

56-2022

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям и курсовой работе
для студентов направления 13.03.01
«Теплоэнергетика и теплотехника»
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)
всех форм обучения

Воронеж 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра теоретической и промышленной теплоэнергетики

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям и курсовой работе
для студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)
всех форм обучения

Воронеж 2022

УДК 621.31(075)
ББК 31.32(я7)

Составитель А. А. Надеев

Теплотехнические измерения и автоматизация: методические указания к практическим занятиям и курсовой работе для студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. А. Надеев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 40 с.

В методических указаниях приведены практические задания и порядок выполнения курсовой работы по дисциплине «Теплотехнические измерения и автоматизация». Указания содержат краткие теоретические сведения по основным разделам лекционного курса.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ ПР-КР ТИиА.pdf.

Табл. 10. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.31(075)
ББК 31.32(я7)

Рецензент – В. В. Портнов, канд. техн. наук, доцент зав. кафедрой теоретической и промышленной теплоэнергетики ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Практические задания и курсовая работа по дисциплине «Теплотехнические измерения и автоматизация» предназначены для закрепления обучающимися теоретического материала и получения ими практических навыков по работе со средствами измерения основных теплотехнических величин, а также изучения особенностей автоматизации теплоэнергетических процессов.

В начале каждого раздела методических указаний приведены краткие теоретические сведения по изучаемому вопросу.

Практические задания предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика». Умения и навыки, полученные при выполнении данных заданий, необходимы при изучении дисциплин «Тепловые электрические станции» и «Проектирование и эксплуатация энергетических установок».

1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

1.1. Краткие теоретические сведения

Измерение температуры может осуществляться различными методами. Каждый метод имеет свои особенности, определяемые как принципом работы, так и применяемыми средствами измерений, и схемами их подключения. Кроме того, при измерении температуры следует учитывать взаимодействие между термопреобразователями и измеряемой средой.

Контактные термопреобразователи находятся в непосредственном контакте со средой, температуру которой они измеряют. Часто собственная температура контактного термопреобразователя (или его части) даже в статическом режиме отличается от температуры измеряемой среды. Это отличие определяется особенностями теплообмена между термопреобразователем и измеряемой средой, конструктивными и теплофизическими характеристиками самого термопреобразователя и отдельных частей его арматуры, а также условиями теплообмена термопреобразователя с окружающей средой.

Показания жидкостных и манометрических термометров расширения определяются температурой не только рабочего вещества, находящегося в непосредственном контакте с измеряемой средой, но и выступающей, неконтактирующей части рабочего вещества, которая находится в теплообмене с окружающей средой. Если конструкцией или условиями эксплуатации предусмотрено наличие неконтактирующей с измеряемой средой (выступающей) части, то градуировка такого термометра должна производиться при определённой температуре выступающей части. Изменение температуры выступающей части относительно градуировочного значения вызовет изменение показаний термометра.

В том случае, если жидкостный термометр полного погружения применяется в условиях частичного погружения, то необходимо ввести поправку на выступающий столбик. Для этой цели рядом с рабочим термометром укрепляют вспомогательный термометр для измерения средней температуры выступающего столбика ртути. Поправку к температуре, показываемой рабочим термометром, находят по уравнению:

$$\Delta t = n \cdot \beta_b \cdot (t - t_0), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.1)$$

где t – температура, показываемая рабочим термометром, $^\circ\text{C}$; t_0 – средняя температура выступающего столбика ртути, показываемая вспомогательным термометром, $^\circ\text{C}$; n – высота выступающего столбика ртути, выраженная в градусах; β_b – кажущийся коэффициент объёмного расширения термометрической жидкости в стекле, $^\circ\text{C}^{-1}$.

Изменение показаний манометрических термометров возможно также за счёт изменения давления независимо от значения температуры. Например, одним из таких факторов может быть разность уровней между термобаллоном и манометром для жидкостных манометрических термометров. Изменение показаний возникает при изменении барометрического давления, так как манометр, используемый в данных приборах, измеряет избыточное давление.

При измерении термо-ЭДС термоэлектрическим термометром (термопарой) могут иметь место ошибки в оценке действительного значения термо-ЭДС, которые вызываются не учётом некоторых свойств термоэлектрических цепей, а также неправильной оценкой температуры свободных концов или не учётом свойств удлиняющих термоэлектродных проводов. Напомним некоторые из этих свойств. Термо-ЭДС цепи не изменится при включении в неё проводника из любого материала, если температура мест подключения одинакова. Удлиняющие термоэлектродные провода служат для удлинения термометра без искажения развиваемой им термо-ЭДС.

Свободными называются те концы термоэлектрического термометра, которые включаются в измерительную цепь. Если термоэлектрический термометр удлинён термоэлектродными проводами, то свободными концами термометра будут концы термоэлектродных проводов. Если температура свободных концов термопары отличается от градуировочного значения, равного $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, то вводится поправка на температуру свободных концов:

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) \pm E_{AB}(t_0, 0), \text{ мВ}, \quad (1.2)$$

где t – температура рабочего спая термопары, $^\circ\text{C}$; t_0 – температура свободных концов термопары, $^\circ\text{C}$; $E_{AB}(t, 0)$ – табличное значение термо-ЭДС, полученное при градуировке, мВ; $E_{AB}(t, t_0)$ – измеренное значение термо-ЭДС, мВ; $E_{AB}(t_0, 0)$ – величина поправки, мВ.

Знак «+» в применяется, если $t_0 > 0$ °С; знак «-», если $t_0 < 0$ °С.

Удлиняющие термоэлектродные провода вносят свою долю в общую погрешность измерения. Например, предел основной допускаемой погрешности удлиняющих проводов для термоэлектрических термометров типа ХА (К) составляет $\pm 0,16$ мВ.

В настоящее время в России применяются двенадцать типов термоэлектрических преобразователей. Типы некоторых термоэлектрических преобразователей и их обозначения приведены в табл. 1. Здесь также приведены допускаемые отклонения термо-ЭДС от градуировочных значений.

Таблица 1

Термоэлектрические термопреобразователи

Тип термопары (НСХ)	Рабочий диапазон температур, °С		a , °С	$b \cdot 10^3$	c , °С
Медь-копелевая МК(М)	от -200 до 0 от 0 до 100		1,3	-1,1 0	0 0
Медь-константановая МКн(Т)	от -200 до -100 от -100 до -400		3	-20 0	-100 0
Железо-константановая ЖК(Ј)	от -200 до -100 от -100 до 400 от 400 до 900		3	-20 0 7,5	-100 0 400
Хромель-копелевая ХК(Л)	от -50 до 300 от 300 до 800		2,5	0 6	0 300
Хромель-константановая ХКн(Е)	от -100 до 400 от 400 до 900		4	0 7,5	0 400
Хромель-алюмелевая ХА(К)	от -200 до -100 от -100 до 400 от 400 до 1300		4	-10 0 7,5	-100 0 400
Платинородий-платиновая ПП(С)	1-й класс точности	от 0 до 300 от 300 до 1600	1,5	0 2	0 300
	2-й класс точности	от 0 до 600 от 600 до 1600	3	0 5	0 600
Платинородий-платинородиевая ПР(В)	от 300 до 600 до 600 до 1800		3	0 5	0 600
Вольфрамрений- вольфрамрениевая ВР(А)	от 0 до 1000		5	0	0
	от 1000 до 1800		5	6	1000
	от 1800 до 2500		10	11,5	1800

Допускаемые отклонения измеряемых значений термо-ЭДС от градуировочных характеристик, определяются из выражения

$$\Delta E = \pm [a + b \cdot (t - c)] \cdot S, \text{ мВ}, \quad (1.3)$$

где a , b , c – коэффициенты, определяемые из табл. 1; t – измеряемая термометром температура, °С; S – коэффициент преобразования, мВ/°С.

Коэффициент преобразования определяется на основе градуировочной характеристики (номинальной статической характеристики) по формуле

$$S = \frac{dE}{dt} = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \text{ мВ/}^\circ\text{С.} \quad (1.4)$$

Допускаемые отклонения, выраженные в градусах, определяются частью выражения (1.3), заключённого в квадратные скобки.

Номинальные статические характеристики всех стандартных термоэлектрических преобразователей приведены в ГОСТ Р 8.585-2001 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования». Общие технические требования, предъявляемые к стандартным ТЭП, условия их применения, пределы допускаемого отклонения от НСХ приведены в ГОСТ 6616-94 «Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия».

При расчёте компенсации температурной погрешности необходимо иметь в виду, что значение вводимой поправки должно быть численно равно изменению термо-ЭДС термоэлектрического термометра при изменении температуры свободных концов. При расчёте изменения показаний с изменением температуры свободных концов необходимо пользоваться выражением равновесия потенциометрической схемы в общем виде, когда движок реохорда потенциометра занимает произвольное положение.

При измерении температуры с помощью термопреобразователей сопротивления необходимо учитывать все особенности, связанные с работой как самих термометров, так и измерительных схем. Так как значение температуры определяется по значению сопротивления чувствительного элемента термометра, то могут иметь место ошибки в определении этого сопротивления. Эти ошибки вызываются изменением сопротивления либо линий связи, либо чувствительного элемента за счёт самонагрева, либо другими причинами, которые изменяют сопротивление термометра независимо от значения температуры измеряемой среды.

Типы термопреобразователей сопротивления, их градуировочные характеристики, диапазоны измеряемых температур, допускаемые отклонения от НСХ приведены в ГОСТ 6651-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний».

Для стандартных платиновых, медных и никелевых термопреобразователей сопротивления зависимость сопротивления от температуры имеет достаточно сложную форму и на различных интервалах аппроксимируется разными выражениями. Для медных термопреобразователей эта зависимость в интервале температур от 0 до 200 °С имеет наиболее простую форму:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot t), \text{ Ом,} \quad (1.5)$$

где R_0 – номинальное сопротивление термопреобразователя сопротивления, т.е. его сопротивление при 0 °С, Ом; α – температурный коэффициент, °С⁻¹

(для медного термопреобразователя $\alpha = 0,00428 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); t – измеряемая термометром температура, $^\circ\text{C}$.

Допускаемые отклонения сопротивления R_0 термопреобразователей при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ от номинального значения приведены в приложении П.16 работы [3].

Кроме чистых металлов в качестве чувствительного элемента в термопреобразователях сопротивления могут применяться различные полупроводники. Зависимость сопротивления полупроводниковых термометров, называемых также термисторами, от температуры можно записать в виде:

$$R_t = R_0 \cdot \exp\left(\frac{B \cdot (293 - T)}{293 \cdot T}\right), \text{ Ом}, \quad (1.6)$$

где T – текущее значение температуры, К; R_0 – значение сопротивления при температуре $T = 293 \text{ К}$, Ом; B – коэффициент, зависящий от свойств полупроводникового материала.

