

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Е. А. Цынаева

**ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
И ПРИБОРЫ**

ПРАКТИКУМ

Ульяновск
УлГТУ
2015

УДК 697.34 (075)

ББК 31.38 я 7

Ц95

Рецензенты:

1. ФГБОУ ВПО «Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации (институт)», факультет лётной эксплуатации и управления воздушным движением;

2. Главный инженер МУП ЖКХ «Быт-Сервис» Петров А. И.

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве практикума

Цынаева, Е. А.

Ц95 Теплотехнические измерения и приборы : практикум /
Е.А. Цынаева. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 61 с.

ISBN 978-5-9795-1445-1

Практикум «Теплотехнические измерения и приборы» по дисциплине «Теплотехнические измерения и приборы» содержит теоретические сведения, справочные материалы, задания и упражнения, способствующие усвоению пройденного. Практикум предназначен для студентов направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки») и для студентов-бакалавров направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика»), а также будет полезен при выполнении экспериментальной части магистерских диссертаций по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Даны контрольные вопросы.

Работа подготовлена на кафедре «Теплоэнергетика».

УДК 697.34 (075)

ББК 31.38 я 7

ISBN 978-5-9795-1445-1

© Цынаева Е. А., 2015

©Оформление. УлГТУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
УСЛОВИЯ УСПЕШНОЙ ЗАЩИТЫ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ	4
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1. Средства измерения температуры	6
Контрольные вопросы	21
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2. Средства измерения давления	23
Контрольные вопросы	33
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3 Средства измерения скорости и расхода.....	35
Контрольные вопросы	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
ПРИЛОЖЕНИЕ	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	60

ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Теплотехнические измерения и приборы» позволяет сформировать мировоззрение, развить интеллект и инженерную эрудицию, развить необходимые профессиональные компетенции теплоэнергетиков.

К основополагающим задачам освоения дисциплины можно отнести следующие:

- 1) овладеть знаниями о системах сбора, преобразования и обработки информации,
- 2) освоить измерения и оценивание погрешностей измерения теплоэнергетических параметров,
- 3) приобрести практические навыки применения полученных знаний.

Изучение дисциплины «Теплотехнические измерения и приборы» позволяет сформировать инженерную эрудицию и необходимые компетенции в соответствии с направлением 14010062 «Теплоэнергетика и теплотехника» (для профиля «Промышленная теплоэнергетика»).

Изучение дисциплины «Теплотехнические измерения и приборы» позволяет сформировать следующие компетенции:

- 1) возможность проводить измерения и наблюдения,
- 2) возможность анализа проведенных измерений и исследований,
- 3) возможность составления обзоров, отчетов и научных публикаций.

В результате изучения дисциплины студент должен:

- 1) **знать** правовые основы обеспечения единства измерений, принципы действия, устройство типовых измерительных приборов для измерения теплофизических параметров;
- 2) **уметь** измерять теплофизические параметры объектов при помощи стандартных приборов измерения, оценить погрешности измерений;
- 3) **владеть** важнейшими методами измерений, обработки результатов и оценки погрешностей измерений.

УСЛОВИЯ УСПЕШНОЙ ЗАЩИТЫ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

После выполнения практических работ студент должен подготовить и представить к защите отчет.

Для успешного выполнения практических работ требуется придерживаться следующего порядка:

- 1) Изучить цели практической работы.
- 2) Ответить на контрольные вопросы и получить допуск к практической работе.

3) Осуществить необходимую работу, произвести расчеты. Составить отчет о проведенной практической работе на листах формата А4. Необходимо, чтобы отчет имел следующую форму:

- титульный лист;
- цель работы, конспект основных сведений;
- таблицу исходных данных;
- принципиальную схему и рисунки, поясняющие суть решаемых задач;
- необходимые формулы, расчеты, графики;
- выводы по работе с анализом полученных результатов.

Объем отчета по работе составляет 5-10 страниц.

4) Подготовиться к защите работы, изучить и осмыслить проведенную учебно-исследовательскую практическую работу. Ответить на контрольные вопросы. Показать преподавателю отчет по выполненной практической работе.

Преподаватель проверяет работу, выполненную студентом. После этого проводится собеседование со студентом. Необходимо, чтобы студент хорошо владел материалом и мог пояснять представленные в работе решения, выводы и результаты. Если у преподавателя в ходе защиты работы возникли замечания, они отмечаются на титульном листе работы. Для успешной защиты работы необходимо устранить недоработки. Студент не может быть допущен к экзамену, если он не проделал и не защитил практические работы, указанные в учебном плане.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1

Средства измерения температуры

Цель работы – изучение принципов и средств измерения температур и привитие навыков практических расчетов при использовании различных средств измерения температур

Основные сведения и расчетные зависимости

Измерение температуры может осуществляться различными методами. Каждый метод имеет свои особенности, определяемые как принципом, так и применяемыми средствами и схемами их подключения.

Температура – это характеристика теплового состояния, физическая величина, характеризующая степень нагретости тела. Степень нагретости тела зависит от его внутренней энергии. Для идеального газа связь его температуры и внутренней энергии выражается

$$\frac{2}{3} \cdot E_c = kT, \quad (1)$$

где k – величина постоянной Больцмана; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

$E_c = \frac{mc^2}{2}$ – величина кинетической энергии поступательного движения молекул.

Закон Шарля можно записать в виде

$$p_t = p_0(1 + \beta_t \Delta t), \quad (2)$$

где β_t – коэффициент температурного расширения.

Коэффициент температурного расширения:

$$\beta_t = \frac{1 \Delta V}{\Delta t V_0}. \quad (3)$$

Тогда закон Шарля примет вид

$$V = V_0(1 + \beta_t \Delta t). \quad (4)$$

Измерение температуры тела всегда происходит косвенным путем за счет использования зависимости температуры от какого-либо физического свойства термометрического тела.

Термометрическим телом выбирают тело, имеющее физические свойства, удобные для непосредственного измерения, которые имеют однозначную зависимость от температуры.

Термометрическое тело при измерении температуры объекта измерения находится с объектом измерения в тепловом контакте. За счет теплообмена между ними, через определенный отрезок времени, они приходят в тепловое равновесие. То есть их температура уравнивается.

Контактным способом измерения температуры является способ, когда температуру тела находят по совпадающей с ней температуре термометрического тела.

При этом возникает методическая погрешность измерения, равная разности значений их температур.

Поскольку в реальном мире не существует рабочих тел, отвечающих всем требованиям в диапазоне измеряемых температур, введены понятия условной температуры и условной шкалы.

Условной температурой называется температура, измеренная термометром, имеющим шкалу, построенную на допущении линейной зависимости температуры от термометрических свойств тела. Такая шкала является **условной температурной шкалой**.

Наиболее ярко это иллюстрирует ртутный термометр со шкалой Цельсия от 0 до 100 °С с линейной функцией физических свойств ртути. За две основные точки шкалы взяты температура плавления льда и температура кипения воды при нормальном давлении.

Другая погрешность возникает при взаимодействии контактных преобразователей и среды, когда они имеют разную температуру в статическом режиме.

Изменение температуры выступающих частей в сравнении с градуировочным значением может привести к изменению показаний термометра.

Шкала Кельвина (термодинамическая температурная шкала) не зависит от термодинамических свойств тела, опирается на действие второго закона термодинамики применительно к циклу Карно.

Если к рабочему телу в прямом обратимом цикле Карно подводят теплоту Q_1 от источника, имеющего высокую температуру T_1 , отводят теплоту Q_2 к источнику, имеющего низкую температуру T_2

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}. \quad (5)$$

Причем выражение (3) справедливо и не зависит от физических свойств рабочего тела. Эта зависимость дает возможность получить шкалу на основе одной постоянной (реперной) точки.

На основе выражения (3) можно получить шкалу, если температура источника с низкой температурой неизвестна:

$$T = T_0 \frac{Q_1}{Q_2}, \quad (6)$$

где $T = T_1$, а $T_0 = T_2$. Q_1 и Q_2 известны.

Международная термодинамическая температурная шкалы (МТТШ)

Реперная точка для МТТШ – это тройная точка воды с температурой 273,16 К. Она выбрана потому, что погрешность ее воспроизведения значительно меньше погрешности точек плавления льда и кипения воды.

Один Кельвин – это единица МТТШ, равная $\frac{1}{273,16}$ части

температурного интервала между тройной точкой воды и абсолютным нулем. Для упрощения практических расчетов в 1968 году вводится **Международная практическая температурная шкала (МПТШ).**

Она имеет 11 основных реперных точек, определенных на основе МТТШ и имеет диапазон от 13,81 до 6300 К.

Связь между шкалой Цельсия и шкалой МПТШ или МТТШ определяется выражением

$$T = t + 273,16, \quad (7)$$

где t – температура по шкале Цельсия.

Контактные термометры **по принципу действия** подразделяют на:

1. **Термометры, работающие из-за теплового расширения рабочего тела.** Применяются с термометрическим **рабочим** телом в жидком состоянии (ртутные термометры) или в твердом состоянии – биметаллические, действуют из-за разных величин коэффициента линейного теплового расширения двух материалов (например, инвар - латунь, инвар - сталь).

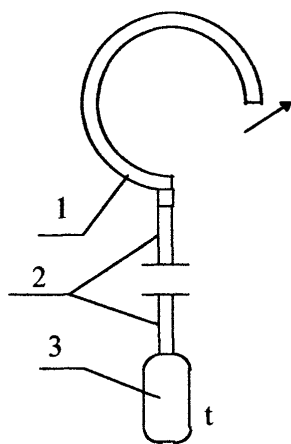


Рис. 1. Манометрический термометр:
1,2,3 – см. в тексте

2. **Термометры на основе измерения давления вещества.**

Термометры манометрические (рис. 1), являются замкнутой герметичной термосистемой [1,2]. Термосистема включает в себя термобаллон 3, манометрическую пружину 1 и капилляр 2.

Герметичная термосистема наполнена газом (азот) или жидкостью. Измерение температуры происходит из-за зависимости температуры и давления газа или зависимости упругости термосистемы от температуры.

При изменении температуры термобаллона 3 пружина 1 перемещается.

Диапазон измерения манометрических приборов от -150°C до $+600^{\circ}\text{C}$, который зависит от физических свойств термометрического рабочего тела.

Манометрические термометры используют при измерении температур газовых и жидких сред.

Изменение температуры выступающей части относительно градуировочного значения вызывает изменение показаний термометра.

Изменение показаний манометрических термометров возможно также за счет изменения давления независимо от значения температуры.

Это может происходить из-за разности уровней между термобаллоном и манометром для жидкостных манометрических термометров.

Показания манометрического термометра могут измениться при изменении барометрического давления. Это происходит потому, что манометр, который используют в работе манометрических термометров, производит измерение избыточного давления.

Относительное изменение показаний термометра при начальном давлении p_0 находим по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta p_{\text{бар}}}{p_0} \cdot 100\% , \quad (8)$$

где $\Delta p_{\text{бар}}$ – изменение барометрического давления $\Delta p_{\text{бар}}$ на отметках шкалы t_0 и t .

Аналогично при давлении, соответствующем температуре, определяемой термометром p_t :

$$\Delta = \frac{\Delta p_{\text{бар}}}{p_t} \cdot 100\% . \quad (9)$$

3. Термометры, работающие на основе возникновения термо-ЭДС (ТЭДС). Их называют термоэлектрическими термометрами, или термопарами.

Они состоят из двух различных по природе термоэлектродов, соединенных в одну цепь.

Схемы включения термопар показаны на рис. 2 [1,2,3].

Результирующая термо-ЭДС при включении прибора в разорванный термоэлектродный провод будет равна [1,2,3]:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) . \quad (10)$$

Результирующая ТЭДС при включении прибора в разорванный холодный спай будет равна:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) . \quad (11)$$

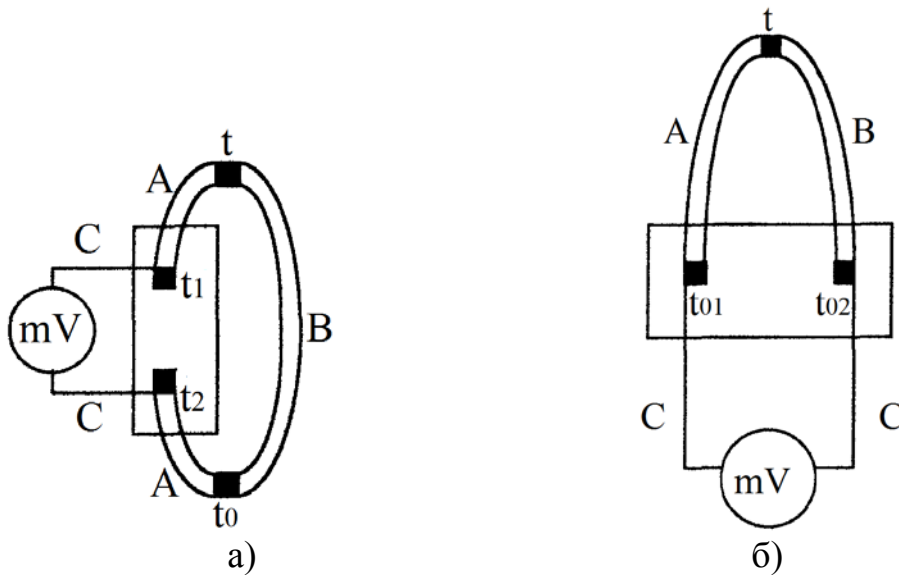


Рис. 2. Схемы включения термопар:

- а) с включением прибора в разорванный термоэлектродный провод;
 б) с включением прибора в разорванный холодный спай

Нетрудно заметить, что способ включения термопары не влияет на результат измерений.

Применяются при измерении температур в диапазоне от -200°C до $+2500^{\circ}\text{C}$.

В результате измерения ТЭДС возникают ошибки в определении действительного ТЭДС термоэлектрического термометра.

Это может быть вызвано несколькими причинами:

- неучет свойств термоэлектрических цепей,
- неточная оценка температуры свободных концов,
- неучет свойств удлиняющих проводов.

Химический состав термоэлектродного материала и условное обозначение термопар показан в табл.1.

Теорема о третьем проводнике. ТЭДС цепи не изменится, если температура в точках включения равна при включении в нее проводника из любого материала. Термоэлектродные удлиняющие провода предназначаются для удлинения термометра без изменения формируемой ТЭДС.

Концы термоэлектрического термометра являются свободными, если они включены в измерительную цепь. Когда термометр термоэлектрический удлиняют за счет термоэлектродных линий, то концы термоэлектродных проводов будут свободными концами термометра.

Таблица 1

Химический состав термоэлектродного материала [3]

Обозначение промышленного термо- преобразователя	Обознач. типа термо- пары (усл. обознач. НСХ преобр.)	Термоэлектронный материал	
		Положительный	Отрицательный
Вольфрам-рений/ вольфрамрениевые ТВР	А-1, А-2, А-3	Сплав вольфрам - рений	
		ВР -5 (95 % W+5 % Re)	ВР -20 (80 % W+20 % Re)
Платинородий/ платинородиевые ТПР	В	Сплав платинородий	
		ПР -30(70 % Pt+30 % Rh)	ПР -6(94 % Pt+6 % Rh)
Платинородий/ платиновые ТПП	S R	Сплав платинородий	Платина
		ПР -10(90 % Pt+10 % Rh) ПР -13(87 % Pt+13 % Rh)	ПлТ (Pt) ПлТ(Pt)
Никель-хром / никель- алюминиевые (хромель-алюмель)* ТХА	К	Сплав хромель	Сплав алюмель
		ТНХ 9,5 (90,5 % Ni +9,5% Cr)	НМцАК 2-2-1 (94,5 % Ni +5,5 % Al, Si, Mn, Co)
Никель-хром/медь- никелевые (хромель- константановые)* ТХКн	Е	Сплав хромель	Сплав константан
		ТНХ 9,5 (90,5 % Ni +9,5 % Cr)	(55 % Cu +45 % Ni, Mn, Fe)
Хромель/копелевые* ТХК	L	Сплав хромель	Сплав копель
		ТНХ 9,5 (90,5 % Ni +9,5 % Cr)	МНМц 43-0,5 (56 % Cu + 44 % Ni)
Медь/медьникелевые (медьконстантановые)* ТМК	Т	Медь	Сплав константан
		Мl (Cu)	(55 % Cu +45 % Ni, Mn, Fe)
Никель-хром-кремний /никель-кремниевые (нихросилнисилиевые)* ТНН	N	Сплав нихросил	Сплав нисил
		(83,49+84,89) %Ni+ +(13,7+14,7)% Cr+(1,2+1,6) % Si+ + 0,15% Fe +0,05% C + 0,01% Mg	(94,98+95,53)%Ni+0,02%Cr+ +(4,2+4,6)%Si+0,15%Fe+0,05%С+ + (0,05+0,2) % Mg
Железо-медь / никелевые (железо- константановые)*ТЖК	J	Железо	Сплав константан
		(Fe)	(55 % Cu +45 % Ni, Mn, Fe)
Медь/копелевые* ТМК	M	Медь	Сплав копель
		Мl (Cu)	(56 % Cu +44 % Ni)
*Наименование, принятое в экономике страны.			
Примечание - Химический состав материалов термоэлектродов ориентировочный.			

