура в момент времени τ , °С;

$a = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с;

λ , c и ρ – соответственно, коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·°С), и плотность материала, кг/м³;

x, y, z – координаты точки.

Если распределение температур зависит от координат и от времени, то температурное поле является нестационарным. В случае, когда распределение температур не зависит от времени и является только функцией координат, температурное поле называют стационарным. Описывается оно уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (19)$$

Если температурное поле рассматривается по трем координатам, то такое поле называется трехмерным. В двухмерном температурном поле формирование происходит по двум координатам:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right). \quad (20)$$

В одномерном температурном поле изменение температуры происходит только по одной координате:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (21)$$

В данной лабораторной работе будет рассмотрено стационарное одномерное температурное поле фрагментов наружной стены:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (22)$$

Для получения расчетной зависимости по определению температурой в любом сечении многослойного ограждения используем уравнение теплового баланса: удельный тепловой поток, проходящий через все ограждение, равен удельному тепловому потоку в любом его сечении, т. е. $q = \text{const}$:

$$q = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{T}}} = \frac{t_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}}{R_{\text{в}}} = \frac{\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}}{R} = \frac{\tau_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}, \quad (23)$$

где $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ – температуры соответственно внутреннего и наружного воздуха, °С;

$\tau_{\text{в}}$, $\tau_{\text{н}}$ – температуры соответственно внутренней и наружной поверхности ограждения, °С;

R_{T} – сопротивление теплопередаче ограждения, м²·°С/Вт, рассчитываемое по выражению:

$$R_{\text{T}} = R_{\text{в}} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{\text{н}}, \quad (24)$$

где R_b, R_n – сопротивление теплообмену на поверхности фрагмента (индекс «в» относится к внутренней поверхности, «н» – к наружной), $m^2 \cdot ^\circ C/Wt$, определяемые по формулам:

$$R_b = \frac{1}{\alpha_b}, \quad (25)$$

$$R_n = \frac{1}{\alpha_n}. \quad (26)$$

где α_b, α_n – коэффициенты теплоотдачи соответственно внутренней и наружной поверхности, $Wt/(m^2 \cdot ^\circ C)$. Коэффициент теплоотдачи численно показывает количество теплоты, которое отдается от воздуха к единице площади поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью и воздухом $1^\circ C$;

R_i – термическое сопротивление i -го слоя n -слойного ограждения, рассчитываемое по выражению (кроме замкнутых воздушных прослоек):

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (27)$$

где δ_i – толщина i -го слоя, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя, $Wt/(m \cdot ^\circ C)$. Коэффициент теплопроводности численно показывает количество теплоты, которое проходит в единицу времени через $1 m^2$ слоя толщиной 1 м при разности температур на границах слоя $1^\circ C$.

Для замкнутых воздушных прослоек определять термическое сопротивление по формуле (27) нельзя ввиду сложного характера теплообмена в прослойке. При передаче теплоты в прослойке участвуют все три вида теплообмена: теплопроводность (кондукция), конвекция и тепловое излучение (рис. 19), причем доминирующими являются конвекция и излучение. Значение термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек приводится в справочной или нормативной литературе в зависимости от толщины, температуры воздуха в ней, ориентации в пространстве и направления теплового потока.

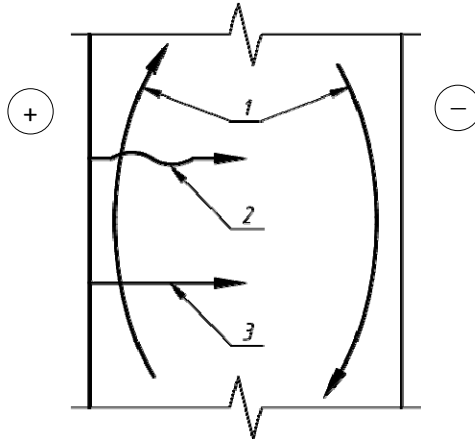


Рис. 19. Схема теплообмена в замкнутой воздушной прослойке:
 1 – теплообмен конвекцией, 2 – теплообмен излучением,
 3 – теплообмен теплопроводностью

Для нахождения температуры в сечениях ограждения помимо расчетного метода существует *графический*. Он состоит в следующем: если по оси абсцисс отложить значения сопротивлений каждого слоя, включая сопротивления теплоотдаче поверхностей, а по оси ординат – температуры внутреннего и наружного воздуха, то, соединив их прямой, получим линию падения температур в ограждении. Так как отношение изменения ординаты к изменению абсциссы равно тангенсу угла наклона линии, а в данном случае это отношение Δt к ΔR , то тангенс угла наклона прямой будет равен удельному тепловому потоку через ограждение:

$$\frac{\Delta t}{\Delta R} = q = \tan \alpha. \quad (28)$$

Для качественного сравнения можно рядом выстроить ограждение, отложив по оси абсцисс толщину каждого слоя. Линия падения в каждом слое будет прямой, а в ограждении в целом – ломанная.

Пример построения для трехслойного ограждения приведен на рис. 20.

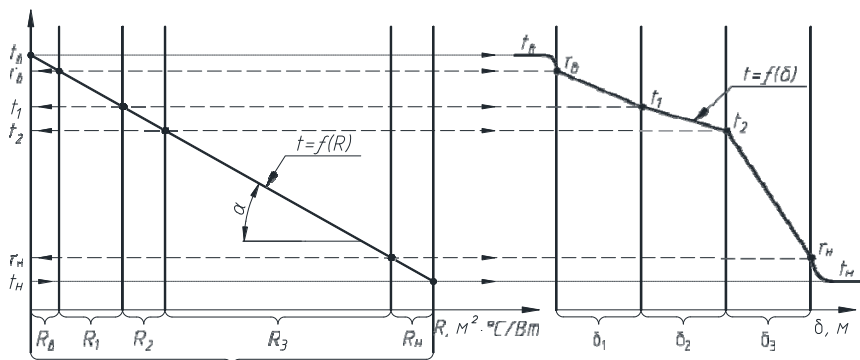


Рис. 20. Графический метод определения стационарного одномерного температурного поля

Данными методами (расчетным и графическим) можно вычислить температуру в произвольном сечении ограждения, кроме замкнутых воздушных прослоек.

Анализируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1) при определенных температурах внутреннего и наружного воздуха t на внутренней поверхности зависит от термического сопротивления теплопередаче ограждения, так как значение сопротивление теплообмену $R_b = 1/\alpha_b$, в соответствии с нормами, принимается постоянной;

2) чтобы увеличить температуру внутренней поверхности τ_b при невозможности повлиять на общее сопротивление теплопередаче, необходимо интенсифицировать теплообмен у внутренней поверхности, т. е. увеличить значение коэффициента теплоотдачи α_b ;

3) падение температуры в слое ограждающей конструкции прямо пропорционально его термическому сопротивлению;

4) угол наклона линии падения температуры в слое ограждения обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности этого слоя.

Описанные методы относятся к приближенным: расчеты величин ведутся исходя из нормируемых значений коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности или термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек. В реальности на теплопередачу влияет ряд факторов, которые не учитываются при расчете: неоднородность материала, влияние разности температур на теплопередачу в замкнутых воздушных прослойках и пр.

Чтобы детально исследовать теплозащитные свойства ограждения, зачастую их испытывают при стационарном тепловом режиме согласно ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций». Исследуемую конструкцию помещают в испытательную камеру, которая делится на «теплый» отсек, где поддерживается постоянная положительная температура, и «холодный» с постоянной отрицательной температурой. Поверхность ограждения разбивается на термически однородные зоны, в которых измеряются температуры поверхностей и тепловой поток, а на расстоянии 100 мм от каждой поверхности термически однородной зоны измеряют температуру воздуха. При необходимости, температуру измеряют и в сечениях конструкции. Для определения сопротивления теплопередаче i -той термически однородной зоны служит формула:

$$R_{Ti} = R_{vi} + R_i + R_{ni} = \frac{t_{vi} + \tau_{vi}}{q_{\phi i}} + \frac{t_{vi} + \tau_{ni}}{q_{\phi i}} + \frac{t_{ni} + \tau_{ni}}{q_{\phi i}}, \quad (29)$$

где $q_{\phi i}$ – фактический удельный тепловой поток через i -тую термически однородную зону, Вт/м², учитывающий термическое сопротивление измерителя теплового потока и материала его крепления к конструкции.

В качестве измерителей температуры зачастую применяют хромель-копелевые термопары (хромель – сплав хрома и никеля, копель – сплав никеля, железа и меди), принцип работы которых основан на эффекте Зеебека, т. е. на возникновении ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах.

Для измерения удельного теплового потока служат специальные приборы – измерители теплового потока, состоящие из двух преобразователей. Первый, преобразующий удельный тепловой поток в термо-ЭДС, представляет собой множество последовательно соединенных термопар, измеряющих перепад между температурами поверхностей данного преобразователя. Второй преобразует термо-ЭДС первого в цифровой сигнал, калиброванный в Вт/м².

С целью сопоставления фактических значений теплопроводности материалов, использованных в конструкции, с проектными значениями, теплопроводность материала слоя λ_{ϕ} определяют по формуле:

$$\lambda_{\phi} = \frac{\delta}{R_{\phi}}, \quad (30)$$

где R_{ϕ} – фактическое термическое сопротивление слоя, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 21) представляет собой два фрагмента наружной стены, вмонтированных в проем холодильника «Минск-17». Образцы собраны в деревянной раме и с торцов теплоизолированы для обеспечения на каждом фрагменте одномерного температурного поля. Фрагменты наружной стены состоят из двух слоев: железобетона, утеплителя и расположенной между ними замкнутой воздушной прослойки. В верхнем образце утеплитель расположен с теплой стороны, а железобетон с холодной ограждения, в нижнем – наоборот, железобетон расположен с теплой стороны, а утеплитель с холодной. Толщины слоев и замкнутой воздушной прослойки одинаковы и равны 60 мм.

Применительно к условиям испытаний, внутренней считается поверхность, обращенная в помещение, наружной – в объем холодильника.

В каждом фрагменте для измерения температурного поля, внутреннего и наружного воздуха размещены 12 термодатчиков, присоединенных к показывающему потенциометру типа КВП-1. Термодатчики в образцах расположены через 20 мм друг от друга.

Измерение удельного теплового потока производится с помощью измерителя теплового потока марки ИТП-17 по методике ГОСТ 25380-82 «Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции». Датчик прибора крепится к месту измерения таким образом, чтобы плоскость датчика была плотно прижата к внутренней поверхности ограждения.

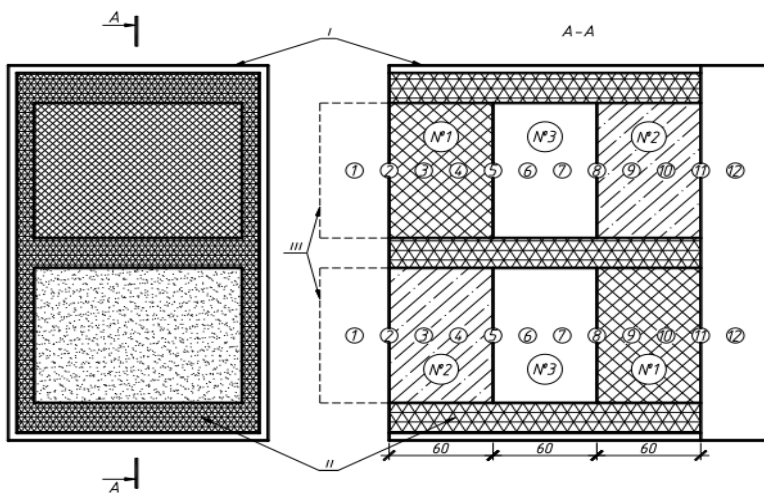


Рис. 21. Схема экспериментальной установки:
 1–12 – номера термопар; I – каркас; II – теплоизоляция;
 III – защитное ограждение; № 1 – утеплитель; № 2 – железобетон;
 № 3 – замкнутая воздушная прослойка

Порядок выполнения работы

Перед началом работы необходимо подробно ознакомиться с устройством лабораторного стенда, схемой измерения температуры и теплового потока.

Перед выполнением работы необходимо убедиться в стационарности образцов, которая определяется постоянством температуры в любой точке исследуемых фрагментов.

Для измерения температуры попеременно нажимаются клавиши прибора КВП-1, номера которых соответствуют номерам термопар, и по вращающемуся циферблату определяются значения температур с точностью до 0,1 °С. Значения температур, полученных в ходе эксперимента, заносят в соответствующие ячейки табл. 2.