Для измерения сопротивления термометров в промышленных условиях применяются уравновешенные мосты, логометры и цифровые измерители-регуляторы. При использовании мостовых схем основным уравнением является математическое выражение условия равновесия мостовой схемы (произведения значений сопротивлений противолежащих плеч должны быть равны).

При измерении температуры контактными термопреобразователями могут возникнуть значительные погрешности, обусловленные отводом теплоты от чувствительного элемента за счёт теплоотдачи по чехлу и теплоотвода излучением.

Погрешность Δt измерения температуры газа, вызванная лучистым теплообменом между чехлом термопреобразователя и стенкой трубы, определяется из выражения

$$\Delta t = T_t - T_c = -\frac{C_0 \cdot \varepsilon_{np}}{\alpha_k} \cdot \left[\left(\frac{T_t}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ct}}{100} \right)^4 \right], \text{ }^\circ\text{C}, \quad (1.7)$$

где T_c , T_t , T_{ct} – соответственно температура измеряемой среды, термопреобразователя и стенки, К; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией между термопреобразователем и измеряемой средой, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела; ε_{np} – приведённый коэффициент теплового излучения.

Если поверхность стенки значительно больше поверхности термопреобразователя ($F_{ct} \gg F_t$), можно считать, что приведённый коэффициент теплового излучения практически равен коэффициенту теплового излучения термопреобразователя ($\varepsilon_{np} = \varepsilon_t$).

Погрешность Δt измерения температуры за счёт теплоотвода по чехлу определяется по формуле

$$\Delta t = t_{\tau} - t_c = -\frac{t_c - t_{cr}}{\text{chl} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot \alpha}{\lambda \cdot S}}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи между термопреобразователем и измеряемой средой, Вт/(м²·К); P и S – периметр, и площадь поперечного сечения чехла термопреобразователя, м²; λ – коэффициент теплопроводности материала термопреобразователя, Вт/(м·К); l – глубина погружения чехла в измеряемую среду, м.

Все средства измерения температуры имеют тепловую инерцию. Для термопреобразователей (сопротивления и термоэлектрических) коэффициент теплоотдачи за время переходного процесса считается неизменным, а сам процесс описывается уравнением первого порядка

$$T_d \frac{dt_{\tau}}{d\tau} + t_{\tau} = t_c, \quad (1.9)$$

где t_{τ} – текущее значение температуры термопреобразователя, соответствующее времени τ после скачкообразного изменения температуры среды до значения t_c ; T_d – постоянная времени, с.

Тепловая инерция вызывает появление динамической погрешности, которая представляет собой разность текущего значения температуры термопреобразователя t_{τ} и температуры среды t_c .

При решении задач по пирометрам излучения следует руководствоваться математическим выражением физических законов, составляющих основу принципа действия пирометра. Одним из основных законов является закон Планка, устанавливающий зависимость спектральной энергетической яркости абсолютно чёрного тела от его температуры:

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1.10)$$

где λ – длина волны, м; T – температура тела, К; $C_1 = 1,191 \cdot 10^{-16}$ (Вт·м²)/ср; $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Для видимого участка спектра и $t \ll 3000$ К можно вместо закона Планка использовать формулу Вина:

$$B_{0\lambda T} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (1.11)$$

Интегральная энергетическая яркость определяется законом Стефана-Больцмана, который для абсолютно чёрного тела имеет вид:

$$B_{0T} = \sigma \cdot T^4, \quad (1.12)$$

где σ – постоянная, равная $1,805 \cdot 10^{-8}$ Вт/(ср·м²·К⁴).

Энергетическая яркость реальных физических тел меньше яркости абсолютно чёрного тела. Спектральная энергетическая яркость реального тела связана с яркостью абсолютно чёрного тела выражением

$$B_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} \cdot B_{0\lambda T}, \quad (1.13)$$

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

Интегральную энергетическую яркость реального тела можно определить из выражения

$$B_T = \varepsilon_T \cdot B_{0T}, \quad (1.14)$$

где ε_T – интегральный коэффициент теплового излучения при температуре T .

В связи с чрезвычайным разнообразием излучательных свойств реальных тел пирометры излучения всегда градуируются по излучению абсолютно чёрного тела. Поэтому значения температуры реальных тел, отсчитанные по пирометрам излучения, являются не действительными температурами тела, а так называемыми псевдотемпературами. Эти псевдотемпературы носят соответствующие названия: яркостная, цветовая и радиационная температура тела. Например, яркостной температурой T_y реального физического тела называется такая температура абсолютно чёрного тела, при которой спектральная энергетическая яркость абсолютно чёрного тела $B_{0\lambda T_y}$ равна спектральной энергетической яркости реального физического тела $B_{\lambda T}$ при его действительной температуре T .

Аналогично можно дать определения для цветовой и радиационной температур исходя из зависимостей, положенных в основу этих методов. В том, что пирометры излучения позволяют измерять только псевдотемпературы реальных тел, заключается принципиальный недостаток этих методов измерения температуры.

1.2. Практические задания

1.1. Можно ли ртутным стеклянным термометром измерить температуру 500 °С, если температура кипения ртути 356,6 °С? Каким образом можно повысить верхний предел измерения ртутных термометров?

1.2. Лабораторный стеклянный термометр, заполненный пентаном, показывает по шкале –40 °С. Термометр погружен в измеряемую среду до отметки –100 °С. Температура выступающего столбика составляет 20 °С. Коэффициент видимого объёмного теплового расширения пентана в стекле $\gamma = 0,0012$ К⁻¹. Определить действительное значение температуры.

1.3. Определите изменение показаний манометрического ртутного термометра, если при градуировке термобаллон и показывающий прибор находи-

лись на одном уровне, а в реальных условиях показывающий прибор расположен на 7,37 м выше, чем термобаллон. Шкала термометра 0-500 °С. При изменении температуры от 0 до 500 °С давление в системе изменяется от 4,47 до 14,28 МПа. Плотность ртути $\rho = 13\,595 \text{ кг/м}^3$.

1.4. Определите изменение показаний манометрического газового термометра, вызванное увеличением температуры капилляра на 40 °С и температуры пружины на 10 °С относительно градуировочного значения 20 °С при следующих условиях: объём капилляра $V_k = 1,9 \text{ см}^3$; объём манометрической пружины $V_n = 1,5 \text{ см}^3$; объём термобаллона $V_o = 140 \text{ см}^3$.

1.5. Оцените изменение показаний манометрического газового термометра за счёт изменения температуры внешней среды на 30 °С, если известно соотношение объёмов капилляра V_k , пружины V_n и баллона V_o : $(V_k + V_n) = 0,01 \cdot V_o$.

1.6. Определите, какое начальное давление должно быть создано в системе манометрического газового термометра при 0 °С, чтобы при изменении температуры от 0 до 500 °С давление в системе изменялось на 10 МПа. Термический коэффициент расширения газа $\beta = 0,00366 \text{ К}^{-1}$.

1.7. Будет ли изменяться термо-ЭДС термоэлектрического термометра типа ХК(L) при изменении температуры рабочего конца, но при сохранении разности температур рабочего конца и свободных концов, например, $E(300, 50 \text{ °С})$ и $E(600, 350 \text{ °С})$?

1.8. Введите поправку в показания термоэлектрического термометра и определите температуру рабочего конца, если известно, что термо-ЭДС термометра типа ПП(S) равна 3,75 мВ, а температура свободных концов 32 °С.

1.9. Термоэлектрический термометр типа ПП(S) подключён к измерительному прибору медными проводами. Температура рабочего конца 700 °С, свободных концов 20 °С.

Изменится ли термо-ЭДС, если температура места подключения медного провода к платинородиевому термоэлектроду увеличилась до 100 °С, а температура места подключения медного провода к платиновому термоэлектроду осталась равной 20 °С. Термо-ЭДС пары платинородий-медь при температурах спаев 100 °С и 20 °С составляет $-0,077 \text{ мВ}$ (т.е. $E(100, 20 \text{ °С}) = -0,077 \text{ мВ}$).

1.10. Определите температуру рабочего конца термоэлектрического термометра для измерительной цепи, составленной из термопары, удлиняющих (термоэлектродных) проводов, соединительных (медных) проводов, измерительного прибора. Известно, что $t_1 = t_2 = 70 \text{ °С}$; $t_0 = 28 \text{ °С}$; $t_n = 18 \text{ °С}$. Термо-ЭДС, измеряемая лабораторным потенциометром, равна $E = 23,52 \text{ мВ}$, тип термометра ХА(К).

1.11. Оцените значение погрешности измерения температуры пара термоэлектрическим термометром типа К в комплекте с милливольтметром. Милливольтметр находится в помещении блочного щита, температура в котором $20 \pm 1 \text{ °С}$. Термоэлектрический термометр подключён к милливольтметру с по-

мощью удлиняющих термоэлектродных проводов. Шкала милливольтметра 200-600 °С, класс 1,0. Показания милливольтметра 540 °С.

Пределы допускаемых значений погрешностей термометра и удлиняющих термоэлектродных проводов приведены, соответственно, в табл. 1.1 и работе [2].

1.12. Термоэлектрический термометр типа ПП(S) (длина термоэлектродов 2 м, диаметр 0,5 мм) подключён к пирометрическому милливольтметру, градуированному на внешнее сопротивление 5 Ом, при глубине погружения термометра 0,5 м в среду с температурой 1000 °С. Остальная часть термометра находилась при температуре 40 °С.

Изменяются ли показания милливольтметра, если глубину погружения увеличить до 1,5 м? Внутреннее сопротивление милливольтметра 195 Ом. Сопротивление 1 м платинового термоэлектрода при 40 °С $R_1 = 0,579$ Ом, при 1000 °С $R_2 = 2,199$ Ом. Соответственно для платинородиевого термоэлектрода $R'_1 = 1,033$ Ом и $R'_2 = 2,394$ Ом.

1.13. Определите изменение показаний милливольтметра градуировки ХА(К), вызванное изменением температуры помещения, в котором находится милливольтметр, от 20 до 40 °С. Сопротивление внешней цепи 5 Ом, сопротивление милливольтметра при 20 °С $R_{мв} = 302$ Ом, сопротивление рамки, выполненной из меди, $R_p = 65$ Ом, показание прибора 540 °С. Измерительная схема милливольтметра состоит из рамки и последовательно включённого марганцевого резистора. Температурный коэффициент электрического сопротивления меди $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

1.14. Медный термометр сопротивления имеет сопротивление при 20 °С $R_{20} = 1,75$ Ом. Определите его сопротивление при 100 и 150 °С. Температурный коэффициент $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

1.15. Определите сопротивление платинового термометра, изготовленного из платины марки Пл-2, при температуре -200 °С и +200 °С. Сопротивление термометра при 0 °С составляет 7,45 Ом.