Номинальная статическая характеристика (НСХ) термодпары – зависимость ТЭДС от температуры рабочего конца и при постоянно заданной температуре свободных концов, выраженная в милливольтгах, приписанная термодпаре определенного типа.

Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от НСХ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от НСХ [3]

Обозначение промышленного термопреобразователя	Обозначение типа термопары	Класс допуска	Диапазон измерений, °С	Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от НСХ $\pm \Delta t$, °С
ТПП	S, R	2	От 0 до 600 Св. 600 до 1600	1,5 0,0025 t
		1	От 0 до 1100 Св. 1100 до 1600	1,0 1,0+0,003 (t -1100)
ТПР	B	3	От 600 до 800 Св. 800 до 1800	4,0 0,005 t
		2	От 600 до 1800	0,0025 t
ТХК	L	3	От -200 до -100 Св. -100 до +100	1,5+0,01 t 2,5
		2	От -40 до +360 Св. 360 до 800	2,5 0,7+0,005 t
ТХКн	E	3	От -200 до -167 Св. -167 до +40	0,015 t 2,5
		2	От -40 до +333 Св. 333 до 900	2,5 0,0075 t
		1	От -40 до +375 Св. 375 до 800	1,5 0,004 t
ТХА, ТНН	K, N	3	От -250 до -167 Св. -167 до +40	0,015 t 2,5
		2	От -40 до +333 Св. 333 до 1300	2,5 0,0075 t
		1	От -40 до +375 Св. 375 до 1300	1,5 0,004 t
ТМК	T	3	От -200 до -66 Св. -66 до +40	0,015 t 1,0
		2	От -40 до +135 Св. 135 до 400	1,0 0,0075 t
		1	От -40 до +125 Св. 125 до 350	0,5 0,004 t
ТЖК	J	2	От 0 до 333 Св. 333 до 900	2,5 0,0075 t
		1	От -40 до +375 Св. 375 до 750	1,5 0,004 t
ТМК	M	-	От -200 до 0 Св. 0 до 100	1,3+0,001 t 1,0
ТВР	A-1, A-2, A-3	3	От 1000 до 2500	0,007 t
		2	От 1000 до 2500	0,005 t

Примечание: t – величина измеряемой температуры, °С.

Диапазон преобразований температур термопары – определенный температурный интервал термопары, для которого выполняется преобразование температур в ТЭДС.

Допускаемое отклонение от НСХ – удовлетворяющее техническим требованиям на термопару, максимально возможное отклонение ТЭДС термопары от номинального значения [3].

Предельные значения допускаемых отклонений ТЭДС термопар определяются формулой

$$\Delta E = \Delta t \frac{dE}{dT}, \quad (12)$$

где $\frac{dE}{dT}$ – значение чувствительности термопары, которая рассчитывается для измеренного значения температуры, $\text{мВ}^\circ\text{C}^{-1}$; Δt – величина предела допускаемого отклонения ТЭДС термопары от НСХ преобразования, $^\circ\text{C}$.

4. Термометры, работающие на основе зависимости электрического сопротивления и температуры веществ. Их называют электрическими термометрами сопротивления.

При определении температуры такими термометрами возникают погрешности, вызванные несколькими причинами:

- 1) нагревание элементов термометра при работе,
- 2) нестабильность сопротивления элементов вне зависимости от изменения измеряемой температуры.

Типы термопреобразователей сопротивления из платины, меди и никеля; технические требования и методы испытаний приведены в ГОСТ 6651-2009. Общие технические требования и методы испытаний для преобразователей измерительных для термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления изложены в ГОСТ 13384-93. Общие технические требования для преобразователей термоэлектрических платинородий-платиновых и платинородий-платинородиевых эталонных 1, 2 и 3-го разрядов приведены в ГОСТ Р 52314-2005. Для медных термопреобразователей зависимость сопротивления от температуры в температурном диапазоне $50\dots+200$ $^\circ\text{C}$ может быть выражена как

$$R_t = R_0(1 + \alpha_m t), \quad (13)$$

где R_0 – сопротивление термопреобразователя при значении температуры 0 $^\circ\text{C}$; α_m – температурный коэффициент, $\alpha_m = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Величина коэффициента преобразования термометра на всем интервале температур определяется согласно выражению

$$S = \frac{\Delta R_t}{\Delta t}. \quad (14)$$

На интервале температур коэффициент преобразования выразится $S = R_0 \alpha$. (15)

Сопротивление полупроводниковых термометров в зависимости от температуры определяется формулой

$$R_t = R_0 \exp\left[\frac{B(293 - T)}{293T}\right], \quad (16)$$

где T – величина текущего значения температуры, K ; R_0 – сопротивление термометра при $T = 293 K$; B – коэффициент, отражающий свойства полупроводниковых материалов.

На интервале температур от t_1 до t_2 среднее значение коэффициента преобразования находится по выражению

$$S = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{t_2 - t_1}, \quad (17)$$

где R_{t_1} и R_{t_2} – сопротивление термометра соответственно при температурах t_1 и t_2 .

Сопротивление термометров в промышленных условиях измеряется мостами или логометрами. Неуравновешенные мосты применяются гораздо реже из-за их недостатков:

- 1) нелинейности градуировочной характеристики,
- 2) зависимости их показаний от значения напряжения питания.

Наибольшее распространение получили уравновешенные мосты.

При использовании для измерения температуры контактных термопреобразователей иногда появляются существенные погрешности, вызванные процессом отвода теплоты от чувствительного элемента в основном из-за лучистого теплообмена и теплоотдачи по чехлу.

Возникающая из-за лучистого теплообмена между чехлом термопреобразователя и стенкой трубы погрешность измерения температуры газа Δt определяют согласно формуле

$$\Delta t = T_T - T_C = -\frac{C_0 \varepsilon_{np}}{\alpha_k} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right], \quad (18)$$

где T_C , T_T , T_{CT} – температура измеряемой среды, температура термопреобразователя, температура стенки соответственно; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией между термопреобразователем и средой; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε_{np} – приведенный коэффициент теплового излучения из-за теплообмена между термопреобразователем и стенкой.

В случае, когда площадь поверхности стенки значительно превышает площадь поверхности термопреобразователя ($F_{CT} \gg F_T$), принимают, что величины приведенного коэффициента теплового излучения и коэффициента теплового излучения термопреобразователя равны ($\varepsilon_{np} = \varepsilon_T$).

Величина погрешности Δt измерения температуры из-за теплоотвода через чехол находится по выражению

$$\Delta t = t_T - t_C = -\frac{t_C - t_{CT}}{chl\sqrt{\frac{P\alpha}{\lambda S}}}, \quad (19)$$

где P , S – соответственно значение периметра чехла, м, и площади поперечного сечения чехла, м², термопреобразователя; λ – величина коэффициента теплопроводности материала термопреобразователя; l – глубина погружения чехла в погружаемую среду; α – величина коэффициента теплоотдачи между термопреобразователем и измеряемой средой, Вт/(м²·К).

При измерении температуры высокоскоростных газовых потоков возникает погрешность, вызванная торможением потока.

Связь между статической (или термодинамической) температурой потока T_C и температурой торможения T^* , которую принимает поток при полном его адиабатном торможении, выражается формулой

$$T^* - T_C = \frac{v^2}{2c_p}, \quad (20)$$

где v – скорость движения потока, м/с; c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

В задачах, связанных с тепловой инерцией термопреобразователей, коэффициент теплоотдачи за время переходного процесса считается неизменным, а сам процесс описывается уравнением первого порядка

$$T_D \frac{dt_T}{dt_\tau} + t_T = t_C, \quad (21)$$

где T_D – постоянная времени, с; t_T – текущее значение температуры преобразователя, соответствующее значению времени τ после скачкообразного изменения температуры среды до значения t_C .

Тепловая инерция вызывает появление динамической погрешности, которая представляет собой разность текущего значения температуры термопреобразователя t_T и температуры среды t_C .

Закон Планка устанавливает зависимость спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела от его температуры. Может быть полезен при работе с пирометрами и тепловизорами.

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\lambda^5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (22)$$

где λ – длина волны, м; T – температура тела, К; $C_1 = 1,91 \times 10^{-16}$ Вт/(м²·К), $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Для видимого участка спектра и $T \ll 3000$ К используют формулу Вина.

$$B_{0\lambda T} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (23)$$

Законом Стефана-Больцмана определяется интегральная энергетическая яркость. Для абсолютно черного тела выражение примет вид

$$B_{0T} = \sigma T^4, \quad (24)$$

где σ – постоянная, равная $1,805 \cdot 10^{-8}$ Вт/(ср·м²·К).

У реальных физических тел энергетическая яркость меньше яркости абсолютно черного тела. Спектральная энергетическая яркость определяется по выражению

$$B_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} B_{0\lambda T}, \quad (25)$$

где $\varepsilon_{\lambda T}$ – монохроматический коэффициент теплового излучения при температуре T.

У реального тела интегральную энергетическую яркость определяют по выражению

$$B_T = \varepsilon_T B_{0T}, \quad (26)$$

где ε_T – значение интегрального коэффициента теплового излучения при температуре T.

Бесконтактные методы измерения температуры основаны на законах излучения. Наиболее распространенными из них являются следующие:

- яркостный метод, основанный на зависимости спектральной энергетической яркости тела от температуры;
- цветовой, опирается на перераспределение спектральных энергетических яркостей внутри данного участка спектра в зависимости от температуры (отношения двух спектральных энергетических яркостей);
- радиационный, основан на зависимости энергетической яркости тела от температуры в широком спектральном интервале.

Пирометры излучения градуируются по излучению абсолютно черного тела. Поэтому величины температур реальных тел, полученные с помощью пирометров излучения, будут псевдотемпературами. Эти псевдотемпературы носят соответствующие названия:

- 1) яркостная,
- 2) цветовая,
- 3) радиационная температура тела.

Яркостной температурой $T_{\text{я}}$ реального физического тела называют температуру абсолютно черного тела, при которой спектральная энергетическая яркость абсолютно черного тела $B_{0\lambda T}$ равна спектральной

энергетической яркости реального физического тела $B_{\lambda T}$ при его действительной температуре T .

Общие технические требования для пирометров устанавливает ГОСТ 28243-96. Методы и средства поверки на пирометры термоэлектрические установлены в ГОСТ 13881-68.

Задачи

(n - номер варианта по списку группы)

1. Задача.

Необходимо определить изменение показаний манометрического термометра. Во время градуировки термобаллон и показывающий прибор располагались на одной высоте (уровне), а при работе показывающий прибор находится на H м выше, чем термобаллон.

Шкала термометра от t_1 до t_2 , °С. При изменении температуры от t_1 до t_2 , °С давление в системе изменяется от p_1 до p_2 , МПа. Рабочая жидкость термометра (табл. 3) имеет плотность ρ , кг/м³.

Таблица 3

Номер варианта	H , м	t_1 , °С	t_2 , °С	p_1 , МПа	p_2 , МПа	Рабочая жидкость термометра	Плотность рабочей жидкости, ρ , кг/м ³
Четный	$7+0,1n$	0	500	5	15	Ртуть	13595
Нечетный	$2+0,1n$	0	100	1	1,4	Спирт	806

Пояснение.

Давление на показывающем приборе определяется как разность давления в термобаллоне и давления столба жидкости. Найдем снижение давлений, вызванное разницей высот, на которых находятся термобаллон и показывающий прибор:

$$\Delta p = \Delta H \rho g .$$

То есть показания прибора будут занижены на величину Δp . Чувствительность манометрического термометра можно определить по формуле

$$S_M = \frac{p_2 - p_1}{t_2 - t_1} .$$

Разность показаний термометра из-за различного положения прибора и термобаллона находим по формуле

$$\Delta t = \Delta p / S_M .$$

2. Задача.

Необходимо определить изменение показаний манометрического газового термометра из-за повышения температуры капилляра до t_k и

температуры пружины до t_n по сравнению с градуировочным значением температуры t_{zp} при следующих условиях: объем капилляра $V_k, \text{см}^3$, объем манометрической пружины $V_n, \text{см}^3$, объем термобаллона $V_m, \text{см}^3$

Таблица 4

Номер варианта	$t_k, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_{zp}, ^\circ\text{C}$	$V_k, \text{см}^3$	$V_n, \text{см}^3$	$V_m, \text{см}^3$	$\beta_t, ^\circ\text{C}^{-1}$
Четный	40+0,1n	10+0,1n	20+0,1n	1,9+0,1n	1,5+0,1n	140+0,1n	$3,665 \cdot 10^{-3}$
Нечетный	30+0,1n	5+0,1n	21+0,1n	2,5+0,1n	2+0,1n	130+0,1n	$3,661 \cdot 10^{-3}$

Пояснение.

Из-за расширения газа в капилляре и пружине происходит изменение показаний манометрического термометра, которое можно найти через относительное изменение давления в системе из выражения закона Шарля:

$$\Delta t = \frac{V_k \Delta t_k + V_n \Delta t_n}{V_0 + V_k + V_n},$$

где $\Delta t_k, \Delta t_n$ – отклонение температуры капилляра и пружины от градуировочной соответственно.

$$\Delta t_k = |t_k - t_{zp}|,$$

$$\Delta t_n = |t_n - t_{zp}|.$$

3. Задача.

Определить изменение показаний манометрического газового термометра за счет изменения температуры внешней среды на Δt_n , если известно соотношение $\frac{V_k + V_n}{V_0} = K$ объемов капилляра V_k , пружины V_n и баллона V_0 .

Таблица 5

Номер варианта	$\frac{V_k + V_n}{V_0} = K$	$\Delta t_n, ^\circ\text{C}$
Четный	0,01	30+0,1n
Нечетный	0,02	40+0,1n

$$\frac{V_k + V_n}{V_0} = K.$$

Пояснение.

Изменение показаний манометрического газового термометра определяем по выражению

$$\Delta t = \frac{V_k \Delta t_k + V_n \Delta t_n}{V_{\bar{o}} + V_k + V_n} = \frac{K \Delta t_n}{(1 + K)},$$

где $\Delta t_k, \Delta t_n$ – отклонение температуры капилляра и пружины.

4. Задача.

Определите начальное давление, которое необходимо создать в манометрическом газовом термометре при $t_0, ^\circ\text{C}$, чтобы при изменении температуры от t_0 до $t ^\circ\text{C}$ давление в системе изменялось на Δp , МПа. Термический коэффициент расширения газа $\beta_t, ^\circ\text{C}^{-1}$.

Таблица 6

Номер варианта	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	Δp , МПа.	$\beta_t, ^\circ\text{C}^{-1}$
Четный	0+0,1n	500+n	10+0,1n	$3,665 \cdot 10^{-3}$
Нечетный	10+0,1n	600+n	12+0,1n	$3,661 \cdot 10^{-3}$

Пояснение.

Изменение давления в системе происходит по закону Шарля

$$p_t = p_0(1 + \beta_t(t - t_0)),$$

где β_t – коэффициент температурного расширения; t_0 и t – начальная и текущая температуры; p_0 – давление рабочего вещества при температуре t_0 . Отсюда $\Delta p = p_0 \beta_t (t - t_0)$.

5. Задача.

Определить, как изменятся показания манометрического газового термометра, если барометрическое давление изменилось на $\Delta p_{\bar{o}ap}$ на отметках шкалы t_0 и t .

Таблица 7

Номер варианта	$\Delta p_{\bar{o}ap}$, МПа	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	Δp , МПа	$\beta_t, ^\circ\text{C}^{-1}$
Четный	0,005	0+0,1n	700+n	20+0,1n	$3,665 \cdot 10^{-3}$
Нечетный	0,006	10+0,1n	800+n	25+0,1n	$3,661 \cdot 10^{-3}$

Пояснение.

Начальное и конечное давление в системе манометрического термометра находим как в предыдущей задаче.

Относительное изменение показаний термометра при начальном давлении находим по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta p_{\bar{o}ap}}{p_0} \cdot 100\%.$$

6. Задача.

Необходимо определить поправку в показания термопары и температуру рабочего конца термометра. Тип термопары (см. таблицу ниже), ТЭДС термометра равна E , мВ, а температура свободных концов t_c , °С.

Таблица 8

Номер варианта	Тип термопары	E , мВ	t_c , °С
Четный	Платинородий – платина	$3,75+0,1n$	$32+n$
Нечетный	Хромель – копель	$4+0,1n$	$21+n$

Пояснение.

