

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Тепловые электрические станции»

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ.
ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальностей
1-43 01 01 «Электрические станции»,
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение»

М и н с к
Б Н Т У
2 0 1 0

УДК [621.1 + 620.9](075.8)

ББК 31.3я7

Т34

Составители:

А.Г. Герасимова, Н.Б. Карницкий, Е.В. Пронкевич,

В.П. Кащеев, А.В. Седнин

Рецензенты:

В.А. Седнин, В.В. Сорокин

Т 34 Теплоэнергетические процессы и установки. Общая энергетика: лабораторный практикум для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение» / сост.: А.Г. Герасимова [и др.]. – Минск: БНТУ, 2010. – 93 с.

ISBN 978-985-525-293-2.

Лабораторный практикум по дисциплинам «Теплоэнергетические процессы и установки», «Общая энергетика» предназначен для более глубокого изучения курса путем практического ознакомления студентов с основами теплотехнического эксперимента, определения термодинамических характеристик и теплофизических свойств различных веществ, широко используемых в энергетике.

Лабораторный практикум рассчитан на студентов энергетического профиля специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение» дневного и заочного обучения. Может использоваться для выполнения лабораторных работ по специальностям экономического, инженерно-педагогического и строительного профиля.

УДК [621.1 + 620.9](075.8)

ББК 31.3я7

ISBN 978-985-525-293-2

© БНТУ, 2010

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Прежде чем приступить к работе, необходимо внимательно ознакомиться с заданием, правилами безопасности работы и противопожарными требованиями, а также проверить исправность приборов и инструмента. О замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю.

При выполнении лабораторных работ используются электронагревательные приборы и устройства.

Запрещается включать и выключать электрические приборы и установки без разрешения руководителя.

При несчастном случае необходимо оказать пострадавшему первую помощь. Для этого в лаборатории должна быть аптечка, укомплектованная необходимыми лекарствами. Во всех случаях пострадавшего необходимо отправить в ближайший пункт для оказания квалифицированной медицинской помощи.

При возникновении пожара необходимо вызвать пожарную службу, прекратить доступ воздуха к горящему предмету и по возможности локализовать очаг пожара. Для этого, если можно, закрыть горящее место кошмой, асбестом, одеялом, засыпать песком. При сильном пламени применять огнетушители и вызвать пожарную охрану.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Лабораторные работы проводятся на современных стендах, поэтому особое внимание при этом уделяется измерениям различных параметров и величин. Прежде чем приступить к непосредственному выполнению работ, студенты должны глубоко изучить теоретические разделы данного лабораторного практикума.

1.1. Общие сведения

Измерением называют процесс нахождения значения физической величины путем сопоставления с некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения.

Все теплотехнические измерения можно разделить на две группы: *прямые* и *косвенные*.

При прямых измерениях значение искомой величины находится либо сравнением ее с конкретной мерой, либо с помощью приборов, градуированных в соответствующих единицах.

При косвенных измерениях значение искомой величины находится на основании прямых измерений физических величин, связанных с искомой величиной определенной функциональной зависимостью:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots). \quad (1.1)$$

Все измерения основаны на физических закономерностях, определяющих *принцип измерения*. Для реализации тех или иных принципов измерения используют различные средства измерений.

Совокупность принципов и средств измерений, с помощью которых они осуществляются, составляют *метод измерения*.

В теплотехнических экспериментальных исследованиях используют методы *непосредственной оценки*, *компенсационный* (метод сравнения с мерой) и *нулевой*.

Метод непосредственной оценки – это метод, в котором значение измеряемой величины непосредственно отсчитывается по шкале измерительного прибора (измерение температуры жидкостным термометром, измерение давления манометром и т. д.).

В компенсационном методе измеряемую величину сравнивают с величиной воспроизводимой меры (например, измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с ЭДС нормального элемента).

В нулевом методе действие измеряемой величины полностью уравнивается действием известной величины, так что их взаимный эффект сводится к нулю. В этом случае измерительный прибор (нулевой) служит лишь для установления факта уравнивания. Нулевой метод обладает высокой точностью, которая определяется точностью воспроизведения образцовой меры и чувствительностью нулевого прибора (например, метод измерений электрического сопротивления термометра уравновешенным мостом).

1.2. Средства измерений

Основными средствами измерений являются меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и измерительные устройства. *Мерой* называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. *Измерительным прибором* называется средство измерения, вырабатывающее измерительный сигнал в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы подразделяются на аналоговые и цифровые, которые, в свою очередь, могут быть показывающими или регистрирующими.

В том случае, когда необходимо выработать измерительный сигнал в форме, удобной для передачи, обработки или хранения, используют *измерительные преобразователи*. Измерительные преобразователи в зависимости от их функций подразделяются на *первичные* (датчики), *передающие*, предназначенные для дистанционной передачи сигнала, и *масштабные*, используемые для изменения значения выходного сигнала в заданное число раз.

Измерительные приборы, оснащенные измерительными преобразователями, называют *измерительными устройствами*. Кроме упомянутых средств измерений в настоящее время широкое распространение получают *информационно-измерительные системы*, использующие ПЭВМ и позволяющие не только производить автоматические многоканальные измерения, но и обрабатывать результаты измерений по заданным алгоритмам. В этой связи особо важное значение приобрета-

ет унификация выходных сигналов различных измерительных устройств, повышающая надежность автоматизированных систем.

Все существующие средства измерений в зависимости от назначения делятся на *рабочие*, *образцовые* и *эталонные*. Рабочие измерительные средства предназначены для практических измерений и подразделяются на технические и средства повышенной точности (лабораторные). Образцовые измерительные средства служат для поверки рабочих мер, измерительных приборов и преобразователей. Эталонные служат для воспроизведения и хранения единиц физических величин с наивысшей достижимой точностью на данном этапе развития науки и техники.

1.3. Погрешности измерений

Погрешностью измерений называют отклонение результата измерения величины x от ее истинного значения x_d . Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины, называется *абсолютной погрешностью измерения*:

$$\Delta = X - X_d.$$

Отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению величины называется *относительной погрешностью измерения*.

В зависимости от причин, вызвавших появление погрешностей, последние принято разделять на систематические, случайные и грубые.

Составляющая погрешностей измерения, представляющая собой постоянную или изменяющуюся по определенному закону ошибку, называется *систематической погрешностью измерений*.

Если систематическая погрешность известна по значению и знаку, то она может быть исключена путем внесения поправки. Обычно различают следующие виды систематических погрешностей: *инструментальные*, зависящие от погрешностей средств измерения; *метода измерений*, происходящие от несовершенства метода измерения; *методические*, определяемые условиями измерения физической величины; *субъективные*, вызываемые индивидуальными особенностями наблюдателя.

Систематические ошибки могут существенным образом исказить результаты измерений, однако указать на исчерпывающие правила отыскания систематических погрешностей практически невозможно. В ряде случаев используют специальные способы исключения методических и других погрешностей измерений, некоторые из которых будут рассмотрены в соответствующих разделах, посвященных измерениям конкретных физических величин. Для устранения систематических инструментальных погрешностей средства измерений в обязательном порядке должны проходить поверку в лаборатории мер и измерительных приборов.

Составляющую погрешностей измерений, изменяющуюся случайным образом при последовательных измерениях одной и той же величины, называют *случайной погрешностью измерений*.

Случайная погрешность измерений не может быть определена для каждого отдельного измерения. Однако при большом числе последовательных измерений физической величины случайные погрешности могут быть количественно определены с помощью теории вероятностей и методов статистики.

Погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую, называется *грубой* (промахом).

1.4. Метрологические характеристики средств измерений

Основной характеристикой средств измерений является *класс точности*, определяемый пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей измерений. Под пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей измерений понимают наибольшие (без учета знака) погрешности, при которых данное средство измерений может быть допущено к эксплуатации.

Следует иметь в виду, что класс точности не является непосредственным указателем точности измерений, так как точность измерений зависит еще от метода измерений и условий их выполнения.

Основная погрешность средств измерений определяется в нормальных условиях эксплуатации (например, $t = (20 \pm 5)^\circ\text{C}$, $p = (760 \pm 25)$ мм рт. ст. Приведенные в качестве примера нормальные области значений влияющих факторов необязательные для всех средств измерений. В каждом конкретном случае нормальные условия эксплуатации устанавливаются техническими условиями на средства

измерений. Кроме нормальных условий на средства измерений устанавливается рабочая область изменения влияющих физических величин, в пределах которой нормируется *дополнительная погрешность*.

Приведенная погрешность измерительного прибора представляет собой долю абсолютной погрешности в процентах от нормирующего значения:

$$\delta = \pm 100 \Delta / X_N.$$

Нормирующее значение для технических средств измерений принимается равным диапазону измерений (для средств измерений с двусторонней шкалой – арифметической сумме верхнего и нижнего пределов). В этом случае предел допустимой основной погрешности показаний δ совпадает с классом K средства измерений, т. е.

$$\Delta = \pm K X_N / 100 = \delta X_N / 100.$$

Дополнительная погрешность средств измерений δ_d выражается в виде

$$\delta_d = 100 (x_p - x_{пн}) / X_N,$$

где x_p – показание прибора при рабочих условиях;

$x_{пн}$ – показание прибора при нормальных условиях.

Пределы допустимой дополнительной погрешности указываются либо в виде конкретных значений, либо в виде функциональной зависимости δ_d от влияющей величины.

В некоторых случаях (для образцовых и рабочих средств измерений повышенной точности) для исключения систематической погрешности показаний вводят поправку, равную абсолютной погрешности измерительного прибора.

1.5. Оценка погрешностей при технических измерениях

В большинстве случаев случайные погрешности не определяют точность технических измерений, а поэтому отпадает необходи-

мость в многократно повторяющихся измерениях. В промышленных и лабораторных условиях прямые измерения *практически постоянных* физических величин выполняются, как правило, *однократно* с помощью рабочих (технических и повышенной точности) средств измерений, а точность результатов оценивается *относительной предельной (максимальной) погрешностью* измерения

$$\delta_{\text{п}} = \pm (\delta + \delta_{\text{д}} + \delta_{\text{м}}), \quad (1.2)$$

где δ и $\delta_{\text{д}}$ – допустимые основная и дополнительная погрешности измерительного прибора, %;

$\delta_{\text{м}}$ – методическая погрешность, %.

При проведении косвенных теплотехнических измерений в лабораторных условиях используют, как правило, измерительные системы, состоящие из различных средств измерений.

При косвенном измерении величины y , когда имеет место функциональная зависимость вида (1.1), погрешность измерения искомой величины можно определить из выражения для полного дифференциала

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (1.3)$$

при условии, что *погрешности измерений величины x_i бесконечно малы* (в действительности погрешности Δx_i не являются бесконечно малыми). Следовательно, для определения погрешности Δy можно воспользоваться выражением (1.3), если пренебречь изменением производных $\partial f / \partial x_i$ в пределах изменения соответствующих величин Δx_i .