1.16. Определите среднее значение коэффициента преобразования для платиновых термометров градуировки 10 П и 100 П в интервалах 400-500 °С, 300-400 °С и сопоставьте результаты.

1.17. Оцените значение дополнительной погрешности, возникающей за счёт самонагрева чувствительного элемента термометра сопротивления, выполненного в виде платиновой нити диаметром 0,05 и длиной 10 мм, измеряющего температуру воздушного потока. Коэффициент теплоотдачи от нити к воздуху $\alpha_k = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, ток, протекающий по нити, $I = 100$ мА сопротивление термометра при рабочей температуре $R_t = 0,54$ Ом.

1.18. Какой из термометров сопротивления – градуировки 100 П, 100 М или полупроводниковый с параметрами $R_0 = 10,6$ кОм, $B = 2500$ К имеет наибольший коэффициент преобразования при температуре 60 °С?

1.19. Каким образом оценить дополнительную погрешность измерения температуры медным термометром сопротивления, вызванную отклонением действительных значений R'_0 и α' от номинальных.

Действительные значения: $R'_0 = 49,90$ Ом, $\alpha' = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Номинальные значения: $R_0 = 50$ Ом; $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Текущее значение сопротивления термометра $R_t = 75,58$ Ом.

1.20. Термопреобразователь стоит в газоход, но вокруг него установлен экран. Температура стенки $t_{\text{ст}} = 1100$ °С, коэффициент теплоотдачи от газового потока к экрану $\alpha_{\text{к1}} = 485 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура экрана $t_s = 1420$ °С, приведённый коэффициент теплового излучения системы термопреобразователь-экран $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,92$, коэффициент теплоотдачи от газового потока к термопреобразователю $\alpha_{\text{к2}} = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура газа $t_c = 1903$ °С. Оцените погрешность измерения температуры газа, вызванную лучистым теплообменом.

1.21. Температура газохода измеряется квазимонохроматическим пирометром. Стрелка пирометра показывает температуру 1100 °С. Определите действительную температуру газохода и систематическую погрешность измерения температуры стенки, если коэффициент теплового излучения её составляет $\varepsilon_\lambda = 0,75$. Эффективная длина волны пирометра $\lambda_s = 0,65$ мкм.

1.22. Определите коэффициент пирометрического ослабления поглощающего стекла квазимонохроматического пирометра, если известно, что температура, отсчитанная по одной и той же шкале пирометра без поглощающего стекла, составила 1103 °С, а с поглощающим стеклом 306 °С.

1.23. Оцените систематическую погрешность измерения температуры радиационным методом. Радиационная температура $t_p = 1627$ °С, коэффициент теплового излучения $\varepsilon = 0,38$.

1.24. Оцените систематическую погрешность измерения температуры методом спектрального отношения, если цветовая температура $t_{\text{ц}} = 1247$ °С, коэффициент теплового излучения $\varepsilon_{\lambda_1} = 0,358$ (при $\lambda_1 = 0,65$ мкм) и $\varepsilon_{\lambda_2} = 0,390$ (при $\lambda_2 = 0,45$ мкм).

2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

2.1. Краткие теоретические сведения

Для измерения давления и разности давлений наиболее часто применяются различные виды жидкостных приборов и деформационных приборов с упругим чувствительным элементом.

В жидкостных приборах измеряемое давление (разность давлений) уравновешивается давлением столба жидкости (разностью давлений столбов жидкости). Давление столба жидкости определяется высотой столба, плотностью и

ускорением свободного падения, поэтому погрешности измерения давления жидкостными манометрами связаны с погрешностями измерения высоты столба жидкости, точностью определения плотности, которая зависит от температуры, и ускорения свободного падения, определяемого географической широтой и высотой над уровнем моря. К жидкостным приборам относятся двухтрубные, однотрубные (чашечные) манометры и чашечные микроманометры с наклонной трубкой.

Основной формулой для жидкостных приборов давления является формула, устанавливающая зависимость между измеряемым избыточным давлением или перепадом давлений Δp , плотностью заполняющей (рабочей) жидкости ρ и разностью её уровней h в обоих сосудах прибора:

$$\Delta p = h \cdot \rho \cdot g, \text{ Па.} \quad (2.1)$$

Из этой формулы легко могут быть получены выражения для погрешностей измерения, вызванных ошибками отсчёта h или отклонением ρ и g от значений, принятых при градуировке.

Аналогичные зависимости для чашечного прибора и микроманометра соответственно имеют вид:

$$\Delta p = h \cdot \rho \cdot g \cdot \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right), \text{ Па;} \quad (2.2)$$

$$\Delta p = h \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right) \approx l \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha, \text{ Па,} \quad (2.3)$$

где d , D – диаметр измерительной трубки и сосуда (чаши), соответственно, м; α – угол наклона трубки; l – перемещение уровня жидкости в трубке, м.

В деформационных приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или развиваемой ими силе. В качестве таких чувствительных элементов применяются: одновитковая или многовитковая трубчатая пружина; сильфон; плоская или гофрированная мембрана (пластина); мембранные коробки различной конструкции.

На показания деформационных приборов может оказывать влияние температура окружающей среды, которая вызывает изменение свойств чувствительного элемента и передаточного механизма. Большое распространение получили приборы для измерения давления с унифицированным выходным сигналом, работающие по принципу компенсации усилий. Приборы этого типа применяются для измерения давления, разрежения, вакуума и разности, давлений в широком диапазоне значений измеряемого параметра.

У приборов с силовой компенсацией в статическом режиме в их кинематической схеме происходит уравнивание усилия, развиваемого чувствительным элементом, усилием, действующим на этот элемент со стороны

устройства обратной связи (электрического или пневматического). Эти усилия рассчитываются по известным усилиям, развиваемым отдельными элементами, и соотношению плеч. В настоящее время практически все выпускаемые приборы с силовой компенсацией имеют унифицированный выходной сигнал (электрический или пневматический).

2.2. Практические задания

2.1. В U-образном манометре с водяным заполнением внутренние диаметры трубок соответственно равны 8 и 8,3 мм. При измерении давления уровень в первой трубке переместился на 204 мм. Измеряемое давление считалось равным 4 кПа. Оцените погрешность, вызванную неучетом реального уровня во второй трубке.

2.2. Определите цену деления чашечного манометра в единицах давления, если он заполнен ртутью. Диаметр минусовой трубки 6 мм, диаметр плюсового сосуда 60 мм. Деления на шкале нанесены через 1 мм. Условия измерения: $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $g = 980,665\text{ м/с}^2$.

2.3. Рассчитайте, каким должно быть соотношение между диаметрами плюсового и минусового сосудов чашечного манометра, чтобы при отсчёте уровня жидкости только в минусовом сосуде погрешность измерения разности давления не превосходила 0,1 %.

2.4. Изменится, ли цена деления чашечного манометра (см. задачу 2.2), если все пространство над ртутью в трубке и сосуде залито водой)? Температура дифференциального манометра и измеряемой среды равна $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.5. Определите цену деления спиртового микроманометра с наклонной трубкой, если диаметр трубки 4 мм, диаметр плюсового сосуда 70 мм, угол наклона трубки микроманометра $48^{\circ}23'$, плотность спирта (концентрация 96 %) в условиях градуировки при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_{20} = 808\text{ кг/м}^3$. Расстояние между отметками шкалы равно 1 мм. Ускорение свободного падения – нормальное.

Определите поправочный множитель на изменение плотности спирта, если микроманометр работает при температуре $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\rho_{35} = 793\text{ кг/м}^3$).

2.6. Давление отсчитано по шкале спиртового микроманометра при рабочих условиях $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $g = 9,8156\text{ м/с}^2$. Определите действительное измеряемое давление, если градуировка производилась при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $g = 9,80665\text{ м/с}^2$. Отсчёт по шкале $n = 195$; $K = 0,8$. Плотность спирта $\rho_{20} = 808\text{ кг/м}^3$; $\rho_{40} = 790\text{ кг/м}^3$.

2.7. Чувствительным элементом манометра является сильфон. Уравновешивание давления (разности давлений) осуществляется за счёт упругого противодействия сильфона и пружины, эффективная площадь сильфона $S_{\text{эф}} = 31,5\text{ мм}^2$, жёсткость пружин $K_{\text{п}} = 9,20\text{ Н/мм}$, жёсткость одного гофра сильфона к

воздействию осевого усилия $K_c = 0,25$ Н/мм, число гофр 8. При перемещении стрелки манометра от начала до конца шкалы доньшко сиффона перемещается на $h = 4,5$ мм. Определите пределы измерения манометра.

2.8. Определите погрешность манометра с токовым выходным сигналом (0-5 мА) с пределами измерения 0-4 МПа, если при измерении давления 3,2 МПа выходной сигнал составил $I = 3,93$ мА.

2.9. Определите погрешность манометра с пневматическим выходным сигналом (0,02-0,1 МПа) и пределом измерения 0-0,6 МПа, если при давлении 0,45 МПа значение выходного сигнала составило 0,084 МПа.

2.10. Манометр, измеряющий давление пара, установлен на 5 м ниже точки отбора. Манометр показывает $p = 5$ МПа, среднее значение температуры конденсата в импульсной линии $t = 60^\circ\text{C}$. Определите действительное значение давления в паропроводе.

2.11. В колокольном дифференциальном манометре с тонкими стенками уравнивание колокола осуществляется за счёт деформации пружины (выталкивающей силой жидкости можно пренебречь). Изменится ли коэффициент преобразования дифференциального манометра, если утяжелить колокол при неизменной линейной характеристике пружины?

2.12. Какой должна быть жёсткость пружины в колокольном дифференциальном манометре с пружинным уравниванием, чтобы изменение перепада давления от 0 до 1,6 кПа вызвало перемещение колокола на 4 мм? Диаметр колокола 50 мм.

3. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

3.1. Краткие теоретические сведения

Для измерения уровня жидкостей и сыпучих сред в настоящее время применяется большое количество различных методов, каждый из которых имеет достоинства и недостатки.

Одним из наиболее распространённых методов измерения уровня жидкостей является измерение гидростатического давления столба жидкости, осуществляемое водомерными стёклами и их разновидностями, а также манометрическими или пневмометрическими устройствами. Во всех этих методах, как правило, главной является погрешность за счёт изменения плотности измеряемой жидкости от температуры. Для исключения или уменьшения этой погрешности создаются сложные измерительные системы, одновременно измеряющие гидростатическое давление жидкости и её плотность, и корректирующие затем показания уровнемера в соответствии с плотностью.

Погрешность определения уровня Δh для уровнемеров с визуальным отсчётом (водомерными стёклами) за счёт изменения плотности можно вычислить по формуле

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right), \text{ м}, \quad (3.1)$$

где h_1 , h_2 – уровень жидкости в резервуаре и указательном стекле, соответственно, м; ρ_1 , ρ_2 – плотность жидкости в резервуаре и указательном стекле, соответственно, кг/м³.