По справочным данным определяем градуировочные характеристики термопары при t_c , °С (табл. приложений П.1, П.2).

ТЭДС термометра с учетом поправки определится как сумма E и градуировочной характеристики термопары при t_c , °С.

Находим по суммарной ТЭДС температуру ей соответствующую (табл. приложений П.1, П.2).

7. Задача.

Определите величину допускаемых отклонений измеренной термоэлектродвижущей силы при измерении температуры рабочего тела термоэлектрическим термометром. Тип термометра (см. таблицу ниже) в наборе с милливольтметром. Милливольтметр расположен в помещении блочного типа, имеющем температуру t_g , °С. Термоэлектрический термометр подключен к милливольтметру с помощью удлиняющих термоэлектродных проводов. Шкала милливольтметра $t_{u1}-t_{u2}$, °С, класс 1,0. Показания измеренной температуры t_u , °С.

Таблица 9

Номер варианта	t_g , °С	t_{u1} , °С	t_{u2} , °С	t_u , °С	Тип термометра, класс допуска
Четный	(20 ± 1)	200	600	$540+n$	К, 2
Нечетный	(18 ± 1)	180	700	$600+n$	Т, 1

Пояснение.

Пределы допускаемых значений погрешностей термометра и удлиняющих термоэлектродных проводов приведены выше [формула (2) и табл. 1,2].

8. Задача.

Медный термометр сопротивления имеет сопротивление при температуре t_1 , °С R_{t1} , Ом. Определить сопротивление при температуре, равной 100 °С . Температурный коэффициент равен $\alpha_m = 4,26 \cdot 10^{-3} K^{-1}$

Таблица 10

Номер варианта	t_1 , °С	R_{t1} , Ом
Четный	20	1,75
Нечетный	20	2

9. Задача.

Определить допуск термопреобразователя сопротивления 100М, если измеряемая температура равна t_1 , а класс допуска (см. таблицу ниже).

Таблица 11

Номер варианта	Класс допуска	t_1 , °С
1, 13 2, 14 3, 15	AA W 0.1 F 0.1	0+n
4,16 5,17 6,18	A W 0.15 F 0.15	-50 +5n
7, 19 8, 20 9, 21	B W 0.3 F 0.3	-150 +20n
10, 22 11, 23 12, 24	C W 0.6 F 0.6	-150 +20n

Пояснение.

Обозначение термопреобразователя сопротивления 100М означает, у него сопротивление $R_0 = 100$ Ом, а его тип – медный.

Контрольные вопросы

1. Что такое температура?
2. Какие температурные шкалы вы знаете?
3. Расскажите о термометрах, работающих за счет теплового расширения рабочего тела.
4. Что такое коэффициент температурного расширения?
5. Раскройте принцип действия манометрического термометра.
6. Как работает термопара?
7. Какие схемы включения термопар вы знаете?
8. Как работают электрические термометры сопротивления?

9. Какие достоинства и недостатки вы знаете у электрических термометров сопротивления?

10. Термоэлектрический термометр присоединен по схеме рис. 2 а. Как вы думаете, произойдет ли изменение ТЭДС, если медные провода, которыми осуществлялось соединение, заменить алюминиевыми проводами (при этом температура концов термометра не менялась)?

11. Что такое НСХ термопары?

12. Что такое диапазон преобразований температур термопары?

13. Что собой представляют электрические термометры сопротивления?

14. Какие физические законы используются при работе пирометров?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2

Средства измерения давления

Цель работы – изучение принципов и средств измерения давления и привитие навыков практических расчетов при использовании различных средств измерения давления

Основные сведения и расчетные зависимости

Приборы для измерения давления по назначению подразделяются на следующие виды:

- приборы для определения избыточного или абсолютного давления (манометры);
- приборы для определения абсолютного давления атмосферного воздуха (барометры);
- приборы для определения разности барометрического и абсолютного давления, если величина абсолютного давления ниже 1 кПа (вакуумметры);
- приборы для определения избыточного и вакуумметрического давления (мановакуумметры);
- приборы для определения разности давлений, если никакое из них не является равным атмосферному (дифференциальные манометры);
- приборы для определения микроразностей давлений (микроманометры).

Устройства для измерения давления по принципу действия подразделяются на несколько видов:

- устройства, в которых измеренное давление уравновешивается давлением столба жидкости (жидкостные);
- устройства, у которых измеренное давление уравновешивается массой поршня или груза (грузопоршневые);
- устройства, которые измеряют давление с помощью чувствительного элемента, который деформируется под действием давления (деформационные);
- устройства, действующие на основе определенных веществ, изменяющих свои электрические свойства под действием давления (электрические);
- устройства и приборы, использующие для измерения давления изменение ионного тока под действием давления (электроразрядные);
- устройства и приборы, использующие зависимость теплопроводности газового слоя от изменения давления (теплоэлектрические).

Единицей давления в СИ является 1 Па. $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$

1 мм рт. ст. = 133,32 Па;

1 мм вод. ст. = 1 кг/м = 9,81 Па.

По степени точности производимых измерений приборы делят на несколько видов:

- образцовые (с классом точности 0,16; 0,25; 0,4),
- повышенной точности (с классом точности 0,6; 0,1),
- контрольные (с классом точности 0,6),
- технические (с классом точности 1; 1,6; 2,5; 4,0).

Жидкостные манометры делят на двухтрубные (U-образные) и однотрубные (чашечные).

На рис. 3 показана схема действия жидкостного U-образного манометра.

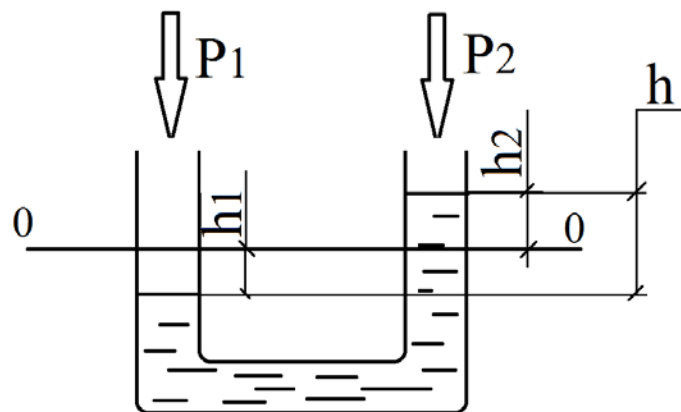


Рис. 3. Схема действия жидкостного U-образного манометра

На рис. 4 показана схема действия жидкостного однотрубного чашечного манометра.

Для двухтрубного манометра справедливо выражение

$$h = h_1 + h_2. \quad (27)$$

Разность давлений в трубах манометра определяют по выражению

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g h, \quad (28)$$

где ρ — значение плотности жидкости; g — величина ускорения свободного падения; h — значение высоты столба жидкости.

Для чашечных манометров справедливо выражение

$$h = h_1 \left(1 + \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right) = h_1 \left(1 + \frac{d_1^2}{d_2^2} \right), \quad (29)$$

где h_1 — высота столба жидкости в трубке; A_1 — площадь сечения трубки чашечного манометра; d_1 — диаметр трубки; A_2 — площадь сечения чаши манометра; d_2 — диаметр чаши.

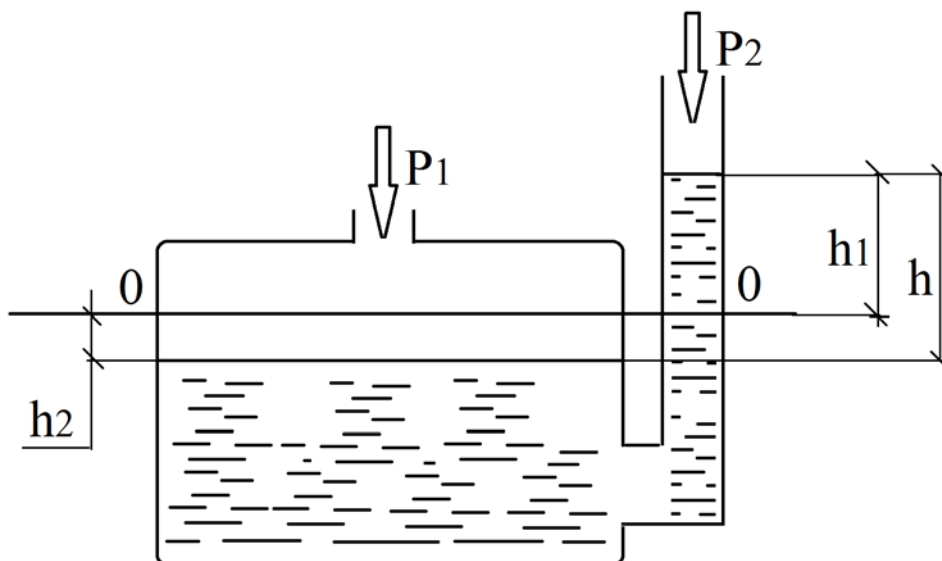


Рис. 4. Схема действия жидкостного однотрубного чашечного манометра

Для чашечного манометра с наклонной трубкой высота h_1 определяется по формуле

$$h_1 = l \sin \alpha, \quad (30)$$

где l – длина трубки; α – угол наклона трубки.

Чувствительность микроманометра с наклонной трубкой определяется отношением изменения длины столба жидкости в измерительной трубке к изменению давления, которое вызвало изменение уровня.

С уменьшением угла наклона при неизменном измеряемом давлении длина столба жидкости увеличивается, и чувствительность тоже увеличивается.

Выражение h получим, приравняв объемы $lA_1 = h_2A_2$, подставим выражение h_1 и h_2 . Получим

$$h = l \left(\sin \alpha + \frac{A_1}{A_2} \right). \quad (31)$$

Измеряемое давление и показания микроманометра связаны выражением

$$p = l \rho_{zp} g \left(\sin \alpha + \frac{A_1}{A_2} \right), \quad (32)$$

где ρ_{zp} – плотность рабочей жидкости при температуре градуировки.

$$p = l \rho_{zp} g \left(\sin \alpha + \frac{A_1}{A_2} \right) = lk, \quad (33)$$

где $k = \rho_{zp} g \left(\sin \alpha + \frac{A_1}{A_2} \right)$ – постоянная прибора.

Работа **деформационных приборов давления** основывается на функции изгибающего момента упругих чувствительных элементов (ЧЭ) прибора или деформации от давления. Величина давления характеризуется линейным перемещением ЧЭ.

Такие устройства применяют для измерения давления от 50 Па до 1000 МПа.

Они выполняются как манометры абсолютного давления, манометры избыточного давления, дифференциальные манометры, вакуумметры. Схема действия деформационного манометра с трубчатой пружиной показана на рис. 5.

Свободный конец пружины 3 перемещается, движение с помощью поводка 4 передается стрелке 1 через секторный передаточный механизм с зубчатым сектором 5 и с зубчатым колесом 2.

Прибор оснащен концентрической равномерной шкалой, имеющей центральный угол 270° .

Деформационные приборы давления бывают двух видов:

- **прямого действия**, когда при действии давления или разности давлений перемещение чувствительного упругого элемента преобразуется в значение давления или в сигнал давления;
- **приборы**, которые имеют в своей конструкции преобразователи, преобразующие перемещение чувствительного элемента в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

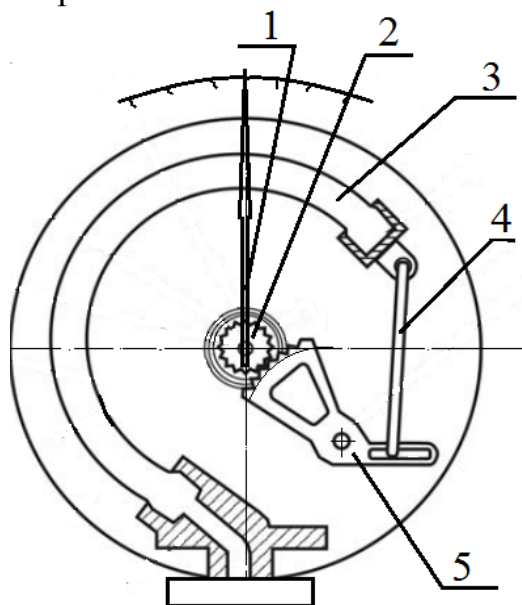


Рис. 5. Схема действия деформационного манометра с трубчатой пружиной

В качестве чувствительных элементов могут использоваться сильфоны и пружины Бурдона (одновитковые трубчатые пружины), плоские пластины, гофрированные мембраны.

Сильфоны однослойные измерительные металлические выпускают согласно ГОСТ 21482-76 [12].

На рис. 6 представлен чертеж сильфона однослойного металлического измерительного.

Пример условного обозначения сильфона с наружным диаметром $D=28$ мм, с числом гофров $n=10$, толщиной стенки $S_0=0,12$ мм, из сплава 36НХТЮ:

Сильфон $28 \times 10 \times 0,12$ – 36НХТЮ ГОСТ 21482–76.

Сильфоны применяют при измерении избыточного давления до 60 МПа, давления вакуумметрического от 0,06 до 0,1 МПа, абсолютного давления до 2,5 МПа, разности давлений до 0,025 МПа.

Пружины Бурдона в своем сечении могут быть нескольких видов. Различные виды сечения пружин Бурдона показаны на рис. 7 [13]. Их применяют при измерении избыточных давлений до 160 МПа, а также вакуумметрических давлений от 0,06 до 0,1 МПа.

Из-за механических свойств материалов, применяемых для изготовления ЧЭ, при действии нагрузки могут возникать явления, негативно действующие на точность измерения.

К таким явлениям относятся:

- явление гистерезиса,
- явление упругого последствия.

Явление гистерезиса – явление, когда из-за механических свойств ЧЭ возникает разность значений перемещений ЧЭ или усилий, развиваемых ЧЭ при одних и тех же значениях возрастающей и убывающей нагрузок, что образует петлю гистерезиса. Функциональность сильфона по перемещению показана на рис. 8 а), функциональность сильфона по усилию показана на рис. 8 б) [14].

Явление упругого последствия состоит в том, что стрелка устройства при снятии нагрузки не сразу возвращается на начало отсчета (ноль). Явление упругого последствия усиливает явление гистерезиса.

Общее действие явлений гистерезиса и упругого последствия называют *практическим гистерезисом*.

Погрешность, возникающую от действия этого явления, оценивают по формуле

$$\Delta_{\text{гис}} = \frac{\Delta \delta_{\text{max}}}{\delta_{\text{max}}} \cdot 100, \quad (34)$$

где $\Delta \delta_{\text{max}}$ – значение максимальной разности перемещений характерной точки ЧЭ при действии одного и того же давления при повышении и понижении давления,

δ_{max} – значение максимального перемещения ЧЭ.