Для оценки *максимально допустимой погрешности косвенных измерений* часто используют выражение

$$\Delta y = \pm \left(\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right| \right) = \pm \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|, \quad (1.4)$$

где Δx_i – абсолютная предельная погрешность прямого однократного измерения величины x_i (1.2).

После несложных преобразований из уравнения (1.4) можно получить выражение для относительной максимальной погрешности измерений (%):

$$\delta_y = \pm 100 \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|. \quad (1.5)$$

Этот способ определения погрешностей косвенных измерений дает заведомо завышенные значения Δy и δ_y , так как предположение о том, что все погрешности Δx_i , входящие в (1.4) и (1.5), максимальны и одновременно одного знака, маловероятно. Кроме того, подсчитанная по формулам (1.2), (1.5) относительная максимальная погрешность измерений не является полной, так как при проведении измерений мы не учли так называемую *ошибку отнесения*.

Дело заключается в том, что искомую физическую величину следует измерять при определенных значениях параметров, а так как в течение опыта сами параметры могут изменяться с какой-то погрешностью, то это и вызывает ошибку отнесения.

Например, в практике теплотехнических измерений основными параметрами являются давление и температура. В этом случае максимальную относительную ошибку отнесения следует рассчитывать по формуле

$$\delta_y^{\text{отн}} = \pm 100 \left(\left| \frac{1}{y} \left(\frac{\partial y}{\partial T} \right)_p \Delta T \right| + \left| \frac{1}{y} \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)_T \Delta p \right| \right).$$

Значение этой ошибки будет зависеть от интенсивности изменения физической величины под влиянием изменения параметров, т. е. от частных производных.

1.6. Оценка случайных погрешностей при точных измерениях

Если исключить систематические ошибки и грубые промахи, то даже при использовании средств измерений повышенной точности на результаты измерений будут оказывать влияние различные слу-

чайные факторы, не поддающиеся учету и контролю. К числу таких факторов относятся физиологическое состояние органов чувств экспериментатора, случайные вибрации отдельных частей измерительных устройств, неучтенное изменение внешних факторов и т. п. При этом результаты отдельных измерений обнаруживают характерную картину *случайного рассеяния*, описываемую нормальным законом распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_n^2} \right], \quad (1.6)$$

где $f(x)$ – *плотность вероятности* измеряемых значений величины;
 m – *математическое ожидание*, являющееся наиболее вероятным значением измеряемой величины x и представляющее собой среднее арифметическое значение:

$$m = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n;$$

σ_n – *среднее квадратическое отклонение* измеряемой величины;

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n-1}}.$$

На рис. 1.1 представлена нормальная кривая распределения случайной величины, где по оси абсцисс отложены результаты измерений, а по оси ординат – плотность вероятности их появления. Площадь под кривой, соответствующая какому-либо интервалу по оси абсцисс, представляет собой *вероятность* P попадания случайного результата измерения в этот интервал. После интегрирования (1.6) найдем

$$P = \frac{2}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_n^2}} dx. \quad (1.7)$$

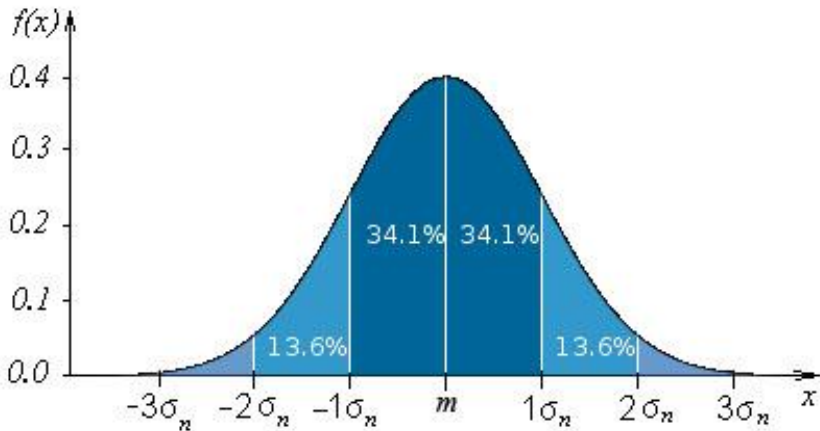


Рис. 1.1. Нормальное распределение погрешностей

Если взять интервал по оси абсцисс в долях от среднего квадратического отклонения, т. е. ввести новую переменную $(x - m)/\sigma_n = t$, то выражение (1.7) примет вид

$$P = \frac{2}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt = 2\Phi(t),$$

где $\Phi(t)$ – так называемая функция нормального распределения, для которой составлены таблицы.

Таким образом, на участке $m - \sigma_n, m + \sigma_n$ размещаются 0,6228 всех произведенных измерений. В более широких границах, например $m - 2\sigma_n, m + 2\sigma_n$ размещаются уже 0,9546 всех измерений, а из «трехсигмовых» границ выходят лишь 0,0028 измерений.

Параметр σ_n характеризует форму нормальной кривой распределения. Если изменить метод измерения (точность) величины x , рассеяние будет происходить около центра с прежней абсциссой m , но форма кривой изменится, так как среднее квадратическое отклонение зависит от точности измерений.

Конечная цель анализа выполненных измерений состоит в определении погрешности среднего арифметического значения

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n.$$

Согласно теории погрешностей оценкой точности измерения среднего арифметического значения, принимаемого за истинное значение измеряемой величины, является среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_m = \sigma_n / \sqrt{n} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Таким образом, среднее квадратическое отклонение оценки среднего арифметического \sqrt{n} раз меньше среднего квадратического отклонения результатов отдельных измерений. Однако для получения полного представления о надежности оценки погрешностей измерений должен быть указан *доверительный интервал*, в котором с заданной вероятностью находится значение измеряемой величины.

Так как нормальный закон справедлив при бесконечном числе измерений (практически при $n > 200$), то для оценки доверительного интервала пользуются распределением Стьюдента, учитывающим влияние конечного числа измерений на величину доверительного интервала (при $n \rightarrow \infty$ распределение Стьюдента сходится с нормальным).

Границы доверительного интервала для заданного значения доверительной вероятности β при ограниченном числе наблюдений записываются в виде

$$\bar{x} - t_{\beta} \sigma_m \leq x \leq \bar{x} + t_{\beta} \sigma_m, \quad (1.8)$$

где $t_{\beta} \sigma_m$ – коэффициент Стьюдента, значения которого в зависимости от числа измерений $(n - 1)$ и доверительной вероятности β приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения коэффициента Стьюдента в зависимости от числа измерений $n-1$ и доверительной вероятности β

$n-1$	t_{β} для значений β			
	0,683	0,9	0,95	0,997
1	1 833	6,314	12,710	234,8
2	1 283	2920	4,303	18,72
3	1 197	2,353	3,182	9,005
4	1 142	2,132	2,776	6,485
5	1,110	2,015	2,571	5,404
6	1,089	1,943	2,447	4,819
7	1,075	1,845	2,365	4,455
8	1,066	1,859	2,306	4,209
9	1,058	1,833	2,262	4,032
10	1,052	1,812	2,228	3,898
12	1,042	1,782	2,179	3,711
14	1,036	1,761	2,145	3,586
16	1,031	1,746	2,120	3,496
18	1,027	1,734	2,101	3,430
20	1,024	1,725	2,086	3,378
30	1,016	1,697	2,042	3,230

Следует иметь в виду, что, как было упомянуто выше, измерения, содержащие грубые промахи, должны быть исключены, так как не заслуживают доверия. На практике отбрасывают результаты измерений, погрешности которых превышают значения $\Delta \geq (4-3)\sigma_m$.

Случайная составляющая погрешностей косвенных измерений может быть строго определена только при условии, что зависимость (1.1) может быть линеаризована с достаточной точностью. В этом случае среднее квадратическое отклонение величины y , полученное в результате прямых независимых измерений величины x_i , свободных от систематических погрешностей измерений, может быть определено по формуле

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{m_j} \right)^2},$$

где σ_{m_j} – средние квадратические отклонения результатов измерений величин \bar{x}_j .

Границы доверительного интервала при заданной доверительной вероятности определяются по формуле (1.8). Таким образом, обозначая для заданной доверительной вероятности β погрешности измерений величин \bar{x}_j через ε_j , получим

$$\varepsilon_y = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \varepsilon_j \right)^2}. \quad (1.9)$$

Погрешности в (1.9) выражаются в тех же единицах, что и величина ε_y .

Если непосредственно измеряемые величины x_j являются различными, то пользуются относительными погрешностями.

1.7. Оценка погрешностей измерительных систем при технических измерениях

Для технических измерений используют измерительные системы, как правило, состоящие из первичного преобразователя (датчика), промежуточного преобразователя (или линии связи) и измерительного прибора (или аналого-цифрового преобразователя перед входом в ПЭВМ). Для оценки погрешностей измерительных систем при технических измерениях используют два метода. В первом методе, аналогичном описанному в п. 1.5, погрешности измерительной системы оценивают пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей измерений. Однако нельзя ожидать, что описанный в п. 1.5 неблагоприятный случай будет часто встречаться. Поэтому погрешности измерительной системы следует находить из суммы квадратов пределов допустимых погрешностей составляющих элементов:

$$\Delta y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (1.10)$$

Второй метод (вероятностно-статистический) позволяет получить оценки, близкие к действительным. Для того, чтобы воспользоваться этим методом, необходимо знать статистические характеристики систематической и случайной составляющих погрешностей.

Так, например, если для системы, состоящей из нескольких последовательно включенных преобразователей с коэффициентами преобразования, равными единице, математические ожидания случайных составляющих равны нулю, то математическое ожидание погрешностей $\bar{\chi}_{\text{и.с}}$ будет равно сумме систематических составляющих погрешностей отдельных преобразователей:

$$\bar{\chi}_{\text{и.с}} = \sum_{i=1}^n \Delta i.$$

Кроме того, если случайные погрешности измерительной системы статистически независимы, то среднеквадратическое отклонение измерительной системы найдется из выражения

$$\sigma_{\text{и.с}} = \sum_{i=1}^n D_i,$$

где $D_i = \sigma_i^2$ – дисперсии случайных составляющих средств измерений.