Все системы измерения уровня жидкостей гидростатическим методом требуют тщательного анализа измерительной системы, соединительных линий, их температурного режима, особенностей работы измерительных преобразователей системы. Например, для одной и той же схемы измерения уровня в барабане парогенератора гидростатическим методом применение мембранных дифманометров вместо поплавковых существенно уменьшает возможные погрешности измерения уровня. Это объясняется тем, что объем жидкости, перемещающейся в мембранных дифманометрах при изменении измеряемого уровня, значительно меньше, чем в поплавковых.

В общем случае зависимость перепада давления Δp от уровня жидкости H для гидростатических уровнемеров определяется соотношением

$$\Delta p = H \cdot \rho \cdot g, \text{ Па}, \quad (3.2)$$

где ρ – плотность жидкости в резервуаре и импульсных трубках, кг/м³.

Пневмометрический метод измерения уровня основан на измерении давления воздуха (инертного газа), уравнивающего гидростатическое давление столба жидкости. Поэтому кроме недостатков и особенностей гидростатического метода измерения здесь добавляется специфика пневмометрической системы.

Одними из наиболее простых и надёжных являются поплавковые уровнемеры. Однако они практически не могут применяться при высоких давлениях. Некоторый прогресс в этом отношении представляют буйковые уровнемеры, которые могут работать и при значительных давлениях. Но применение как поплавковых, так и буйковых уровнемеров затруднено в агрессивных жидкостях и в средах с выпадающими осадками.

Ёмкостные уровнемеры могут применяться для измерения как непроводящих, так и проводящих жидкостей. Они пригодны для измерения уровня в широком диапазоне давлений и температур измеряемых сред, как агрессивных, так и неагрессивных. Показания их зависят от диэлектрической проницаемости среды, которая может изменяться с температурой. Применение компенсационных ёмкостей позволяет существенно уменьшить это влияние, но не исключает его полностью. Схемное исполнение электронной части ёмкостных уровнемеров достаточно сложно, что ограничивает их широкое распространение.

К радиоволновым методам относятся радиолокационный, радиointерференционный, эндовибраторный и резонансный. Наиболее распространённым является радиолокационный.

Работа радиолокационных уровнемеров основывается на явлении отражения электромагнитных волн от границы раздела сред, различающихся электрическими и магнитными свойствами. Уровень жидкости h определяется измерением временного интервала между моментом посылки сигнала излучателем и приходом отражённого сигнала на приёмник. Эти величины связаны соотношением

$$\tau = 2 \cdot (H - h) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{c}, \quad (3.3)$$

где τ – время прохождения сигнала от излучателя до приёмника, с; h – уровень жидкости, м; H – высота расположения излучателя и приёмника, отсчитываемая от дна резервуара, м; c – скорость света в вакууме, м/с; ε , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды над жидкостью, соответственно.

3.2. Практические задания

3.1. Уровень воды в барабане котельного агрегата измеряется водомерным стеклом (вынесенным уровнемером с визуальным отсчётом). Давление пара в барабане 10 МПа, вода в барабане находится при температуре насыщения. Действительное значение уровня $H = 0,5$ м. Определите уровень в водомерном стекле h , если температура воды в нём составляет 150 °С.

3.2. Для условия задачи 3.1 определите, как изменится погрешность измерения уровня, если перед измерением водомерное стекло было продуто и температура воды в стекле стала $t = 300$ °С.

3.3. Уровень воды в ёмкости измеряется гидростатическим способом с помощью дифманометра с плюсовой и минусовой импульсными трубками. Максимальный уровень $H_{\max} = 400$ мм. Оцените относительную погрешность измерения максимального уровня, вызванную изменением уровня воды в минусовой импульсной трубке мембранного дифманометра. Внутренний диаметр импульсных трубок $d = 10$ мм. При изменении уровня от 0 до H_{\max} происходит изменение объёма минусовой камеры дифманометра на $\Delta V = 4$ см³.

При $H = 0$ мм уровни воды в обеих импульсных трубках равны. Температура окружающей среды и воды в ёмкости и трубках $t = 20$ °С.

3.4. Для условия задачи 3.3 оцените погрешность, если измерение уровня осуществляется поплавковым дифманометром с диаметром поплавкового сосуда $D_{\text{п}} = 77$ мм и диаметром сменного сосуда $D_{\text{с}} = 64,6$ мм. Плотность ртути в дифманометре при $t = 20$ °С $\rho_{\text{рт}} = 13546$ кг/м³, плотность воды $\rho_{\text{в}} = 998,2$ кг/м³.

3.5. Уровень воды в открытой ёмкости измеряется дифманометром-уровнемером. Уровнемер градуировался при температуре воды в ёмкости и импульсных трубках 30 °С. Изменяются ли показания уровнемера, если температура воды в ёмкости увеличилась до 90 °С, а температура воды в импульсных линиях осталась 30 °С.

3.6. Измерение уровня воды в барабане котла производится с помощью двухкамерного уравнительного сосуда. Температура воды в сосуде равна температуре воды в ёмкости. Будет ли в этом случае изменение плотности воды влиять на показания уровнемера? Давление в барабане 0,1 МПа.

3.7. Как изменятся показания уровнемера, отградуированного при давлении 0,1 МПа (условие задачи 3.6), если давление насыщения в барабане поднимается до 10 МПа?

3.8. В цилиндрическом вертикальном стальном резервуаре-хранилище диаметром 12 и высотой 10 м находится керосин. При температуре 30 °С высота уровня керосина составляет 8,5 м.

Изменяются ли показания гидростатического уровнемера и изменится ли действительный уровень керосина, если температура окружающего воздуха и резервуара вместе с керосином будет 0 °С?

3.9. Определите вес груза и передаточное число измерительного преобразователя поплавкового механического уровнемера, измеряющего уровень кислоты в ёмкости в интервале от 0 до 500 мм. Плотность кислоты $\rho_k = 1230 \text{ кг/м}^3$, диаметр шарового поплавка $D_{\text{п}} = 100 \text{ мм}$, материал поплавка – пластмасса плотностью $\rho_{\text{п}} = 1500 \text{ кг/м}^3$, толщина стенок поплавка $b = 5 \text{ мм}$, вес троса 3 Н, сила трения в передаточном механизме не превышает 0,5 Н, угол поворота стрелки по шкале $\alpha = 270^\circ$ диаметр барабана, через который перекинут трос, $D_6 = 50 \text{ мм}$.

3.10. Пьезометрический уровнемер измеряет уровень щелочи в выпарном аппарате. Определите давление воздуха в источнике питания и примерный часовой расход воздуха при максимальном уровне. Максимальная плотность раствора щелочи $\rho_{\text{щ}} = 1280 \text{ кг/м}^3$. Диапазон изменения уровня 0-400 мм, внутренний диаметр пневмометрической трубки $d = 6 \text{ мм}$, температура жидкости в аппарате 80 °С, абсолютное давление в аппарате 16 кПа.

3.11. Рассчитайте ёмкость и коэффициент преобразования измерительного преобразователя ёмкостного уровнемера, предназначенного для измерения уровня в баках-хранилищах керосина, от нулевого до максимального значения $H_{\text{max}} = 8 \text{ м}$. Ёмкостный преобразователь состоит из полого металлического цилиндра диаметром $D = 60 \text{ мм}$ (внешний электрод), внутри которого коаксиально расположен металлический тросик диаметром $d = 1,5 \text{ мм}$, покрытый слоем изоляции толщиной $b = 1 \text{ мм}$ (внутренний электрод). Длина преобразователя $l = 8 \text{ м}$, ёмкость конструктивных элементов $C_0 = 75 \text{ пФ}$. Относительная диэлектрическая проницаемость паров керосина $\varepsilon_{\text{н}} = 1$, керосина $\varepsilon_{\text{к}} = 2,1$, изоляционного покрытия тросика $\varepsilon_{\text{и}} = 4,2$.

3.12. Измерительный преобразователь ёмкостного уровнемера состоит из измерительной и компенсационной частей. Интервал изменения уровня h от 0 до 2 м, длина измерительной части преобразователя $l_{\text{и}} = 2 \text{ м}$. Ёмкость конструктивных элементов компенсационной части $C_{\text{к0}} = 30 \text{ пФ}$, её длина $l_{\text{к}} = 10$

см. Ёмкость в воздухе 1 м измерительной части уровнемера $C_{и.п} = 240$ пФ; ёмкость 1 м компенсационной части $C_{к.п} = 860$ пФ. Показания вторичного прибора пропорциональны отношению $C_{и}/C_{к}$, где $C_{и}$ – ёмкость измерительной части преобразователя, $C_{к}$ – ёмкость компенсационной части. Диэлектрическая проницаемость изменяется с изменением температуры на 0,2 %/К.

Оцените относительное изменение показаний прибора, вызванное увеличением температуры жидкости на 25 °С при максимальном уровне.

4. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА

4.1. Краткие теоретические сведения

Расход жидкостей, газов и пара является одним из важных показателей многих технологических процессов. Для его измерения в настоящее время применяется большое число различных методов.

Перепад давления Δp , образующийся в комбинированной напорной трубке, равен динамическому напору. Скорость v , соответствующая этому перепаду, определяется из уравнения

$$v = k_T \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}, \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

где k_T – коэффициент трубки (для правильно изготовленных трубок он близок к единице); ρ – плотность измеряемой среды, кг/м³; Δp – перепад давления, измеряемый дифманометром, Па.

Напорные трубки измеряют скорость в конкретной точке сечения потока. Поэтому для определения расхода необходимо знать соотношение между местной скоростью v и средней скоростью v_c , которое определяется распределением скоростей по сечению трубопровода. При осесимметричном потоке распределение скоростей определяется числом Рейнольдса Re и степенью шероховатости трубы. В широком диапазоне чисел Re от $4 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$ $v/v_c = 1 \pm 0,005$ на расстоянии $0,762 \cdot R$ от центра трубы. При ламинарном режиме это отношение имеет место на расстоянии $0,707 \cdot R$ от центра трубы, где R – радиус трубы.

В настоящее время наиболее распространённым в промышленности методом является измерение расхода с помощью сужающих устройств.

Взаимосвязь между объёмным Q_o или массовым Q_m расходом и перепадом Δp на сужающем устройстве определяется уравнениями расхода:

$$Q_o = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (4.2)$$

$$Q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \text{ кг/с}; \quad (4.3)$$

где F_0 – площадь отверстия сужающего устройства, м^2 ; ρ – плотность измеряемой среды перед сужающим устройством, кг/м^3 ; α – коэффициент расхода; ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды.