Измерение удельного теплового потока проводят периодически через промежутки времени в 5–10 минут до получения установившегося значения. Экспериментальные значения удельных тепловых потоков заносят в соответствующие ячейки табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные

Образец	Данные	Значение температуры в точках, °С											$q, \text{Вт/м}^2$		
		1 ($t_1=t_b$)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12 ($t_{12}=t_a$)	
верхний	экспериментальные														
	расчетные			-	-		-	-		-	-				
нижний	экспериментальные														
	расчетные			-	-		-	-		-	-				

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитываются значения термических сопротивлений слоев и заполняется табл. 3.

Для утеплителя (пенополистирола) и железобетона расчет термического сопротивления производится по формуле (26). Коэффициенты теплопроводности принимаются по СП 2.04.01-2020 «Строительная теплотехника» в зависимости от условий эксплуатации ограждающей конструкции.

Для замкнутых воздушных прослоек термическое сопротивление принимается по СП 2.04.01-2020 в зависимости от их толщины, положения, направления теплового потока и температуры в прослойке.

Таблица 3

Теплотехнические показатели материалов слоев фрагментов наружной стены

Материал слоя	Плотность материала $\rho, \text{кг/м}^3$	Толщина слоя $\delta, \text{м}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$	Расчетное термическое сопротивление $R, \text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$	
				верхний образец	нижний образец
Пенополистирол	50	0,06			
Железобетон	2 500	0,06			

Материал слоя	Плотность материала ρ , кг/м ³	Толщина слоя δ , м	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	Расчетное термическое сопротивление R , м ² ·°C/Вт	
				верхний образец	нижний образец
Замкнутая воздушная прослойка	–	0,06	–		

Результаты определения термических сопротивлений также заносятся в соответствующие ячейки табл. 4.

2. Принимаются значения коэффициентов теплообмена внутренней и наружной поверхности согласно СП 2.04.01-2020 и рассчитываются сопротивления теплоотдаче внутренней и наружной поверхности по формуле (25). Значения заносятся в табл. 4.

Таблица 4

Значения сопротивлений

Наименование сопротивлений	Значения сопротивлений, м ² ·°C/Вт			
	расчетные		экспериментальные	
	верхний образец	нижний образец	верхний образец	нижний образец
Сопротивление теплоотдаче внутренней поверхности R_v				
Термическое сопротивление слоя утеплителя (пенополистирола) R_{yt}				
Термическое сопротивление железобетона $R_{ж/б}$				
Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки $R_{звп}$				
Сопротивление теплоотдаче наружной поверхности R_n				
Сопротивление теплопередаче конструкции R_T				

При определении коэффициента теплоотдачи наружной поверхности следует обратить внимание на различие характера теплообмена для наружных стен в реальных условиях и в эксперименте.

3. Рассчитывается сопротивление теплопередаче фрагмента ограждения по формуле (24), результат заносится в табл. 4.

4. На листах бумаги производится построение линии падения температур в ограждении графическим способом, как указано на рис. 20.

Следует обратить особое внимание на порядок слоев во фрагментах:

– в верхнем – утеплитель, замкнутая воздушная прослойка и железобетон;

– в нижнем – железобетон, замкнутая воздушная прослойка и утеплитель.

В итоге для каждого образца должно получиться по два графика распределения температур во фрагментах: ось ординат, соответствующая температуре, будет общей, а по оси абсцисс на первом графике откладываются значения сопротивлений теплоотдаче и термических сопротивлений слоев, на втором – толщины материалов слоев.

5. Определение расчетных значений температур на поверхностях и по сечениям фрагментов производится по формуле:

$$t_x = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_0} \left(\frac{1}{\alpha_g} + \sum_{i=1}^x \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (31)$$

где t_B , t_H – расчетные температуры воздуха в помещении и в холодильной камере, принимаются по экспериментальным данным, °С;

R_0 – сопротивление теплопередаче образцов, $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$, рассчитывается в соответствии с требованиями СП 2.04.01-2020;

δ_i и λ_i – толщина (м) и коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°С}$) i -го слоя образца.

6. Результаты заносятся в табл. 2.

7. На чертеже конструкции, выполненной в масштабе толщин, строится график экспериментального распределения температур. Для этого в плоскостях установки термпар откладываются соответствующие значения экспериментальных температур и соединяются ломаной линией. Для большей наглядности построение выполняется карандашом другого цвета.

8. Рассчитывают экспериментальные значения сопротивлений на основании данных из табл. 2 по формуле:

$$R_k^{\text{эксп}} = \frac{t_k^{\text{эксп}} - t_{k+1}^{\text{эксп}}}{q^{\text{эксп}}}, \quad (32)$$

где $t_k^{\text{эксп}}$, $t_{k+1}^{\text{эксп}}$ – экспериментальные значения температур на поверхностях рассчитываемого слоя, °С, измеренные термомпарами;

$q^{\text{эксп}}$ – удельный тепловой поток через ограждение, Вт/м², измеренный прибором ИТП-17.

Полученные значения заносят в табл. 4.

9. На основании анализа полученных данных сделать выводы о причинах различия величин сопротивления теплопередаче верхнего и нижнего образцов, рассчитанных по экспериментальным данным, и о рациональном расположении слоев в ограждении.

Контрольные вопросы

1. Какой характер носит распределение температур в слоях ограждений при стационарном температурном режиме?

2. Какими способами можно определить распределение температур в сечениях ограждающих конструкций?

3. В чем особенность нахождения термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек?

4. Как рациональнее располагать в ограждении замкнутые воздушные прослойки?

5. От чего зависит значение коэффициентов теплоотдачи внутренней и наружной поверхности ограждения?

6. В каком порядке необходимо располагать слои в конструкции наружных ограждений?

7. В чем отличие в расчетном и экспериментальном способах определения сопротивления теплопередаче ограждения?

8. От чего зависит коэффициент теплопроводности материала?

9. От чего зависит сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции?

Рекомендуемая литература

1. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / А. М. Протасевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 239 с.

2. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А. М. Протасевич; под ред. Б. М. Хрусталева. – Минск : БНТУ, 2016. – 452 с.

3. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин; под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. – 5-е изд., перераб. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.

Нормативная литература

1. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность. СН 2.04.02-2020. – Минск : Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2021. – 24 с.

2. Строительная теплотехника. СП 2.04.01-2020. – Минск : Мин-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 72 с.

Лабораторная работа № 2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Цель работы: изучить и на практическом примере закрепить знания по основным параметрам и характеристикам влажного воздуха, h - d диаграмме и принципу работы психрометров.

Теоретические сведения

Основные параметры и характеристики влажного воздуха

Атмосферный воздух состоит из смеси неконденсирующихся газов (так называемого сухого воздуха) и водяного пара. Смесь сухого воздуха и водяного пара называется *влажным воздухом*. Влажный воздух может находиться в двух состояниях: насыщенного (смесь сухого воздуха и влажного насыщенного пара) и ненасыщенного (смесь сухого воздуха и перегретого пара) воздуха. Если в воздухе содержится максимально возможное количество водяного пара, то он является влажным насыщенным воздухом.

Основными параметрами и характеристиками влажного воздуха являются:

- абсолютная ρ , кг/м³, и относительная влажность φ , %;
- парциальное давление $p_{п}$ и давление насыщения (максимальное парциальное давление) $p_{нас}$ водяного пара, Па;
- плотность $\rho_{в}$, кг/м³;
- влагосодержание x (единица измерения – кг/кг с.в.) или d (единица измерения – г/кгс.в.);
- температура точки росы t_p , °C;
- удельная энтальпия h , кДж/кгс.в.

Абсолютная влажность воздуха – это отношение массы m_n водяного пара, содержащегося в единице объема влажного воздуха, т. е.:

$$\rho = \frac{m_n}{V}. \quad (33)$$

Относительная влажность – это отношение абсолютной влажности ρ к максимально возможной абсолютной влажности $\rho_{нас}$ воздуха при той же температуре и том же атмосферном давлении:

$$\varphi = \frac{P}{P_{\text{нас}}} \cdot 100 \% . \quad (34)$$

Если для упрощения принять, что находящийся в воздухе водяной пар подчиняется законам идеального газа, и, в частности, закону Бойля-Мариотта, который гласит, что при постоянной температуре и массе газа произведение его давления и удельного объема постоянно ($pV = \text{const}$), и дополнительно учесть, что величины плотности и удельного объема взаимнообратные, то получится следующая запись формулы (34):

$$\varphi = \frac{P}{P_{\text{нас}}} \cdot 100 \% = \frac{P_n}{P_{\text{нас}}} \cdot 100 \% , \quad (35)$$

где p_n – парциальное давление водяного пара, Па;

$P_{\text{нас}}$ – давление насыщения (максимальное парциальное давление) водяного пара при той же температуре, Па.

Парциальное давление (упругость водяных паров) – это такое давление, которое создавал бы компонент, занимая объем смеси газов при той же температуре. При определенной температуре парциальное давление и, следовательно, абсолютная влажность могут повышаться до определенной величины – *предела насыщения*. Это максимальное давление называется давлением насыщения (максимальным парциальным давлением или максимальной упругостью водяных паров) $P_{\text{нас}}$.

Если температура воздуха при определенной абсолютной влажности повысится, то его относительная влажность понизится, т. к. величина парциального давления пара не изменится, а значение давления насыщения увеличится. Наоборот, при охлаждении воздуха его относительная влажность увеличится из-за уменьшения давления насыщения.

Приближенная формула для определения давления насыщения при температуре от -60 °С до 0 °С имеет вид:

$$P_{\text{нас}} = e^{\frac{18,74 \cdot t - 115,72}{233,77 + 0,881 \cdot t}} , \quad (36)$$

при температуре от 0 °С до 83 °С.

$$P_{нас} = e^{\frac{16,57 \cdot t - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot t}}. \quad (37)$$

При достижении некой температуры парциальное давление станет равным давлению насыщения, т. е. $\varphi = 100\%$. Эта температура называется *температурой точки росы* или просто точкой росы t_p . Т. е. температурой точки росы называется такая температура воздуха, при которой водяной пар, содержащийся в нем, достигает насыщения. Если понижать температуру ниже точки росы, то давление пара будет понижаться в соответствии с понижением давления насыщения, а избыточная влага будет конденсироваться.

Плотность сухого воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$, можно определить исходя из закона Клапейрона-Менделеева по выражению:

$$\rho_{с.в.} = \frac{P_{с.в.} \mu_{с.в.}}{R_{\mu} T}, \quad (38)$$

где $p_{с.в.}$ – парциальное давление сухого воздуха, Па;

$\mu_{с.в.}$ – молярная масса сухого воздуха, $\mu_{с.в.} = 29 \cdot 10^{-3}$ $\text{кг}/\text{моль}$;

R_{μ} – универсальная газовая постоянная, $R_{\mu} = 8,314$ $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$;

T – абсолютная температура воздуха, К.

Если принять для сухого воздуха при атмосферном давлении ($B = 101325$ Па), то получим упрощенную запись формулы (39):

$$\rho_{с.в.} = \frac{353}{T}. \quad (39)$$

Плотность влажного воздуха определяется по формуле:

$$\rho_{в.в.} = \frac{P_{с.в.} \mu_{с.в.}}{R_{\mu} T} + \frac{p_n \mu_n}{R_{\mu} T} = \frac{(B - p_n) \mu_{с.в.}}{R_{\mu} T} + \frac{p_n \mu_n}{R_{\mu} T} = \frac{B \mu_{с.в.}}{R_{\mu} T} - \frac{p_n (\mu_{с.в.} - \mu_n)}{R_{\mu} T}, \quad (40)$$

$$\rho_{\text{в.в.}} = \frac{353}{T} - \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot p_n}{T}, \quad (41)$$

$$d = 1000 \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.в}}} = 1000 \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{с.в}}} = 1000 \frac{\mu_{\text{п}} p_{\text{п}}}{\mu_{\text{с.в}} p_{\text{с.в}}}, \quad (42)$$

где B – атмосферное (барометрическое) давление, Па;

$\mu_{\text{п}}$ – молярная масса водяного пара, $\mu_{\text{п}} = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Из выражения (40) очевидно, что плотность влажного воздуха всегда меньше плотности сухого воздуха. Однако в практических расчетах зачастую пренебрегают уменьшением плотности (погрешность составляет около 0,75 %), а расчет плотности влажного воздуха ведут по формуле (39).

Влагосодержание d – отношение массы водяного пара в граммах, содержащегося во влажном воздухе, сухая часть которого равна 1 кг.

Подставив значения молярных масс водяного пара и сухого воздуха, получим:

$$d = 1000 \frac{18 p_n}{29 p_{\text{с.в}}} = 622 \frac{p_n}{p_{\text{с.в}}} = 622 \frac{p_n}{B - p_n}. \quad (43)$$

Если массу пара измерять в кг, то величина обозначается буквой «х» и измеряется в кг/кг с.в.