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. Средние арифметические и средние квадратические отклонения

Значение искомого параметра, вычисленное на основе ограниченного числа опытов, всегда будет содержать элемент случайности. Такое приближенное значение называется *оценкой* параметра. Например, как было показано в п. 1.6, оценкой для математического ожидания служит *среднее арифметическое* \bar{X} наблюдавшихся значений случайной величины X_i в n независимых опытах:

$$\bar{X} = \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) / n.$$

Оценкой для среднего квадратического отклонения является статистическое *среднее квадратическое отклонение* S (*стандартное отклонение*), представляющее меру ширины гистограммы – кривой распределения, построенной по экспериментальным данным:

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

При очень большом числе опытов \bar{X} и S будут с большой вероятностью весьма близки к m и σ (оценки, обладающие такими свойствами, называются *состоятельными*). Кроме того, желательно, чтобы, пользуясь величинами \bar{X} вместо m и S вместо σ , мы не делали систематических ошибок в сторону завышения или занижения (такие оценки называются *несмещенными*). Наконец, выбранные несмещенные оценки должны обладать по сравнению с другими оценками минимальным средним квадратическим отклонением. Оценки, обладающие таким свойством, называются *эффективными*. В связи с этим Гаусс предложил *метод наименьших квадратов* (точнее, минимума суммы квадратических ошибок). Следуя Гауссу,

определим $v_i = x_i - m$ и обозначим квадратными скобками сумму по i от 1 до n , например

$$[v] = \sum_{i=1}^n v_i, [vv] = \sum_{i=1}^n v_i^2.$$

Для того, чтобы оценка для m была эффективной, значение $[vv] = [xx] - 2m[x] + nm^2$ должно быть минимальным. Минимум этого выражения относительно m получаем путем приравнивания к нулю первой производной:

$$-2[x] + 2nm = 0,$$

откуда

$$m = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n = \bar{x}.$$

Следовательно, смысл среднего арифметического заключается в том, что оно позволяет свести к минимуму стандартное отклонение.

2.2. Закон распределения ошибок Гаусса

При решении различных задач, связанных с обработкой экспериментальных данных, нас часто интересуют случайные величины, которые являются функциями других случайных величин. Как определить стандартное отклонение функции, зная стандартные отклонения ее аргументов?

Сначала решим эту задачу для функции одной переменной $y = f(x)$. Для величины x измеряемые значения x_1, x_2, \dots, x_n дают среднее арифметическое $\bar{x} = [x] / n$. Для каждого x_i вычисляется соответствующее значение функции $y_i = f(x_i)$. Так как $x_i = \bar{x} + v_i$, то, полагая v_i достаточно малым, получим

$$y_i = f(\bar{x} + v_i) \approx f(\bar{x}) + v_i \left(\frac{df}{dx} \right) \Big|_{\bar{x}, \bar{y}} = \bar{y} + v_i \left(\frac{df}{dx} \right) \Big|_{\bar{x}, \bar{y}}.$$

Далее получаем

$$\Delta y_i = y_i - \bar{y} = v_i \left(df / dx \right) \Big|_{\bar{x}, \bar{y}},$$

$$[\Delta y \Delta y] = (df / dx)^2 [vv].$$

Следовательно:

$$s_y = (df / dx) s_x.$$

В случае большого числа переменных вычисления совершенно аналогичны. Пусть $Z = f(x, y, \dots)$ и наблюдаемыми величинами являются x_i, y_i .

Тогда

$$\begin{aligned} z_i &= f(x_i, y_i, \dots) = f(\bar{x} + v_i, \bar{y} + u_i, \dots) \approx \\ &\approx f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) + v_i \left(df / dx \right) \Big|_{\bar{x}, \bar{y}} + u_i \left(df / dy \right) \Big|_{\bar{x}, \bar{y}} + \dots \end{aligned}$$

откуда следует, что

$$\Delta z = z_i - \bar{z} = v_i \left(df / dx \right) + u_i \left(df / dy \right) + \dots$$

Пренебрегая удвоенными произведениями и членами более высокого порядка, получим

$$[\Delta z \Delta z] = (df / dx)^2 [vv] + (df / dy)^2 [uu] + \dots$$

Откуда следует закон распространения ошибок:

$$s_z = \sqrt{f_x^2 s_x^2 + f_y^2 s_y^2 + \dots},$$

связывающий стандартное отклонение функции со стандартными отклонениями аргументов.

2.3. Взвешенное среднее

В экспериментальных исследованиях при определении среднего арифметического часто приходится иметь дело с результатами измерений различной точности. Для определения погрешностей измерений в этом случае вводятся *веса* W_i так, чтобы измерениям большей точности соответствовали большие веса. Тогда среднее арифметическое сформулируется в виде

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} = \frac{[WX]}{[W]} = \frac{[WX]}{W_0},$$

где значение W_0 считается постоянным. Согласно закону распределения ошибок Гаусса, стандартное отклонение среднего арифметического

$$s_x^2 = \frac{1}{W_0^2} (W_1^2 s_1^2 + W_2^2 s_2^2 + \dots + W_n^2 s_n^2).$$

Веса выбираются таким образом, чтобы s_x^2 было минимальным. Из последнего уравнения следует, что

$$s_x^2 = \frac{1}{W_0^2} [W_1^2 s_1^2 + W_2^2 s_2^2 + \dots + (W_0 - W_1 - \dots - W_{n-1})^2 s_n^2].$$

Это выражение становится минимальным, если $\partial s_x^2 / \partial W_i = 0$, т. е.

$$2W_i s_i^2 - 2W_n s_n^2 = 0 \text{ или } W_i / W_n = (1/s_i^2) / (1/s_n^2). \quad (2.1)$$

Следовательно, веса должны быть обратно пропорциональны квадратам стандартных отклонений.

2.4. Сглаживание экспериментальных зависимостей по методу наименьших квадратов

Пусть производится опыт, целью которого является исследование зависимости некоторой физической величины y от физической величины x . В результате опыта получен ряд экспериментальных точек и построен график зависимости y от x . Обычно экспериментальные точки на таком графике дают некоторый разброс, т.е. обнаруживают случайные отклонения от видимой общей зависимости. Эти отклонения связаны с неизбежными во всяком опыте ошибками измерений.

Возникает вопрос, как по этим экспериментальным данным наилучшим образом воспроизвести зависимость y от x ? В этом случае желательно обработать экспериментальные данные таким образом, чтобы по возможности точно отразить общую тенденцию зависимости y от x и сгладить незакономерные, случайные отклонения.

Для решения подобных задач обычно применяется метод наименьших квадратов, который дает возможность при заданном типе зависимости $y = f(x)$ так выбрать ее числовые параметры, чтобы кривая $y = f(x)$ в известном смысле наилучшим образом отображала экспериментальные данные.

Что касается типа кривой $y = f(x)$, часто этот вопрос решается непосредственно по внешнему виду экспериментальной зависимости. Бывает так, что вид зависимости (линейная, квадратичная, степенная и т. д.) известен из физического смысла задачи, а из опыта требуется установить только некоторые параметры этой зависимости.

Исчисление ошибок иногда называют исчислением выравнивания: с помощью несложных преобразований можно придать линейную математическую форму целому ряду зависимостей.

Пусть имеется линейная зависимость

$$y = Ax + B.$$

Предположим, что независимая переменная x устанавливается без ошибки. В соответствии с методом наименьших квадратов величины A и B определяются из предположения о минимуме суммы квадратов отклонений y от экспериментально определенных y_i , т. е.

$$s = \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)^2 = \min. \quad (2.2)$$

Частное дифференцирование по A и B дает

$$-2 \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)x_i = -2[xy] + 2A[xx] + 2B[x];$$

$$-2 \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B) = -2[y] + 2A[x] + 2nB.$$

Приравняв обе производные, получим следующую систему уравнений:

$$[xx]A + nB\bar{x} = [xy];$$

$$xA + B = \bar{y},$$

где $\bar{y} = [y]/n$ и $\bar{x} = [x]/n$, откуда

$$A = \frac{[xy] - n\bar{x}\bar{y}}{[xx] - n\bar{x}^2}; \quad B = \frac{[xx]\bar{y} - [xy]\bar{x}}{[xx] - n\bar{x}^2}.$$

Затем вычисляется значение s по формуле (2.2) для найденных A и B , которое будем обозначать s_{\min} , тогда

$$s_A^2 = \frac{s_{\min}}{(n-2)([xx] - n\bar{x}^2)};$$

$$s_B^2 = \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{[xx] - n\bar{x}^2} \right) \frac{s_{\min}}{n-2}$$

являются стандартными отклонениями величин A и B .

2.5. Прямая выравнивания

Как правило, независимые переменные задаются с известной ошибкой, т. е. каждому значению x_i соответствует стандартное отклонение S_i и, следовательно, каждому значению y_i – стандартное отклонение t_i . Нахождение взаимосвязи между y и x называется *регрессионным анализом данных*. Если эта взаимосвязь линейна, то с помощью измеренных значений строится *прямая регрессии*.

Пусть измеренные пары функциональных значений и их стандартные отклонения следующие: X_i и S_i , y_i и t_i . Необходимо определить выравниваемые величины X_i и Y_i , а также числовые значения A и B в соотношении

$$Y_i = AX_i + B.$$

Анализ основан на обобщении минимума суммы квадратических ошибок. Будем искать минимум выражения

$$S = \sum_i \left[(X_i - x_i)^2 \frac{1}{S_i^2} + [AX_i + B - y_i]^2 \frac{1}{t_i^2} \right], \quad (2.3)$$

где $1/S_i^2$ и $1/t_i^2$ – веса, выбираемые в соответствии с соотношением (2.1).

Минимум выражения (2.3) получаем путем приравнивания нулю первой частной производной по X_i :

$$(X_i - x_i) / S_i^2 + A(AX_i + B - y_i) / t_i^2 = 0.$$

Умножая на $S_i^2 t_i^2$ и приводя подобные члены, получаем

$$X_i = w_i [x_i t_i^2 + S_i^2 A(y_i - B)],$$

где эффективный вес

$$w_i = (t_i^2 + A^2 S_i^2)^{-1}. \quad (2.4)$$

Учитывая выражение (2.4), получим

$$s = \sum_i w_i (B + Ax_i - y_i)^2.$$

Приравнивание нулю производной $\partial s / \partial B$ приводит к равенству

$$A\bar{X} + B = \bar{Y},$$

где

$$\bar{X} = \sum_i w_i x_i / \sum_i w_i; \quad \bar{Y} = \sum_i w_i y_i / \sum_i w_i.$$

Полагая

$$x'_i = x_i - \bar{X} \text{ и } y_i = y_i - \bar{Y},$$

получим

$$s = \sum_i w_i (Ax'_i - y'_i)^2.$$

Наконец, приравниваем нулю производную $\partial s / \partial A$. Тогда

$$\sum_i \left[2w_i (Ax'_i - y'_i)x'_i - 2w_i^2 (Ax'_i - y'_i)^2 As_i^2 \right] = 0.$$

Откуда следует, что

$$A \sum_i w_i x'_i z_i = \sum_i w_i y'_i z_i,$$

где $z_i = w_i (t_i^2 x'_i - As_i^2 y'_i)$.

Следовательно,

$$A = \sum_i w_i z_i y'_i / \sum_i w_i z_i x'_i; \quad B = \bar{Y} - A\bar{X}. \quad (2.5)$$

Пользоваться соотношениями (2.5) непосредственно невозможно, так как в w_i содержится величина A [см. (2.4)]. Поэтому A определяется методом итераций: процедура начинается с некоторого оценочного значения A (или даже с $A = 0$), с помощью которого вычисляется w_i , затем из (2.5) определяется новое значение A и вновь вычисляется w_i из (2.4). Процесс повторяется до тех пор, пока A не перестанет изменяться (с учетом заданной точности).