Коэффициент расхода α зависит от относительной площади (модуля) сужающего устройства m и числа Рейнольдса Re . При $Re > Re_{гр}$ α слабо зависит от Re и в основном определяется значением m . Действительный коэффициент расхода α определяется через исходный α_n по формуле (для промышленных расходомеров)

$$\alpha = \alpha_n \cdot k_{ш} \cdot k_{п}, \quad (4.4)$$

где $k_{ш}$ – поправочный множитель на шероховатость трубопровода; $k_{п}$ – поправочный множитель на притупление входной кромки диафрагмы (для сопел коэффициент $k_{п} = 0$).

При использовании этого метода измерения часто имеют место погрешности, вызванные несоответствием расчётных и действительных значений параметров в уравнениях расхода. Например, при отклонении температуры среды t от расчётной t_p изменяется плотность среды, что вызывает изменение показаний расходомера. Для сухого газа новое значение плотности ρ определяется через плотность ρ_n при нормальных условиях по формуле

$$\rho = \rho_n \cdot \frac{p \cdot T_n}{p_n \cdot T \cdot k}, \text{ кг/м}^3, \quad (4.5)$$

где p , p_n – давление среды действительное и при нормальных условиях, Па; T , T_n – температура действительная и при нормальных условиях, К; k – коэффициент сжимаемой среды.

Для жидкости плотность ρ при температуре t вычисляется по формуле

$$\rho = \rho_p \cdot [1 - \beta \cdot (t - t_p)], \text{ кг/м}^3, \quad (4.6)$$

где ρ_p – плотность жидкости при расчётной температуре кг/м^3 ; β – средний коэффициент объёмного теплового расширения жидкости в интервале температур от t_p до t , $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода показывающим дифманометром определяется по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \frac{\sigma^2}{4} + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2}. \quad (4.7)$$

Составляющие подкоренного выражения определяются по ГОСТ 8.586.1-2005 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования».

Электромагнитные расходомеры применимы для измерения расхода электропроводящих сред. Поэтому они не могут быть использованы для измерения расхода газов, нефтепродуктов, масел и других непроводящих сред. Конструкция измерительного преобразователя расходомера практически не изменяет форму и сечение трубопровода и поэтому может широко использоваться для измерения загрязнённых жидкостей и пульп. Это один из немногих методов, позволяющих измерять расходы жидких металлов.

Ультразвуковые расходомеры позволяют измерять расход без непосредственного контакта с измеряемой средой. Этот метод пока применяется только для измерения расхода жидкостей. Схема ультразвукового расходомера достаточно сложна. Поэтому они пока не нашли широкого применения в промышленности.

Некоторое распространение получили тепловые расходомеры (калориметрические, термоанемометрические), работа которых основана на зависимости теплообмена между нагреваемым элементом и потоком от скорости (расхода) измеряемой среды.

4.2. Практические задания

4.1. По трубе диаметром $D = 100$ мм движется поток жидкости со средней скоростью $v_c = 1,5$ м/с. Определите массовый расход жидкости, если её плотность $\rho = 990$ кг/м³.

4.2. Определите перепад давления, создаваемый напорными трубками, если поток воды движется со скоростью $0,1$ м/с, плотность воды $\rho = 985$ кг/м³, коэффициент трубки $k_T = 0,97$.

4.3. Определите расход дымовых газов через цилиндрический трубопровод, если перепад давления на напорной трубке $\Delta p = 50$ кгс/м². Диаметр трубопровода $D = 200$ мм, коэффициент трубки $k_T = 0,98$, плотность газов $\rho = 0,405$ кг/м³. Трубка установлена на расстоянии $23,8$ мм от стенки трубопровода. Кинематическая вязкость газов $\nu = 93,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

4.4. Расход воды в трубопроводе диаметром $D = 80$ мм измеряется бронзовой диафрагмой с отверстием диаметром $d = 58$ мм. Температура воды 150 °С, давление воды 2 МПа, перепад давления на диафрагме $0,04$ МПа.

Определите, как изменится действительное значение расхода, если температура воды станет 20 °С. Диаметр трубопровода, коэффициент расхода и перепад давления на диафрагме считаем неизменными $k'_i = 1,0023$.

4.5. Сопло Вентури (длинное) используется на насосной станции в схеме регулирования расхода воды. Относительная площадь сопла $m = 0,25$. Автоматический регулятор поддерживает постоянным перепад давления на сопле, равный 35 кПа. Расчётная температура воды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако в дневное время температура воды поднимается до $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в ночное время опускается до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите, на сколько процентов будет увеличиваться или уменьшаться действительное значение расхода в дневное и ночное время. Давление воды 0,6 МПа.

4.6. Через диафрагму, установленную в трубопроводе, протекает сернистый газ, расходные характеристики для которого были получены при нормальных условиях: $t_{\text{н}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{н}} = 101,322\text{ кПа}$ и влажности $\varphi_{\text{н}} = 0$. Однако в реальных условиях $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,13\text{ МПа}$ и $\varphi = 30\%$.

Определите поправочный коэффициент для пересчёта показаний расходомера на нормальные условия.

4.7. Расход воды, протекающей по трубопроводу $D = 200\text{ мм}$, составляет $Q_{\text{м}} = 100\text{ т/ч}$. Относительная площадь диафрагмы $m = 0,5$, давление воды $p = 10\text{ МПа}$, температура $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите значение перепада давления на сужающем устройстве.

4.8. Определите массовый расход воды через трубопровод $D = 100\text{ мм}$ с учётом коэффициента коррекции на число Рейнольдса, если расход измеряется диафрагмой с $m = 0,6$. Верхний предел измерения расходомера 10 т/ч, показание расходомера 4 т/ч, параметры воды: $p = 5\text{ МПа}$; $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.9. Определите поправочный множитель на расширение измеряемой среды ε и погрешность измерения расхода газа за счёт отклонения поправочного множителя от расчётного значения $\varepsilon_{\text{р}}$, если расход изменяется от $Q_{\text{макс}}$ до $0,4Q_{\text{макс}}$ при абсолютном давлении $p = 2\text{ МПа}$ и $p = 0,08\text{ МПа}$.

Сужающее устройство – диафрагма рассчитывалась для обоих случаев в предположении, что $Q_{\text{ср}} = Q_{\text{макс}}$. Перепад $\Delta p_{\text{макс}} = 40\text{ кПа}$. Относительная площадь сужающего устройства $m = 0,3$. Показатель адиабаты $\chi = 1,4$.

4.10. Определите длины прямых участков трубопровода до и после сужающего устройства, если перед сужающим устройством стоит тройник, а после него – группа колен в разных плоскостях: для диафрагмы и для сопла. Диаметр трубопровода $D = 200\text{ мм}$, у обоих сужающих устройств $m = 0,5$.

4.11. Определите угол конусности φ трубки ротаметра, который применяется для измерения расхода воды в диапазоне от 10 до 500 л/ч. Расчётная плотность воды $\rho_{\text{в}} = 998,2\text{ кг/м}^3$, длина шкалы $H = 160\text{ мм}$, сечение поплавка $f = 78,6\text{ мм}^2$, объём поплавка $V = 600\text{ мм}^3$, плотность материала поплавка $\rho_{\text{п}} = 7870\text{ кг/м}^3$, коэффициент расхода ротаметра постоянен и равен $\alpha = 0,98$.

4.12. Определите значение ЭДС, индуцируемой в электромагнитном расходомере с диаметром проходного отверстия $d = 100\text{ мм}$, при расходе воды $Q = 200\text{ м}^3/\text{ч}$. Индукция магнитного поля $B = 0,01\text{ Тл}$.

4.13. В трубопроводе диаметром 100 мм протекает вода, расход которой меняется от 0 до 300 м³/ч. Для измерения расхода установлены ультразвуковые излучатель и приёмник. Расстояние между излучателем и приёмником 300 мм. Определите время прохождения ультразвуковых колебаний при распространении их «по потоку» и «против потока». Скорость распространения звуковых колебаний в воде $c = 1500$ м/с.

4.14. Калориметрический расходомер состоит из нагревателя мощностью 200 Вт, выполненного из проволоки диаметром 0,5 мм; диаметр трубопровода 100 мм. Определите разность температур измеряемой среды до и после нагревателя при расходе $Q_0 = 50$ м³/ч. Изменяемая среда – вода или воздух. Исходная температура измеряемой среды 20 °С.

4.15. Платиновый термоанемометр с диаметром проволоки $d = 0,05$ мм предназначен для измерения скорости воздуха от 2 до 30 м/с. Температура воздуха 20 °С. Определите, какую температуру будет иметь нить термоанемометра, если мощность, выделяемая на нити, $W = 8$ Вт/м.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

5.1. Краткие теоретические сведения

Основным различием приборов, осуществляющих анализ газообразных сред (газоанализаторов), являются физические основы их работы, определяющие их устройство и электрические схемы.

У термокондуктометрических газоанализаторов измерительная камера представляет собой полый цилиндр, внутри которого коаксиально расположена платиновая нить (чувствительный элемент). Теплоотвод от единицы поверхности нити к стенкам осуществляется в основном теплопроводностью в соответствии с выражением

$$Q = \lambda \cdot (t_n - t_c), \text{ Вт/м}, \quad (5.1)$$

где t_n , t_c – температура соответственно нити и стенки камеры анализатора, °С; λ – теплопроводность смеси при температуре, равной $(t_n + t_c)/2$, Вт/(м·К).

Теплопроводность смеси связана с теплопроводностью компонентов λ_i и их объёмной концентрацией C_i следующим образом:

$$\lambda_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot C_i. \quad (5.2)$$

Для термомагнитных газоанализаторов основным является выражение для силы, действующей на единичный объём парамагнитной смеси, находящейся в неоднородном магнитном поле:

$$F_M = C \cdot \chi_0 \cdot T_0 \cdot \left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) \cdot \frac{p}{p_0} \cdot H \cdot \frac{dH}{dx}, \quad (5.3)$$

где C – относительная концентрация компонента; χ_0 – объёмная магнитная восприимчивость компонента при нормальном давлении $p_0 = 760$ мм рт. ст. и нормальной температуре $T_0 = 273$ К; H – напряжённость магнитного поля, А/м; T_1 – температура газа на входе в измерительные камеры, К; T_2 – температура газа после обогрева нитью, К.

Эта сила определяет интенсивность термомагнитной конвекции, которая в свою очередь влияет на отвод теплоты от чувствительного элемента, т. е. его температуру. В реальных условиях интенсивность газовой конвекции определяется не только силой F_M , но и силой тепловой конвекции. Поэтому изменение показаний прибора при изменении температуры t и давления p газовой смеси отличается от рассчитанного только по изменению F_M .