Удельная энтальпия h , кДж/кг, в общем случае определяется по формуле:

$$h = u + pv, \quad (44)$$

где u – удельная внутренняя энергия системы, кДж/кг;

p – давление, Па;

v – удельный объем, м³/кг.

Если продифференцировать данное выражение и подставить в уравнение первого начала термодинамики, то получим:

$$dq = dh - v dp, \quad (45)$$

где dq – приращение подводимой к системе теплоты, отнесенное к 1 кг газа, кДж/кг.

Таким образом, в изобарном процессе ($dp = 0$) вся подводимая к системе теплота будет расходоваться на увеличение энтальпии. Из этого следует, что удельная энтальпия равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг газа в изобарном процессе для нагрева его от 0°C до данной температуры.

Для влажного воздуха принято относить энтальпию к 1 кг сухого воздуха. Тогда удельная энтальпия влажного воздуха определяется по формуле:

$$h_{\text{в.в}} = h_{\text{с.в}} + \frac{h_n d}{1000}, \quad (46)$$

где $h_{\text{с.в}}$ – удельная энтальпия сухого воздуха, кДж/кг с.в., рассчитываемая по формуле:

$$h_{\text{с.в}} = c_p^{\text{с.в}} t, \quad (47)$$

где $c_p^{\text{с.в}}$ – изобарная теплоемкость сухого воздуха, $c_p^{\text{с.в}} = 1,005$ кДж/(кг·°C);

h_n – удельная энтальпия водяного пара, кДж/кг, определяемая по выражению:

$$h_n = r + c_p^n t, \quad (48)$$

где r – удельная теплота парообразования воды, равная $r = 2\,500$ кДж/кг;

c_p^n – изобарная теплоемкость водяного пара, $c_p^n = 1,8$ кДж/(кг·°C).

Однако в практических расчетах удельной энтальпией пара и влиянием температуры на теплоемкость в виду малости пренебрегают и принимают, что удельная энтальпия влажного воздуха $h_{\text{в.в}} = 1,005 \cdot t$.

Психрометр Ассмана

Для определения относительной влажности в стационарных и полевых условиях используется аспирационный психрометр (гигрометр психрометрический) Ассмана (рис. 22), разработанный в 1887–

1892 г. немецким метеорологом Рихардом Ассманом (1845–1918). Искусственная вентиляция в приборе осуществляется с помощью аспиратора (вентилятора) потоком исследуемого воздуха. Термометры 2 и 3 находятся в специальной латунной оправе 4 с вентилятором 1, протягивающим воздух около резервуаров термометров. Батистовая ткань 6 смочена водой и одета на чувствительную часть термометра (баллон с ртутью). Термометр с тканью, называется «мокрым» термометром, термометр без нее – «сухим».

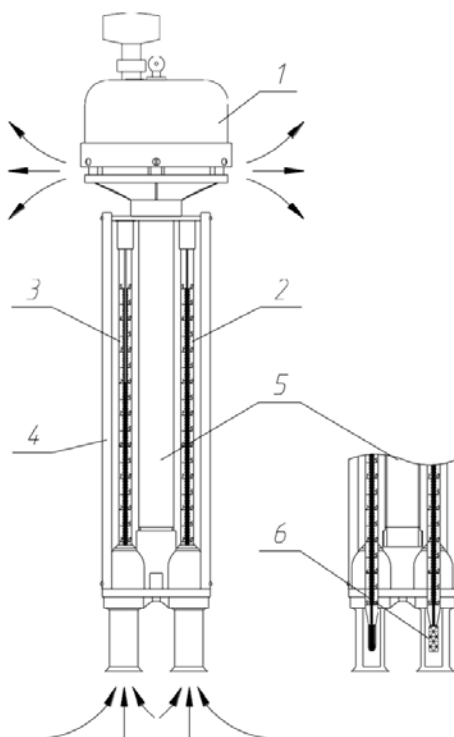


Рис 22. Психрометр Ассмана

Прибор работает следующим образом: вентилятором в прибор засасывается воздух, который, обтекая термометры, проходит по воздухопроводной трубке 5 и выбрасывается наружу через прорези. Благодаря протеканию вокруг резервуаров термометров потока воз-

духа с постоянной скоростью около 2,5–3 м/с «сухой» термометр показывает температуру этого потока, а показания «мокрого» термометра будут меньше, так как он охлаждается вследствие испарения воды с поверхности ткани. И чем суше воздух, тем сильнее испарение воды, и тем больше разница в показаниях термометров.

Для определения относительной влажности по психрометру Ассмана служат специальные психрометрические графики или таблицы, учитывающие влияние скорости потока на показания прибора: чем выше скорость, тем быстрее будет испаряться влага с «мокрого» термометра и скорее установится температурно-влажностный режим.

В этом заключается преимущество психрометра Ассмана над стационарным психрометром Августа, в котором скорость аспирации, т. е. омывания потоком воздуха, равна подвижности воздуха в помещении, которая, в принципе, не является постоянной величиной.

h-d диаграмма влажного воздуха

h-d диаграмма¹, разработанная советским теплотехником Л. К. Рамзиным (1887 – 1948) в 1918 г., (рис. 23 графически связывает между собой все параметры, определяющие тепловлажностное состояние влажного воздуха: удельную энтальпию, влагосодержание, температуру, относительную влажность и парциальное давление водяного пара. h-d диаграмма построена в косоугольной системе координат. Это позволяет расширить область ненасыщенного влажного воздуха, что делает ее удобной для графических построений. По оси ординат отложена удельная энтальпия² h , кДж/кг с. в., по оси абсцисс – влагосодержание d , г/кг с.в. Поле диаграммы разбито линиями постоянных энтальпий $h = \text{const}$ и влагосодержания $d = \text{const}$. На диаграмму нанесены линии постоянных температур $t = \text{const}$, которые представляют собой прямые линии, идущие под небольшим наклоном к горизонтали и слегка расходящиеся веером.

В нижней части расположена вспомогательная линия, имеющая самостоятельную ось ординат. Эта линия связывает влагосодержание d с парциальным давлением пара p_p .

¹ В Европе обычно применяется h-x диаграмма Молье, разработанная немецким теплотехником Рихардом Молье (1863–1935) в 1923 г.

² Далее – просто энтальпия.

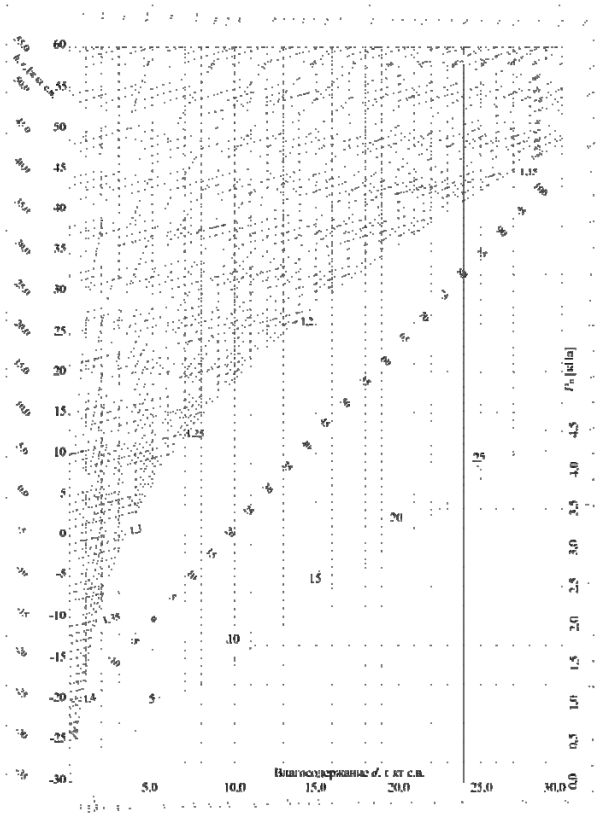


Рис. 23. h-d диаграмма влажного воздуха

По контуру h-d диаграммы построена шкала угловых коэффициентов лучей процессов изменения состояния воздуха (шкала тепловлажностных отношений) ε , кДж/кг влаги, которые рассчитываются по выражению:

$$\varepsilon = \frac{1000 \cdot \Delta h}{\Delta d}, \quad (49)$$

где Δh – изменение энтальпии в процессе изменения состояния воздуха, кДж/кг с. в.;

Δd – изменение влагосодержания в данном процессе, г/кг с. в.

Нахождение параметров влажного воздуха на h - d диаграмме

Рассмотрим нахождение параметров влажного воздуха по h - d диаграмме при использовании психрометра Ассмана.

1. Нахождение расчетной точки влажного воздуха.

На рис. 24 показаны этапы нахождения расчетной точки. Измерив температуры по «сухому» t_c и «мокрому» t_m термометру, необходимо отложить соответствующие температуры на температурной шкале. На изотерме температуры «мокрого» термометра t_m (линия 1) необходимо найти точку пересечения с линией $\varphi = 100\%$. Через данную точку необходимо провести изоэнтальпу $h = \text{const}$ (линия 2) до пересечения с изотермой температуры «сухого» термометра t_c (линия 3). Полученная точка пересечения и будет являться расчетной:

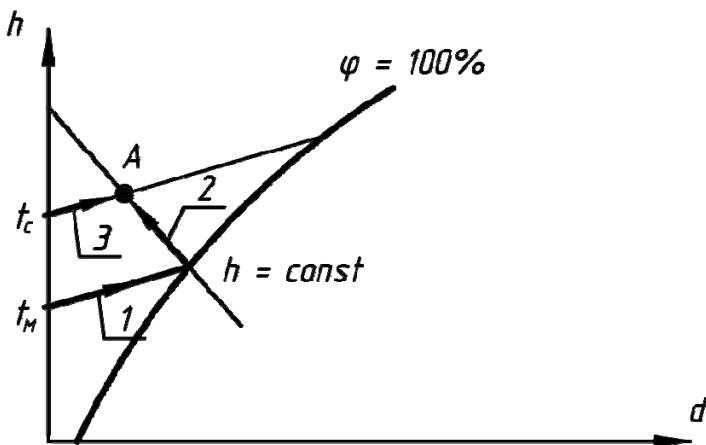


Рис. 24. Нахождение расчетной точки на h - d диаграмме

2. Нахождение параметров влажного воздуха.

Рис. 25 показывает этапы определения характеристик влажного воздуха для произвольной расчетной точки A .

Для нахождения величины относительной влажности φ_A , %, необходимо найти проходящую через точку кривую относительной влажности и определить значение величины (линия I - A).

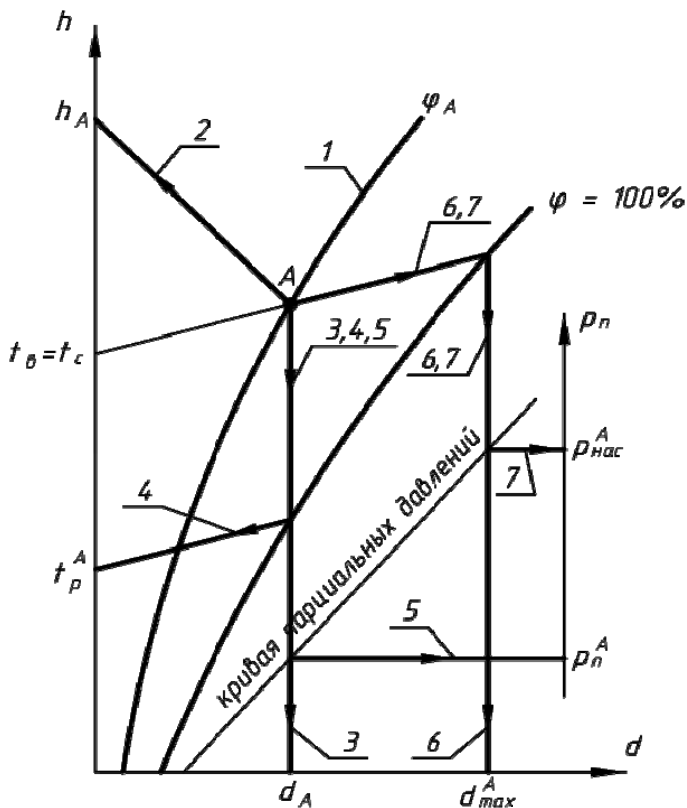


Рис. 25. Нахождение параметров расчетной точки

Энтальпия влажного воздуха h_A , кДж/кг с. в., находится проведением через точку линии постоянной энтальпии (линия $A-2$) с последующим нахождением значения величины по оси ординат.

Влагосодержание d_A , г/кг с. в., находится проведением через точку линии постоянного влагосодержания, параллельной оси ординат, с определением значения по оси d (линия $A-3$).