Критерием правильности расчета может являться тот факт, что при перестановке местами x_i и y_i положение прямой выравнивания не изменяется.

Для вычисления стандартных отклонений величин A и B необходимы вспомогательные величины:

$$\bar{Z} = \sum_i w_i z_i / \sum_i w_i; \quad z_i = z_i - \bar{Z};$$

$$Q^{-1} = \sum_i w_i [x_i y_i / A + 4 z_i (z_i - x_i)].$$

Тогда

$$s_A^2 = Q^2 \sum_i w_i^2 (x_i^2 t_i^2 + y_i^2 s_i^2);$$

$$s_B^2 = \frac{1}{\sum_i w_i} + 2(\bar{X} + 2\bar{Z})\bar{Z}Q + (\bar{X} + 2\bar{Z})^2 s_A^2.$$

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Краткие сведения из теории

3.1. Основные понятия

Теория теплообмена – наука о процессах переноса теплоты в пространстве и во времени. Перенос теплоты осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность представляет собой перенос теплоты микро-частицами (молекулами, атомами, электронами) в телах, обусловленный неоднородностью температурного поля.

Под *конвекцией* понимают процессы переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа в пространстве. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, и этот совместный процесс называют *конвективным теплообменом*. Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкостью или газом называется *теплоотдачей*.

Процессы теплопроводности и конвективного теплообмена могут сопровождаться излучением.

Тепловое излучение – процесс переноса теплоты с помощью электромагнитных волн.

В инженерной практике часто имеют место процессы теплообмена между жидкостями, разделенными твердой стенкой. Такой процесс переноса теплоты называют *теплопередачей*.

В теории теплообмена в большинстве случаев жидкости или газы рассматриваются как сплошные среды. Сплошные среды могут быть как однофазными, так и многофазными. В однофазных сплошных средах физические свойства изменяются в пространстве непрерывно. В многофазных средах на границах раздела фаз физические свойства изменяются скачкообразно, поэтому теплообмен в однофазных и многофазных средах протекает по-разному.

Рабочий процесс в различных теплообменных устройствах, как правило, основан на конвективном теплообмене между твердой поверхностью тела и омывающей его жидкостью, а его интенсивность определяется как гидродинамическими условиями обтекания, так и теплофизическими свойствами жидкости.

Для расчета стационарного теплового потока обычно используют формулу Ньютона, согласно которой плотность теплового потока q ($\text{Вт}/\text{м}^2$) пропорциональна температурному напору:

$$q = \alpha (T_{\text{о.с}} - T_{\text{ст}}), \quad (3.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;

$T_{\text{о.с}}$ – температура среды (жидкости, газа), К ;

$T_{\text{ст}}$ – температура поверхности теплообмена, К .

Коэффициент теплоотдачи имеет следующий порядок для различных условий конвективного теплообмена, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$:

свободная конвекция в газах –	5–30;
Свободная конвекция воды –	10^2 – 10^3 ;
вынужденная конвекция газов –	10–500;
вынужденная конвекция воды –	500– $2 \cdot 10^4$;
кипение воды –	$2 \cdot 10^3$ – $4 \cdot 10^4$;
пленочная конденсация водяных паров –	$4 \cdot 10^3$ – $1,5 \cdot 10^4$;
капельная конденсация водяных паров –	$4 \cdot 10^4$ – $1,2 \cdot 10^5$.

Современные методы расчета конвективного теплообмена основываются на теории пограничного слоя. Несмотря на свою незначительную по сравнению с характерными размерами тела толщину, пограничный слой играет основную роль в процессах динамического и теплового взаимодействия потока жидкости с поверхностью теплообмена. В непосредственной близости стенки существует вязкий подслой, где теплота передается только теплопроводностью.

Тогда в соответствии с гипотезой Фурье

$$q = -\lambda_{\text{о.с}} \partial T / \partial n, \quad (3.2)$$

где $\lambda_{\text{о.с}}$ – теплопроводность окружающей среды, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

n – координата, отсчитываемая по нормали к изотермической поверхности, м .

Если принять в первом приближении

$$\partial T / \partial n \approx -(T_{0,c} - T_{ст}) / \delta_T,$$

где δ_T – толщина теплового пограничного слоя (м), то из уравнений (3.1) и (3.2) следует, что

$$\alpha \approx \lambda_{0,c} / \delta_T.$$

Таким образом, чтобы интенсифицировать теплоотдачу, необходимо использовать жидкости с высокой теплопроводностью и принять меры к уменьшению толщины пограничного слоя.

Различают естественную и вынужденную конвекцию. *Естественная конвекция* возникает за счет того, что в неравномерно нагретой жидкости разность температур приводит к неравномерному распределению плотности, а следовательно, и к появлению подъемной силы, обуславливающей движение жидкости. Конвективный теплообмен, возникающий под действием внешних сил, называется *вынужденной конвекцией*.

При малых скоростях движения жидкости и больших перепадах температур теплота переносится как за счет естественной, так и за счет вынужденной конвекции. Если скорости движения велики, а температурные перепады незначительны, то влияние свободной конвекции на суммарный теплообмен также незначительно. Интенсивность теплоотдачи конвекцией зависит от характера течения жидкости в пограничном слое. При *ламинарном режиме* течения жидкости, когда линии тока параллельны теплоотдающей поверхности, интенсивность теплоотдачи невелика, слабо зависит от скорости течения жидкости и сильно изменяется при изменении теплофизических свойств теплоносителя.

При *турбулентном режиме* течения скорость в каждой точке потока пульсирует около некоторого среднего по времени значения. Вследствие этого возникает интенсивное поперечное перемешивание жидкости, что и вызывает интенсивный обмен количеством движения и теплотой между слоями с различной скоростью.

При вынужденном течении жидкости в трубах только на достаточном удалении от входа в зависимости от режима течения жидкости устанавливается вполне определенное распределение скорости и температуры (стабилизированное течение), не зависящее от начальных условий. В этой области теплоотдача зависит от скорости, диаметра трубы и физических свойств жидкости. На начальном участке, где имеет место нестабилизированное течение, процесс теплоотдачи отличается большой сложностью, и коэффициент теплоотдачи резко изменяется по длине.

Распределение температуры и скорости для несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами описывается системой дифференциальных уравнений, которые в приближении стационарного двумерного пограничного слоя имеют такой вид:

– уравнение энергии:

$$\rho c_p w_x \partial T / \partial x + \rho c_p w_y \partial T / \partial y = \lambda \partial^2 T / \partial y^2 ; \quad (3.3)$$

– уравнение движения:

$$\rho w_x \partial w_x / \partial x + \rho w_y \partial w_x / \partial y = g \beta \Delta T - \partial p / \partial x + \mu \partial^2 w_x / \partial y^2 ; \quad (3.4)$$

– уравнение сплошности:

$$\partial w_x / \partial x + \partial w_y / \partial y = 0 , \quad (3.5)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

g – ускорение свободного падения, м/с²;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

x, y – продольная и поперечная координата соответственно, м;

w_x, w_y – продольная и поперечная составляющие скорости соответственно, м/с;

T – термодинамическая температура, К;

$\Delta T = T_{ст} - T_{о.с}$ температурный напор, К.

Система уравнений (3.3–3.5) описывает бесконечное множество процессов конвективного теплообмена. Частные особенности процессов теплообмена характеризуются *условиями однозначности*, которые содержат геометрические, физические, временные и граничные условия.

Геометрические условия характеризуют форму и конкретные геометрические размеры системы, в которой протекает процесс теплообмена.

Физические условия задают числовыми значениями физических параметров среды: ρ , μ , λ , β , c_p .

Временные условия задают в виде начального распределения температур и скоростей (для стационарных задач эти условия отсутствуют).

Граничные условия характеризуют условия на поверхности теплообмена и на границах потока. На поверхности теплообмена продольная составляющая скорости W_x принимается равной нулю, а поперечная составляющая W_y при наличии вдува отлична от нуля и является заданной величиной.

Тепловые граничные условия обычно задаются в виде распределения температур или тепловых потоков (граничные условия первого и второго родов).

Граничные условия третьего рода связывают температуру поверхности теплообмена $T_{ст}$ с температурой окружающей среды с помощью уравнения теплового баланса

$$-\lambda \partial T / \partial y = \alpha (T_{ст} - T_{о.с}).$$

Коэффициент теплоотдачи α , как следует из анализа системы дифференциальных уравнений и условий однозначности, является сложной функцией, зависящей от большого числа факторов. Так, например, в случае внутренней задачи (течение жидкости в трубе)

$$\alpha = f(\rho, \mu, c_p, \lambda, W_{ср.м}, T_{о.с}, T_{ст}, d, l, x),$$

где x – расстояние от входа в трубу, м;

$W_{ср.м}$ – среднемассовая скорость течения жидкости, м/с;

d – диаметр трубы, м;

l – длина трубы, м.

3.2. Обобщение результатов эксперимента и моделирование

Математическое описание процесса теплообмена в общем случае складывается из системы дифференциальных уравнений (3.3–3.5) и условий однозначности (геометрических, физических, начальных, граничных). При аналитическом решении задачи искомая величина (коэффициент теплоотдачи – α , температура T и т. п.) выражается в функции аргументов – независимых переменных (время τ , координаты – X, Y, Z) и параметров системы ($\mu, \lambda, \nu, \rho \dots$). Аналитическое решение является наиболее желательным для инженерной практики, так как позволяет оценить влияние различных параметров на рассматриваемый процесс и найти оптимальные значения этих параметров при реализации процесса в конструкции того или иного аппарата.

Однако во многих случаях математическое описание процессов теплообмена оказывается столь сложным, что решить задачу аналитически не представляется возможным. В таком случае задача может быть решена либо численным методом, либо экспериментально.

Отличаясь по способу получения искомого величин, оба этих метода равноценны по возможностям при определении зависимости искомой величины от аргументов. Оба метода позволяют найти решение для одного конкретного случая при фиксированных значениях аргументов. При изменении хотя бы одного параметра задачу необходимо решить заново. При большом числе аргументов не только оказывается чрезвычайно большим объем вычислений или экспериментов, но и становится очень трудным, а иногда и невозможным, подобрать эмпирическую зависимость, правильно отражающую влияние всех аргументов, т. е. обобщить результаты численных решений или экспериментов.

Эти трудности преодолеваются с помощью так называемых *обобщенных переменных – критериев подобия*, представляющих собой безразмерные комплексы физических величин, которые отражают совместное влияние совокупности физических величин на явление.

Использование обобщенных переменных позволяет:

– сократить число аргументов задачи и тем самым уменьшить количество необходимых экспериментов и упростить обработку результатов этих экспериментов (или численных решений);

– обобщить данные эксперимента (даже единичного), т. е. распространить их на многие подобные между собой случаи;

– моделировать процессы, протекающие в натуральных установках.