Принцип действия оптико-акустических газоанализаторов основан на явлении избирательного поглощения анализируемым компонентом энергии излучения определённой длины волны, причём интенсивность этого поглощения зависит от концентрации анализируемого компонента в газовой смеси. Эта зависимость описывается выражением

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \cdot e^{-\varepsilon_\lambda \cdot C \cdot l}, \quad (5.4)$$

где $I_{0\lambda}$ – интенсивность излучения на входе в поглощающий слой газа; I_λ – то же после прохождения слоя газа; ε_λ – коэффициент поглощения, характерный для анализируемого компонента газовой смеси и длины волны λ ; C – концентрация анализируемого компонента в газовой смеси; l – толщина поглощающего слоя.

Наибольшее распространение при измерении влажности воздуха получили различные варианты психрометров и определение влажности по точке росы. Психрометрический метод основан на зависимости между влажностью воздуха и показаниями сухого t_c и мокрого t_m термометров. При использовании психрометра «психрометрическая разность» $t_c - t_m$ зависит не только от относительной влажности воздуха, но и от конструкции психрометра, определяющей интенсивность охлаждения мокрого термометра за счёт испарения влаги. Поэтому психрометрические таблицы могут составляться только для конкретных типов психрометров.

Измерение влажности по методу точки росы является одним из точных методов, получивших широкое распространение в промышленности. Эти гигрометры имеют широкие пределы применения по температуре, давлению и влажности воздуха. Однако они отличаются некоторой сложностью конструкции, а также влиянием на результат измерения состояния поверхности зеркала.

5.2. Практические задания

5.1. Определите концентрацию двуокиси углерода CO_2 в продуктах горения, если анализ содержания CO_2 производился объёмно-абсорбционным газоанализатором. Объём смеси в измерительной бюретке до поглощения $V_0 = 100$ мл, объём после поглощения $V_{\text{п}} = 94$ мл. Объём вредного пространства вне измерительной бюретки (объём распределительной гребёнки и других соединительных частей) $V_{\text{в.п}} = 2,5$ мл. Коэффициент $K_{\text{п}}$, характеризующий отношение объёма компонента, поглощённого в газоанализаторе, к объёму этого компонента до поглощения, равен 0,95.

5.2. Определите концентрацию кислорода в дымовых газах, если анализ производился объёмно-абсорбционным газоанализатором и объём смеси после поглощения составил $V_{\text{п}} = 95$ мл; $V_0 = 100$ мл; $V_{\text{в.п}} = 2,5$ мл; $K_{\text{п}} = 0,95$. Температура газа перед отбором пробы в газоанализатор $t_1 = 40$ °С. Во время анализа температура газа снизилась до $t_2 = 30$ °С.

5.3. Анализ содержания углекислого газа в продуктах горения осуществляется термокондуктометрическим газоанализатором. Определите, как изменится температура чувствительного элемента (нити) газоанализатора, если через него первоначально пропускаться воздух (температура нити 80 °С), а затем стали пропускаться продукты горения со следующим содержанием компонентов: кислород – 4 %, углекислый газ – 15 %, азот – 63 %, водяные пары – 18 %.

Предполагается, что количество теплоты, передаваемой от чувствительного элемента к стенке, одинаково при любой газовой смеси. Предполагается также, что передача теплоты осуществляется только за счёт теплопроводности, а температура стенок постоянна и равна $t_{\text{ст}} = 20$ °С.

5.4. Оцените погрешность, которая может иметь место при эксплуатации термокондуктометрического газоанализатора, если его градуировка на CO_2 осуществлялась на синтетических смесях (например, 10 % CO_2 + 90 % воздуха или 10 % CO_2 + 90 % N_2), а средний состав продуктов горения природного газа следующий: $\text{CO}_2 = 10$ %; $\text{O}_2 = 2$ %; $\text{N}_2 = 70$ % и $\text{N}_2\text{O} = 18$ %. При заполнении всех камер газоанализатора воздухом температура чувствительного элемента $t_{\text{но}} = 20$ °С. Температура стенки $t_{\text{ст}} = 20$ °С.

5.5. Содержание водорода H_2 в электролитическом кислороде O_2 в интервале от 0 до 10 % измеряется термокондуктометрическим газоанализатором. Установите связь между содержанием водорода и температурой платиновой нити чувствительного элемента газоанализатора.

Коэффициент теплового излучения нити $\varepsilon = 0,2$, диаметр нити $d = 0,02$ мм, длина нити $l = 20$ мм, диаметр камеры $D = 5$ мм, ток, протекающий по нити, $I = 51$ мА, температура стенок камеры $t_{\text{ст}} = 20$ °С, а температура нити $t_{\text{н}} = 80$ °С.

Сопротивление нити изменяется по закону $R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t)$, где $\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Удельное сопротивление платины при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho = 0,0981 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В решении следует учесть все виды теплообмена между нитью и стенкой.

5.6. Через магнитный газоанализатор проходит смесь следующего состава: $\text{CO}_2 = 20 \%$, $\text{O}_2 = 5 \%$ и $\text{N}_2 = 75 \%$ при расчётной температуре $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, разрежении $p_1 = 3 \text{ кПа}$.

Изменится ли показание газоанализатора, если: 1) при неизменной концентрации температура смеси возрастёт до $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 2) при неизменной температуре возрастёт разрежение до $p_2 = 10 \text{ кПа}$? Предполагается, что на выходе из измерительной ячейки температура смеси равна $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.7. Для определения влажности воздуха в цехе завода применяется аспирационный психрометр. Определите относительную влажность воздуха φ , если сухой термометр показывает $t_c = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$, а мокрый $t_m = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление, воздуха 760 мм рт. ст. Сопоставьте значения с показаниями простого психрометра.

5.8. Абсолютная влажность воздуха, поступающего в нагревательную печь, $f_n = 30 \text{ г/м}^3$ сухого воздуха. Определите относительную влажность дутья при температуре $t = 300 \text{ }^\circ\text{C}$. Избыточное давление воздуха $p_n = 0,2 \text{ МПа}$.

5.9. Определите абсолютную влажность доменного газа, если известно, что измеритель влажности, работающий по методу точки росы, показывает температуру $t_{т.р} = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$ при нормальном давлении.

5.10. При измерении влажности воздуха в цехе производства приборов номинальное значение точки росы составляет $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако после протирки зеркальца замасленной тряпкой температура точки росы понизилась до $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Какова погрешность, возникающая при измерении относительной влажности воздуха ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) при таком изменении точки росы, и какова причина изменения показаний влагомера?

6. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Задание на курсовую работу содержит три практических задачи, предназначенные для приобретения обучающимися практических навыков определения погрешности компенсационного измерения температуры, расчёта сужающего устройства для измерения расхода воды, определения границ доверительного интервала, в котором лежит истинное значение измеряемой величины.

Исходные данные приведены в соответствующих таблицах. Первая цифра кода задания соответствует последней цифре номера зачётной книжки обучающегося, вторая цифра кода задания – предпоследней цифре, третья цифра – третьей с конца цифре или при её отсутствии выбирается любая.

Задача № 1

Определить предельную погрешность компенсационного измерения температуры термоэлектрическим термометром, состоящим из термоэлектрического преобразователя (ТЭП), удлиняющих термоэлектродных проводов (УП) и автоматического самопишущего потенциометра типа КСП в нормальных условиях. Скорость передвижения диаграммной ленты составляет 20 мм/ч. Погрешность полярного планиметра составляет $\pm 0,5\%$. Необходимые для расчёта исходные данные приведены в табл. 2. Заданный класс точности нормирует основную приведённую погрешность потенциометра.

Таблица 2

Исходные данные задачи № 1

Первая цифра кода задания	Тип ТЭП	Тип УП	Показания потенциометра, °С	Шкала потенциометра, °С	Вторая цифра кода задания	Класс точности КСП	Ширина поля записи, мм
1	ХА	М	550	от 0 до 800	1	1.0	250
2	ПП	ПП	1050	от 0 до 1500	2	1.5	160
3	ХК	ХК	75	от 50 до 150	3	0.5	250
4	ПП	П	950	от 300 до 1300	4	1.5	160
5	ХА	М	690	от 400 до 1000	5	1.5	250
6	ПП	П	1005	от 500 до 1200	6	1.0	250
7	ХА	М	780	от 200 до 1000	7	1.5	160
8	ХК	ХК	210	от 100 до 600	8	0.5	250
9	ХК	ХК	325	от 0 до 600	9	0.5	250
0	ХА	М	440	от 0 до 1000	0	1.0	250

Определяется значение предельной погрешности показаний комплекта термоэлектрического термометра по формуле

$$\delta_k = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_t^2 + \delta_{уп}^2 + \delta_{кт}^2}, \quad (6.1)$$

где δ_m – пределы допускаемой основной относительной погрешности показаний милливольтметра (потенциометра) при заданном диапазоне измерений, %; δ_t – допускаемое отклонение термо-ЭДС от значений градуировочной таблицы, %; $\delta_{уп}$ – допускаемое отклонение ЭДС в паре между жилами удлиняющих проводов, %; $\delta_{кт}$ – пределы допускаемой погрешности устройства компенсации температуры для термометров заданного типа, %.

Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности показаний потенциометра типа КСП при заданном диапазоне измерения вычисляются по формуле

$$\Delta E_M = \pm \frac{K \cdot E_D}{100}, \text{ мВ}, \quad (6.2)$$

где K – класс точности потенциометра; E_D – термо-ЭДС термоэлектрических термометров стандартной градуировки при температуре свободных концов, равной 0°C .

Значение E_D определяется из таблиц П4-7-1 – П4-7-4 приложения [1] или таблиц [4] в зависимости от заданной шкалы потенциометра:

$$E_D = E_D^{t_{\max}} - E_D^{t_{\min}}, \text{ мВ}, \quad (6.3)$$

где $E_D^{t_{\min}}$, $E_D^{t_{\max}}$ – значение термо-ЭДС соответственно при нижнем и верхнем значении шкалы потенциометра, мВ.

По значению ΔE_M с помощью таблиц П4-7-1 – П4-7-4 приложения [1] или таблиц [4] определяется соответствующее значение пределов допускаемой основной абсолютной погрешности в градусах Цельсия Δt_M .

Определяются пределы допускаемой основной относительной погрешности δ_M по формуле

$$\delta_M = \pm (\Delta t_M / t) \cdot 100, \%, \quad (6.4)$$

где t – показания потенциометра (измеренное значение температуры), $^\circ\text{C}$.

Определяется допускаемое отклонение термо-ЭДС термоэлектрического термометра ΔE_T от значений градуировочной таблицы согласно табл. 3.