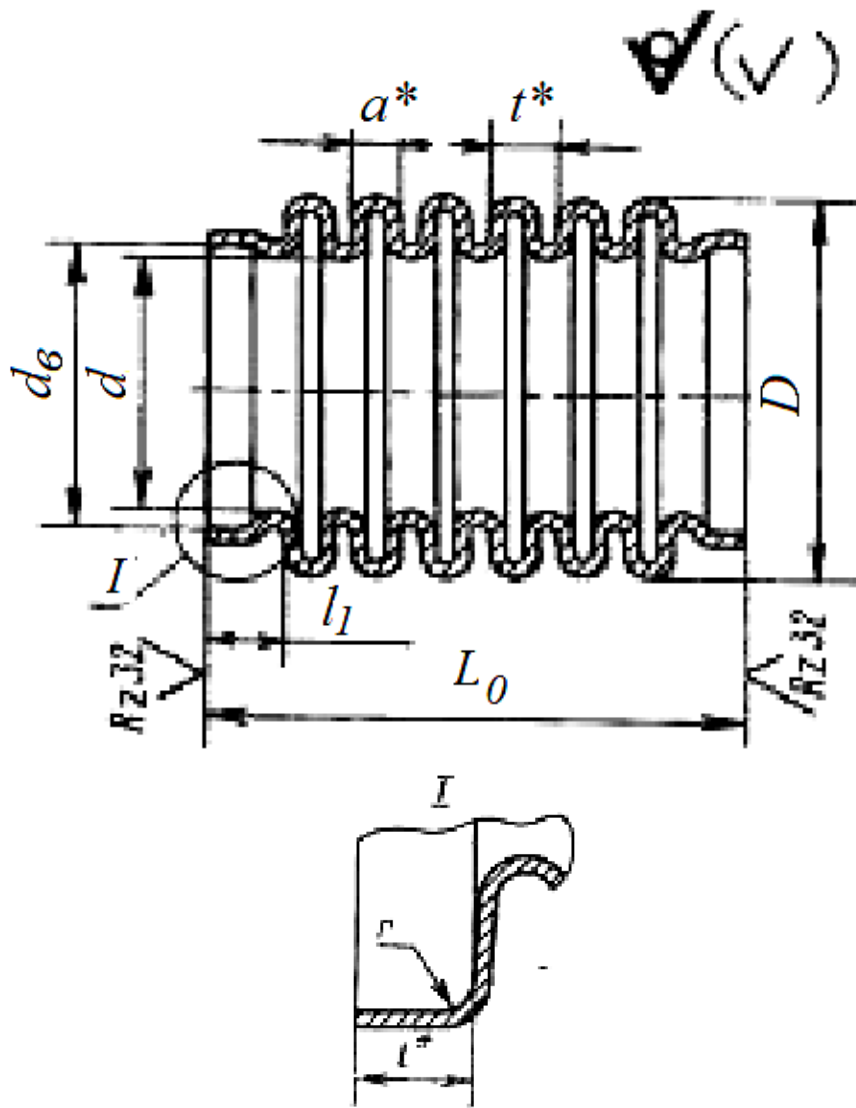


Рис. 6. Эскиз сиффона однослойного металлического измерительного

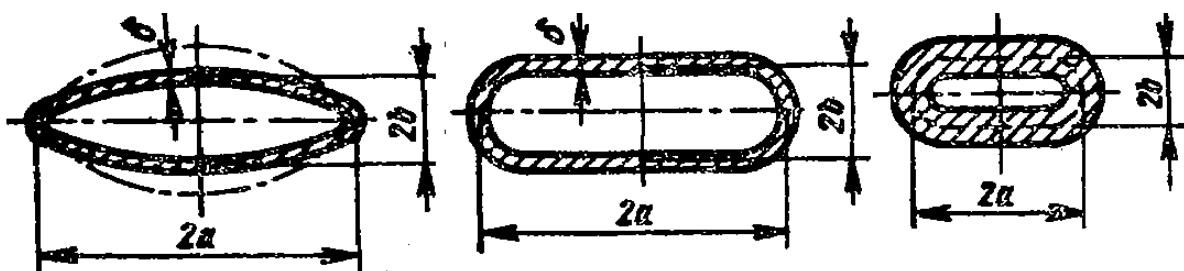


Рис. 7. Эскиз различных видов сечения пружин Бурдона

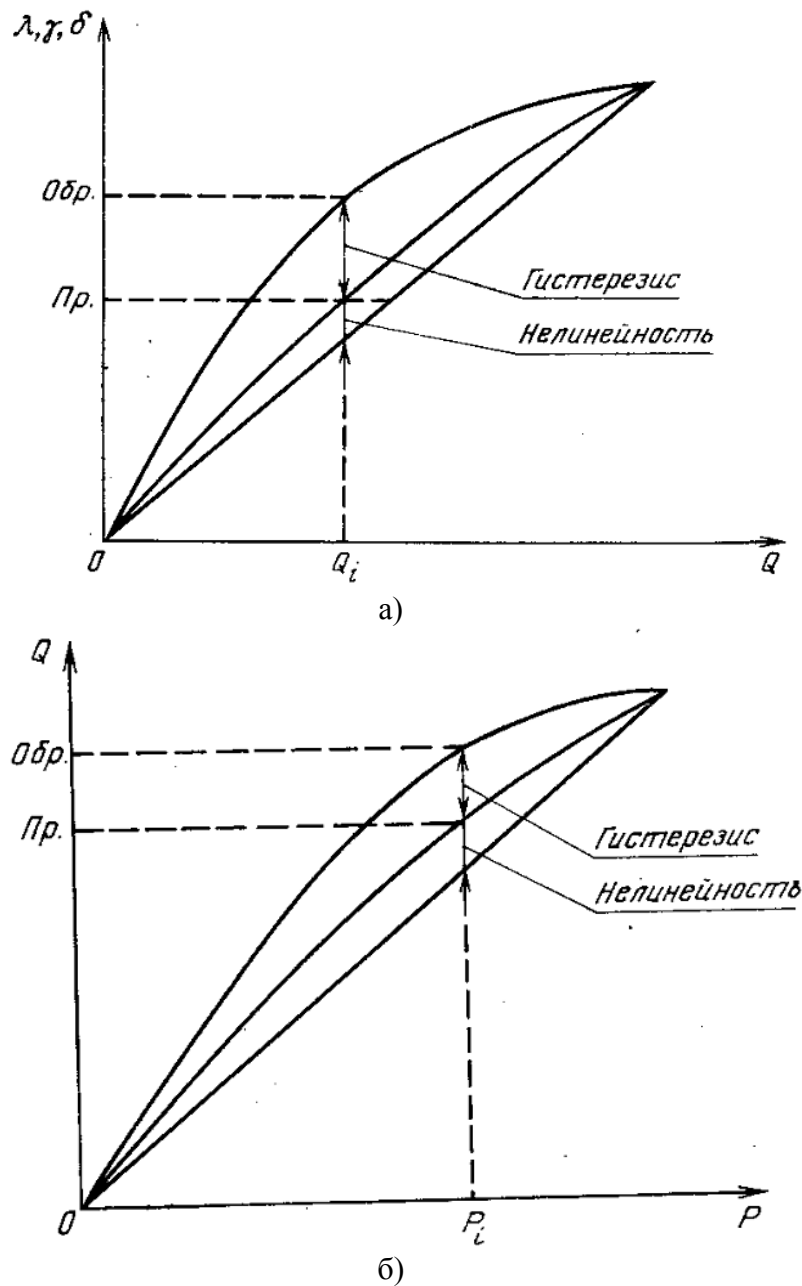


Рис. 8. Функциональность сильфона: а) по перемещению, б) по усилию

Датчики давления, у которых ЧЭ является пластиной, применяют при измерении пульсаций давления с частотой до 2000 – 4000 Гц.

Основными качествами упругих ЧЭ являются жесткость и чувствительность.

Жесткость определяют по формуле

$$Ж = \frac{P}{\delta_p} \cdot 100, \quad (35)$$

где p – действующее давление; δ_p – перемещение ЧЭ, соответствующее действующему давлению.

Чувствительность определяют по формуле

$$C = \frac{1}{\lambda Ж}. \quad (36)$$

На рис. 9 показана схема действия дифференциального манометра колокольного типа [14].

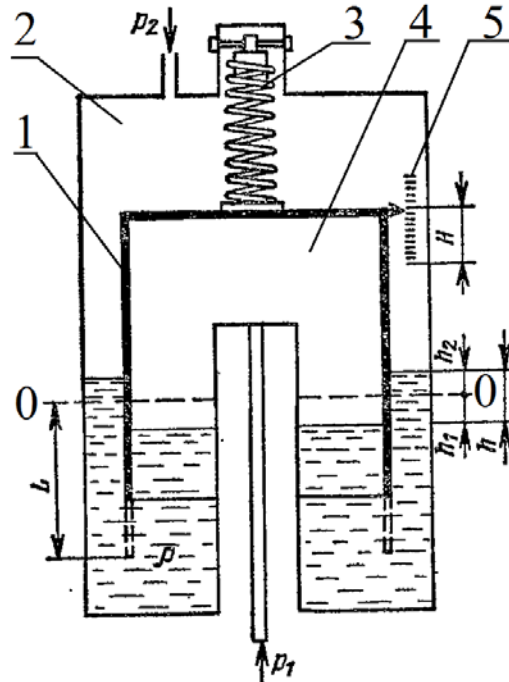


Рис. 9. Схема действия дифференциального манометра колокольного типа

Колокол 1 дифференциального манометра подвешен на пружине 3 и частично погружен в трансформаторное масло. Трансформаторное масло залито в емкость 2. Пока давление под колоколом 1 и в сосуде 2 над колоколом равны ($p_1 = p_2$), колокол будет находиться в равновесии, а уровень жидкости будет соответствовать 0-0. Шкала 5 показывает уровень при наличии разности давлений $p_1 - p_2$, когда нет равновесия сил, приложенных к колоколу. Возникает подъемная сила, которая будет перемещать колокол вверх. В момент, когда подъемная сила сравняется по величине с противодействующей силой, колокол 1 займет новое положение равновесия на высоте H .

Сила упругости винтовой пружины уравнивает равнодействующую сил тяжести колокола и гидростатического давления:

$$k_n L = G_k - Lfg\rho_{ж}, \quad (37)$$

где k_n — жесткость винтовой пружины, $\frac{H}{M}$; L — начальная глубина погружения колокола (длина начального растяжения пружины), м; f — площадь поперечного сечения стенок колокола, m^2 ; $\rho_{ж}$ — плотность

жидкости, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; G_k – величина силы тяжести колокола, Н; g – значение местного ускорения свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

У манометров с тонкостенным колоколом силой гидростатического давления можно пренебречь, так как площадь поперечного сечения стенок колокола пренебрежимо мала $f \approx 0$. Значит, уравнение для $k_n L$ примет вид

$$k_n L = G_k. \quad (38)$$

В новом положении колокола на высоте H с разностью давлений $p_1 - p_2$:

$$(p_1 - p_2)F_{\text{вн}} = G_k - k_n(L - H), \quad (39)$$

где $F_{\text{вн}}$ – площадь дна колокола.

Для дифманометров с тонкостенным колоколом, учитывая выражение для $k_n L$:

$$H = \frac{(p_1 - p_2)F_{\text{вн}}}{k_n}. \quad (40)$$

Анализируя выражение для H , можно сказать, что у дифманометров с тонкостенным колоколом H не зависит от плотности жидкости, в которую погружен колокол. И измеряемый этим манометром перепад давлений $p_1 - p_2 = \Delta p$ также не зависит от плотности жидкости, в которую погружен колокол. Измеряемый перепад давлений $p_1 - p_2 = \Delta p$ можно принимать равным номинальному перепаду давлений дифманометра $\Delta p_{\text{ном}}$.

Чувствительность дифманометра с тонкостенным колоколом:

$$S = \frac{H}{(p_1 - p_2)} = \frac{F_{\text{вн}}}{k_n}. \quad (41)$$

Задачи

(n – номер варианта по списку группы)

1. Задача.

Определить погрешность измерения давления U-образного манометра (рабочая жидкость – вода), если диаметры его трубок не равны между собой и имеют размеры d_1 и d_2 .

Измеряемое давление считалось равным p , высота столба жидкости в первой трубке изменилась на h_1 .

Таблица 12

Номер варианта	d_1 , мм	d_2 , мм	p , кПа	h_1 , мм
Четный	8	$d_1 + 0,05 n$	4	204
Нечетный	7	$d_1 + 0,05 n$	5	250

Пояснение.

При изменении высоты столба жидкости в первой трубке на h_1 мм, из нее в другую трубку перетекает вода объемом $V = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1$. Значит, высота столба жидкости во второй трубке изменилась на $h_2 = h_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$.

А действительное измеренное давление будет равно $p_\partial = \rho g(h_1 + h_2)$.

2. Задача.

Определить цену деления чашечного манометра в единицах давления, если его рабочая жидкость – ртуть. Диаметр минусовой трубки d_1 , диаметр плюсовой чаши d_2 , деления на шкале нанесены через 1 мм. Условия измерения: t °С; ускорение свободного падения g .

Таблица 13

Номер варианта	d_1 , мм	d_2 , мм	t , °С
Четный	6	60+n	0
Нечетный	7	70+ n	5

Пояснение.

Плотность рабочего тела берется для температуры измерения по справочным данным.

Цена деления единицах давления определяется по формуле (20) для высоты столба жидкости в 1 мм.

3. Задача.

Определить цену деления в единицах давления у микроманометра с наклонной трубкой, если диаметр трубки равен d_1 , диаметр чаши d_2 , угол наклона трубки микроманометра $48^\circ 23'$, плотность рабочего тела (спирт 96%) в условиях градуировки при t , °С $\rho_{sp} = 808$ кг/м³.

Таблица 14

Номер варианта	d_1 , мм	d_2 , мм	t , °С
Четный	4	60+n	20
Нечетный	5	70+ n	20

Пояснение.

Расстояние между отметками шкалы равно 1 мм. Ускорение свободного падения – нормальное.

4. Задача.

Определить действительное измеряемое давление, если градуировка производилась при температуре t , °С, и ускорении свободного падения g ,

а измерения при температуре $t_1, ^\circ\text{C}$, и ускорении свободного падения g_1 . При этом длина трубки l (см. табл. ниже). Измерения проводились при помощи спиртового манометра с наклонной трубкой.

Таблица 15

Номер варианта	$t, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$g, \text{м/с}^2$	$g_1, \text{м/с}^2$	$l, \text{мм}$	k
Четный	20	35+n	9,80665	9,8156	195	0,8
Нечетный	20	45+n	9,80655	9,8156	200	0,7

Пояснение.

Плотность спирта для различных температур взять по справочным данным.

5. Задача.

Определить, какой должна быть жесткость пружины в колокольном дифманометре с пружинным уравновешиванием, чтобы изменение перепада давления от p_1 до p_2 кПа вызывало перемещение колокола на H мм? Диаметр колокола $D_{\text{кол}}$ мм.

Таблица 16

Номер варианта	$p_1, \text{кПа}$	$p_2, \text{кПа}$	$D_{\text{кол}}, \text{мм}$	$H, \text{мм}$
Четный	0	1,6+0,05 n	50	4
Нечетный	0	2,5+0,05 n	80	6

Пояснение.

Необходимо воспользоваться формулами (37)-(41).

6. Задача.

Определить чувствительность дифманометра с тонкостенным колоколом, если известно, что изменение перепада давления от p_1 до p_2 кПа вызывало перемещение колокола на H мм.

Таблица 17

Номер варианта	$p_1, \text{кПа}$	$p_2, \text{кПа}$	$H, \text{мм}$
Четный	0	1,6+0,05 n	7
Нечетный	0	2,5+0,05 n	8

Контрольные вопросы

1. Какие приборы для измерения давления вы знаете?
2. Каков принцип действия U-образного манометра?
3. Поясните принцип действия жидкостного чашечного манометра.
4. Что такое постоянная микроманометра?

5. Как связаны между собой измеряемое давление и показания микроманометра?
6. Как работают деформационные манометры с трубчатой пружиной?
7. Расшифруйте обозначение сильфона «Сильфон 30×12×0,15 – 36НХТЮ ГОСТ 21482-76».
8. Что такое гистерезис?
9. Объясните явление упругого последствия.
10. Что такое *жесткость* чувствительного элемента?
11. Что такое *чувствительность* чувствительного элемента?
12. Объясните, как работает дифференциальный манометр колокольного типа?
13. Как определяется чувствительность дифманометра с тонкостенным колоколом?
14. Проведите размерный анализ выражения жесткости пружины для дифманометра с тонкостенным колоколом.
15. Докажите, что у дифманометров с тонкостенным колоколом H не зависит от плотности жидкости, в которую погружен колокол.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3

Средства измерения скорости и расхода

Цель работы – изучение принципов и средств измерения скорости и расхода и привитие навыков практических расчетов при использовании различных средств измерения скорости и расхода.

Основные сведения и расчетные зависимости

Измерение скорости и расхода может осуществляться различными методами. Каждый метод имеет свои особенности, определяемые как принципом, так и применяемыми средствами и схемами их подключения.

Методы измерения скоростей потока делятся на несколько видов по применяемому оборудованию [15-18]:

- пневмометрический,
- термоанемометрический.

Методы измерения скоростей потока бывают прямыми и косвенными. Наиболее простым методом, используемым при измерении скоростей потоков, является пневмометрический.

Число Маха определяется по формуле

$$M = \frac{w}{a}, \quad (42)$$

где w – скорость потока; a – местная скорость звука.

Поток является несжимаемым, когда скорость потока мала, а число Маха меньше 0,25.

Уравнение Бернулли для идеальной жидкости имеет вид

$$P_{nm} = P_{cm} + \frac{\rho w^2}{2} = const, \quad (43)$$

где P_{nm} – давление торможения (полное давление); P_{cm} – давление статическое; $\frac{\rho w^2}{2}$ – скоростной напор; ρ – плотность потока. Уравнение 43 стало основой пневмометрического метода измерения скорости потока, если выразить w при определенных значениях P_{nm} , P_{cm} , ρ .

$$w = \sqrt{2 \frac{P_{nm} - P_{cm}}{\rho}}. \quad (44)$$

Для измерения полного давления используют трубки Пито. Свободный конец трубки Пито располагают против потока, второй конец трубки соединяют с манометром.

Схема измерения полного давления при помощи трубки Пито показана на рис. 10 [18].