Структура безразмерных комплексов (критериев) может быть найдена либо на основе анализа дифференциальных уравнений, описывающих явление и содержащих общие связи между величинами (метод теории подобия), либо на основе анализа размерностей физических величин, существенных для явления (метод анализа размерностей).

По физическому смыслу критерии подобия выражают соотношения между физическими эффектами (силами, тепловыми потоками), существенными для явления. Комбинация из критериев также является критерием и при необходимости может заменить любой из критериев, входящих в нее. Использование того или иного критерия из совокупности эквивалентных определяется практическими соображениями и в первую очередь отсутствием в нем величин, не заданных по условиям однозначности.

Критерии подобия носят имена ученых, которые внесли значительный вклад в развитие соответствующей области науки, и обозначаются двумя первыми латинскими буквами имени ученого.

Критерии подобия, состоящие из физических величин, заданных условиями однозначности, называются *определяющими*, критерии, содержащие неизвестные величины, – *неопределяющими* (или определяемыми). Зависимости между критериями подобия называются *критериальными уравнениями* и, как следует из вышесказанного, находятся с помощью экспериментов или численных решений.

3.3. Основные критерии подобия

Ниже приведены важнейшие критерии подобия теории теплообмена с объяснением их физического смысла.

Критерий Нуссельта

$$Nu = \alpha / \lambda$$

характеризует отношение между потоком теплоты от жидкости к поверхности тела (теплоотдачей) и потоком теплоты теплопроводно-

стью в жидкости у стенки. Критерий Нуссельта – неопределяющий критерий, так как содержит искомый коэффициент теплоотдачи.

Критерий Рейнольдса

$$Re = w / \nu$$

характеризует отношение между инерционной силой и силой внутреннего трения в жидкости (вязкости). Чем меньше значение критерия, тем больше влияние молекулярных сил вязкости и тем устойчивее вязкое, ламинарное течение жидкости. При некотором критическом значении критерия Re ламинарное течение жидкости переходит в турбулентное. Интенсивность конвективного теплообмена существенным образом зависит от режима течения жидкости, поэтому критерий Re является одним из основных определяющих критериев в теории теплообмена.

Критерий Пекле

$$Pe = w / \alpha$$

характеризует отношение между потоком теплоты, переносимым движущейся жидкостью (конвективным), и потоком теплоты теплопроводностью при одинаковом температурном напоре.

Критерий Прандтля

$$Pr = \nu / \alpha = Pe / Re$$

характеризует совокупное соотношение между силами инерции и вязкости и потоками теплоты конвективным и кондуктивным. Критерий Прандтля содержит только физические параметры среды и поэтому сам является параметром среды. Для газов критерий Pr определяется только атомностью. Его значение близко к единице (для одноатомных $Pr = 0,67$; для двухатомных $Pr = 1,0$). Для капельных жидкостей значение критерия Pr больше единицы. Исклю-

чение составляют жидкие металлы, которые характеризуются чрезвычайно малыми значениями критерия Pr .

Критерий Эйлера

$$Eu = \Delta p / (\rho w^2)$$

характеризует соотношение между силой давления и инерционной силой. Критерий Эйлера – неопределяющий критерий, так как содержит обычно искомый перепад давлений (сопротивление).

Критерий Стантона

$$St = \alpha / (\rho c_p w) = Nu / (Re \cdot Pe)$$

характеризует соотношение между потоком теплоты от жидкости к поверхности тела и конвективным потоком теплоты, переносимым движущейся жидкостью.

При рассмотрении теплообмена при высоких скоростях ($w > \alpha/4$) необходимо учитывать сжимаемость среды и критерий Маха, характеризующий сжимаемость среды.

Критерий Маха

$$M = w / \alpha$$

представляет собой отношение скорости потока к скорости распространения слабых возмущений в среде – скорости звука.

При решении задач нестационарной теплопроводности важное значение имеют критерии Фурье и Био.

Критерий Фурье

$$Fo = \alpha \tau / l^2$$

характеризует безразмерное время и необходим при решении нестационарных задач.

Критерий Био

$$Bi = \alpha l / \lambda = (l / \lambda) / (1 / \alpha)$$

характеризует отношение между термическим сопротивлением тела l/λ и термическим сопротивлением теплоотдачи $1/\alpha$. Написание критерия Био похоже на форму записи критерия Нуссельта. Однако между ними имеется существенное различие. В критерии Био λ – теплопроводность твердого тела, в то время как в критерии Нуссельта λ – теплопроводность жидкости (газа), омывающей тело. Принципиальное различие критериев Bi и Nu заключается в том, что в первом из них коэффициент теплоотдачи рассматривается как величина, заданная при решении задачи (граничные условия 3-го рода), а во втором – коэффициент теплоотдачи является величиной искомой. Таким образом, критерий Bi является определяющим, а критерий Nu – неопределяющим.

Критерий Фруда

$$Fr = gl / w^2$$

характеризует отношение между силой тяжести и инерционной силой. Этот критерий имеет существенное значение в тех случаях, когда гравитационные эффекты играют заметную роль.

Критерий Галилея

$$Ga = gl^3 / \nu^2 = Re^2 Fr$$

характеризует отношение массовых сил к силам вязкости. Применяется при анализе свободного движения жидкости.

Критерий Архимеда

$$Ar = (gl^3 / \nu^2)(\Delta\rho / \rho)$$

представляет собой комбинацию из критерия Галилея и параметрического критерия $\Delta\rho/\rho$, характеризующего неоднородное поле плотности.

Если разность плотностей жидкости определяется разностью температур ΔT , то отношение $\Delta\rho / \rho$ можно представить через коэффициент объемного расширения $\beta = (1 / \rho)(\partial\rho / \partial T)$, полагая его постоянным, в виде критерия Грасгофа.

Критерий Грасгофа

$$Gr = g\beta\Delta T l / \nu^2$$

характеризует соотношение между подъемной силой в жидкости, возникающей вследствие разности плотностей, и силой вязкости.

Критерий Релея

$$Ra = g\beta\Delta T l (\mathbf{v}a) = GrPr$$

часто используется при свободной конвекции.

Критерии Re , Fr , Ga , Ar , Eu вытекающие из дифференциального уравнения движения, часто называют *критериями гидродинамического подобия*. Критерии Nu , Pe , Fo , Gr , St относят к *критериям теплового подобия*. Анализируя исходные дифференциальные уравнения (3.3–3.5) и условия однозначности методами теории подобия, можно получить общий вид функциональной связи между критериями подобия для различных случаев конвективного теплообмена.

Так, в случае свободной конвекции в большом объеме, когда движение жидкости обусловлено неоднородностями плотности, возникающими за счет разности температур, критерий Nu однозначно определяется значением критерия Релея:

$$Nu = f(GrPr). \quad (3.6)$$

При этом критериальное уравнение (3.6) принято представлять в виде

$$Nu = C(GrPr)^n, \quad (3.7)$$

где значение постоянной C и показателя степени n зависят от диапазона изменения аргумента, т. е. критерия Ra .

В случае вынужденной конвекции при течении жидкости в трубах и каналах анализ проблемы методами теории подобия приводит в общем случае к функциональной связи:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, l/d), \quad (3.8)$$

где l/d – отношение длины трубы к ее диаметру, учитывает изменение теплоотдачи по длине трубы, связанное с гидродинамической и тепловой стабилизацией потока на начальном участке.

При ламинарном режиме течения ($Re_d = wd/\nu \leq 2200$) в общем случае на теплоотдачу при вынужденном движении оказывает влияние свободная конвекция, что и учитывается в (3.8) введением в число независимых аргументов критерия Gr . Однако влияние свободной конвекции на теплоотдачу ощущается лишь в том случае, когда имеет место так называемый вязкостно-гравитационный режим течения теплоносителя ($Gr Pr \geq 8 \cdot 10^5$).

В остальных случаях влиянием свободной конвекции на теплоотдачу при вынужденном течении пренебрегают, и функциональная зависимость (3.8) принимает вид

$$Nu = f(Re, Pr, l/d). \quad (3.9)$$

При развитом турбулентном режиме течения ($Re_d \geq 10^4$) общий вид функциональной зависимости (3.9) остается прежним. Так же, как и в случае свободной конвекции, экспериментальные данные по теплоотдаче при вынужденной конвекции обычно обобщают в виде степенной зависимости

$$Nu = C Re^n Pr^m \epsilon_l,$$

где ϵ_l – поправка, учитывающая влияние начального участка на теплоотдачу.

При внешнем обтекании общий вид критериальной зависимости при ламинарном и турбулентном режимах течения квазиизотермической несжимаемой жидкости в пограничном слое имеет вид

$$Nu = C Re_x^n Pr^m, \quad (3.10)$$

где Re_x^n – критерий Рейнольдса, построенный по расстоянию x , отсчитываемому от передней критической точки тела.

В условиях внешней задачи часто в качестве неопределяющего критерия используют критерий Стантона, в который не входит характерный размер теплоотдающей поверхности.

Следует заметить, что поскольку критериальные уравнения получаются на основе эксперимента, необходимо в каждом случае учитывать:

- диапазон применимости полученного уравнения, характеризующий значениями определяющих критериев подобия;
- какая температура принимается в качестве определяющей, по которой находятся физические параметры, входящие в критерии подобия;
- какой размер системы принимается в качестве определяющего при подсчете соответствующих критериев подобия.

Нередко определяющая температура (или размер) указываются в форме подстрочного индекса у критерия в критериальном уравнении.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Цель работы – определение коэффициентов теплоотдачи на поверхности горизонтальной трубы в условиях естественной конвекции.

Описание экспериментальной установки

На этой универсальной установке могут быть проведены несколько лабораторных работ, благодаря возможности простой трансформации отдельных устройств.

Установка УИСКВ-1 (рис. 3.1) состоит из стойки 1, на которой закреплены приборная панель 2, информационная панель 3, площадка 4 и 5. Стойка 1 имеет опору 6. Опора закрывается крышками 7 и 8.

На приборной панели установлены прибор измеритель-терморегулятор ИР «Сосна-004» 9, вольтметр 10 и амперметр 11. На информационной панели 3 размещена сигнальная арматура 12, выключатели 13 и информационные таблички 14.

На площадке 4 сверху установлены стойки 15, на которых закреплены экспериментальный образец 16 и вентилятор 17 для продольной конвекции.

К нижней стороне площадки 4 закреплен раструб 18, служащий для обеспечения поперечной конвекции. В нижней части раструба (на входе) установлена решетка, обеспечивающая равномерный обдув образца. Внизу раструба 18 установлен вентилятор для поперечного обдува 19.

На площадке 5 установлен трансформатор 20. На самой опоре 6 расположены магнитные пускатели 21, конденсатор 22, разъем 23 и автоматический выключатель 24. Сигнальная арматура 25, информирующая о включении установки расположена на отдельной панели 3б.