Таблица 3

Пределы допустимых основных погрешностей термоэлектрических термометров при температуре свободных концов 0°C

Обозначение типов ТЭП	Обозначение градуировки	Интервал температур, $^\circ\text{C}$	Пределы допустимых основных абсолютных погрешностей, мВ
ПП	S	от 0 до 300	$\Delta E_T = \pm 0,01$
		от 300 до 1600	$\Delta E_T = \pm 0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5} (t - 300)$
ХА	К	от -50 до 300	$\Delta E_T = \pm 0,16$
		от 300 до 1300	$\Delta E_T = \pm 0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} (t - 300)$
ХК	L	от -50 до 300	$\Delta E_T = \pm 0,20$
		от 300 до 800	$\Delta E_T = \pm 0,20 + 6,0 \cdot 10^{-4} (t - 300)$

По значению ΔE_T с помощью таблиц П4-7-1 – П4-7-4 приложения [1] или таблиц [4] определяется соответствующее значение пределов допускаемой основной абсолютной погрешности в градусах Цельсия Δt_T .

Определяется допускаемое отклонение δ_T по формуле

$$\delta_t = \pm(\Delta t_t/t) \cdot 100, \% \quad (6.5)$$

Допускаемое отклонение ЭДС в паре между жилами удлиняющих термоэлектродных проводов $\Delta E_{уп}$ принимается согласно табл. 4.

Таблица 4

Основные технические характеристики стандартных удлиняющих термоэлектродных проводов

Тип ТЭП	Термоэлектродные провода		Обозначение проводов	Значение термо-ЭДС, мВ	$\Delta E_{уп}$, мВ
	Положительный (материал)	Отрицательный (материал)			
ХК	Хромель	Копель	ХК	6,95	$\pm 0,20$
ХА	Медь	Константан	М	4,10	$\pm 0,15$
ПП	Медь	Сплав ПП	П	0,64	$\pm 0,03$

Значение термо-ЭДС (табл. 4) определяется в паре между жилами при температуре рабочего конца (спая) 100°C и свободных концов 0°C

По значению $\Delta E_{уд}$ с помощью таблиц П4-7-1 – П4-7-4 приложения [1] или таблиц [4] определяется соответствующее значение пределов допускаемого отклонения в градусах Цельсия $\Delta t_{уп}$.

Определяется допускаемое отклонение $\delta_{уп}$ по формуле

$$\delta_{уп} = \pm(\Delta t_{уп}/t) \cdot 100, \% \quad (6.6)$$

Пределы допускаемой погрешности устройства компенсации температуры $\delta_{кт}$ для данной задачи можно принять равными нулю.

Найденные значения погрешностей подставляются в формулу предельной погрешности показаний для комплекта (6.1).

Определяется предельная относительная погрешность записи среднесуточной температуры среды для комплекта термоэлектрического термометра по формуле

$$\delta_{з.к} = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_t^2 + \delta_{уп}^2 + \delta_{пп}^2}, \quad (6.7)$$

где $\delta_{пп}$ – погрешность определения среднесуточной температуры по диаграммной ленте; принимается равной допускаемой относительной погрешности планиметра, %.

Определяются пределы допускаемой основной погрешности показаний и записи показаний потенциометром заданного класса с заданной шириной поля записи $E_{п}$ при диапазоне измерения $E_{д}$:

$$\Delta E_{\Pi} = \pm \frac{K \cdot E_{\Pi}}{100}, \text{ мВ.} \quad (6.8)$$

По значению ΔE_{Π} с помощью таблиц П4-7-1 – П4-7-4 приложения [1] или таблиц [4] определяется соответствующее значение допускаемой основной погрешности показаний и записи показаний в градусах Цельсия Δt_{Π} .

Определяется допускаемое отклонение δ_{Π} по формуле

$$\delta_{\Pi} = \pm (\Delta t_{\Pi} / t) \cdot 100, \%. \quad (6.9)$$

Используя ранее вычисленные значения допускаемого отклонения заданной градуировки термометра δ_{τ} и заданного допускаемого отклонения ЭДС в паре между жилами термоэлектродных проводов $\delta_{\text{уп}}$ вычисляется значение $\delta_{\text{з.к}}$:

$$\delta_{\text{з.к}} = \sqrt{\delta_{\Pi}^2 + \delta_{\tau}^2 + \delta_{\text{уп}}^2 + \delta_{\text{пл}}^2}. \quad (6.10)$$

Определяется предельная абсолютная погрешность записи температуры для комплекта термоэлектрического термометра по формуле

$$\Delta_{\text{зк}} = \frac{\delta_{\text{з.к}} \cdot t}{100}, \text{ }^{\circ}\text{C.} \quad (6.11)$$

Погрешность показаний и записи температуры для комплекта по опытными данным обычно получается по сравнению с расчётными значениями меньше на 10-15 %.

Задача № 2

Произвести расчёт сужающего устройства, предназначенного для измерения расхода воды в трубопроводе и определить предельную относительную погрешность измерения.

Параметры измеряемой среды до сужающего устройства: P_1 – давление; t_1 – температура; D – внутренний диаметр трубопровода при 20 °С; Q_{max} – максимальный расход.

Известны: L_1 – длина прямого участка трубопровода; $(P_{\Pi}/P_1) \cdot 100$ – допустимая безвозвратная потеря давления, где P_{Π} – потеря (перепад) давления в сужающем устройстве.

Материал трубопровода и сужающего устройства, а также тип сужающего устройства и дифманометра могут быть выбраны самостоятельно. При расчёте сужающего устройства необходимо воспользоваться ГОСТ 8.586.5-2005 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений» (допускается примене-

ние РД 50-213-80 «Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами»).

Исходные данные для расчёта приведены в табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные задачи № 2

Первая цифра кода задания	Давление P_1 , МПа	Температура t_1 , °С	Расход Q_{\max} , кг/с	Вторая цифра кода задания	Диаметр грубы D , м	Третья цифра кода задания	Потеря давления $\frac{P_n}{P_1} \cdot 100$, %
1	1,2	20	1160	1	0,6	1	5-6
2	1,0	75	970	2	0,55	2	10-12
3	1,4	95	2390	3	0,45	3	7-15
4	1,1	90	1340	4	0,5	4	10-20
5	1,3	80	1650	5	0,55	5	3-10
6	1,5	30	1910	6	0,65	6	2-8
7	1,7	45	830	7	0,55	7	14-25
8	1,6	60	2520	8	0,65	8	15-18
9	1,8	10	790	9	0,6	9	12-24
0	1,9	40	1200	0	0,5	0	8-16

Инженерный расчёт сужающего устройства сводится к определению параметра d_{20} – диаметра отверстия сужающего устройства, м. Расчёт производится методом последовательных приближений.

Для расчёта сужающего устройства необходимо выбрать тип сужающего устройства, а также тип дифманометра, а если точнее, то необходимо знать предельный перепад давления Δp дифманометра и верхний предел измерения $Q_{\text{вп}}$.

Выбираем тип сужающего устройства для заданного варианта – диафрагму.

Верхний предел $Q_{\text{вп}}$ выбирается по заданному максимальному измеряемому расходу Q_{\max} так, чтобы стандартное значение $Q_{\text{вп}}$, взятое из ряда, приведённого в ГОСТ 18140-84 «Манометры дифференциальные ГСП. Общие технические условия», было ближайшее большее по отношению к Q_{\max} .

В соответствии с ГОСТ 18140-84 верхние пределы измерений дифманометров-расходомеров должны выбираться из ряда

$$A = a \cdot 10^n, \quad (6.12)$$

где a – одно из чисел ряда: 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; n – целое (положительное или отрицательное) число или ноль.

Если задана допускаемая потеря давления P_n в сужающем устройстве, то выбирают такое наибольшее значение Δp , при котором потеря давления должна оставаться меньше допускаемой. Необходимость выбора наибольшего значения Δp обусловлено стремлением получения наименьшего из возможных

значений модуля диафрагмы, т.к. при уменьшении параметра m повышается точность измерений и расширяется область измерений без поправки на влияние чисел Рейнольдса. Однако, при уменьшении m возрастают потери в сужающем устройстве. Здесь параметр m представляет собой относительную площадь сужающего устройства и вычисляется по формуле

$$m = S_0/S_1, \quad (6.13)$$

где S_1 , S_0 – площадь поперечного сечения трубопровода и отверстия сужающего устройства (диафрагмы) соответственно, m^2 .

На рис. 14-2-8 [1] приведена зависимость потери давления от m и типа сужающего устройства в долях от перепада давления. Для пользования данным рисунком целесообразно заданную допустимую безвозвратную потерю давления среды $(P_{\text{п}}/P_1) \cdot 100$, % выразить через диапазон абсолютных значений потери давления:

$$P_{\text{п}} = (0,1 - 0,2) \cdot P_1, \text{ Па.} \quad (6.14)$$

Используя основную расчётную формулу расхода среды можно определить в первом приближении значение $\alpha_{1\Delta} \cdot m_1$ по формуле

$$\alpha_{1\Delta} \cdot m_1 = \frac{Q_{\text{вп}}}{0,01252 \cdot \varepsilon \cdot D^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta p}}. \quad (6.15)$$

Далее по рис. 14-9-1 [1] определяется исходный коэффициент расхода $\alpha_{\text{исх1}}$ в зависимости от $\alpha_{1\Delta} \cdot m_1$ и значения m_1 .

При увеличении Δp значение m будет уменьшаться, и при этом будут расти безвозвратные потери. Все результаты вычислений необходимо свести в табл. 6.

Таблица 6

Результаты вычислений

Q_{max} , кг/с	D , мм	$\rho_{\text{в}}$, кг/м ³	Δp , кгс/см ²	$\alpha_{1\Delta} \cdot m_1$	$\alpha_{\text{исх1}}$	Фактич. $(P_{\text{п}}/P_1)$	Диапазон $(P_{\text{п}}/P_1)$	

Необходимо дать ряд пояснений по составлению табл. 6:

1. Плотность воды $\rho_{\text{в}}$, кг/м³ при заданном давлении P_1 , кгс/см² и температуре t_1 , °С вычисляется с помощью табл. П 14-5-1 работы [1].

2. Поправочный множитель ε на расширение измеряемой среды вводится вследствие того, что плотность газа или пара изменяется при прохождении через сужающее устройство. Для жидкости данный коэффициент равен 1.

3. Предельные перепады давления Δp дифманометра выбираются из ряда в соответствии с ГОСТ 18140-84: 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4; 6,3 и т.д. кгс/см².

4. Значения исходного коэффициента расхода $\alpha_{исх1}$ определяются по рисунку рис. 2 в зависимости от $\alpha_{1\Delta} \cdot m_1$.

5. Так же следует отметить, что в основных формулах расчёта расхода среды используются значения диаметра отверстия сужающего устройства d и диаметра трубопровода D , соответствующие рабочей температуре t_1 :

$$d = d_{20} \cdot k'_t; \quad (6.16)$$

$$D = D_{20} \cdot k''_t, \quad (6.17)$$

где k'_t , k''_t – поправочные множители, учитывающие влияние линейного расширения металла от воздействия температуры. В общем случае $k'_t = k''_t = 1$.