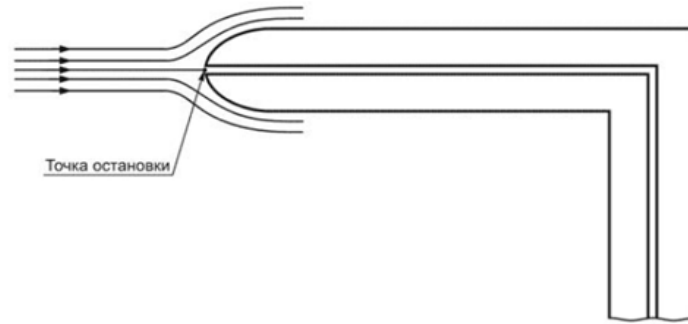


Рис. 10. Схема измерения полного давления при помощи трубки Пито

Основные размеры приемной части комбинированного приемника давления показаны на рис. 11 согласно ГОСТ 12.3.018-79 [15].

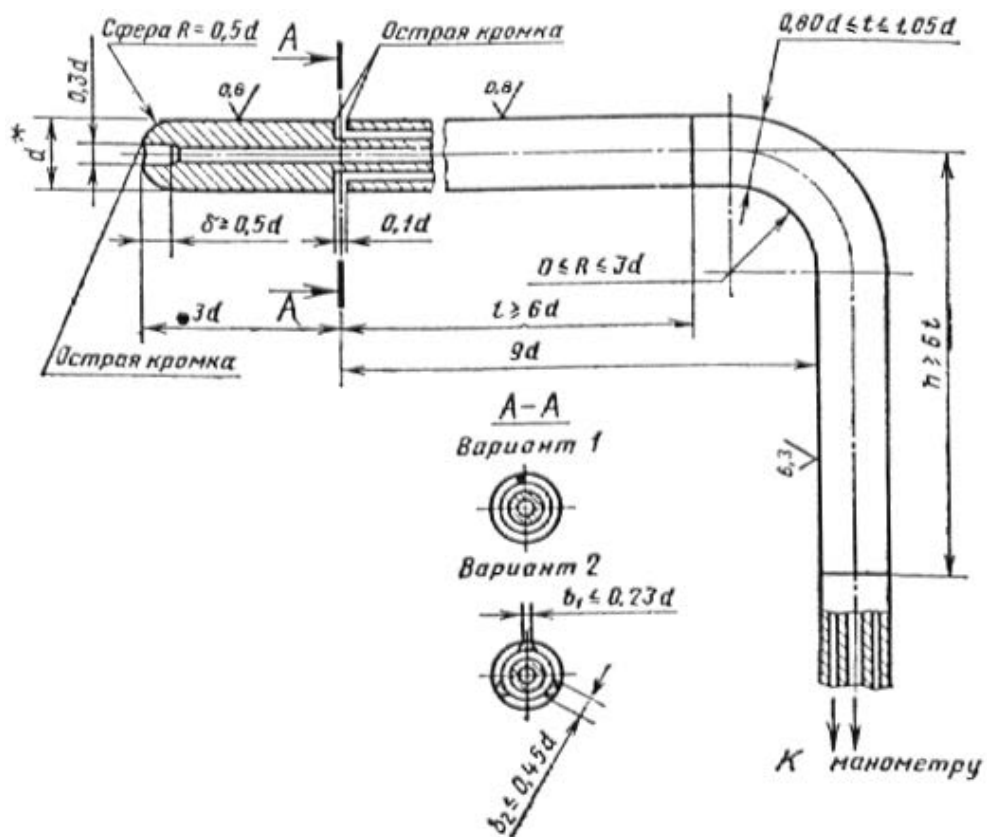


Рис. 11. Основные размеры приемной части комбинированного приемника давления

Дифференциальные напорные трубки, имеющие градуировочный коэффициент, близкий к 1, и загнутые навстречу потоку, выполняют согласно ГОСТ 8.361-79 [16]. На рис. 12, а) изображена трубка Пито с конусной головкой, а на рис. 12, б) трубка Пито с эллипсоидальной головкой.

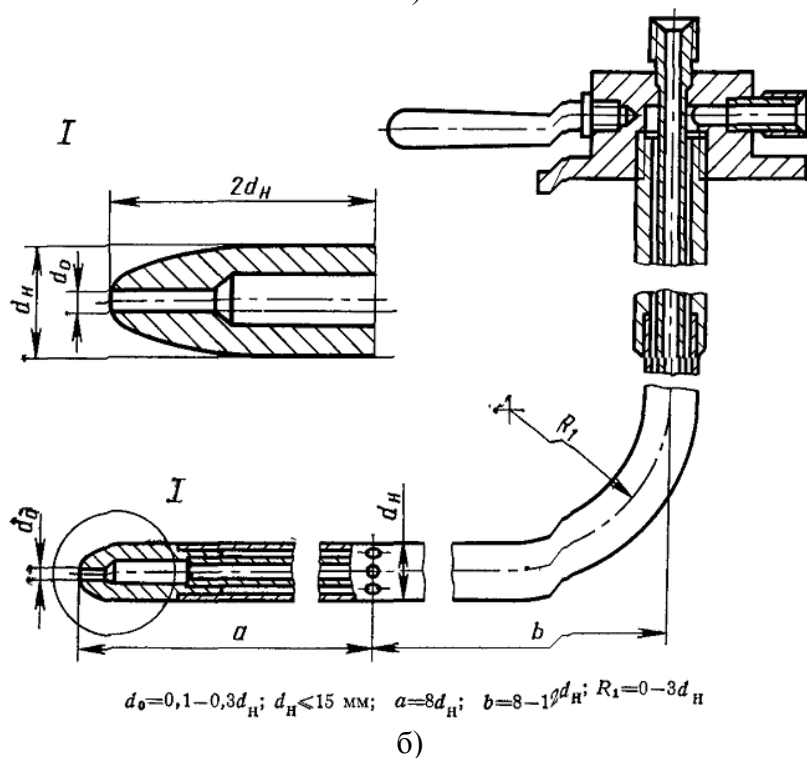
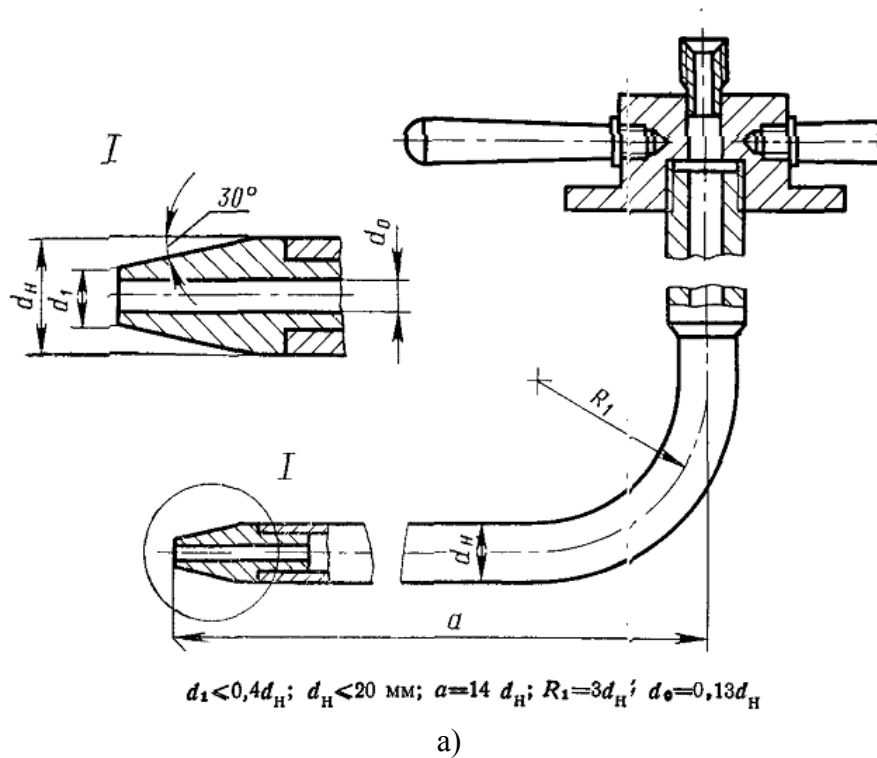


Рис. 12. Дифференциальные напорные трубки (трубки Пито):
 а) с конусной головкой, б) с эллипсоидальной головкой

При расчете погрешностей измерения расхода воздуха комбинированным приемником давления совместно с дифманометром необходимо пользоваться методикой, изложенной в ГОСТ 12.3.018-79[15]:

$$L = F \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} \cdot \frac{\sum_{i=1}^z (p_{di})^{0,5}}{z}, \quad (45)$$

где L – расход воздуха L , м³/с; F – площадь сечения трубопровода; ρ – плотность воздуха, кг/м³; p_{di} – величина динамического давления p_d кПа средней скорости движения воздуха, которое определяется по замеренным в z точках (см. схему в приложении).

Значение предельной относительной погрешности измерения расхода воздуха выразится в процентах

$$\delta_L = (2\sigma_L + \delta_\varphi), \quad (46)$$

где σ_L – величина среднеквадратичной относительной погрешности, вызванной неточностью измерений в процессе испытаний;

δ_φ – величина предельной, относительной погрешности нахождения расхода воздуха, которая вызвана неравномерным распределением скоростей в мерном сечении (см. приложение, табл. 6П).

Значение σ_L выразится

$$\sigma_L = \left(4\sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2 \right)^{0,5}, \quad (47)$$

где σ_D – значение среднеквадратичной погрешности нахождения размеров мерного сечения, которое зависит от величины гидравлического диаметра воздухопровода; при $100 \text{ мм} \leq D_h \leq 300 \text{ мм}$ значение $\sigma_D = \pm 3 \%$, при $D_h > 300 \text{ мм}$ $\sigma_D = \pm 2\%$; σ_p , σ_B , σ_t – значение среднеквадратичной погрешности измерений, соответственно, динамического давления p_d потока, барометрического давления p_a , температуры потока t , величины σ_p , σ_B , σ_t (см. приложение, в табл. 7П, табл. 8П).

Пользуясь табл. 7П, табл. 8П, и рассчитывают предельную погрешность определения расхода воздуха.

Уравнение состояния, или уравнение Клапейрона, позволяет определить плотность потока:

$$\rho = \frac{P_{cm}}{RT}. \quad (48)$$

Насадок Прандтля служит для измерения статического давления.

Схема измерения статического давления при помощи трубки Прандтля показана на рис. 13 [18].

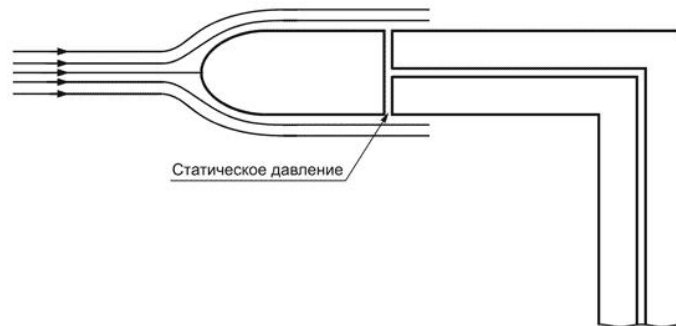


Рис. 13. Схема измерения статического давления при помощи трубки Прандтля

Метод измерения расхода воды в напорных трубопроводах и методика выполнения измерений методом площадь-скорость приведены в ГОСТ 8.439-81 ГСИ [17].

Схема измерения динамического давления при помощи трубки Пито-Прандтля показана на рис. 14 [18].

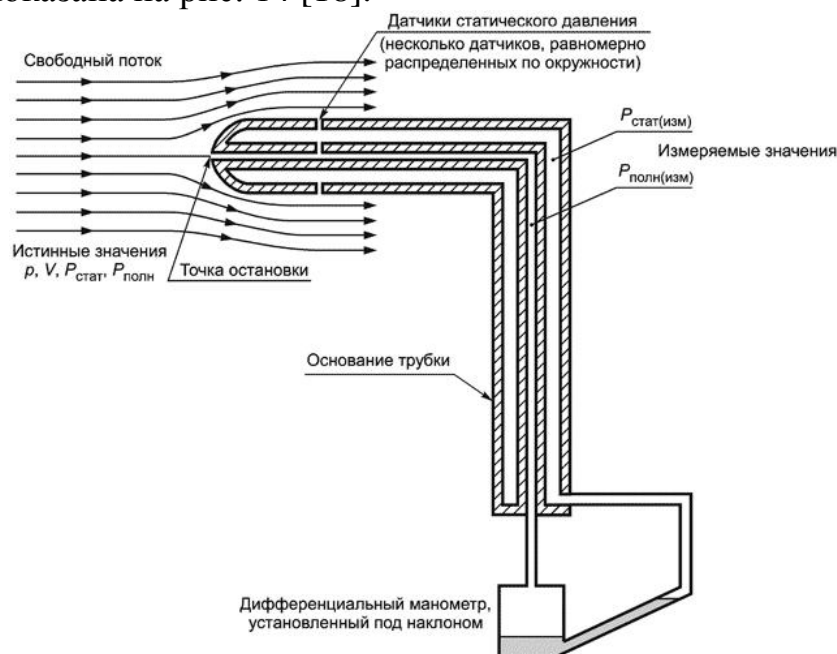


Рис. 14. Схема измерения динамического давления при помощи трубки Пито-Прандтля

Основные соотношения размеров пневмометрической трубки Пито-Прандтля показаны на рис. 15 согласно ГОСТ 12259-75 [18].

Трубка Пито-Прандтля служит для определения статического и полного давления. Такая комбинированная трубка состоит из внутренней трубки, служащей для измерения полного давления, и наружной трубки, боковые отверстия которой воспринимают статическое давление.

Подробнее об измерениях теплофизических величин в теплообменниках см. в ГОСТ Р ЕН 306-2011 [19].

При помощи трубки Пито-Прандтля производят измерения давления в газовом потоке с числом Маха $M > 0,85$.

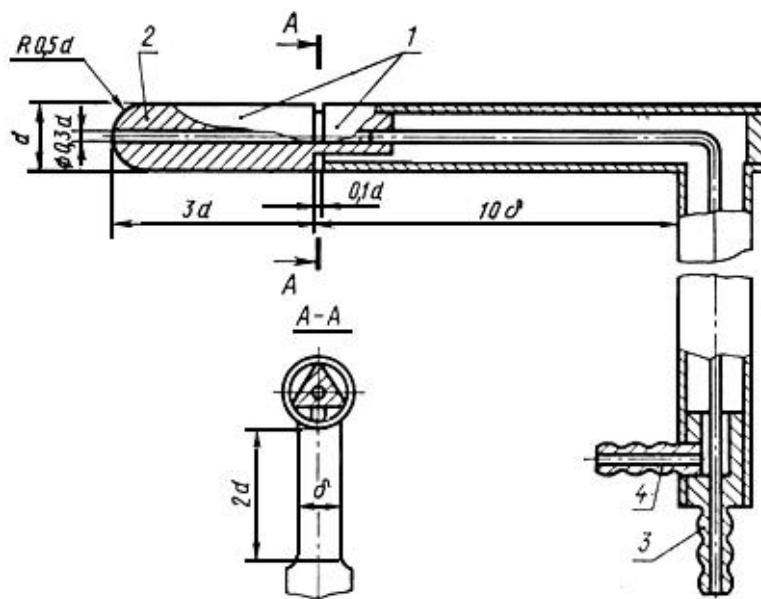


Рис. 15. Основные соотношения размеров пневмометрической трубки Пито-Прандтля:
 1 – измерительная часть трубки; 2 – носик трубки; 3 – штуцер полного давления;
 4 – штуцер статического давления

При измерениях, проводимых при помощи насадков, динамический напор не соответствует истинному динамическому напору. Для корректирования этого несоответствия вводится коэффициент ε , значение которого зависит от размеров и формы насадка. При точном изготовлении насадка $\varepsilon \approx 1 = const$ для широкого диапазона чисел Рейнольдса.

А выражение скорости примет вид

$$w = \varepsilon \sqrt{2 \frac{P_{nm} - P_{ст}}{\rho}}. \quad (49)$$

Число Рейнольдса, согласно положениям гидрогазодинамики, выражается следующим образом:

$$Re = \frac{\rho w l}{\mu}. \quad (50)$$

Здесь l является характерным размером, а μ – динамический коэффициент вязкости.

Динамический коэффициент вязкости определяется в зависимости от кинематического коэффициента вязкости:

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho}. \quad (51)$$

При обтекании насадка жидкостью вязкость не вносит больших изменений в показания прибора при больших числах Рейнольдса Re .

При малых числах Re в расчеты вносят поправку, отражающую влияние вязкости.

$$\varepsilon = \frac{2(P_{nm} - P_{cm})}{\rho w^2} = 1 + \frac{5,6}{Re}. \quad (52)$$

Измерение скорости и расхода жидкостей можно проводить прямым и косвенным методами.