Монтажная разводка проводов (после входной системы электропитания к установке и его разводки по вышеуказанным позициям) расположена внутри установки за панелями 2, 3 и задней панели 3а.

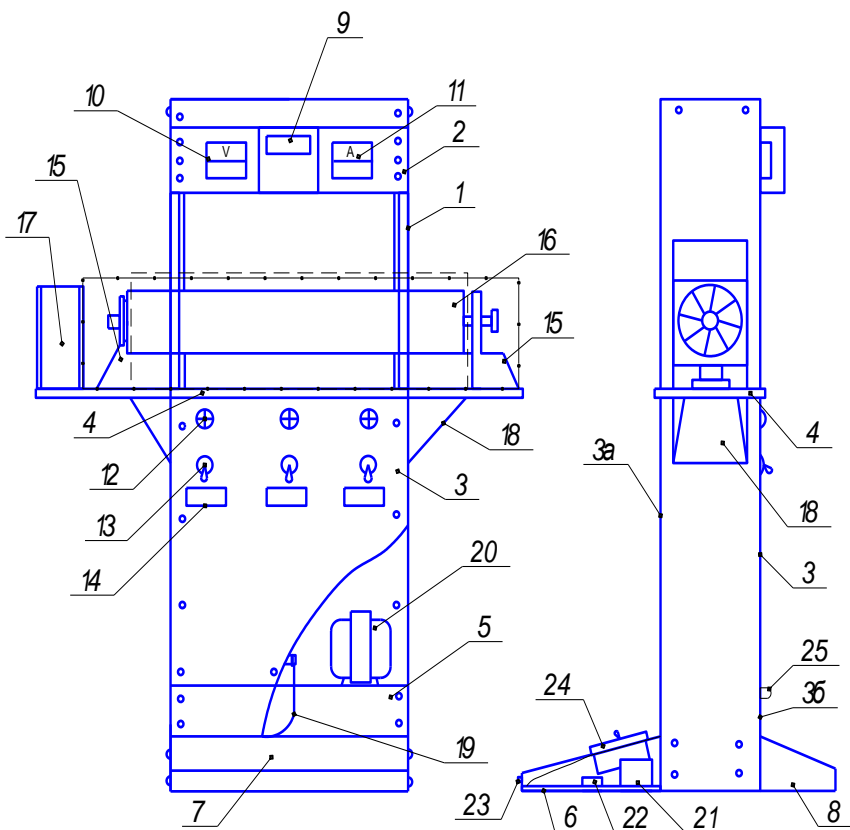


Рис. 3.1. Установка для исследования свободной и вынужденной конвекции (УИСКВ-1): 1 – стойка; 2 – приборная панель; 3 – информационная панель; 4, 5 – площадки; 6 – опора; 7, 8 – крышки; 9 – прибор измеритель-терморегулятор «Сосна-004»; 10 – вольтметр; 11 – амперметр; 12 – сигнальная арматура; 13 – выключатели; 14 – информационные таблички; 15 – стойки; 16 – экспериментальный образец; 17 – вентилятор для продольного обдува; 18 – раструб; 19 – вентилятор для поперечного обдува; 20 – трансформатор; 21 – магнитные пускатели; 22 – конденсатор; 23 – разъем; 24 – автоматический выключатель; 25 – сигнальная арматура

Установка имеет три варианта условий работы, а именно:

- а) свободная конвекция;
- б) вынужденная конвекция при поперечном обдуве нагреваемого образца;

в) вынужденная конвекция при продольном обдуве нагреваемого образца.

Тумблерами 13, размещенными на передней панели 3, производится включение необходимого канала.

Электрическая схема работы установки разработана таким образом, что не позволяет включения одновременно двух или трех вариантов исследования. При включении, например, тумблера канала электрического питания свободной конвекции каналы электрического питания вынужденной конвекции не включаются.

При исследовании температура образца измеряется прибором ИР «Сосна-004». Напряжение, поступающее на нагреватель образца и потребляемый ток, измеряется с помощью вольтметра и амперметра установленных на верхней панели. Величины напряжений, подаваемые на нагреватель, фиксированы.

Экспериментальный образец 16 представляет собой медную трубку длиной 804 мм. Наружный диаметр трубы 76 мм. Внутри трубы имеются трубчатые керамические изоляторы. Нагреватель помещен внутрь медной трубы, на которой предварительно, в 12 точках, просверлены отверстия, в которые изнутри зачеканены термопары. Вывод термопар из корпуса образца осуществлен через выходной фланец. Термочувствительные головки термопар запаяны в толщине стенки медной трубы. Расположение термопар показано на рис. 3.2.

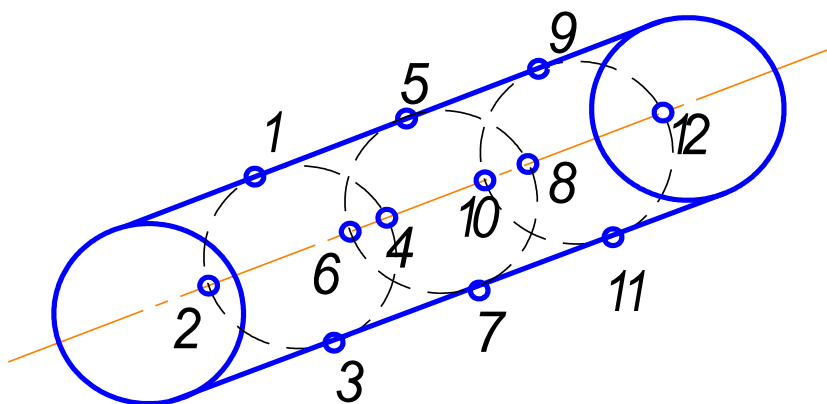


Рис. 3.2. Схема расположения термопар на образце

Технические характеристики установки

1. Габариты:	
– длина, мм, –	1000;
– ширина, мм, –	760;
– высота, мм, –	2050.
2. Рабочее напряжение, В, –	220.
3. Количество образцов, шт., –	1.
4. Габариты образца:	
– длина, мм, –	$804 \pm 0,5$;
– наружный диаметр, мм, –	$76 \pm 0,05$.
5. Сопротивление нагревателя образца, Ом, –	$47 \pm 0,05$.
6. Напряжение питания нагревателя, В:	
– свободная конвекция –	53;
– вынужденная при поперечном обдуве –	110;
– вынужденная при продольном обдуве –	110.
7. Потребляемая мощность, Вт:	
– свободная конвекция –	52;
– вынужденная при поперечном обдуве –	264;
– вынужденная при продольном обдуве –	264.
8. Максимальная температура на образце, °С:	
– свободная конвекция –	55–60;
– вынужденная при поперечном обдуве –	60–65;
– вынужденная при продольном обдуве –	67–75.
9. Скорость потока воздуха, обдувающего образец, м/с:	
– вынужденная при поперечном обдуве –	1,5;
– вынужденная при продольном обдуве –	3,5.
10. Количество термопар на образце, шт., –	12.

Принципиальная электрическая схема установки показана на рис. 3.3.

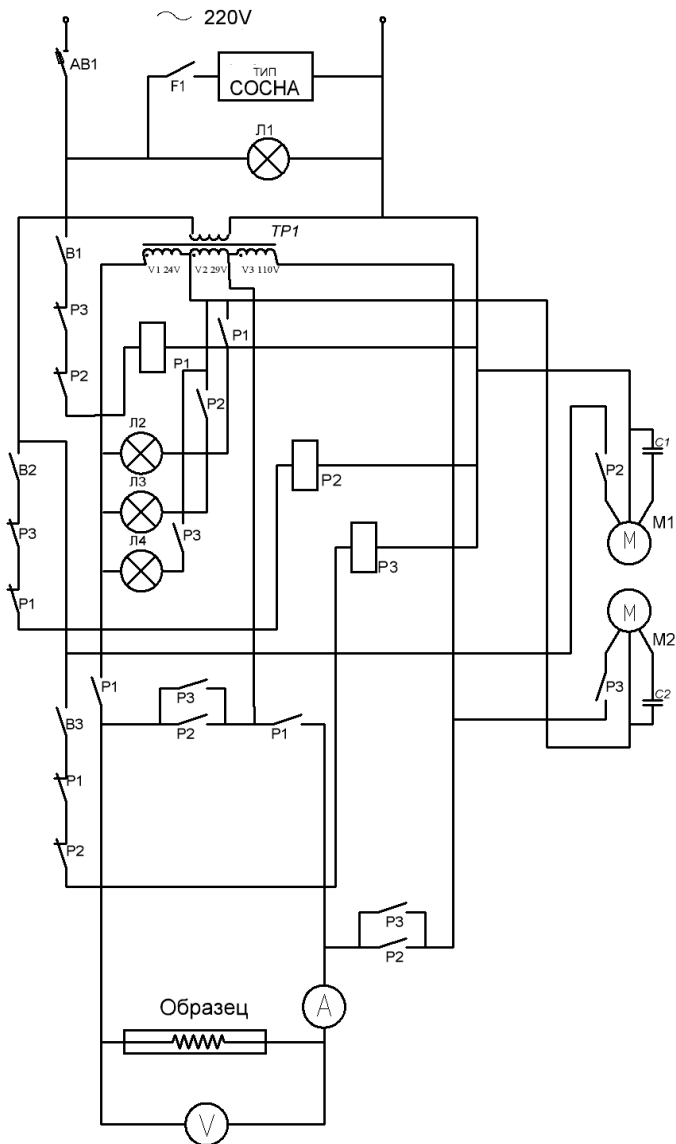


Рис. 3.3. Принципиальная электрическая схема установки для исследования свободной и вынужденной конвекции (УИСКВ-1)

№ п/п	Наименование	Обоз.	Кол-во
1	Автоматический выключатель	АВ	1
2	Термоизмерительный прибор «Сосна-004»	Тип Сосна	1
3	Трансформатор	ТР1	1
4	Тумблер	В	3
5	Тумблер	Ф	1
6	Сигнальная арматура	Л	4
7	Магнитный пускатель МПЕ III	P1-P3	3
8	Вентилятор	M1, M2	2
9	Вольтметр	V	1
10	Амперметр	A	1
11	Образец		1

Подготовка установки к работе

Перед началом работы на установке обслуживающему персоналу необходимо произвести следующие действия.

1. Проверить наличие и качество крепления заземляющего провода.
2. Установить автоматические выключатели поз. 24 рис. 3.1 в положение ВЫКЛ.
3. Установить все три выключателя поз. 13 в положение ВЫКЛ.
4. Визуально осмотреть качество крепления термопар на образце 16.
5. Подключить установку к сети 220 В, установив вилку питающего провода в розетку.