Теперь определим число Рейнольдса по формуле

$$Re_D = \frac{0,361 \cdot Q_{\max}}{D \cdot \mu}, \quad (6.18)$$

где μ – динамическая вязкость воды, Па·с. Значение μ определяется по [5].

Данное число Рейнольдса необходимо сравнивать с минимальным значением числа Рейнольдса. Если $Re_D < Re_{D\min}$, то при принятых параметрах расходомера измерять расход данным методом невозможно.

Теперь необходимо определить значение коэффициентов $k_{ш}$ и $k_{н}$. Коэффициент $k_{ш}$ учитывает влияние шероховатости трубопровода, а коэффициент $k_{н}$ учитывает недостаточную остроту входной кромки диафрагмы. Значения произведения данных коэффициентов приведены в [1]. Для расчётов можно принять $k_{ш} \cdot k_{н} = 1$. Полученные значения $k_{ш}$ и $k_{н}$ позволяют найти значение коэффициента расхода $\alpha_2 = \alpha_{исх1} \cdot k_{ш} \cdot k_{н}$ и во втором приближении значение модуля ε .

Затем определяется искомое значение d_{20} по формуле

$$d_{20} = \frac{D}{k_t} \cdot \sqrt{m}. \quad (6.19)$$

Предельная относительная погрешность измерения расхода показывающим дифманометром подсчитывается по формуле

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\varepsilon^2 + \delta_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4} \cdot \delta_\rho^2}, \quad (6.20)$$

где δ_α – среднеквадратическая относительная погрешность коэффициента расхода а, %; δ_ε – среднеквадратическая относительная погрешность поправоч-

ного множителя на расширение измеряемой среды, %. В расчётах параметр ε участие не принимал, поэтому значение δ_ε в вышеуказанной формуле принимаем равным нулю; $\delta_{\sqrt{\Delta p}}$ – среднеквадратическая относительная погрешность показаний по шкале дифманометра при измерении расхода Q_B , % по расходу; δ_ρ – среднеквадратическая относительная погрешность значения плотности измеряемой среды, %.

Среднеквадратическая относительная погрешность коэффициента расхода α для диафрагм вычисляется по формуле

$$\delta_\alpha = \sqrt{\delta_{\alpha_n}^2 + \delta_{k_{ш}}^2 + \delta_{k_n}^2 + (\delta_\alpha)_{Re}^2 + (\delta_\rho)_D^2}. \quad (6.21)$$

Среднеквадратическая относительная погрешность исходного коэффициента расхода δ_{α_n} определяется по рис. 14-8-1 [1]. Среднеквадратическая относительная погрешность поправочного множителя на шероховатость трубопровода $\delta_{k_{ш}}$ и среднеквадратическая относительная погрешность поправочного множителя на неостроту входной кромки диафрагмы δ_{k_n} приведены на рис. 14-8-2 и 14-8-3 [1]. Среднеквадратическая погрешность $(\delta_\alpha)_{Re}$ учитывает неточность вычисления поправки на влияние числа Рейнольдса или полное ей пренебрежение. Для текущих расчётов можно принять $(\delta_\alpha)_{Re} = 0,15$ %.

Значение $(\delta_\rho)_D$ учитывает погрешность определения α_n , обусловленную отклонением действительного диаметра трубопровода от номинального, и определяется по формуле

$$(\delta_\rho)_D = 0,3 \cdot \frac{m^2}{\alpha_n}. \quad (6.22)$$

Среднеквадратическая относительная погрешность показаний по шкале дифманометра определяется по формуле

$$\delta_{\sqrt{\Delta p}} = \frac{\sigma_Q \cdot Q_{вп}}{2 \cdot Q}, \quad (6.23)$$

где σ_Q – основная допустимая погрешность показаний по шкале (диаграмме) дифманометра, % по расходу; Q – измеренный расход, кг/с.

Предельные относительные погрешности табличных значений плотности воды δ_ρ , находящейся под давлением выше атмосферного, принимаются равными $\pm 0,02$ % при $t_1 \leq 50$ °С и $\pm(0,03-0,04)$ % при $50 < t_1 \leq 200$ °С.

Задача № 3

В табл. 7 приведены результаты наблюдений некоторой неизменяющейся величины, в которых отсутствуют систематические погрешности. Наблюдения являются многократным и равноточными, т.е. выполнены в стационарных условиях одним средством измерений и одним экспериментатором.

В данной задаче необходимо:

1) используя критерий В.И. Романовского, определить, не содержат ли грубую погрешность наблюдения, вызывающие сомнение в отношении соответствия их остальному ряду наблюдений, если известен уровень значимости q , и известен теоретический уровень значимости β_T ;

2) считая, что распределение погрешностей отдельных наблюдений подчиняется нормальному закону, оценить, пользуясь $t_{n,P}$ -таблицей, доверительные границы и доверительный интервал измеряемой величины, за пределы которых с заданной доверительной вероятностью P не выйдет её истинное значение.

Таблица 7

Исходные данные задачи № 3

Первая цифра кода задания	Результаты наблюдений								Вторая цифра кода задания	P_k	Третья цифра кода задания	P
	1	2	3	4	5	6	7	8				
1	3,97	4,03	3,95	3,75	3,96	4,00	4,02	3,95	1	0,05	1	0,998
2	127	126	128	120	129	126	125	126	2	0,02	2	0,80
3	43,5	43,8	43,0	43,2	43,6	43,3	43,4	43,7	3	0,05	3	0,90
4	7,13	7,08	7,18	7,06	7,10	7,07	7,12	7,09	4	0,01	4	0,95
5	275	282	287	284	279	280	276	283	5	0,02	5	0,98
6	937	925	940	935	933	930	941	928	6	0,05	6	0,99
7	12,1	11,8	11,9	12,3	12,0	11,3	11,7	11,6	7	0,10	7	0,998
8	1,01	1,03	0,97	1,02	0,99	0,90	0,98	1,00	8	0,01	8	0,80
9	153	150	152	151	159	150	154	150	9	0,10	9	0,99
0	420	418	417	421	414	423	422	415	0	0,02	0	0,95

Расчёт с помощью критерия Романовского заключается в том, что если $\varepsilon_k < X_{n+1} - \bar{X}_n$, то наблюдение X_{n+1} подлежит исключению из ряда, как не заслуживающее доверия.

Определим для ряда наблюдений от X_1 до X_n среднее арифметическое значение по формуле

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i, \quad (6.24)$$

где n – число измерений.

Оценка среднеквадратичного отклонения (СКО) вычисляется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}. \quad (6.25)$$

Рассчитываем величины $(X_i - \bar{X})$ и $(X_i - \bar{X})^2$ для каждого из наблюдений и сводим все вычисления в табл. 8.

Таблица 8

Результаты вычислений к СКО

№ наблюдения	X_i	$(X_i - \bar{X})$	$(X_i - \bar{X})^2$
1			
...			
8			

Затем определяется оценка среднего квадратичного отклонения по формуле (6.25).

При использовании критерия Романовского для определения наличия в ряде измерений промаха (грубой погрешности) применяется уровень значимости β , вычисляемый по формуле

$$\beta = \frac{|\bar{X} - X_{\min/\max}|}{\sigma}, \quad (6.26)$$

где $X_{\min/\max}$ – результат измерения, подозрительный на содержание грубой погрешности (X_{\min} – наименьший результат измерения в ряду измеренных значений; X_{\max} – наибольший результат измерения в ряду измеренных значений).

В зависимости от заданного уровня значимости q , т.е. от желания экспериментатора получить уверенный результат проверки гипотезы, и количества измерений n из табл. 9 определяется теоретический уровень значимости β_T .

Таблица 9

Значения теоретического уровня значимости β_T

n	q			
	0,01	0,02	0,05	0,10
4	1,73	1,72	1,71	1,69
6	2,16	2,13	2,10	2,00
8	2,43	2,37	2,27	2,17

Затем производится сравнение β_T и рассчитанного значения β для минимального и максимального значения выборки (соответственно β_{\min} и β_{\max}). Если $\beta > \beta_T$, то результат X_{\min} (X_{\max}) следует отбросить как содержащий гру-

бую погрешность. После исключения результата, содержащего грубую погрешность, из ряда измеренных значений производится повторная проверка полученной выборки ($n - 1$) на наличие грубой погрешности.

В том случае, если уровень значимости $\beta < \beta_r$, то выборку следует сохранить в полном объёме.

Теперь определим доверительные границы и доверительный интервал измеряемой величины, за пределы которых с данной доверительной вероятностью P не выйдет её истинное значение. Считаем, что распределение погрешностей отдельных наблюдений подчиняется нормальному закону распределения.

Нижняя граница доверительного интервала представляет собой величину $(\bar{X} - \varepsilon)$, а верхняя – величину $(\bar{X} + \varepsilon)$.

Параметр ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon = t_{n,P} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (6.27)$$

где $t_{n,P}$ – квантиль распределения Стьюдента.

Значения $t_{n,P}$ в зависимости от заданной доверительной вероятности P и количества измерений n даны в табл. 10.

Таблица 10

Значения квантиля распределения Стьюдента

$n - 1$	$P = 0,80$	$P = 0,90$	$P = 0,95$	$P = 0,98$	$P = 0,99$	$P = 0,998$
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501

Доверительный интервал выражается в виде $\bar{X} - \varepsilon < X < \bar{X} + \varepsilon$ или $I_p = (\bar{X} - \varepsilon; \bar{X} + \varepsilon)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.
3. Кузнецов, Н. Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
4. ГОСТ Р 8.585-2001 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования». – Введ. 2002–07–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 78 с.
5. Смирнов, А. Д. Справочная книжка энергетика / А. Д. Смирнов, К. М. Антипов. – 4-е изд. – М. Энергоатомиздат. – 1984. – 440 с.
6. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Введ. 2013–01–01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 24 с.
7. ГОСТ Р 50779.22-2005 Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. – Введ. 2005–07–01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 12 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ	3
1.1. Краткие теоретические сведения	3
1.2. Практические задания	9
2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ	12
2.1. Краткие теоретические сведения	12
2.2. Практические задания	14
3. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ	15
3.1. Краткие теоретические сведения	15
3.2. Практические задания	17
4. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА	19
4.1. Краткие теоретические сведения	19
4.2. Практические задания	21
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД	23
5.1. Краткие теоретические сведения	23
5.2. Практические задания	25
6. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ	26
Задача № 1	27
Задача № 2	30
Задача № 3	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	38

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям и курсовой работе
для студентов направления 13.03.01
«Теплоэнергетика и теплотехника»
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)
всех форм обучения

Составитель

Надеев Александр Александрович

В авторской редакции

Подписано к изданию 12.05.2022.

Уч.-изд. л. 2,5

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84