Точка росы влажного воздуха t_p^A , °С, определяется по точке пересечения линии влагосодержания d_A и линии $\varphi = 100\%$ со следующим нахождением соответствующей температуры по изотерме 4.

Парциальное давление водяного пара p_n^A , Па, находится переносом точки пересечения линии влагосодержания d^A и кривой парци-

альных давлений на ось парциальных давлений p , расположенную с правой стороны диаграммы (линия 5).

Для нахождения максимального влагосодержания d^A_{\max} , г/кг с. в., необходимо найти точку пересечения изотермы температуры воздуха t_b , равной температуре по «сухому» термометру t_c , и линии $\varphi = 100\%$ с последующим проведением через точку линии постоянного влагосодержания с определением значения по оси влагосодержания d (линия 6).

Давление насыщения (максимальное парциальное давление) водяного пара p^A (Па) находится по оси парциальных давлений путем нахождения точки пересечения линии максимального влагосодержания d^A_{\max} и кривой парциальных давлений (линия 7).

Порядок выполнения работы

Психрометр Ассмана устанавливают в местах измерения параметров влажного воздуха в помещении, количество которых определяется преподавателем. Резиновый баллон с пипеткой, заполненный водой, вводятся во внутреннюю трубку «мокрого» термометра психрометра и производится смачивание батиста. После этого заводится пружина вентилятора и через 3–5 минут производится снятие показаний обоих термометров, которые заносятся в табл. 5. Далее психрометр переносится в следующее место измерения, при этом проверяется увлажнение батиста и завод пружины.

Таблица 5

Результаты измерений

Номер точки замера	Назначение помещения	Показания термометров психрометра Ассмана	
		«сухого» t_c , °C	«мокрого» t_m , °C
1			
2			
3			
4			
5			

Обработка результатов эксперимента

По полученным значениям температур с помощью психрометрических таблиц или h - d диаграммы определяются параметры и характеристики влажного воздуха, которые вносятся в табл. 6.

Таблица 6

Значения параметров влажного воздуха

Номер точки замера	Назначение помещения	Параметры влажного воздуха							
		температура воздуха, $t_{вп}$, °С	относительная влажность, φ , %	энтальпия h , кДж/кг с. в.	влагосодержание, г/кг с. в.		парциальное давление $P_{п}$, Па	давление насыщения $P_{нас}$, Па	точка росы $t_{р}$, °С
					d	d_{max}			
1									
2									
3									
4									
5									

Контрольные вопросы

1. Назовите параметры и характеристики влажного воздуха и определите их физический смысл.
2. Как изменится относительная влажность при увеличении атмосферного давления?
3. Каковы принципы измерения параметров воздуха с использованием аспирационных психрометров?
4. Зачем у психрометра Ассмана никелированный корпус?
5. Где на h - d диаграмме находятся параметры сухого воздуха?
6. Как изменяется относительная влажность воздуха с постоян-

ным влагосодержанием при увеличении его температуры?

7. Как изменяется парциальное давление воздуха с постоянным влагосодержанием при уменьшении температуры?

8. От чего зависит максимальное парциальное давление воздуха?

9. Что нужно знать, чтобы определить температуру точки росы?

10. При каких условиях может образовываться конденсационная влага из воздуха?

11. На какие группы разделены расчетные температура и относительная влажность внутреннего воздуха в ГОСТ 30494-2011?

Рекомендуемая литература

1. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха расчетов / А. В. Нестеренко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1971. – 460 с.

2. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А. М. Протасевич; под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск : БНТУ, 2016. – 452 с.

Нормативная литература

1. Строительная теплотехника. СП 2.04.01-2020. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 72 с.

2. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: ГОСТ 30494-2011. – Введ. 13.11.2017. – Минск : Госстандарт, 2018. – 11 с.

Лабораторная работа № 3
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Цель работы: исследование воздухопроницаемости и определение фильтрационного потока воздуха и коэффициентов воздухопроницаемости различных строительных материалов.

Теоретические сведения

Строительные материалы в ограждающих конструкциях в большинстве своем являются капиллярно-пористыми телами, т. е. обладают определенной проницаемостью. Поэтому наличие разности давлений по обе стороны ограждающей конструкции может привести к направленному движению воздуха через нее. Данное явление называется фильтрацией или воздухопроницаемостью. Выделяют следующие виды фильтрации:

- инфильтрация – процесс проникновения наружного воздуха в помещение через ограждение;
- эксфильтрация – обратный инфильтрации процесс, т. е. воздух движется из помещения наружу.

Помещения в зданиях не должны быть полностью герметизированы. Например, оконные блоки и балконные двери обычно в меру воздухопроницаемы, так как это влияет на естественную вентиляцию помещений. Но воздухопроницаемость ограждающих конструкций не должна приводить к их переохлаждению или переувлажнению.

Наличие воздухопроницаемости оказывает влияние на передачу теплоты через различные ограждения, например:

1. *Заполнения световых проемов* (окна, балконные двери). В зданиях воздухопроницаемость данных заполнений является наибольшей среди остальных ограждающих конструкций. С этим связано увеличение расхода теплоты, которая идет на нагрев инфильтрующегося воздуха. В зависимости от конструкции заполнения, количество теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха могут достигать 30 % от ее расхода в целом.

2. *Наружные двери и ворота*. Влияние инфильтрации на них такое же, как и на заполнение световых проемов. Нормативными документами устанавливается ограничение по их воздухопроницаемости.

3. *Массив и стыки наружных ограждений.* Наличие инфильтрации через указанные элементы ограждения вызывает изменение температурного поля внутри конструкции и температуры на внутренней ее поверхности. Это обусловлено тем, что наружный воздух, проходя через ограждение навстречу кондуктивному (за счет теплопроводности) потоку теплоты, нагревается и поступает в помещение с более высокой температурой. Однако нагрев воздуха и смещение температурного поля в ограждении может существенно изменить его влажностный режим.

Различают три вида фильтрации:

– поперечная (сквозная) фильтрация – это вид фильтрации, возникающий в ограждениях, при котором фильтрационный поток воздуха проходит через все слои конструкции вследствие наличия перепада давлений по обе стороны ограждения. Поперечная фильтрация возникает при отсутствии в конструкциях плотных слоев с высоким сопротивлением воздухопроницанию.

– внутренняя фильтрация – это вид фильтрации, возникающий из-за наличия конвективных токов воздуха, обусловленных влиянием разности температур, в ограждениях, достаточно защищенных с обеих поверхностей. Примером могут служить конструкции с крупнопористыми засыпками, а также конструкции с минераловатным утеплителем низкой плотности. При наличии в ограждении данного вида фильтрации может значительно снизиться сопротивление теплопередаче ограждения в целом.

– продольная фильтрация – это вид фильтрации, возникающий в ограждениях, при наличии перепадов давлений на различных участках конструкции и проявляется в неконтролируемом движении воздуха в толще ограждения. При этом вход и выход воздуха наблюдается на различных участках наружной поверхности ограждающей конструкции. Данный вид фильтрации наблюдается у конструкций, наружная поверхность которых недостаточно защищена от воздухопроницания или имеет дефекты (пример: кирпичные стены с дефектами, оштукатуренные только с внутренней стороны).

Схематически, на примере наружной стены с вентилируемой фасадной системой утепления, смещение нулевой изотермы за счет процессов фильтрации в толще показано на рис. 26.

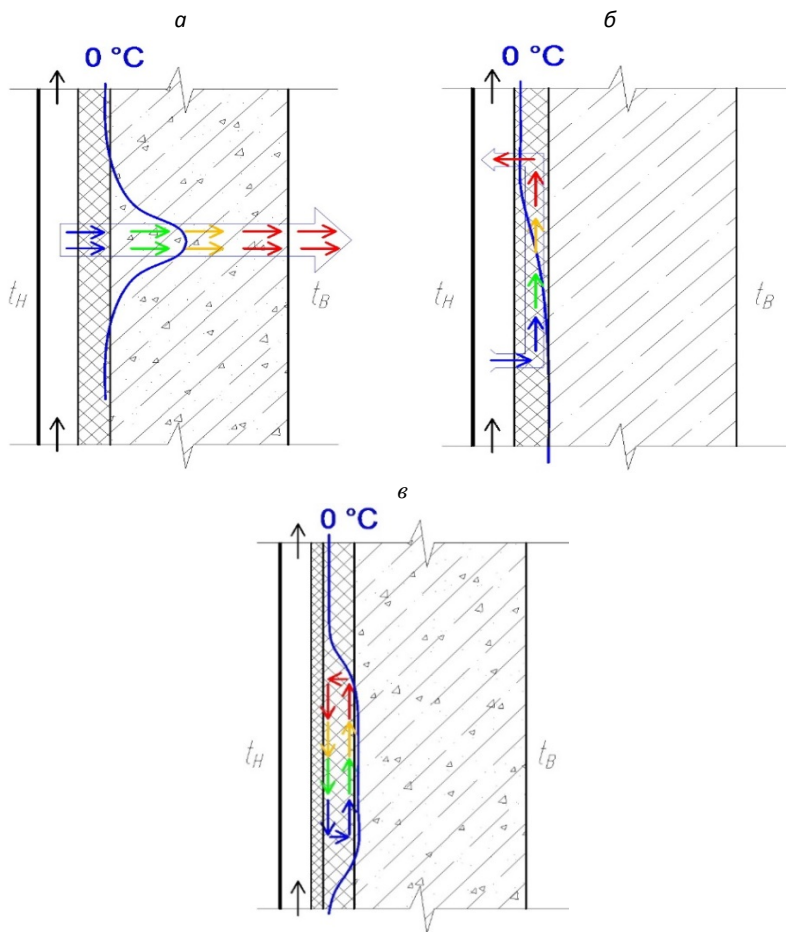


Рис. 26. Смещение нулевой изотермы при фильтрации воздуха в наружных стенах (на примере вентилируемой фасадной системы утепления):
a – поперечная фильтрация; *б* – внутренняя фильтрация;
в – продольная фильтрация

Воздухопроницаемость ограждающих конструкций зависит от разницы давлений воздуха по обе стороны конструкций. Суммарная разность давлений воздуха определяется наличием гравитационного и ветрового давления на противоположных поверхностях ограждения. Гравитационное давление – та разность давлений, которая воз-

никает из-за разности температур, и, следовательно, плотностей наружного и внутреннего воздуха:

$$\Delta P_{\text{гр}} = gh(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}), \quad (50)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

h – высота столба воздуха, м;

$\rho_{\text{н}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – плотность, кг/м^3 , соответственно наружного и внутреннего воздуха, определяемая по выражению:

$$\rho = \frac{353}{T} = \frac{353}{273 + t}, \quad (51)$$

где T – абсолютная температура воздуха, К;

t – температура воздуха по шкале Цельсия, °С.

Ветровое давление – разность давлений, возникающая из-за действия ветра на поверхность ограждения:

$$\Delta P_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{н}} v_{\text{ср}}^2}{2} (c_{\text{н}} - c_{\text{п}}) k_i, \quad (52)$$

где $c_{\text{н}}$, $c_{\text{п}}$ – аэродинамические коэффициенты (показывают ту часть динамического давления ветра, которая переходит в статическое) соответственно наветренной и подветренной поверхностей ограждения, принимаемые по СН 2.01.05-2019 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия»;

$v_{\text{ср}}$ – максимальная из средних скоростей ветра по румбам в январе, повторяемость которой составляет 16 % и более, м/с;

k_i – коэффициент учета изменения ветрового давления в зависимости от высоты здания и типа местности, принимаемый согласно СН 2.01.05-2019.

Воздухопроницаемость строительных материалов объясняется их структурой. Характер воздухопроницаемости каждого конкретного строительного материала и конструкции определяется экспериментальным путем. Эксперименты показывают, что при относительно небольшой разнице давлений движение воздуха в материала-

лах по капиллярам и порам происходит с малыми скоростями и носит ламинарный (слоистый) характер. Это обуславливается исключительно силами трения, зависящими от внутренней структуры строительного материала. Учитывая своеобразный характер потока в пористых телах, фильтрационное движение воздуха оценивается по характеру экспериментальной кривой. Зависимость между перепадом давлений ΔP и фильтрационным потоком G принимается линейной и описывается уравнением Дарси-Ланга:

$$G = i \frac{\Delta P}{\delta}, \quad (53)$$

где G – фильтрационный поток, кг/(м²·ч);

δ – толщина материала, м;

i – коэффициент воздухопроницаемости материала, кг/(м·ч·Па).

Он численно равен той массе воздуха в килограммах, которая проходит за 1 ч через поверхность образца, расположенную перпендикулярно воздушному потоку, площадью 1 м² при разности давлений на поверхностях 1 Па и толщине образца 1 м.

Описание экспериментальной установки

Схема установки приведена на рис. 27.