Порядок проведения работы

1. При изучении *свободной конвекции* образец должен быть открыт (без дополнительных раструбов).
2. Включить автоматический выключатель 24 рис. 3.1, при этом должна загореться сигнальная лампочка 25.
3. Включить прибор ИР «Сосна-004», поставив тумблер включения прибора в положение ВКЛ.
4. При включении прибора на его табло через некоторое время появится значение температуры термопары № 1, установленной в образце. Схема расположения термопар в образце показана на рис. 3.2.
5. Дать прогреться прибору в течение 15 минут.

6. Последовательным нажатием кнопки на приборе или в автоматическом режиме произвести опрос всех 12 точек измерения.

7. Включить нагреватель, поставив тумблер выбранного варианта работы в положение ВКЛ. При этом должна загореться соответствующая сигнальная лампочка. То, что нагреватель исправен будет видно по амперметру, на котором появятся показания тока, проходящего через нагреватель.

8. После достижения стационарного режима (о чем судят по неизменности показаний термопар во времени) через каждые 1–2 мин делают несколько записей показаний термопар, амперметра и вольтметра и заносят в таблицу измерений.

9. Записать результаты измерений в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Таблица результатов измерений

№, п/п	Показание амперметра, I , А	Показание вольтметра, U , В	Показания термопар, °С														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1																	
2																	
3																	
Ср. знач.																	

10. Измерить температуру окружающего воздуха.

11. При проведении лабораторных работ с компьютером необходимо:

- соединить СОМ-порт компьютера с СОМ-портом прибора «Сосна-004» специальным кабелем;
- провести подготовку установки к работе;
- включить компьютер;
- запустить файл: D:\ Конвекция \ конвекция.exe;
- после запуска программы установить интервал опроса 60 секунд и нажать кнопку «Установить».

Обработка результатов измерения

В случае естественной конвекции около горизонтального цилиндра с постоянной температурой критериальное уравнение (3.7) имеет вид

$$Nu_m = C(GrPr)_m^n, \quad (3.11)$$

где $Nu = \alpha d / \lambda$;

$Pr = \nu / \alpha$;

$Gr = (g \beta / \nu^2) \Delta t$;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

d – наружный диаметр цилиндра, м ;

$g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения;

$\beta = 1/(t + 273)$ – коэффициент объемного расширения, К^{-1} .

Индекс m в уравнении (3.11) означает, что физические параметры, входящие в критерии подобия, находятся при средней температуре пограничного слоя

$$t_m = (t_{\text{ст}} - t_{\text{о.с}}) / 2,$$

где $t_{\text{ст}}$ – температура поверхности цилиндра, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{о.с}}$ – температура воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$.

Постоянные C и n определяются из эксперимента следующим образом. В логарифмических координатах зависимость (3.11) представляет собой прямую

$$\lg Nu_m = \lg C + n \lg (GrPr)_m$$

с угловым коэффициентом, равным показателю степени n . Постоянная C представляет собой отрезок, получающийся при пересечении прямой с осью ординат (рис. 3.4). В результате обобщения многочисленных экспериментальных данных в диапазоне изменения аргумента $5 \cdot 10^2 \leq (GrPr)_m \leq 2 \cdot 10^7$ для рассматриваемого случая получены следующие значения постоянных: $C = 0,54$; $n = 0,25$.

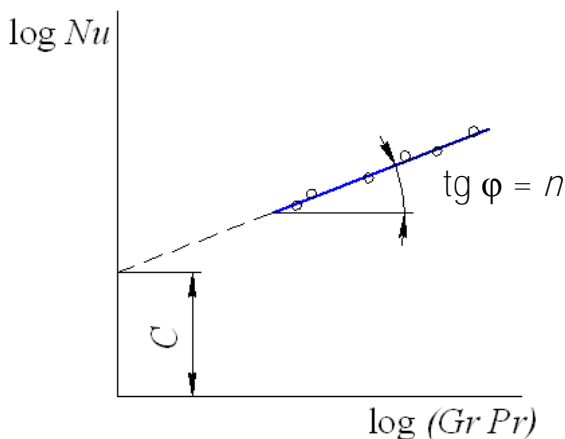


Рис. 3.4. Зависимость $Nu = C(GrPr)^n$ в логарифмических координатах

Для предоставления экспериментальных данных в форме зависимости (3.10) необходимо сделать следующее.

1. Определить коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи α характеризует интенсивность теплообмена между телом и окружающей средой. Он равен количеству тепла, передаваемого 1 м^2 поверхности тела в среду при перепаде температур в один градус.

Определяется коэффициент теплоотдачи расчетным путем по формуле Ньютона

$$\alpha = \frac{q}{(t_{\text{ст}} - t_{\text{о.с}})},$$

где q – тепловой поток, направленный по нормали, от поверхности цилиндра в окружающую среду, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Тепловой поток определяется по электрической мощности, затрачиваемой на нагрев рабочего участка:

$$q = IU / F = WI / F, \quad (3.12)$$

где I – сила тока в цепи нагревателя, А;

U – напряжение на зажимах нагревателя, В;

W – электрическая мощность нагревателя, Вт.

F – поверхность рабочего участка, м².

Вычисленный коэффициент теплоотдачи в случае естественной конвекции является суммарным, так как теплота с поверхности цилиндра отдается не только естественной конвекцией, но и излучением: $\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется расчетным путем:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{F(t_{\text{ст}} - t_{\text{о.с}})},$$

где $Q_{\text{л}}$ – поток тепла, переданный путем теплового излучения, Вт.

Поток тепла, передаваемый путем теплового излучения, определяется по уравнению Стефана–Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = C \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{о.с}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \quad (3.13)$$

где $T_{\text{ст}}$ и $T_{\text{о.с}}$ – соответственно температуры поверхности тела и окружающей среды, К;

C – приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/м²·К⁴.

При тепловом излучении в неограниченное пространство приведенный коэффициент лучеиспускания C принимается равным коэффициенту лучеиспускания излучающей поверхности, который может быть определен из соотношения

$$C = \varepsilon \cdot C_0,$$

где $\varepsilon = 0,6$ – степень черноты поверхности тела;

C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный 5,67 Вт/м²·К⁴.

2. Подсчитать значения коэффициента теплоотдачи за счет свободной конвекции: $\alpha_{\text{к}} = \alpha - \alpha_{\text{л}}$.

3. Вычислить значения коэффициента объемного расширения β_m , а из табл. П1 выписать значения физических констант λ_m , ν_m и критерия Pr_m .

4. Подсчитать значения критериев Nu_m , $(GrPr)_m$ и их логарифмы.

5. Построить в логарифмических координатах зависимость $Nu_m = 0,54(GrPr)_m^{0,25}$.

6. Полученные данные сравнить со справочными данными (табл. П2).

Оценка погрешностей измерения

Среднеквадратическая погрешность измерения суммарного коэффициента теплоотдачи в соответствии с расчетными зависимостями (3.1), (3.13), определяется по формуле

$$\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \left[\left(2 \frac{\Delta U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{ст} + \Delta t_{о.с}}{t_{ст} - t_{о.с}} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3.14)$$

Абсолютные погрешности измерений величин, входящих в уравнение (3.14), определяются в соответствии с классом точности используемых приборов. Необходимые сведения о классе точности и диапазоне измерений приборов, используемых в установке, приведены в табл. П2. При вычислении погрешности измерения температуры необходимо также учитывать погрешности градуировки термометров.

Контрольные вопросы

1. Что такое естественная конвекция?
2. Какие критерии являются определяемыми, а какие определяющими для данного вида конвекции?
3. Что называется коэффициентом теплоотдачи?
4. Как определить коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплоотдачи излучением?

Лабораторная работа № 2

ТЕПЛООТДАЧА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ (ПОПЕРЕЧНОЕ ОМЫВАНИЕ ВОЗДУХОМ)

Цель работы – определение коэффициентов теплоотдачи на поверхности горизонтальной трубы в условиях вынужденной конвекции при поперечном омывании воздухом и обобщение результатов опытов.

Описание экспериментальной установки

При проведении лабораторной работы используется универсальная установка, описанная в лабораторной работе № 1 и показанная на рис. 3.1.

При изучении *вынужденной конвекции при поперечном омывании* образец 7б (см. рис. 3.1) должен быть размещен в раструбе, как показано на рис. 3.5. На рис. 3.1 положение раструба показано штрихами.

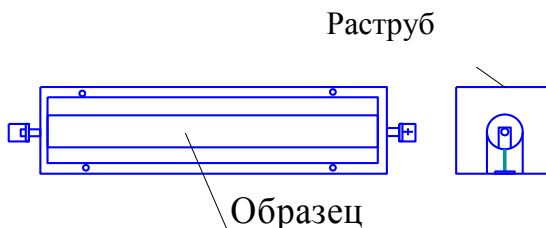


Рис. 3.5. Размещение образца в раструбе для поперечного обдува образца

Порядок проведения работы

1. Подготовить установку к работе (как в предыдущей работе).
2. На установке смонтировать раструб, как показано на рис. 3.5.
3. Далее порядок проведения работы такой же, как и в предыдущей работе.
4. Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Таблица результатов измерений

№, п/п	Показание амперметра, I , А	Показание вольтметра, U , В	Показания термопар, °С													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1																
2																
3																
Ср. знач.																

Обработка результатов измерений

Критериальное уравнение для расчета локальных значений коэффициентов теплоотдачи при поперечном обдуве цилиндра круглого сечения можно записать в виде

$$Nu = C Pr(Re_x)^m \left(\frac{T_{ст}}{T_{о.с}} \right)^{\frac{m}{4}},$$

где $T_{ст}$ и $T_{о.с}$ – абсолютная температура поверхности цилиндра и потока воздуха до встречи с цилиндром соответственно, К;

Pr – критерий Прандтля (табл. П1) для $t_{о.с}$;

Re – критерий Рейнольдса, определяемый из выражения

$$Re_x = \frac{u_c X}{\nu},$$

где u_c – скорость потока воздуха, обдувающего образец, $u_c = 1,5$ м/с;

X – расстояние, отсчитываемое от переднего края образца, мм;

ν – кинематическая вязкость воздуха для $t_{о.с}$, м²/с (табл. П2).

Значения постоянной C и показателя степени m определяются в зависимости от критерия Рейнольдса по табл. 3.3.

Таблица 3.3

Значения Re , C и m для расчета теплообмена от цилиндра при поперечном омывании его воздухом

Re	C	m
0,4–4	0,891	0,330
4–40	0,821	0,385
40–4000	0,615	0,466
4000–40000	0,174	0,618
40000–400000	0,0239	0,805

Для представления полученных экспериментальных данных в критериальной форме необходимо сделать следующее.

1. Определить тепловой поток по электрической мощности нагревателя по формуле (3.12).
2. Определить локальные значения коэффициентов теплоотдачи по формуле

$$\alpha = \frac{q}{(t_{стj} - t_{о.с})}, \quad (3.15)$$

где q – тепловой поток, направленный по нормали, от поверхности цилиндра в окружающую среду, Вт/м²;

$t_{стj}$ – температура в местах заделки термопар, °С;

$t_{о.с}$ – температура воздуха, обтекающего образец, °С.