При измерении прямым методом трубка устанавливается в координатное устройство, которое позволяет поворачивать трубку в плоскости измерения вектора скорости, а к приемному концу трубки присоединяют дифманометр.

Поворачивая трубку, необходимо добиться, чтобы перепад давлений на манометре был равен 0. Тогда ось трубки совпадет с направлением вектора скорости потока и будет биссектрисой угла между симметричными отверстиями.

При измерениях косвенным методом трубку устанавливают в определенное положение, относительно начала отсчета или вдоль оси канала. В область измерения трубку устанавливают без поворота.

Измеренные манометром разности давлений позволяют по кривой тарирования трубки определить углы скоса потока, а значит, и направление потока.

При скоростях потока, соответствующих числу Маха $M > 0,3$, учитывается сжимаемость потока, и скорость определяют по уравнению Бернулли для сжимаемого газа:

$$w = \frac{2k}{k-1} RT_n \left(1 - \left(\frac{P}{P_n} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right), \quad (53)$$

где k – показатель адиабаты; T_n – температура торможения потока.

После определения числа Маха можно определить скорость потока:

$$w = \sqrt{\frac{kRT_n}{1 - \left(\frac{k-1}{2} \right) M^2}}. \quad (54)$$

При термоанемометрическом методе измерения скоростей пользуются термоанемометром, это прибор, имеющий чувствительный элемент (ЧЭ) в виде проволочного или пленочного датчика. Скорость потока определяется на основе зависимости электрического сопротивления (температуры) проводника, установленного в потоке, и скорости обтекания этого проводника.

Термоанемометры работают в режиме постоянного тока и в режиме постоянной температуры.

При режиме постоянного тока сила тока в проводнике не изменяется. При изменении температуры проводника в потоке из-за обдува происходит изменение его сопротивления.

В режиме постоянной температуры температура проводника остается неизменной за счет изменения силы тока, проходящего через него.

Уравнение теплового баланса нити можно привести к следующему виду:

$$E_{cp} = E_{cp0} + BR_{wcp}(T_{wcp} - T_{fcp})W_{cp}, \quad (55)$$

где E_{cp} – среднее падение напряжения на нити при обтекании ее потоком со скоростью потока W_{cp} ; E_{cp0} – среднее падение напряжения на нити в неподвижной среде; W_{cp} – средняя скорость потока по времени; T_{wcp} – средняя температура нити по времени; R_{wcp} – среднее сопротивление нити по времени.

Тарирование термоанемометров производят в аэродинамических трубах.

При измерении расхода жидкости или газа применяют пневмометрические и термоанемометрические расходомеры на основе стандартных и нестандартных сужающих устройств.

Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств подробно описано в ГОСТ 8.586.1-2005 ГСИ [20]. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств описана в методических указаниях РД 50-411-83 [21].

К стандартным сужающим устройствам относят диафрагмы, сопла и сопла Вентури, трубы Вентури.

Расход жидкости, проходящей через суживающее устройство, вне зависимости от типа определяется по выражению

$$G = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho \Delta P}, \quad (56)$$

где α – величина коэффициента расхода; ε – коэффициент, отражающий сжимаемость потока; F_0 – величина проходной площади расходомера в точке сужения; ΔP – перепад давления на устройстве.

Объемный расход равен произведению средней скорости на площадь сечения потока:

$$Q_o = W_{cp} \frac{\pi D^2}{4}, \quad (57)$$

где D – диаметр трубопровода.

А массовый расход определится по формуле

$$Q_m = \rho W_{cp} \frac{\pi D^2}{4}. \quad (58)$$

Модуль сопла равен:

$$m = \frac{F_0}{F} = \frac{d^2}{D^2}, \quad (59)$$

где d – диаметр сужения расходомера; F – площадь сечения трубопровода; F_0 – площадь сечения в месте сужения расходомера.

Поперечное сечение стандартной диафрагмы показано на рис. 16.

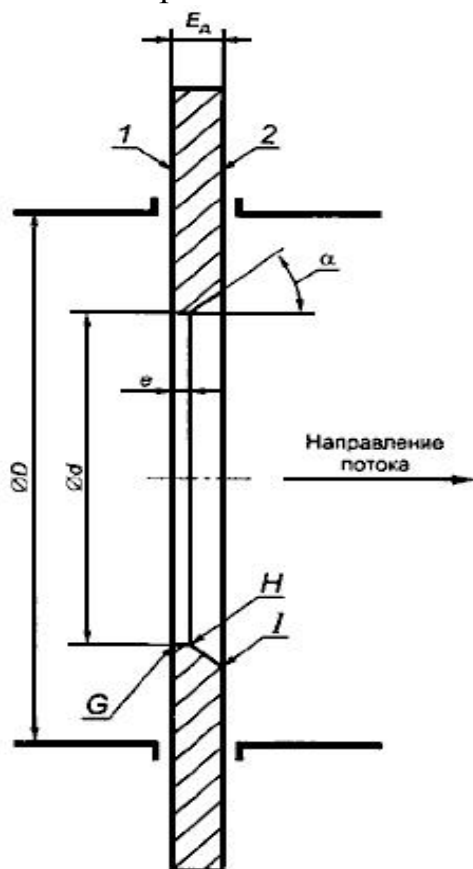


Рис. 16. Поперечное сечение стандартной диафрагмы

Стандартные сужающие устройства можно использовать, только если число Рейнольдса больше граничного значения, а диаметр трубопровода $D \geq 50$ мм.

На рис. 18 приведен разрез сопла ИСА 1932. I – полость камерного сопла, II – отверстия бескамерного сопла.

При значениях чисел Рейнольдса Re меньше граничного Re_{gr} точность измерения стандартными сужающими устройствами снижается, поскольку коэффициенты расхода в этом случае зависят от числа Рейнольдса.

Для снижения погрешностей измерения тогда применяют нестандартные сужающие устройства.

К нестандартным сужающим устройствам относят:

- сдвоенные диафрагмы,
- сопла с профилем в четверть круга.

Профиль сопла Вентури показан на рис. 17.

Профиль сопла Вентури состоит из входной торцевой поверхности, перпендикулярной к осевой линии сопла, сужающейся части с закругленным профилем, цилиндрической горловины и диффузора.

Сопло Вентури применяется, если измерить расход необходимо с минимальной величиной потерь давления.

Использование стандартных сужающих устройств налагает ряд требований:

- поток должен заполнять все поперечное сечение трубопровода,
- поток должен быть установившимся на входе в сужающее устройство,
- поток должен быть однофазный,
- должна быть выдержана концентричность диаметров сужающего устройства и трубопровода.

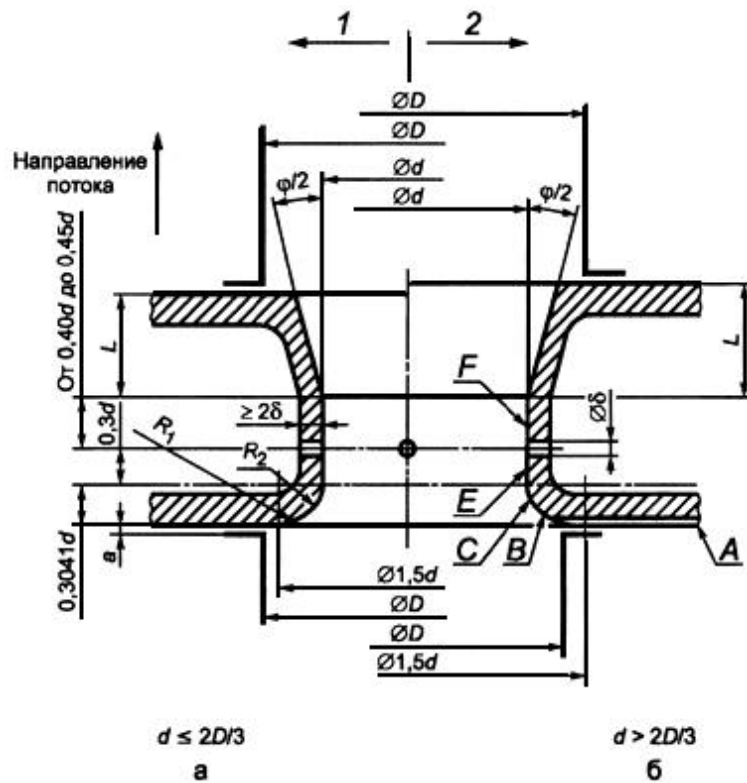


Рис. 17. Профиль сопла Вентури: 1 – укороченное сопло Вентури; 2 – неукороченное сопло Вентури

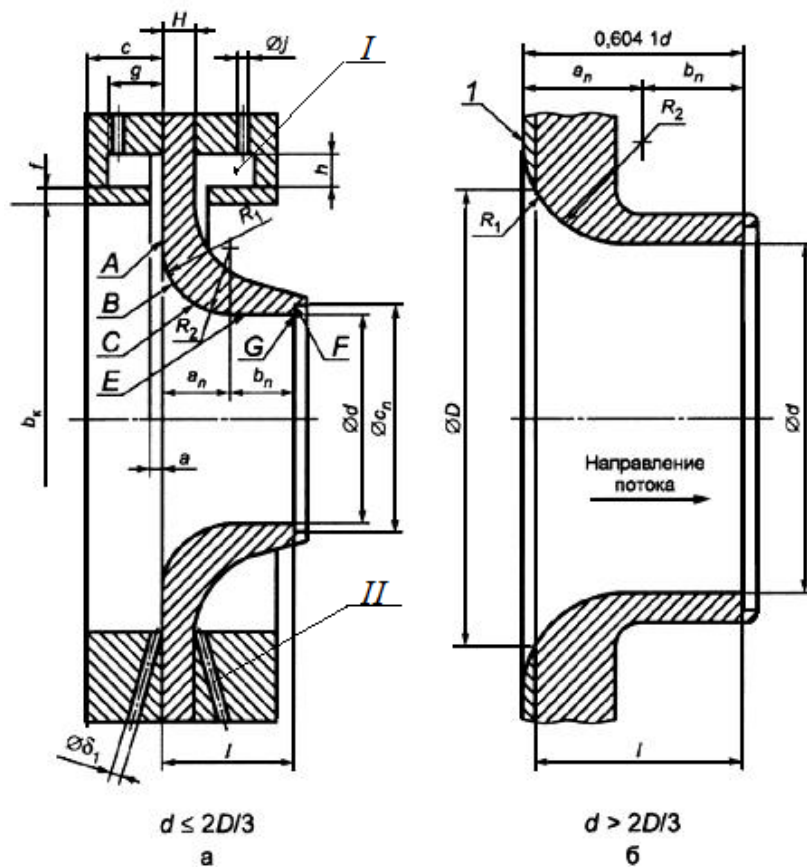


Рис. 18. Разрез сопла ИСА 1932: а) исполнение с размером $d \le 2D/3$, б) исполнение с размером $d > 2D/3$

На рис. 19 показаны 4 различных вида сдвоенных диафрагм.

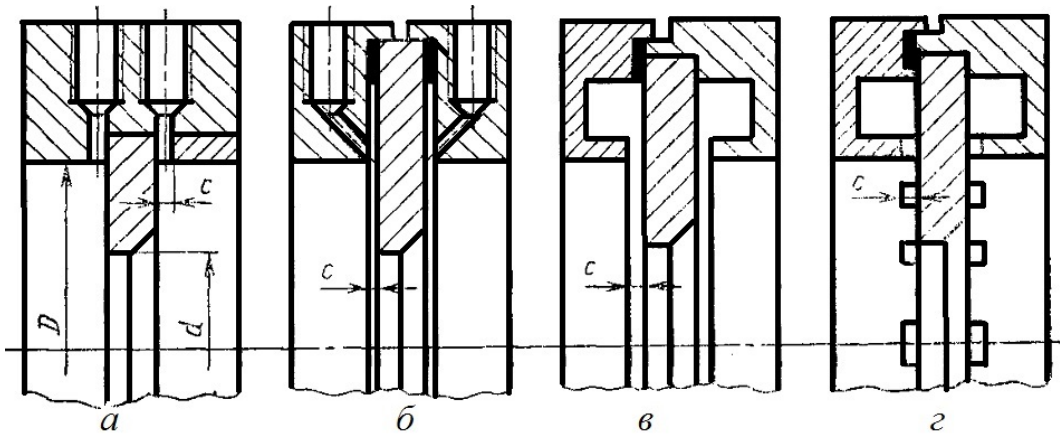


Рис. 19. Различные виды сдвоенных диафрагм: а) и б) – с отдельными цилиндрическими отверстиями для измерения перепада давления, в) – с двумя кольцевыми камерами и кольцевыми щелями, г) – с группой равномерно распределенных по окружности отверстий

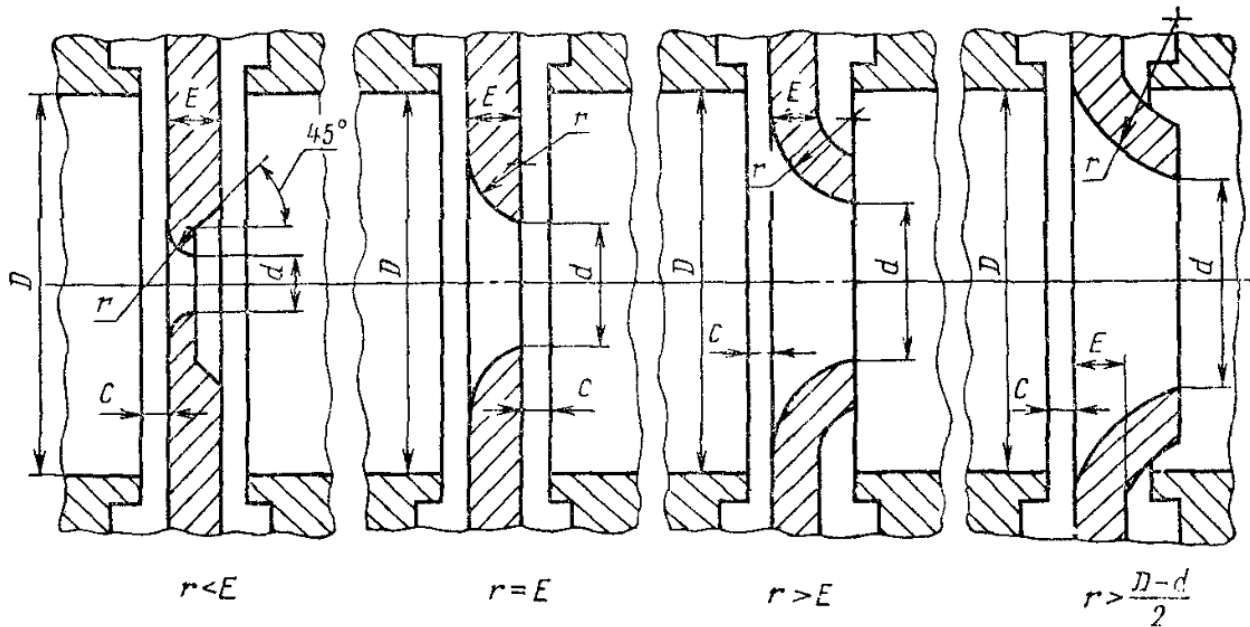


Рис. 20. Различные исполнения сопла в «четверть круга»

Подробнее методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств изложена в РД 50-411-83 [21].

Различные сопла в «четверть круга» представлены на рис. 20.

Значение числа Рейнольдса можно определить через расход:

$$Re = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_o}{D\nu} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_o\rho}{D\mu}, \quad (60)$$

где ν , μ – соответственно коэффициент кинематической и динамической вязкости измеряемой среды.

Нестандартные суживающие устройства в довольно большом

диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^5$ имеют постоянный коэффициент расхода. Значения граничных чисел Re , когда коэффициент расхода постоянен, для специальных сужающих устройств указаны в [21].

Задачи

(n – номер варианта по списку группы)

1. Задача.

Определить предельную относительную погрешность измерения расхода воздуха в мерном сечении, которое находится на расстоянии, равном трем диаметрам, за коленом воздуховода диаметром D . Измерения проводят с помощью комбинированного приемника давления в z точках мерного сечения. Класс точности приборов соответственно дифманометра, барометра и термометра – 1,0. Отсчеты по измерительным приборам производились в середине шкалы.

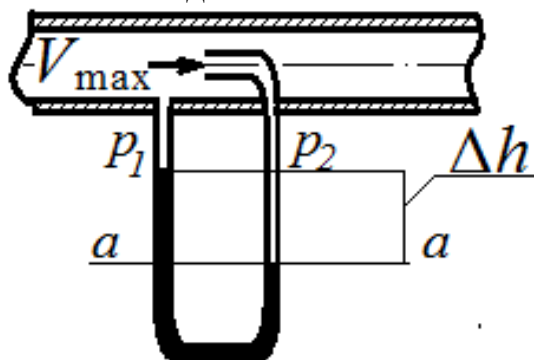
Таблица 18

Номер варианта	D , мм	z
Четный	$300+2n$	8
Нечетный	$350+2n$	12

Пояснение.