Установка представляет собой четыре образца – цементно-песчаная смесь (ЦПС), кирпич (К), неоштукатуренная кирпичная кладка (КК) и кирпичная кладка оштукатуренная (ККО) помещенные в герметичные металлические обоймы 1. Эти обоймы с помощью гибких шлангов и переключателя 2 соединены со стеклянным сосудом 3, заполненным водой.

Сосуд имеет кран 4 для регулировки стока воды. К этому же сосуду с помощью шланга подсоединен U-образный манометр 5, второе колено которого сообщается с атмосферой. Таким образом, объем за образцом, объем над водой в сосуде и объем над водой в правом колене U-образного манометра соединены между собой и представляют единой замкнутое пространство.

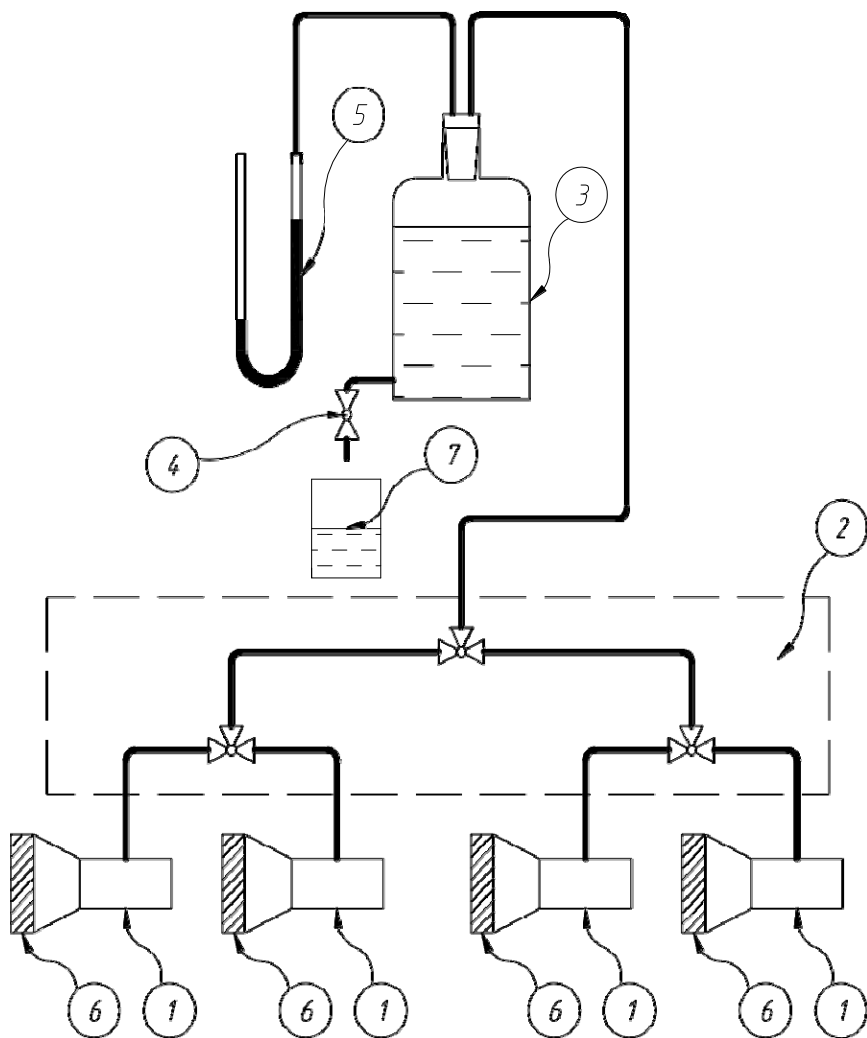


Рис. 27. Схема экспериментальной установки:
 1 – герметичные металлические обоймы;
 2 – переключатель;
 3 – стеклянный сосуд;
 4 – устройство регулировки интенсивности стока воды;
 5 – U-образный манометр;
 6 – образцы;
 7 – мерный стакан

Методика проведения эксперимента

Методика эксперимента основана на поддержании стационарного гидравлического режима. При открытии крана 4 из сосуда вытекает вода. Это приводит к увеличению общего объема, заполненного воздухом за образцом. Воздух заполняет все пространство и, как следствие, это приводит к уменьшению давления за образцом. Возникают условия для фильтрации воздуха через образец. Поток воздуха с наружной стороны (большее давление) устремляется через образец в сторону меньшего давления. В начальный период фильтрации поток воздуха через образец будет возрастать, но с течением времени скорость будет уменьшаться, а фильтрационный поток будет стремиться к определенной постоянной величине, т. е. стационарному гидравлическому режиму. Этот процесс визуально наблюдается по показаниям жидкостного U-образного манометра. В начальный период уровни жидкости в трубках манометра меняются резко, затем, при достижении стационарного гидравлического режима, устанавливаются постоянными. В этом режиме объем воздуха, проходящего через образец 6, равен объему жидкости, вытекающей из сосуда 3 в мерный стакан 7 за фиксированный промежуток времени.

Эксперимент состоит из двух частей:

1. В первой части необходимо исследовать зависимость воздухопроницаемости от структуры строительных материалов. При выполнении этой части эксперимента необходимо, чтобы условия проведения эксперимента для всех образцов были одинаковы, а именно: размеры образца, давление перед образцом, давление за образцом, температура и продолжительность эксперимента.

2. Во второй части необходимо исследовать зависимость воздухопроницаемости одного из материалов от разности давлений, устанавливаемой за и перед образцом.

Порядок проведения работы

Подключить исследуемый образец 6 к сосуду с водой 3 с помощью тройного переключателя 2. Установить стационарный гидравлический режим, открыв кран 4. В мерный стакан 7 за фиксированное время собрать вытекающую жидкость из сосуда 3. Время эксперимента – 1–2 минуты (по указанию). Определить объем жидкости.

В табл. 7 занести номер образца, его размеры, температуру воздуха, показания барометра и манометра, объем вытекшей жидкости и время опыта. Следует помнить, что при выполнении первой части эксперимента необходимо следить за показаниями манометра, которые не должны меняться в течение всего опыта. Кроме того, разность давлений для всех четырех образцов должна быть одинакова.

При исследовании зависимости воздухопроницаемости от разности давлений необходимо провести не менее трех опытов при различных показаниях водяного манометра (по указанию).

Обработка результатов эксперимента

1. Количество воздуха, проходящего через образец, зависит от условий эксперимента, поэтому для сравнительной оценки воздухопроницаемости материалов все результаты опыта необходимо привести к нормальным физическим условиям (н. ф. у.), которыми являются температура $T_0 = 273$ К и атмосферное давление $B_0 = 101\,325$ Па. Тогда масса воздуха m (кг), прошедшего через образец за время опыта при н. ф. у., определяется по выражению:

$$m = \frac{(B - \Delta P) T_0 V \rho_0}{B_0 T}, \quad (54)$$

где B – атмосферное (барометрическое) давление при испытаниях, Па;
 ΔP – разрежение над образцом, Па, определяется по водяному манометру; ρ_0 – плотность, кг/м³, воздуха при н. ф. у., $\rho_0 = 1,29$ кг/м³;
 V – объем жидкости, вытекшей из сосуда за время опыта, м³.
 T – температура воздуха при проведении эксперимента, К.

2. Фильтрационный поток G , кг/(м²·с), определяется по формуле:

$$G = \frac{m}{F \cdot \tau}, \quad (55)$$

где F – площадь образца, м²;

τ – время опыта, с.

3. Коэффициент воздухопроницаемости определяется по формуле:

$$i = \frac{G \cdot \delta}{\Delta P}, \quad (56)$$

1. Результаты всех расчетов свести в табл. 8.
2. По результатам экспериментов следует построить графики:
 - зависимости фильтрационного потока от структуры строительных материалов (для опытов 1–4), т. е. $G = f(N_{\text{обр}})$ (рис. 28);

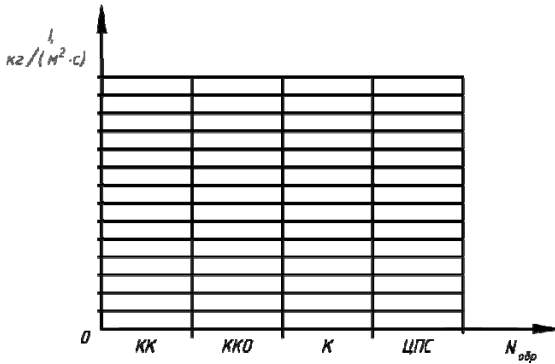


Рис. 28. График зависимости фильтрационного потока от структуры строительных материалов

- зависимости фильтрационного потока от величины разрежения за образцом (для опытов 4–6), т. е. $G = f(\Delta P)$ (рис. 29).

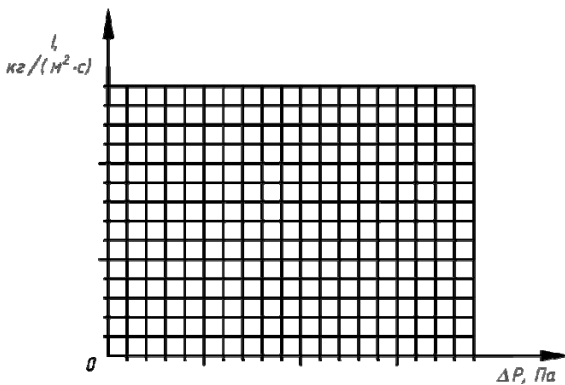


Рис. 29. График зависимости фильтрационного потока от величины разрежения за образцом

3. По результатам экспериментов и расчетов следует сделать вывод о влиянии слоев ограждающей конструкции и перепада давления на величину воздухопроницаемости.

Таблица 7

Результаты эксперимента

Номер опыта	Вид материала	Время опыта t , с	Размеры образца				Показание манометра Δh , мм вод. ст.	Атмосферное давление B , Па	Температура воздуха t , °С	Объем вытекшей Жидкости V , мл
			толщина δ , м	ширина a , м	высота b , м	площадь F , м ²				
1	КК									
2	ККО									
3	К									
4	ЦПС									
5	ЦПС									
6	ЦПС									

Таблица 8

Результаты расчета

Номер опыта	Вид материала	Время опыта t , с	Разрежение над образцом ΔP , Па	Атмосферное давление B , Па	Температура воздуха T , К	Объем вытекшей жидкости V , м ³	Масса прошедшего воздуха m , кг	Воздухопроницаемость G , кг/(м ² ·с)	Коэффициент воздухопроницаемости i , кг/(м·с·Па)
1	КК								
2	ККО								
3	К								
4	ЦПС								
5	ЦПС								
6	ЦПС								

Контрольные вопросы

1. Какое влияние оказывает фильтрация воздуха на тепловлажностный режим ограждающей конструкции?
2. От каких факторов зависит ветровое и гравитационное давление ?
3. По каким формулам можно рассчитать количество воздуха, проходящего через ограждение?
4. В чем заключается различие между поперечной, продольной и внутренней фильтрацией воздуха?
5. Каков физический смысл коэффициента воздухопроницаемости и от каких факторов он зависит?
6. Какой физический смысл аэродинамического коэффициента?
7. От чего зависит нормативная воздухопроницаемость наружных ограждающих конструкций?
8. Как рассчитать величину нормативной воздухопроницаемости наружной ограждающей конструкции?
9. Как определить фактическое сопротивление воздухопроницанию наружной стены здания?
10. Как определить фактическое сопротивление воздухопроницанию оконного блока здания?

Рекомендуемая литература

1. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / А. М. Протасевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 239 с.
2. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин; под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. – 5-е изд., перераб. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.

Нормативная литература

1. Строительная теплотехника. СП 2.04.01-2020. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 72 с.

Лабораторная работа № 4
**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ
КАНАЛЬНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ**

Цель работы: выявление влияния характеристик конструктивных элементов и условий работы на производительность канальной вытяжной вентиляции с естественным побуждением движения воздуха.

Теоретические сведения

В помещениях с небольшими воздухообменами, где изменение количества вентиляционного воздуха не отражается на самочувствии человека (обычно в жилых и общественных зданиях), устраивают организованную вытяжную вентиляцию с возмещением удаляемого воздуха за счет неорганизованного притока через неплотности ограждений (оконные блоки, стыки панелей и пр.). Основным условием проектирования системы вентиляции является обеспечение заданной производительности L , м³/ч, равной расчетному воздухообмену вентилируемого помещения. Это достигается подбором таких типоразмеров всех конструктивных элементов (решеток, каналов и др.), при которых суммарные потери давления в системе ΔP_c , Па, будут равны располагаемому давлению $\Delta P_{расп}$, Па, которое в данном случае возникает вследствие наличия разности плотностей воздуха внутри и снаружи здания, т. е. гравитационных сил. Располагаемое давление в вытяжной естественной вентиляции равняется гравитационному давлению $\Delta P_{гр}$, Па, т. е. в итоге получим, что должно выполняться равенство:

$$\Delta P_c = \Delta P_{расп} = \Delta P_{гр}. \quad (57)$$

Холодный наружный воздух, имеющий более высокую плотность, чем внутренний, проникая в помещение, стремится вытеснить вверх более легкий нагретый внутренний. При этом плоскость равных давлений (нейтральная зона) располагается посередине закрытого решеткой вытяжного отверстия, которое располагается на расстоянии 0,3–0,5 м от потолка.