Необходимо воспользоваться приложением (см. в табл. 7П, табл. 8П) и формулами (37)-(38).

2. Задача.



При помощи трубки Пито с ртутным дифманометром измеряется скорость воды в трубе.

Определить максимальную скорость воды V_{max} , если разность уровней ртути в манометре составила Δh . Температура, при которой проводились измерения $t, ^\circ\text{C}$.

Таблица 19

Номер варианта	Δh , мм	$t, ^\circ\text{C}$
Четный	$18+0,1n$	20
Нечетный	$20+0,2n$	65

Пояснение.

Необходимо записать уравнение равновесия в дифманометре для плоскости $a-a$.

$$p_1 + \Delta h \rho_{рт} g = p_2 + \Delta h \rho g.$$

Тогда напор найдем согласно

$$H = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \Delta h \left(\frac{\rho_{рт}}{\rho} - 1 \right),$$

где p_1, p_2 – значения давлений в трубках ртутного дифманометра на уровне верхней отметки ртути; $\rho_{рт}, \rho$ – плотность ртути и воды при температуре измерений.

Максимальную скорость можно будет найти из выражения скоростного напора

$$H = \frac{V_{max}^2}{2g}.$$

3. Задача.

Определить объемный и массовый расход воды, которая движется по трубе диаметром D со средней скоростью W_{cp} , плотность воды ρ при температуре t .

Таблица 20

Номер варианта	D , мм	t , °C	W_{cp} , м/с
Четный	150	20+n	1
Нечетный	100	65+n	1,5

Пояснение.

По справочным данным определить плотность воды при заданной температуре и воспользоваться формулами для определения Q_o и Q_m .

4. Задача.

Необходимо определить значение перепада давления, который создается на напорных трубках, если известно, что поток воды движется со скоростью W_{cp} , м/с, плотность воды ρ при температуре t , коэффициент трубки k .

Таблица 21

Номер варианта	k	t , °C	W_{cp} , м/с
Четный	0,97	5+n	0,1
Нечетный	0,95	1+n	0,2

По справочным данным определить плотность воды при заданной температуре и воспользоваться формулой

$$\Delta p = k \frac{\rho W_{cp}^2}{2}.$$

5. Задача.

Определить, как изменится действительное значение расхода в процентах в дневное и ночное время, если на насосной станции в схеме регулирования расхода воды применяют длинное сопло Вентури, тарирование которого проводилось при температуре $t, ^\circ\text{C}$. Относительная площадь сопла m . Автоматически поддерживается перепад давления на сопле Δp . Температура днем доходила до t_1 , а ночью опускалась до t_2 .

Таблица 22

Номер варианта	Δp , МПа	m	$t, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
Четный	0,6	0,25	20	$20+0,2n$	$15-0,2n$
Нечетный	0,7	0,27	18	$20+0,2n$	$12-0,2n$

6. Задача.

Определить, как изменится действительное значение расхода, если температура воды станет $t_2, ^\circ\text{C}$. Диаметр трубопровода, коэффициент расхода и перепад давления на диафрагме считать неизменными.

Расход воды в трубопроводе диаметром D , мм измеряется бронзовой диафрагмой с отверстием диаметром d , мм. Температура воды была $t_1, ^\circ\text{C}$, давление воды P , МПа, перепад давления на диафрагме Δp , МПа.

Таблица 23

Номер варианта	Δp , МПа	P , МПа	D , мм,	d , мм,	$t_1, ^\circ\text{C}$.	$t_2, ^\circ\text{C}$.
Четный	0,04	2	80	58	$150+0,2n$	20
Нечетный	0,06	3	120	50	$130+0,2n$	18

Контрольные вопросы

1. Как определяют скорость потока при пневмометрическом методе определения скорости потока?
2. Расскажите о трубке Пито.
3. Расскажите о трубке Прандтля.
4. Расскажите о трубке Пито-Прандтля.
5. Какие стандартные суживающие устройства вы знаете? Поясните их работу.
6. Измерение расхода при помощи стандартного сопла Вентури.
7. Измерение расхода при помощи стандартной диафрагмы.
8. Какие условия должны выполняться при использовании стандартных суживающих устройств?

9. Какие нестандартные суживающие устройства вы знаете? Поясните их работу.

10. Назовите ряд требований, которые необходимо выполнять при использовании стандартных суживающих устройств.

11. В каких случаях необходимо применять нестандартные суживающие устройства?

12. При каких значениях чисел Re погрешность измерений при помощи стандартных суживающих устройств возрастает?

13. Как можно определить значение числа Рейнольдса для суживающих устройств?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа позволит студенту сформировать мировоззрение, развить интеллект и инженерную эрудицию, развить необходимые профессиональные компетенции теплоэнергетика. Поможет овладеть знаниями о системах сбора, преобразования и обработки информации, освоить оценивание погрешностей измерения теплоэнергетических параметров, приобрести практические навыки в расчетах погрешностей различных теплотехнических измерительных приборов и устройств.

Практикум позволит студентам направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки») и студентам направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») сформировать необходимые им компетенции, а также будет полезен при выполнении экспериментальной части магистерских диссертаций по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Цели (задачи), которые студент достигает при проведении практикума, состоят в формировании знания, понимания и способности применять на практике:

- основы обеспечения единства измерений, принципы действия, устройство типовых измерительных приборов для измерения неэлектрических величин;
- основные параметры объекта с помощью типовых измерительных приборов, оценки погрешности измерений;
- основные методы измерений, обработки результатов и оценки погрешностей измерений.

Практикум «Теплотехнические измерения и приборы» по дисциплине «Теплотехнические измерения и приборы» содержит теоретические сведения, справочные материалы, задания и упражнения, способствующие усвоению пройденного.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары в диапазоне температур -50 до +800 °С [3]

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	-3,110									
-40	-2,500	-2,561	-2,622	-2,683	-2,744	-2,805	-2,866	-2,927	-2,988	-3,049
-30	-1,890	-1,951	-2,012	-2,073	-2,134	-2,195	-2,256	-2,317	-2,378	-2,439
-20	-1,270	-1,336	-1,394	-1,456	-1,518	-1,580	-1,642	-1,704	-1,766	-1,828
-10	-0,640	-0,703	-0,766	-0,829	-0,892	-0,955	-1,018	-1,081	-1,144	-1,207
-0	-0,000	-0,064	-0,128	-0,192	-0,256	-0,320	-0,384	-0,448	-0,512	-0,576
+0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,907	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	2,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,898	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,865	9,940	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	10,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777
240	17,860	17,943	18,026	18,109	18,192	18,275	18,358	18,441	18,524	18,607
250	17,690	18,773	18,856	18,939	19,022	19,105	19,188	19,271	19,354	19,437
260	19,520	19,604	19,688	19,772	19,856	19,940	20,024	20,108	20,192	20,276
270	20,360	20,444	20,528	20,612	20,696	20,780	20,864	20,948	21,032	21,116
280	21,200	21,284	21,368	21,452	21,536	21,620	21,704	21,788	21,872	21,956
290	22,040	22,124	22,208	22,292	22,376	22,460	22,544	22,628	22,712	22,796
300	22,880	22,964	23,048	23,132	23,216	23,300	23,384	23,468	23,552	23,636
310	23,720	23,804	23,888	23,972	24,056	24,140	24,224	24,308	24,392	24,476
320	24,560	24,645	24,730	24,815	24,900	24,985	25,070	25,155	25,240	25,325
330	25,410	25,496	25,582	25,668	25,754	25,840	25,926	26,012	26,098	26,184
340	26,270	26,356	26,442	26,528	26,614	26,700	26,786	26,872	26,958	27,044
350	27,130	27,217	27,304	27,391	27,478	27,565	27,652	27,739	27,826	27,913
360	28,000	28,087	28,174	28,261	28,348	28,435	28,522	28,609	28,696	28,783

Продолжение прил.
Окончание табл. П.1

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
370	28,870	28,957	29,044	29,131	29,218	29,305	29,392	29,479	29,566	29,656
380	29,740	29,827	29,914	30,001	30,088	30,175	30,262	30,349	30,436	30,523
390	30,610	30,697	30,784	30,871	30,958	31,045	31,132	31,219	31,306	31,393
400	31,480	31,567	31,654	31,741	31,828	31,915	31,002	32,089	32,176	32,263
410	32,350	32,438	32,526	32,614	32,702	32,790	32,878	32,966	33,054	33,142
420	33,230	33,318	33,406	33,494	33,582	33,670	33,758	33,846	33,934	34,022
430	34,110	34,198	34,286	34,374	34,462	34,550	34,638	34,726	34,814	34,902
440	34,990	35,078	35,116	35,254	35,342	35,430	35,518	35,606	35,694	35,782
450	35,870	35,958	36,046	36,134	36,222	36,310	36,398	36,486	36,574	36,662
460	36,750	36,838	36,926	37,014	37,102	37,190	37,278	37,366	37,454	37,542
470	37,630	37,718	37,806	37,894	37,982	38,070	38,158	38,246	38,334	38,422
480	38,510	38,598	38,686	38,774	38,862	38,950	39,038	39,126	39,214	39,302
490	39,390	39,478	39,566	39,654	39,742	39,830	39,918	40,006	40,094	40,128
500	40,270	40,358	40,446	40,534	40,622	40,710	40,798	40,886	40,974	41,062
510	41,150	41,238	41,326	41,414	41,502	41,590	41,678	41,766	41,854	41,942
520	42,030	42,118	42,206	42,294	42,382	42,470	42,558	42,646	42,734	42,822
530	42,910	42,998	43,086	43,174	43,262	43,350	43,438	43,526	43,614	43,702
540	43,790	43,878	43,966	44,054	44,142	44,230	44,318	44,406	44,494	44,582
550	44,670	44,758	44,846	44,934	45,022	45,110	45,198	45,286	45,374	45,462
560	45,550	45,639	45,728	45,817	45,906	45,995	46,084	46,173	46,262	46,351
570	46,440	46,529	46,618	46,707	46,796	46,885	46,974	47,063	47,152	47,241
580	47,330	47,418	47,506	47,594	47,682	47,770	47,858	47,946	48,034	48,122
590	48,210	48,298	48,386	48,474	48,562	48,650	48,738	48,826	48,914	49,002
600	49,090	49,178	49,266	49,354	49,442	49,530	49,618	49,706	49,794	49,882
610	49,970	50,058	50,146	50,234	50,322	50,410	50,498	50,586	50,674	50,762
620	50,850	50,938	51,026	51,114	51,202	51,290	51,378	51,466	51,554	51,642
630	51,730	51,818	51,906	51,994	52,082	52,170	52,258	52,346	52,434	52,522
640	52,610	52,697	52,784	52,871	52,958	53,045	53,132	53,219	53,306	53,393
650	53,480	53,567	53,654	53,741	53,828	53,915	54,002	54,089	54,176	54,263
660	54,350	54,437	54,524	54,611	54,698	54,785	54,872	54,959	55,046	55,133
670	55,220	55,307	55,394	55,481	55,568	55,655	55,742	55,829	55,916	56,003
680	56,090	56,177	56,264	56,351	56,438	56,525	56,612	56,699	56,786	56,873
690	56,960	57,046	57,132	57,218	57,304	57,390	57,476	57,562	57,648	57,734
700	57,820	57,906	57,992	58,078	58,164	58,250	58,336	58,422	58,508	58,594
710	58,680	58,766	58,852	58,938	59,024	59,110	59,196	59,282	59,368	59,454
720	59,540	59,626	59,712	59,798	59,884	59,970	60,056	60,142	60,228	60,314
730	60,400	60,486	60,572	60,658	60,744	60,830	60,916	61,002	61,088	61,174
740	61,260	61,346	61,432	61,518	61,604	61,690	61,776	61,862	61,948	62,034
750	62,120	62,206	62,292	62,378	62,464	62,550	62,636	62,722	62,808	62,894
760	62,980	63,066	63,152	63,238	63,324	63,410	63,496	63,582	63,668	63,754
770	63,840	63,926	64,012	64,098	64,184	64,270	64,356	64,442	64,528	64,614
780	64,700	64,786	64,872	64,958	65,044	65,130	65,216	65,302	65,388	65,474
790	65,560	65,646	65,732	65,818	65,904	65,990	66,076	66,162	66,248	66,334
800	66,420									

Продолжение прил.

Таблица П.2. Градуировочная характеристика платиновых (10 %) – платиновой терморпары, в диапазоне температур 0–840°C [3]

Температура рабочего конца, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,022	0,027	0,033	0,038	0,044	0,049
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,096	0,101	0,107
20	0,113	0,119	0,125	0,130	0,136	0,142	0,148	0,154	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,203	0,209	0,216	0,222	0,229
40	0,235	0,241	0,247	0,254	0,260	0,266	0,273	0,279	0,286	0,292
50	0,299	0,305	0,312	0,318	0,325	0,331	0,338	0,344'	0,351	0,358
60	0,364	0,371	0,378	0,384	0,391	0,398	0,405	0,412	0,418	0,425
70	0,432	0,439	0,446	0,453	0,460	0,467	0,474	0,481	0,488	0,495
80	0,502	0,509	0,516	0,523	0,530	0,537	0,544	0,551	0,559	0,566
90	0,573	0,580	0,587	0,595	0,602	0,609	0,616	0,623	0,631	0,638
100	0,645	0,652	0,660	0,667	0,675	0,682	0,689	0,697	0,704	0,712
110	0,719	0,727	0,734	0,742	0,749	0,757	0,765	0,772	0,780	0,787
120	0,795	0,803	0,810	0,818	0,825	0,833	0,841	0,849	0,856	0,864
130	0,872	0,880	0,887	0,895	0,902	0,910	0,918	0,926	0,934	0,942
140	0,950	0,958	0,966	0,973	0,981	0,989	0,997	1,005	1,013	0,021
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,093	1,101
160	1,109	1,117	1,125	1,133	1,141	1,149	1,157	1,165	1,174	1,182
170	1,190	1,198	1,206	1,223	1,223	1,231	1,239	1,248	1,256	1,265
180	1,273	1,281	1,289	1,298	1,306	1,314	1,322	1,331	1,339	1,348
190	1,356	1,364	1,373	1,381	1,390	1,398	1,406	1,415	1,423	1,432
200	1,440	1,448	1,457	1,465	1,474	1,482	1,491	1,499	1,508	1,516
210	1,525	1,534	1,542	1,551	1,559	1,568	1,577	1,585	1,594	1,602
220	1,611	1,620	1,628	1,637	1,645	1,654	1,663	1,672	1,680	1,689
230	1,698	1,707	1,715	1,724	1,732	1,741	1,750	1,759	1,767	1,776
240	1,785	1,794	1,803	1,811	1,820	1,829	1,838	1,847	1,855	1,864
250	1,873	1,882	1,899	1,899	1,908	1,917	1,926	1,935	1,944	1,953
260	1,962	1,971	1,980	1,988	1,997	2,006	2,015	2,024	2,033	2,042

Продолжение прил.
Продолжение табл. П.2

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
280	2,141	2,150	2,159	2,168	2,177	2,186	2,195	2,204	2,214	2,223
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,286	2,295	2,305	2,314
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,359	2,368	2,377	2,386	2,396	2,405
310	2,414	2,423	2,432	2,442	2,451	2,460	2,469	2,478	2,488	2,497
320	2,506	2,515	2,525	2,534	2,544	2,553	2,562	2,571	2,581	2,590
330	2,599	2,608	2,618	2,627	2,637	2,646	2,655	2,664	2,674	2,683
340	2,692	2,701	2,711	2,720	2,730	2,739	2,748	2,758	2,767	2,777
350	2,786	2,795	2,805	2,814	2,824	2,833	2,842	2,852	2,861.	2,871
360	2,880	2,889	2,899	2,908	2,918	2,927	2,936	2,946	2,955	2,965
370	2,974	2,984	2,993	3,003	3,012	3,022	3,031	3,041	3,050	3,060
380	3,069	3,079	3,088	3,098	3,107	3,117	3,126	3,136	3,145	3,155
390	3,164	3,174	3,183	3,193	3,202	3,212	3,222	3,231	3,241	3,250
400	3,260	3,270	3,279	3,289	3,298	3,308	3,318	3,327	3,337	3,346
410	3,356	3,366	3,375	3,385	3,394	3,404	3,414	3,423	3,433	3,442
420	3,452	3,462	3,471	3,481	3,490	3,500	3,510	3,520	3,529	3,539
430	3,549	3,559	3,568	3,578	3,587	3,597	3,607	3,616	3,626	3,635
440	3,645	3,655	3,665	3,674	3,684	3,694	3,704	3,714	3,723	3,733
450	3,743	3,753	3,762	3,772	3,781	3,791	3,801	3,811	3,820	3,830
460	3,840	3,850	3,860	3,869	3,879	3,889	3,899	3,909	3,918	3,928
470	3,938	3,948	3,958	3,967	3,977	3,987	3,997	4,007	4,016	4,026
480	4,036	4,046	4,056	4,066	4,076	4,086	4,096	4,106	4,115	4,125
490	4,135	4,145	4,155	4,164	4,174	4,184	4,194	4,204	4,214	4,224
500	4,234	4,244	4,254	4,263	4,273	4,283	4,293	4,303	4,313	4,323
510	4,333	4,343	4,353	4,362	4,372	4,382	4,392	4,402	4,412	4,422
520	4,432	4,442	4,452	4,462	4,472	4,482	4,492	4,502	4,512	4,522
530	4,532	4,542	4,552	4,562	4,572	4,582	4,592	4,602	4,612	4,622
540	4,632	4,642	4,652	4,662	4,672	4,682	4,692	4,702	4,712	4,722
550	4,732	4,742	4,752	4,762	4,772	4,782	4,792	4,802	4,812	4,822
560	4,832	4,842	4,852 .	4,863	4,873	4,883	4,893	4,903	4,913	4,923