Гравитационное давление, вызывающее движение воздуха в канале, равно разности гидростатических давлений наружного и внутреннего воздуха:

$$\Delta P_{\text{гр}} = gh(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) = h(\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}}), \quad (58)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения:

h – высота канала, м;

$\rho_{\text{н}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – плотность, кг/м^3 , соответственно наружного и внутреннего воздуха, определяемая по выражению:

$$\rho = \frac{353}{273 + t}, \quad (59)$$

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

$\gamma_{\text{н}}$ и $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес, Н/м^3 , соответственно наружного и внутреннего воздуха, равный произведению плотности на ускорение свободного падения.

Из формулы (58) следуют следующие выводы:

- гравитационное давление растет с увеличением высоты канала;
- гравитационное давление увеличивается с возрастанием разности температур и, следовательно, плотностей наружного и внутреннего воздуха;
- гравитационное давление не зависит от конфигурации и протяженности системы.

Движение воздуха в системе сопряжено с преодолением сопротивлений на трение воздуха о стенки канала и в местных сопротивлениях. Местные сопротивления можно разделить на три категории:

- с изменением направления потока (отводы, колена);
- с изменением скорости потока (диффузоры, конфузоры, решетки, клапаны);
- с изменением скорости и направления потока (тройники, крестовины).

Для определения потерь давления на участке с постоянным расходом и размерами канала служит следующая формула:

$$\Delta P_{\text{уч}} = \Delta P_{\text{тр}} + Z = \frac{\lambda}{d} l P_{\partial} + \sum \zeta P_{\partial} = Rl + \sum \zeta P_{\partial}, \quad (60)$$

где $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери давления по длине, Па;

R – удельные потери давления на трение на 1 м длины канала, Па/м;

λ – коэффициент трения (коэффициент Дарси);

l – длина участка, м;

d – диаметр канала, м;

$P_{\text{д}} = \rho v^2/2$ – динамическое давление воздуха, Па;

v – средняя скорость движения воздуха в канале, м/с;

Z – потери давления в местных сопротивлениях, Па;

$\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Коэффициент местного сопротивления ζ показывает отношение потерь полного давления в местном сопротивлении к динамическому давлению после него.

Если канал имеет прямоугольную форму, то вместо диаметра используется эквивалентный диаметр, рассчитываемый по выражению:

$$d_{\text{э}} = \frac{2ab}{a+b}, \quad (61)$$

где a и b – ширина и высота прямоугольного канала, м.

Общие потери давления в системе получают суммированием потерь давления на всех участках:

$$\Delta P_{\text{с}} = \Sigma \Delta P_{\text{уч}}. \quad (62)$$

При изменении располагаемого гравитационного давления в системе меняется расход воздуха. Это происходит из-за необходимости соблюдения равенства в формуле (57). Например, при увеличении гравитационного давления для соблюдения данного равенства должна возрасти скорость движения воздуха (см. формулу (60)), и, следовательно, исходя из уравнения неразрывности струи, увеличится расход воздуха L , м³/ч:

$$L = 3600 \cdot v \cdot F, \quad (63)$$

где F – площадь «живого» (свободного для прохождения воздуха) сечения, м².

На графике в системе координат $P-L$ каждому соотношению производительности (расхода) и потери давления соответствует точка. По результатам аэродинамических расчетов систем вентиляции при различных производительностях можно получить ряд точек, соединив которые можно получить кривую, которая выражает зависимость потерь давления от расхода в сети – характеристику сети.

Для вентиляционных сетей график характеристики сети представляет собой параболу, исходящую из начала координат:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{уч}} &= \left(\frac{\lambda}{d} l + \sum \zeta \right) \cdot P_d = \left(\frac{\lambda}{d} l + \sum \zeta \right) \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \\ &= \left(\frac{\lambda}{d} l + \sum \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{L}{3600 \frac{\pi d^2}{4}} \right)^2 = \\ &= \left[\left(\frac{\lambda}{d} l + \sum \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{16}{(3600\pi)^2 d^4} \right] \cdot L^2 = kL^2, \end{aligned} \quad (64)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида сети, Па/(м³/ч)².

Из выражения (63) видно, что при увеличении потерь давления в системе расход воздуха резко снижается. Это может происходить при увеличении шероховатости стенок канала и особенно при введении дополнительных местных сопротивлений.

Кроме гравитационного давления вторым побудителем движения воздуха в организованной системе вентиляции помещений является ветер.

Устройство, позволяющее перемещать вентиляционный воздух за счет кинетической энергии ветра, называется *дефлектор* (см. рис. 30).

Дефлекторы представляют собой различного вида насадки, устанавливаемые на вытяжной шахте над крышей здания. Под воздействием ветра часть наветренной боковой поверхности дефлектора находится под повышенным давлением, а остальная, значительно большая поверхность, – под разрежением. Вследствие этого происходит подсос воздуха из шахты, на которую установлен дефлектор, что влечет увеличение расхода удаляемого из помещения воздуха.

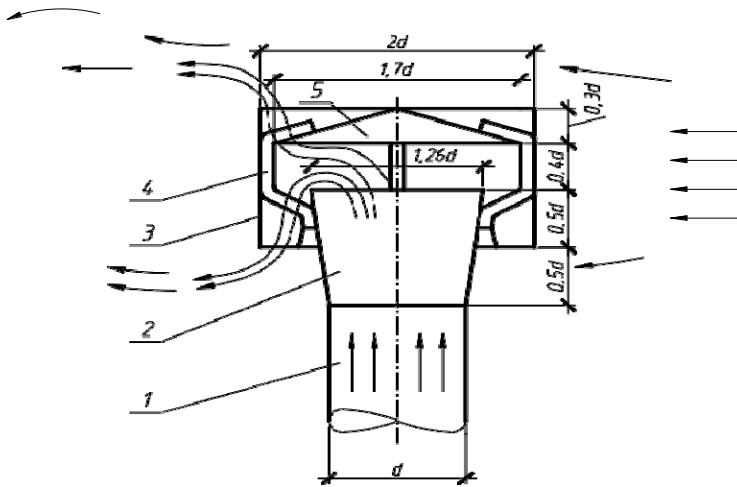


Рис. 30. Круглый дефлектор ЦАГИ:
 1 – всасывающий патрубок; 2 – диффузор; 3 – корпус дефлектора;
 4 – лапки для крепления зонта-колпака; 5 – зонт-колпак

Простейшим дефлектором может быть обычный цилиндр и даже концевая часть круглой вытяжной шахты, однако в этом случае разрежение под действием потока ветра возникает горизонтально или вверх под некоторым углом. Если же поток будет направлен книзу, начнется задувание наружного воздуха внутрь канала, т. е. произойдет так называемое «прокидывание тяги». Форма головки дефлектора устраняет эту опасность, обеспечивая постоянную вытяжку через канал при любом наклоне потока наружного воздуха.

Конфигурации дефлекторов обычно разрабатываются эмпирическим путем. Все размеры дефлектора принимают кратными линейному размеру его всасывающего патрубка (диаметра или стороны квадрата), являющемуся исходной величиной для определения габаритов.

Разряжение, создаваемое дефлектором, а также его производительность зависят от скорости ветра и определяются по эмпирическим формулам или графическим характеристикам. Так для дефлектора ЦАГИ зависимость скорости воздуха в патрубке дефлектора v_d , м/с, для совместного действия гравитационного и ветрового давления определяется по выражению:

$$v_d = \sqrt{\frac{0,4v_B^2 + 1,6\Delta P_{гр}}{1,2 + \sum \zeta + 0,02 \frac{l}{d}}}, \quad (65)$$

где v_B – скорость ветра, м/с;

$\Delta P_{гр}$ – гравитационное давление, Па, рассчитанное по формуле (4.2);

$\sum \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений вытяжного воздуховода, при его отсутствии $\zeta = 0,5$ (вход в патрубок дефлектора);

l – длина патрубка дефлектора или вытяжного воздуховода, м;

d – диаметр патрубка дефлектора или вытяжного воздуховода, м.

Описание экспериментальной установки

Схема установки приведена на рис. 31.

Установка состоит из двух труб (3 и 4) одинакового диаметра $d = 100$ мм, но разной длины (соответственно 1,5 м и 3 м). В нижней части расположена воздухоприемная камера 1 с нагревателями 2, которые обеспечивают примерно одинаковую температуру воздуха на входе в канал.

Таким образом, камера имитирует отапливаемое помещение, а лаборатория – наружную среду, в которую удаляется воздух. Над короткой трубой 3 установлен зонт 5, который можно поднимать или опускать над плоскостью выхода воздуха. Кроме того, имеются кронштейны для установки простейшего цилиндрического дефлектора 6. На длинной трубе 4 сделана прорезь 7 для размещения диафрагм с отверстиями разного диаметра, имитирующих суммарное влияние местных сопротивлений.

Для измерения скоростей воздуха в каналах служат крыльчатые переносные анемометры типа АП-1, датчики 9 которых установлены в местах измерения, а значение скорости выводится на индикаторное табло 10, вмонтированное в лабораторный стенд 15.

Измерение скорости потока наружного воздуха (имитации действия ветра), создаваемого настольным осевым вентилятором с регулируемым числом оборотов 8, производится также крыльчатым анемометром типа АП-1, датчик 9 которого установлен у вентилятора, а значение скорости выводится на индикаторное табло 10.

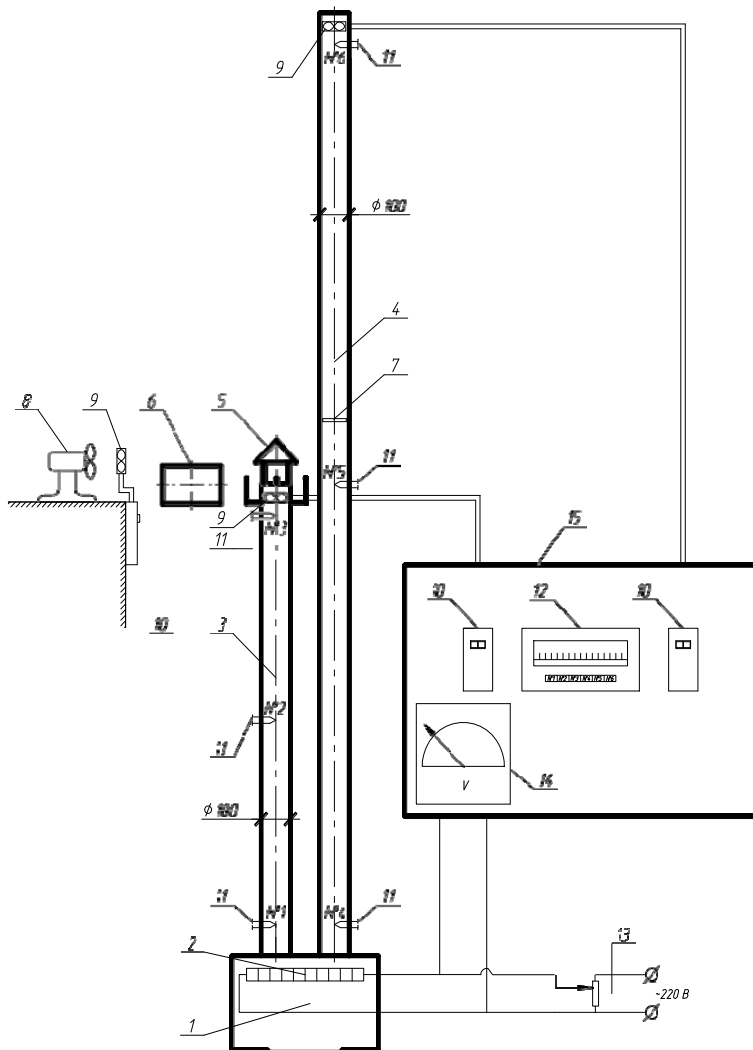


Рис. 31. Схема экспериментальной установки:
 1 – воздухоприемная камера; 2 – нагревательный элемент;
 3 – канал высотой 1,5 м; 4 – канал высотой 3 м;
 5 – вытяжной зонт; 6 – дефлектор; 7 – прорезь для установки диафрагм;
 8 – осевой вентилятор; 9 – датчик крыльчатого анемометра;
 10 – индикаторное табло анемометра; 11 – термопара; 12 – потенциометр;
 13 – ЛАТР, 14 – вольтметр; 15 – лабораторный стенд

Для измерения температуры воздуха в каналах $t_{\text{в}}^{cq}$, °С, служат установленные в них термодпары 11 (№ 1–6), подключенные к показывающему потенциометру 12 типа КВП-1, установленному на стенде 15. Температура воздуха помещения $t_{\text{н}}$, °С, измеряется по «сухому» термометру установленного в лаборатории психрометра Августа или Ассмана.

Изменение температуры воздуха в каналах осуществляется с помощью изменения напряжения, подающегося на нагреватели 2, подключенные к системе электроснабжения через ЛАТР 13. Выходное напряжение ЛАТР-а фиксируется вольтметром 13, установленным на стенде 15.

Порядок выполнения работы

1. Первый этап состоит в выяснении влияния высоты на гравитационное давление при одинаковых температурных условиях и зависимости производительности от гравитационного давления. Этап выполняется при трех режимах работы установки:

- режим I – напряжение 100 В;
- режим II – напряжение 160 В;
- режим III – напряжение 220 В.

Установить напряжение в сети (режим работы нагнетателя) и после наступления стационарных условий теплообмена (примерно через 10–15 мин), когда температура в каждой точке устанавливается неизменной, снимаются показания температур в каналах, переключая клавиши потенциометра 12, и скорости движения воздуха по соответствующим индикаторным табло 10.

Поворотом ручки ЛАТРа 13 изменить напряжение в сети нагревателей, контролируемое по показаниям вольтметра 14.

Значения заносятся в табл. 9.

Плотность внутреннего воздуха определяется по выражению (58) исходя из средней температуры воздуха $t_{\text{в}}^{\text{cp}}$, которая рассчитывается как среднеарифметическое значение температур воздуха в соответствующем канале. Плотность наружного воздуха определяется по температуре воздуха в лаборатории.

2. Второй этап выполнения лабораторной работы состоит в нахождении зависимости производительности системы от дополнительных местных сопротивлений.

Влияние высоты на гравитационное давление и зависимость производительности от гравитационного давления

Высота канала h , м	Режим работы	Напряжение U , В	Скорость воздуха в канале v , м/с	Температура воздуха, °С				Плотность воздуха, кг/м ³		Гравитационное давление $\Delta P_{гр}$, Па	Расход воздуха в канале L , м ³ /ч
				в поме- щении t_n	в канале			ρ_n	ρ_v		
					t_1	t_2	t_3				
3,0	I	100									
	II	160									
	III	220									
1,5	I	100									
	II	160									
	III	220									

Для нахождения зависимости необходимо оставить неизменным напряжение для III режима работы установки, а затем измерить скорости движения воздуха при различных дополнительных местных сопротивлениях, которые имитируются диафрагмами. Для изменения сечения в прорезь 7 длинного канала 4 поочередно вставляются диафрагмы известных относительных проходных сечений.

Относительным проходным сечением \bar{f} диафрагмы называется величина:

$$\bar{f} = \frac{F_{отв}}{F_k}, \quad (66)$$

где $F_{отв}$ – площадь отверстия диафрагмы, м²;

F_k – площадь канала, м².

Результаты эксперимента заносятся в табл. 10.

Таблица 10

Влияние местных сопротивлений
на производительность системы

Относительное проходное сечение диафрагмы \bar{f}	Скорость воздуха в канале v , м/с	Расход воздуха в канале L , м ³ /ч

3. Третий этап – выявление влияния относительной высоты установки вытяжного зонта на производительность системы.

Для нахождения зависимости необходимо оставить неизменным напряжение для режима III работы установки, а затем, изменяя высоту установки зонта 5 над вытяжным каналом 3 в пределах от 0 до 10 см, измерить скорости движения воздуха.

Значения величин заносятся в табл. 11.

Таблица 11

Влияние относительного высоты установки зонта на
производительность системы

Высота установки вытяжного зонта h_3 , см	Диаметр канала d , см	Относительная высота установки зонта h_3/d	Скорость воздуха в канале v , м/с	Расход воздуха в канале L , м ³ /ч	
0	10				
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

4. Четвертый этап состоит в выявлении влияния на работу вытяжной системы дефлектора.

Вытяжной зонт 5 устанавливается над трубой 3 на высоту 70 мм, а на кронштейны устанавливается корпус цилиндрического дефлектора 6 и производится замер скорости воздуха в канале.

После этого включают настольный осевой вентилятор 8 и при трех режимах его работы производятся замеры скорости воздуха в канале.

Результаты эксперимента заносятся в табл. 12.

Таблица 12

Влияние дефлектора
на производительность вытяжной системы

Скорость потока (ветра) v_B , м/с	Скорость воздуха в канале v , м/с	Расход воздуха в канале L , м ³ /ч
0		

Обработка результатов эксперимента

1. Вычислить средние значения температуры воздуха в канале и определить плотности воздуха ρ_B и ρ_H по формуле (59), гравитационное давление $\Delta P_{гр}$ по выражению (58) и расход воздуха (производительность системы) L по формуле (63).

По полученным данным построить графики (рис. 31) зависимости гравитационного давления от расхода воздуха $\Delta P_{гр} = f(L)$ для различных высот каналов (1,5 м и 3,0 м).

2. По результатам заполнения табл. 10 построить график зависимости расхода в канале от относительного проходного сечения канала $L = f(\bar{f})$ (рис. 32).

3. По результатам расчетов в табл. 11 построить график зависимости расхода в канале от относительной высоты установки зонта $L = f(h_s / d)$ (рис. 33).

По результатам заполнения табл. 11 построить график зависимости расхода в канале от скорости ветра при установке дефлектора $L = f(v_g)$ (рис. 34).

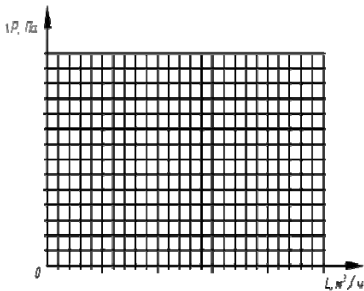


Рис. 31. График зависимости гравитационного давления от расхода для различных высот каналов

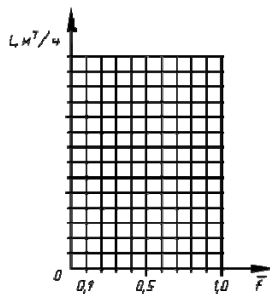


Рис. 32. График зависимости расхода в канале от влияния местных сопротивлений

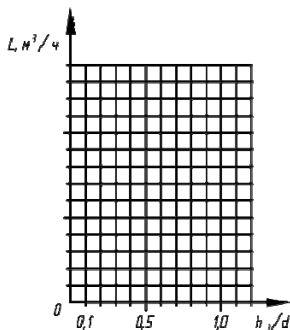


Рис. 33. График зависимости расхода в канале от относительной высоты установки вытяжного зонта

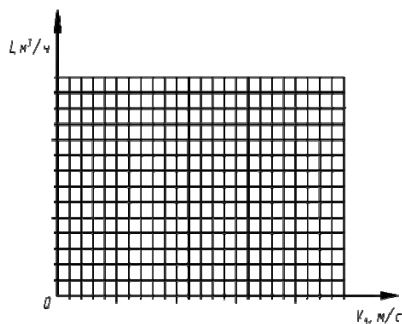


Рис. 34. График зависимости расхода в канале с установленным дефлектором от скорости ветра

Контрольные вопросы

1. Что такое воздухообмен?
2. За счет чего возникает гравитационное давление?

3. От чего зависит расход воздуха в канале естественной вытяжной системы вентиляции?

4. На что расходуется располагаемое давление при движении воздуха по каналу?

5. Как влияет дефлектор на работу естественной вытяжной системы вентиляции?

6. Почему плотность наружного воздуха выше плотности внутреннего воздуха?

Как определяются потери давления на местные сопротивления при движении воздуха в каналах?

7. Как изменяется гравитационное давление с увеличением высоты канала?

8. Как изменяется гравитационное давление с изменением перепада температур между наружным и внутренним воздухом?

Рекомендуемая литература

1. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование. / Б. М. Хрусталёв [и др.]; Под общ. ред. Б. М. Хрусталёва – 3-е изд., испр. и доп. – М. : АСВ, 2008. – 784 с.

2. Тихомиров, К. В. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция / К. В. Тихомиров, Э. С Сергеенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991. – 480 с.

Нормативная литература

1. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03-2019. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 68 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование / Б. М. Хрусталёв [и др.]; под. общ. ред. Б. М. Хрусталёва. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во АСВ, 2008. – 784 с.

2. Внутренние санитарно-гигиенические устройства: в 3 ч. / Богословский В. Н. [и др.]; под ред. Н. Н. Павлова и Ю. И. Шиллера. – М. : Стройиздат, 1992. – Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – 319 с.

3. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В. Н. Богословский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.

4. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: ГОСТ 30494-2011. – Введ. 13.11.2017. – Минск : Госстандарт, 2018. – 11 с.

5. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность. СН 2.04.02-2020. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. – 24 с.

6. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны: ГОСТ 12.1.005–88. – Введ. 01.01.89. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 76 с.

7. Строительная климатология. СНБ 2.04.02-2000. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2001. – 37 с.

8. Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01 – 99* / В. К. Савин [и др.]; под. ред. чл.-кор. В. К. Савина. – М. : НИИ строительной физики РААСН, 2006. – 258 с.

9. Строительная теплотехника. СП 2.04.01-2020. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 72 с.

9. Таблицы психометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения: ГОСТ 8.524-85. – Введ. 12.02.1985. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. – 34 с.

10. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СН 4.02.03-2019. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 68 с.

11. Назаров В. И. Теплотехнические измерения и приборы : учеб. пособ. / В. И. Назаров, В. А. Чиж, А. Л. Буров. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 174 с.

Относительная влажность воздуха (по психрометру Августа)

Показание «морота» термометра, °С	Влажность в % при психрометрической разности температур, °С																				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16	11	7	3					
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19	15	11	7					
2	100	90	83	75	67	61	54	47	42	36	31	26	23	18	14	10					
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	26	21	17	13	10				
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28	24	20	16	14	11			
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30	27	23	19	17	13	10		
6	100	92	85	78	72	66	61	56	50	45	41	35	33	29	26	22	19	16	13	10	
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35	31	28	25	22	18	15	12	11
8	100	92	86	80	74	68	63	59	54	48	45	41	37	33	30	27	25	21	18	15	14
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39	35	32	29	27	24	21	18	17
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41	38	34	31	28	26	23	21	19
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43	40	36	33	30	28	25	23	20

Показание «микрога» термометра, °С	Влажность в % при психрометрической разности температур, °С																					
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44	42	38	35	32	30	27	25	22	
13	100	94	88	83	78	73	69	64	61	57	53	50	46	43	40	37	34	32	29	27	24	
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47	45	41	39	36	34	31	29	26	
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49	46	43	41	37	35	33	31	28	
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50	48	44	42	39	37	34	32	30	
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52	49	46	44	40	38	36	34	31	
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	53	50	47	45	42	40	37	35	33	
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54	51	48	46	43	41	39	37	34	
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55	53	49	47	44	43	40	38	36	
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	41	39	37	
22	100	95	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57	56	52	50	47	45	42	40	38	
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58	56	53	51	48	46	43	41	39	
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59	56	53	52	49	47	44	42	40	
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	59	57	54	52	49	47	45	44	42	

Относительная влажность воздуха (по психрометру Ассмана)

Психометрическая разность температур, °С	Влажность в % при температуре сухого термометра, °С															
	-10	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+8	+10	+12	+14	+16	+18	+20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0,0	95	96	97	97	98	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,1	92	93	95	96	97	97	98	98	99	99	99	99	99	99	99	99
0,2	90	91	93	94	96	96	97	97	97	98	98	98	98	99	99	99
0,3	87	88	90	92	94	94	95	95	96	96	96	97	97	98	98	98
0,4	84	85	87	90	92	92	94	94	95	95	95	96	96	97	97	97
0,5	82	83	85	88	90	91	93	93	94	94	94	95	95	96	96	96
0,6	79	80	82	85	88	89	91	92	92	92	92	93	94	95	95	95
0,7	76	78	80	83	86	87	89	91	91	91	91	92	92	94	94	94
0,8	73	75	77	81	84	85	86	89	89	89	89	90	91	92	93	93
0,9	70	72	75	79	82	83	85	87	87	88	89	90	91	92	92	92
1,0	67	70	73	77	80	82	84	85	86	86	88	89	90	91	91	91
1,1	64	67	70	75	78	80	82	84	85	86	87	88	89	90	90	90
1,2	61	64	68	73	76	78	80	83	83	84	85	87	88	89	89	90
1,3	57	62	66	71	74	76	79	82	82	83	84	86	87	88	88	89
1,4	54	59	64	69	72	74	77	80	80	81	83	85	86	87	87	88
1,5	51	57	62	67	71	73	76	78	79	80	82	84	85	86	86	87
1,6	48	54	59	65	69	71	75	77	78	79	80	82	84	85	85	86
1,7	45	52	57	63	67	70	73	75	76	78	79	81	82	84	84	85
1,8	43	49	55	61	65	68	72	74	75	77	78	80	82	83	83	84