Продолжение прил.
Окончание табл. П.2

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
580	5,034	5,044	5,054	5,065	5,075	5,085	5,095	5,105	5,116	5,126
590	5,136	5,146	5,156	5,166	5,176	5,186	5,196	5,206	5,217	5,227
600	5,237	5,247	5,257	5,268	5,278	5,288	5,298	5,308	5,319	5,329
610	5,339	5,349	5,360	5,370	5,381	5,391	5,401	5,411	5,422	5,432
620	5,442	5,452	5,462	5,473	5,483	5,493	5,503	5,513	5,524	5,534
630	5,544	5,554	5,565	5,575	5,586	5,596	5,606	5,617	5,627	5,638
640	5,648	5,658	5,669	5,679	5,690	5,700	5,710	5,720	5,731	5,741
650	5,751	5,761	5,772	5,782	5,793	5,803	5,813	5,824	5,834	5,845
660	5,855	5,865	5,876	5,886	5,897	5,907	5,918	5,928	5,939	5,949
670	5,960	5,970	5,981	5,991	6,002	6,012	6,022	6,033	6,043	6,054
680	6,064	6,075	6,085	6,096	6,106	6,117	6,127	6,138	6,148	6,159
690	6,169	6,180	6,190	6,201	6,211	6,222	6,232	6,243	6,253	6,264
700	6,274	6,285	6,295	6,306	6,316	6,327	6,338	6,348	6,359	6,369
710	6,380	6,391	6,401	6,412	6,422	6,433	6,444	6,454	6,465	6,475
720	6,486	6,497	6,507	6,518	6,528	6,539	6,550	6,560	6,571	6,581
730	6,592	6,603	6,613	6,624	6,634	6,645	6,656	6,667	6,677	6,688
740	6,699	6,710	6,720	6,731	6,741	6,752	6,763	6,773	6,784	6,794
750	6,805	6,816	6,837	6,837	6,848	6,859	6,859	6,881	6,891	6,902
760	6,913	6,924	6,934	6,945	6,955	6,966	6,977	6,988	6,998	7,009
770	7,020	7,031	7,042	7,052	7,063	7,074	7,085	7,096	7,106	7,117
780	7,128	7,139	7,150	7,160	7,171	7,182	7,193	7,204	7,214	7,225
790	7,236	7,247	7,258	7,269	7,280	7,291	7,302	7,313	7,323	7,334
800	7,345	7,356	7,367	7,377	7,388	7,399	7,410	7,421	7,432	7,443
810	7,454	7,465	7,476	7,486	7,497	7,503	7,519	7,530	7,541	7,552
820	7,563	7,574	7,585	7,596	7,607	7,618	7,629	7,640	7,650	7,661
830	7,672	7,683	7,694	7,705	7,716	7,727	7,738	7,749	7,760	7,771
840	7,782	7,793	7,804	7,815	7,826	7,837	7,848	7,859	7,870	7,881

Продолжение прил.

Таблица П.3

Типы, температурные коэффициенты и классы допусков термопреобразователей сопротивления (ТС) и чувствительных элементов (ЧЭ) [5]

Тип ТС	Обозначение типа ТС	$\alpha, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Класс допуска		
			для проволочных ЧЭ	для пленочных ЧЭ	для ТС
Платиновый	Pt	0,00385	W 0.1, W 0.15, W 0.3, W 0.6	F 0.1, F 0.15, F 0.3, F 0.6	AA, A, B, C
	П	0,00391	AA, A, B, C	AA, A, B, C	AA, A, B, C
Медный	M	0,00428	A, B, C	-	A, B, C
Никелевый	N	0,00617	C	-	C

Таблица П.4

Классы допусков и диапазоны измерений для ТС и ЧЭ [5]

Класс допуска	Допуск, $^\circ\text{C}$	Диапазон измерений, $^\circ\text{C}$			
		Платиновый ТС, ЧЭ		Медный ТС, ЧЭ	Никелевый ТС, ЧЭ
		Проволочный ЧЭ	Пленочный ЧЭ		
AA W 0.1 F 0.1	$\pm(0,1+0,0017 t)$	От -50 до +250	От 0 до +150	-	-
A W 0.15 F 0.15	$\pm(0,15+0,002 t)$	От -100 до +450	От -30 до +300	От -50 до +120	-
B W 0.3 F 0.3	$\pm(0,3+0,005 t)$	От -196 до +660	От -50 до +500	От -50 до +200	-
C W 0.6 F 0.6	$\pm(0,6+0,01 t)$	От -196 до +660	От -50 до +600	От -180 до +200	От -60 до +180
Примечание – $ t $ – абсолютное значение температуры, $^\circ\text{C}$, без учета знака.					

Таблица П.5

Допуски по сопротивлению платинового термопреобразователя сопротивления (ТС) $\alpha = 0,00391 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ номинальным сопротивлением 100 Ом [5]

Класс допуска	Допуск, Ом	
	при 0 $^\circ\text{C}$	при 100 $^\circ\text{C}$
AA	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$
A	$\pm 0,06$	$\pm 0,13$
B	$\pm 0,12$	$\pm 0,31$
C	$\pm 0,24$	$\pm 0,62$

Продолжение прил.

Таблица П.6

Значения доверительных погрешностей термопреобразователей при температурах реперных точек [7]

Температура реперных точек	Доверительная погрешность термопреобразователя, °С					
	Разряд ППО			Разряд ПРО		
	1	2	3	1	2	3
419,527	± 0,3	± 0,5	± 1,0	-	-	-
660,323	± 0,4	± 0,6	± 1,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1084,62	± 0,6	± 0,9	± 1,8	± 0,7	± 1,4	± 1,9
1553,5	-	-	-	± 1,4	± 2,7	± 4,0
1768,4	-	-	-	± 2,0	± 4,0	± 6,0

Примечание:

Электрическое сопротивление изоляции термопреобразователей между цепью ЧЭ и металлической частью защитной арматуры (муфтой) должно быть не менее, МОм:

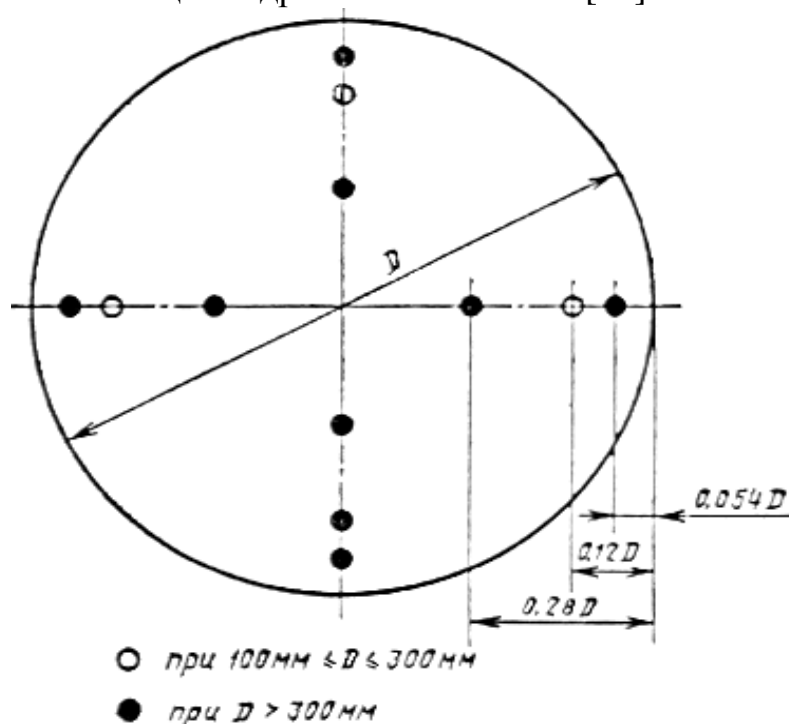
- 100 - при температуре (25 ± 10) °С и относительной влажности от 30 % до 80 %;
- 0,005 - при температуре от 800 °С до 1000 °С .

В зависимости от химического состава термоэлектродов термопреобразователи подразделяют на платинородий-платиновые эталонные (ППО) и платинородий-платинородиевые эталонные (ПРО).

Термопреобразователи каждого типа имеют 1, 2, 3-й разряды в соответствии с ГОСТ 8.558. Вероятность безотказной работы термопреобразователей должна быть не менее 0,9:

- для ППО за время пребывания в печи в течение 500 ч при температуре 1100 °С ;
- для ПРО за время пребывания в печи в течение 80 ч при температуре 1600 °С .

Координаты точек измерения давлений и скоростей в воздуховодах цилиндрического сечения [15]



Продолжение прил.

Координаты точек измерения давлений и скоростей в воздуховодах
прямоугольного сечения [15]

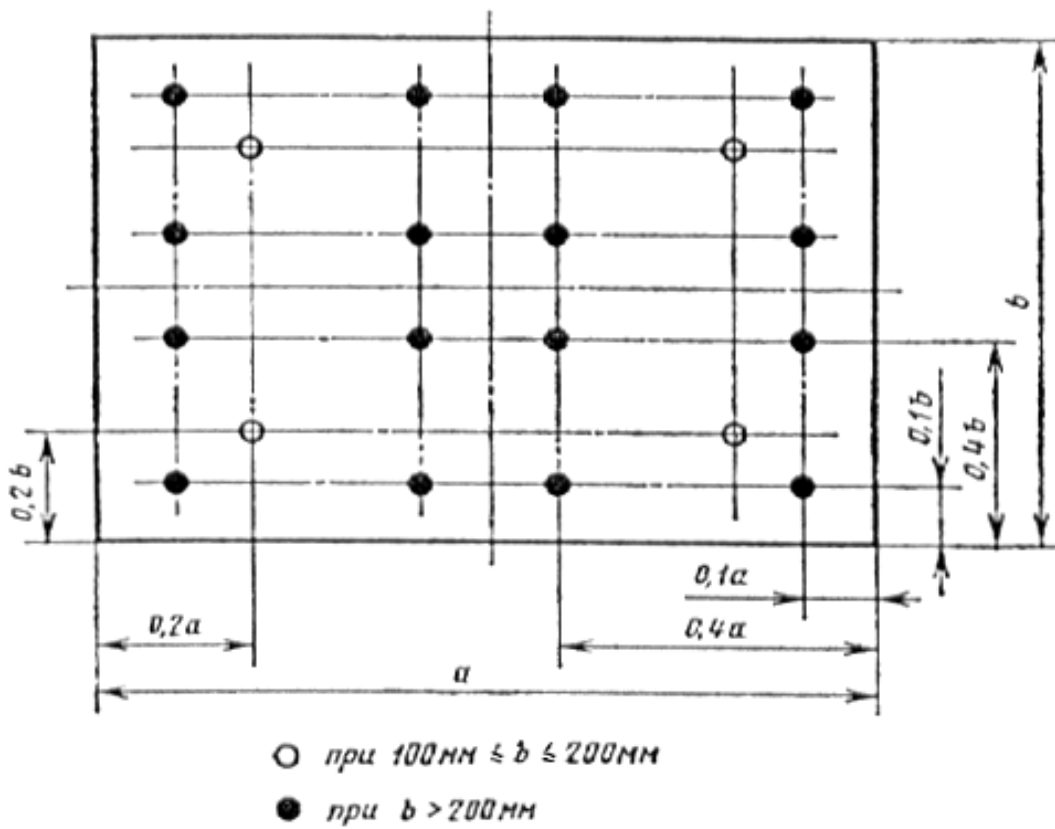


Таблица П7

Зависимость коэффициента K_φ от температуры и влажности
перемещаемого воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	10		20		30		40		50	
$\varphi, \%$	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
K_φ	0,998	1,003	1,000	1,005	1,004	1,012	1,010	1,025	1,020	1,040

Окончание прил.

Таблица П8

Предельная относительная погрешность δ_{ϕ} , вызванная неравномерностью распределения скоростей в мерном сечении [15]

Форма мерного сечения	Число точек измерений	δ , %, при расстоянии от места возмущения потока до мерного сечения в гидравлических диаметрах D_h				
		1	2	3	5	> 5
Круг	4	20	16	12	6	3
	8	16	12	10	5	2
	12	12	8	6	3	2
Прямоугольник	4	24	20	15	8	4
	16	12	8	6	3	2

Таблица П9

Значения среднеквадратичных погрешностей σ_p , σ_B , σ_t показаний приборов [15]

Показание прибора в долях длины шкалы	σ_p , σ_B , σ_t , %, для приборов класса точности	
	10	0,5
1,00	$\pm 0,5$	$\pm 0,25$
0,75	$\pm 0,7$	$\pm 0,24$
0,50	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$
0,25	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$
0,10	$\pm 5,0$	$\pm 2,5$
0,05	$\pm 10,0$	$\pm 5,0$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковальногов, Н.Н. Теория и техника теплофизического эксперимента: Текст лекций по прогр. магистер. подгот. студ. 550110 «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» / Н.Н. Ковальногов. – Ульяновск : УлГТУ, 1999.
2. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для вузов. – 2-е изд., доп. / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяковб – М.: МЭИ, 2005.
3. ГОСТ Р 8.585–2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования. – М. : Изд-во стандартов, 2001.
4. ГОСТ Р 8.624–2006 Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки. – М. : Изд-во стандартов, 2006.
5. ГОСТ 6651–2009 Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2011.
6. ГОСТ 13384–93 Преобразователи измерительные для термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2008.
7. ГОСТ Р 52314–2005 Преобразователи термоэлектрические платинородий-платиновые и платинородий-платинородиевые эталонные 1, 2 и 3-го разрядов. Общие технические требования. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2005.
8. Кузнецов, Н.Д. Сборник задач и вопросов о теплотехническим измерениям и приборам : учебное пособие для вузов / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – 2-е изд., доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
9. Куликовский, К.Л. Методы и средства измерений / К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
10. ГОСТ 28243–96 Пирометры. Общие технические требования. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003.
11. ГОСТ 13881–68 Пирометры термоэлектрические. Методы и средства поверки. – М. : Изд-во стандартов, 1971.
12. ГОСТ 21482-76 Сильфоны однослойные измерительные металлические. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
13. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов» / В.П. Преображенский. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
14. ГОСТ 22743–85 Сильфоны. Термины, определения и буквенные обозначения. – М. : Изд-во стандартов, 1987.

15. ГОСТ 12.3.018–79 Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
16. ГОСТ 8.361–79 Государственная система обеспечения единства измерений. Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
17. ГОСТ 8.439–81 ГСИ. Расход воды в напорных трубопроводах. Методика выполнения измерений методом площадь-скорость. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
18. ГОСТ 12259–75 Машины электрические. Методы определения расхода охлаждающего газа. – М. : Изд-во стандартов, 1981.
19. ГОСТ Р ЕН 306–2011 Теплообменники. Измерения и точность измерений при определении мощности. – М. : Стандартиформ, 2013.
20. ГОСТ 8.586.1–2005 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. – М. : Стандартиформ, 2007.
21. РД 50-411–83 Методические указания. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств. – М. : Стандартиформ, 1984.

Учебное электронное издание

ЦЫНАЕВА Екатерина Александровна

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Практикум

ЭИ № 676. Объем данных 2,40 Мб.

Редактор Н.А. Евдокимова

Печатное издание

ЛР №020640 от 22.10.97.

Подписано в печать 25.11.2015. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 3,72. Тираж 50 экз. Заказ 997.

Ульяновский государственный технический университет

432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

ИПК «Венец», 432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Тел.: (8422) 778-113

E-mail: venec@ulstu.ru

<http://www.venec.ulstu.ru>