Психрометрическая разность температур, °С	Влажность в % при температуре сухого термометра, °С															
	-10	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+8	+10	+12	+14	+16	+18	+20
1,9	40	47	53	59	63	66	70	73	74	76	77	79	81	82	82	83
2,0	38	45	51	57	62	65	69	71	73	75	76	78	80	81	81	82
2,1	35	43	49	55	60	63	66	70	71	73	75	77	79	80	81	82
2,2	32	41	47	53	58	61	64	68	70	72	74	76	78	79	80	81
2,3	29	39	45	51	57	59	63	67	69	71	73	75	77	78	79	80
2,4	26	37	43	49	55	57	61	65	67	70	72	74	76	77	78	80
2,5	23	35	41	47	53	56	60	64	66	69	71	73	75	77	78	79
2,6	20	32	39	45	51	54	59	63	65	68	70	72	74	76	77	78
2,7	18	30	37	43	49	52	57	61	63	66	68	71	73	75	76	77
2,8	15	27	35	41	47	51	56	60	62	65	67	70	72	74	75	76
2,9	12	24	33	39	45	49	55	59	61	64	66	69	71	73	74	75
3,0	10	22	32	38	44	48	53	58	60	63	65	68	70	72	73	74
3,1	—	20	30	36	42	46	51	56	58	61	64	67	69	71	72	73
3,2	—	19	28	34	41	45	49	54	57	60	63	66	68	70	72	72
3,3	—	16	26	32	39	43	48	53	55	59	62	65	67	69	71	71
3,4	—	14	24	30	37	42	47	52	54	58	61	64	66	68	70	70
3,5	—	12	23	29	36	41	46	50	53	57	60	63	65	67	69	70
3,6	—	—	21	27	34	39	44	48	52	55	59	62	64	66	68	69
3,7	—	—	20	26	33	38	43	47	51	54	58	61	63	65	67	68
3,8	—	—	18	24	31	36	41	46	50	53	57	60	62	64	66	68
3,9	—	—	16	23	30	35	40	44	48	52	56	59	61	63	65	67

Психрометрическая разность температур, °С	Влажность в % при температуре сухого термометра, °С															
	-10	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+8	+10	+12	+14	+16	+18	+20
4,0	-	-	15	22	29	33	39	43	47	51	54	57	60	62	64	66
4,1	-	-	-	19	26	30	36	41	45	48	52	55	58	61	62	64
4,2	-	-	-	19	26	30	36	41	45	48	52	55	58	61	62	64
4,4	-	-	-	16	24	27	33	39	42	46	50	53	56	58	60	63
4,6	-	-	-	13	21	25	31	36	40	44	48	51	54	57	59	61
4,8	-	-	-	11	19	22	28	33	38	42	46	50	53	55	58	60
5,0	-	-	-	9	17	20	25	31	36	40	44	48	51	54	56	58
5,2	-	-	-	-	-	-	22	28	34	38	42	46	50	52	54	56
5,4	-	-	-	-	-	-	19	26	31	36	40	44	48	50	52	54
5,6	-	-	-	-	-	-	17	23	29	34	38	42	46	48	50	53
5,8	-	-	-	-	-	-	14	20	27	32	36	40	44	47	49	52
6,0	-	-	-	-	-	-	12	18	25	30	34	38	42	46	48	51
6,2	-	-	-	-	-	-	-	16	23	28	32	36	41	44	47	49
6,4	-	-	-	-	-	-	-	13	21	26	30	34	39	42	45	47
6,6	-	-	-	-	-	-	-	11	18	24	28	32	37	41	44	46
6,8	-	-	-	-	-	-	-	9	16	22	26	31	36	40	43	45
7,0	-	-	-	-	-	-	-	7	14	20	24	29	34	38	41	44
7,2	-	-	-	-	-	-	-	-	12	18	22	27	33	36	39	42
7,4	-	-	-	-	-	-	-	-	10	16	20	25	31	34	37	40
7,6	-	-	-	-	-	-	-	-	8	14	16	24	29	33	36	39
7,8	-	-	-	-	-	-	-	-	6	12	16	22	27	31	35	38

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НЕКОТОРЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материал	Плотность в сухом состоянии ρ , кг/м ³	Расчетные коэффициенты (при условиях эксплуатации)					
		теплопроводности λ , Вт/(м·°С)		теплоусвоения s , Вт/(м ² ·°С) (при периоде колебаний $T = 24$ ч)			
		А	Б	А		Б	
Бетоны и растворы							
Железобетон	2 500	1,92	2,04	17,98			19,70
Бетон на гравии или щебне из природного камня	2 400	1,74	1,86	16,77			17,88
Керамзитобетон на керамзитовом песке	1 800	0,80	0,92	10,50			12,33
	1 600	0,67	0,79	9,06			10,77
	1 400	0,56	0,65	7,75			9,14
	1 000	0,36	0,37	5,35			5,53
Газо- и пенобетон, газо- и пеносиликат	900	0,32	0,33	4,79			4,95
	800	0,28	0,29	4,22			4,38
	700	0,23	0,24	3,51			3,67
	600	0,18	0,19	2,81			2,95
Цементно-песчаный раствор	1 800	0,76	0,93	9,60			11,09
Сложный раствор (песок, известь, цемент)	1 700	0,70	0,87	8,95			10,42

Материал	Плотность в сухом состоянии ρ , кг/м ³	Расчетные коэффициенты (при условиях эксплуатации)					
		теплопроводности λ , Вт/(м·°С)			теплоусвоения s , Вт/(м ² ·°С) (при периоде колебаний $T = 24$ ч)		
		А	Б	В	А	Б	В
Кладки							
Глиняный обыкновенный кирпич	Глиняный обыкновенный кирпич	Глиняный обыкновенный кирпич	Глиняный обыкновенный кирпич	Глиняный обыкновенный кирпич	Глиняный обыкновенный кирпич	Глиняный обыкновенный кирпич	Глиняный обыкновенный кирпич
		Силикатный кирпич	Силикатный кирпич	Силикатный кирпич	Силикатный кирпич	Силикатный кирпич	Силикатный кирпич
Силикатный кирпич	Силикатный кирпич	0,87	1,07	0,81	0,78	9,16	10,29
Силикатный кирпич	Силикатный кирпич	0,69	0,81	0,78	7,91	8,59	9,79
Керамический кирпич	Керамический кирпич	0,63	0,78	0,630	8,72	9,58	8,48
Камни керамические	Камни керамические	0,575	0,630	0,630	8,72	9,58	8,48
18-щелевых плотностью 1 600 кг/м ³	18-щелевых плотностью 1 600 кг/м ³	1 700	0,575	0,630	8,72	9,58	8,48
Кирпич силикатный утолщенный	Кирпич силикатный утолщенный	1 600	1,03	1,28	8,83	9,91	9,91
Камни силикатные	Камни силикатные	1 400	0,79	0,93	7,93	9,01	9,01
Теплоизоляционные материалы							
Пенополиуретан	80	0,05	0,67	0,53	0,70	0,05	0,05
	60	0,041	0,53	0,55	0,55	0,05	0,05
	40	0,04	0,40	0,40	0,40	0,05	0,05
	125	0,046	0,51	0,60	0,60	0,66	0,66
Маты минераловатные прошивные	100	0,045	0,48	0,53	0,53	0,57	0,57
	75	0,043	0,46	0,45	0,45	0,48	0,48
	50	0,042	0,45	0,36	0,36	0,39	0,39

Материал	Плотность в сухом состоянии ρ , кг/м ³	Расчетные коэффициенты (при условиях эксплуатации)			
		теплопроводности λ , Вт/(м·°С)		теплоусвоения s , Вт/(м ² ·°С) (при периоде колебаний $T = 24$ ч)	
		А	Б	А	Б
Плиты пенополиэтирольные	15	0,054	0,25	0,30	0,05
	250	0,069	0,98	1,08	0,45
	200	0,064	0,85	0,93	0,49
	175	0,059	0,76	0,83	0,51
Плиты мягкие, полужесткие и жесткие минераловатные на синтетическом связующем	125	0,054	0,63	0,67	0,53
	75	0,051	0,47	0,51	0,57
	50	0,052	0,46	0,55	0,05
Плиты пенополистирольные	35	0,050	0,40	0,48	0,05
	25	0,052	0,33	0,39	0,05
Древесина и изделия из нее					
Сосна и ель поперек волокон	500	0,14	0,18	3,87	4,54
Сосна и ель вдоль волокон	500	0,29	0,35	5,56	6,33
Плиты древесноволокнистые и древесностружечные	1000	0,23	0,29	6,75	7,70
	8 000	0,19	0,23	5,49	6,13
	400	0,11	0,13	2,95	3,26
	200	0,07	0,08	1,67	1,81
Кровельные материалы, рулонные покрытия для полов					
Листы асбестоцементные плоские	1 800	0,47	0,52	7,55	8,12
	1 600	0,35	0,41	6,14	6,80
	1 400	0,27	0,27	6,80	6,80
Битум нефтяной строительный и кровельный	1 200	0,22	0,22	5,69	5,69
	1000	0,17	0,17	4,56	4,56

Материал	Плотность в сухом состоянии ρ , кг/м ³	Расчетные коэффициенты (при условиях эксплуатации)			
		теплопроводности λ , Вт/(м·°С)		теплоусвоения s , Вт/(м ² ·°С) (при периоде колебаний $T = 24$ ч)	
		А	Б	А	Б
Рубероид, пергамин, толь	600	0,17	0,17	3,53	3,53
Медь	8 500	407	407	326,0	326,0
Стекло оконное	2 500	0,76	0,76	10,79	10,79

Термическое сопротивление замкнутых воздушных прослоек

Толщина воздушной прослойки, м	Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки $R_T, \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$			
	горизонтальной, при потоке тепла снизу вверх, и вертикальной		горизонтальной, при потоке тепла сверху вниз	
	при температуре воздуха в прослойке			
	положительной	отрицательной	положительной	отрицательной
0,01	0,13	0,15	0,14	0,15
0,02	0,14	0,15	0,15	0,19
0,03	0,14	0,16	0,16	0,21
0,05	0,14	0,17	0,17	0,22
0,10	0,15	0,18	0,18	0,23
0,15	0,15	0,18	0,19	0,24
0,20–0,30	0,15	0,19	0,19	0,24

Примечание: при оклейке одной или обеих поверхностей, ограничивающих воздушную прослойку, алюминиевой фольгой термическое сопротивление следует увеличивать в 2 раза.

Максимальное парциальное давление
водяного пара влажного воздуха

Температура воздуха t , °С	Парциальное давление водяного пара E_k , Па	Температура воздуха t , °С	Парциальное давление водяного пара E_k , Па	Температура воздуха t , °С	Парциальное давление водяного пара E_k , Па
-25	63	-5	402	15	1 705
-24	69	-4	437	16	1 817
-23	77	-3	476	17	1 937
-22	85	-2	517	18	2 064
-21	93	-1	563	19	2 197
-20	103	0	611	20	2 338
-19	113	1	657	21	2 488
-18	125	2	705	22	2 644
-17	137	3	759	23	2 809
-16	151	4	813	24	2 984
-15	165	5	872	25	3 168
-14	181	6	935	26	3 363
-13	199	7	1 001	27	3 567
-12	217	8	1 072	28	3 782
-11	237	9	1 148	29	4 005
-10	260	10	1 228	30	4 243
-9	284	11	1 312	–	–
-8	310	12	1 403	–	–
-7	338	13	1 497	–	–
-6	369	14	1 599	–	–

Учебное издание

ПЕХОТА Александр Николаевич
КРУТИЛИН Антон Борисович
ЗОЛОТАРЁВА Ирина Михайловна

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Пособие

для студентов очной и заочной форм обучения специальностей
1-08 01 01-05 «Профессиональное обучение (строительство)»,
1-27 01 01-04 «Экономика и организация производства
(коммунальное и водное хозяйство)»,
1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов»,
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»

Редактор *А. С. Быховцова*
Компьютерная верстка *А. В. Степанкиной*

Подписано в печать 30.10.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,87. Уч.-изд. л. 3,72. Тираж 100. Заказ 53.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.