3. Вычислить критерии подобия Nu и Re_x , построить в логарифмическом масштабе зависимость $\lg Nu - \lg Re_x$ и обобщить экспериментальные данные в виде

$$Nu = C Pr (Re_x)^m \left(\frac{T_{ст}}{T_{о.с}} \right)^{\frac{m}{4}}.$$

4. Оценить погрешность измерения. Среднеквадратическая относительная погрешность косвенного измерения коэффициента теплоотдачи в соответствии с формулами (1.10), (3.12), (3.15) может быть определена из выражения

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \left[\left(2 \frac{\Delta U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{\text{ст}}}{t_{\text{ст}} - t_{\text{о.с}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{\text{о.с}}}{t_{\text{ст}} - t_{\text{о.с}}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Контрольные вопросы

1. Что такое вынужденная конвекция?
2. Какие факторы оказывают влияние на местный коэффициент теплоотдачи при внешнем обтекании?
3. Какие критерии подобия являются определяющими в процессе теплоотдачи при вынужденной поперечной конвекции?

Лабораторная работа № 3

ТЕПЛОТДАЧА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ (ПРОДОЛЬНОЕ ОМЫВАНИЕ ВОЗДУХОМ)

Цель работы – определение локальных и среднего значений коэффициентов теплоотдачи при вынужденном продольном обтекании трубы.

Описание экспериментальной установки

При проведении лабораторной работы используется универсальная установка, описанная в лабораторной работе №1 и показанная на рис. 3.1.

При изучении *вынужденной конвекции при продольном омывании* образец 16 (см. рис. 3.1) должен быть размещен в цилиндрической раструбе, как показано на рис. 3.6. На рис. 3.1 положение раструбы показано точками.

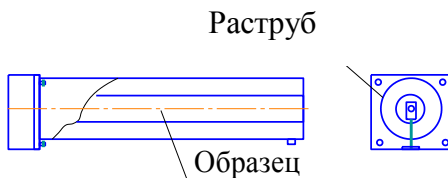


Рис. 3.6. Размещение образца в раструбе для продольного обдува образца

Порядок проведения работы

1. На установке смонтировать раструб, как показано на рис. 3.6.
2. Далее порядок проведения работы такой же, как и в лабораторной работе № 1.
3. Результаты измерений занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Таблица результатов измерений

№, п/п	Показание амперметра, <i>J</i> , А	Показание вольтметра, <i>U</i> , В	Показания термомпар, °С													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1																
2																
3																
Ср. знач.																

Обработка результатов измерений

Критериальное уравнение для расчета локальных значений коэффициента теплоотдачи при внешнем обтекании (3.10), выраженное через критерий Стантона, имеет вид

$$St = C Re_x^{n_1} Pr^{m_1}, \quad (3.16)$$

где $St = \alpha / (\rho C_p u_c)$ – критерий Стантона;

$Re_x = u_c x / \nu$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \nu / \alpha$ – критерий Прандтля;

u_c – скорость потока воздуха, м/с;

x – расстояние, отсчитываемое от начала образца вдоль поверхности трубы, м.

В случае обтекания пластины воздушным потоком уравнение (3.16) вследствие слабой зависимости критерия Pr от температуры (табл. П2) упрощается и принимает вид

$$St = C_1 Re_x^{n_1}, \quad (3.17)$$

где $C_1 = C Pr_{\text{пл}} = \text{const}$.

Физические константы, входящие в критерии подобия, определяются по температуре невозмущенного потока. Коэффициент C_1 и показатель степени n_1 зависят от характера течения жидкости в пограничном слое.

Переход от ламинарной формы течения к турбулентной происходит не в точке, а на некотором участке и зависит от многих факторов, в том числе от степени турбулентности набегающего потока, шероховатости поверхности, продольного градиента давления в потоке и т. д. Опыты показывают, что переход к турбулентной форме течения в пограничном слое на пластине при низкой степени турбулентности внешнего потока может происходить при значениях $Re_{\text{кр}}$, лежащих в пределах $3,5 \cdot 10^5 - 2,8 \cdot 10^6$. Координаты начала разрушения ламинарного слоя и образования развитого турбулентного пограничного слоя определяются по значениям $Re_{\text{кр1}}$ и $Re_{\text{кр2}}$.

В результате расчетов и обобщения многочисленных экспериментальных данных по теплоотдаче трубы, обтекаемой потоком воздуха с постоянными физическими свойствами, получены следующие значения постоянных в уравнении:

- для ламинарного режима $C_1 = 0,412$; $n_1 = -0,5$;
- для турбулентного режима $C_1 = 0,035$; $n_1 = -0,2$.

Для того, чтобы представить полученные экспериментальные данные в форме зависимости (3.17), необходимо сделать следующее.

1. Определить тепловой поток по электрической мощности нагревателя по формуле (3.12).
2. Определить локальные значения коэффициентов теплоотдачи по формуле (3.15).
3. Вычислить критерии подобия St и Re_x , построить в логарифмическом масштабе зависимость $\lg St - \lg Re_x$ и обобщить экспериментальные данные в виде

$$St = C_1 Re_x^{n_1},$$

определив постоянные C_1 и показатели степени n_1 для ламинарной и турбулентной формы течения в пограничном слое как параметры прямых линий

$$\lg St = C_1 + n_1 \lg Re_x,$$

построенных в координатах $\lg St, \lg Re_x$.

Отметить на графике числа $Re_{кр1}$ и $Re_{кр2}$, соответствующие началу разрушения ламинарного пограничного слоя и возникновения развитого турбулентного течения. Полученные зависимости сравнить с имеющимися в литературе данными.

4. Оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы используются для измерения температуры и тепловой мощности?
2. Какие критерии подобия являются определяющими в процессе теплоотдачи при вынужденной продольной конвекции и каков их физический смысл?
3. Оценить разницу коэффициента теплоотдачи при продольном и поперечном омывании поверхности образца.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы – определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов.

Общие сведения

Теплоизоляционными называют материалы, обладающие малой теплопроводностью вследствие их высокой пористости и применяемые для тепловой изоляции строительных конструкций, промышленного оборудования и трубопроводов.

Теплоизоляционные материалы способствуют снижению материалоемкости строительства, сокращению расходов топлива на отопление здания и производство различных промышленных продуктов. Использование материалов с низкой теплопроводностью, например в ограждающих конструкциях крупнопанельных жилых зданий, позволяет в 1,5–2 раза снизить расход стали и в 3–4 раза расход цемента по сравнению с конструкциями без тепловой изоляции. Снижение массы конструкции приводит к снижению транспортных потерь. Изоляция поверхностей оборудования на тепловых электрических станциях снижает потери теплоты до 25 раз. Во многих случаях тепловая изоляция способствует интенсификации технологических процессов. При этом создаются нормальные температурные условия труда и комфортабельный микроклимат в помещениях.

Общим признаком всех теплоизоляционных материалов является высокая пористость, которая достигается различными технологическими процессами: образованием волокнистого каркаса, вспучиванием массы в процессе тепловой обработки, поризацией массы при смешивании с пеной, введением пористых заполнителей, выгорающих добавок и др.

К числу теплоизоляционных материалов можно отнести пробковые материалы, стекловойлок, стекловату, пенополиуретаны, асбест, шлак, глину, песок и др. В последнее время широкое применение получили искусственно созданные материалы: пенобетон,

пенопласты, защитная пена и т.д. В целом к теплоизоляционным материалам относят материалы у которых коэффициент теплопроводности $\lambda < 0,2$ Вт/(м °С).

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов зависит от их температуры, плотности, влажности. Очень сильно растет теплопроводность при повышении влажности, так как вода, заполняя поры, вытесняет воздух и тем самым усиливает перенос тепла.

Тепловая изоляция необходима для снижения теплоотдачи в окружающую среду от теплопроводов, применяемых в тепловых сетях. Она снижает теплоотдачу на воздухе в 10–15 раз, а в грунте в 3–5 раз по сравнению с неизолированными теплопроводами. Теплоизоляция должна отвечать следующим требованиям:

- обладать хорошими теплоизоляционными свойствами;
- прочностью;
- долговечностью и стойкостью против влаги, чтобы не допускать коррозии металлических частей теплоизолированного оборудования.

В технике находят широкое применение следующие виды теплоизоляции.

Сегментная, или *блочная* изоляция состоит из блоков различной формы (пористые кирпичи, полуцилиндры и др.), изготавливается из пеностекла, пенобетона, асбоцемента, минеральной ваты. Сегменты и блоки, наложенные на трубопровод, необходимо стягивать кольцами и промазывать мастикой. Кольца можно изготовить из проволоки или сетки и покрыть асбестоцементной штукатуркой, мастикой, тканью с последующей гидроизоляцией.

Оберточная изоляция представляет собой минеральный войлок, алюминиевую фольгу, асбестовые листы. Такой изоляцией трубы покрывают в один или несколько рядов. Изоляция крепится специальными скрепками или бандажами из полос металла, затем обертывается тканью и окрашивается краской.

Набивная изоляция изготавливается путем набивки изоляционного материала (минеральная вата, зонолит, железобетонная крошка, кремнезем, савелит и др.) в специальные чехлы, сетки, различные оболочки, смонтированные вокруг трубы.

Литая изоляция состоит из пенобетона и пенопласта, которыми заливают поверхности труб, а также сборные блоки из арматуры и другого материала. Благодаря монолитности литая изоляция обладает большой прочностью. Изоляцию можно применять и при безканаль-

ной укладке труб. Для защиты наружной поверхности теплопроводов от коррозии применяются следующие материалы: лаки в смеси с алюминиевой пудрой в количестве 15–20 %, мастики различных сортов. Широкое применение находит мастика из смеси нефтяных битумов с тонко измельченными минеральными или органическими наполнителями. Снаружи трубы обертываются стеклотканью.

Описание установки

Установка для определения коэффициента теплопроводности (УОКТ-1) (рис. 3.7) состоит из стойки 1, на которой закреплены лицевая приборная панель 2, задняя панель 3, верхняя площадка 4, панель-столик 5 и панели 7, 8, 9, 10, 11. Внизу стойка 1 имеет опору 6.

На лицевой панели 2 стойки 1 размещены приборы и элементы управления установкой, а именно:

- 12 – приборы для измерения температуры;
- 13 – приборы для измерения рабочего напряжения;
- 14 – приборы для измерения силы тока;
- 15 – сигнальная арматура;
- 16 – выключатели;
- 17 – автотрансформаторы;

На верхней площадке 4 установлены образцы 18 и кронштейны 19 для крепления образцов 18. Внизу установки на панелях установлены:

- 20 – разъем для ввода рабочего напряжения;
- 21 – розетки для подключения вспомогательных приборов;
- 22 – сигнальная лампа включения сети;
- 23 – автоматические выключатели.

Выпрямитель блока питания 24 установлен внутри установки за регуляторами напряжения 17.

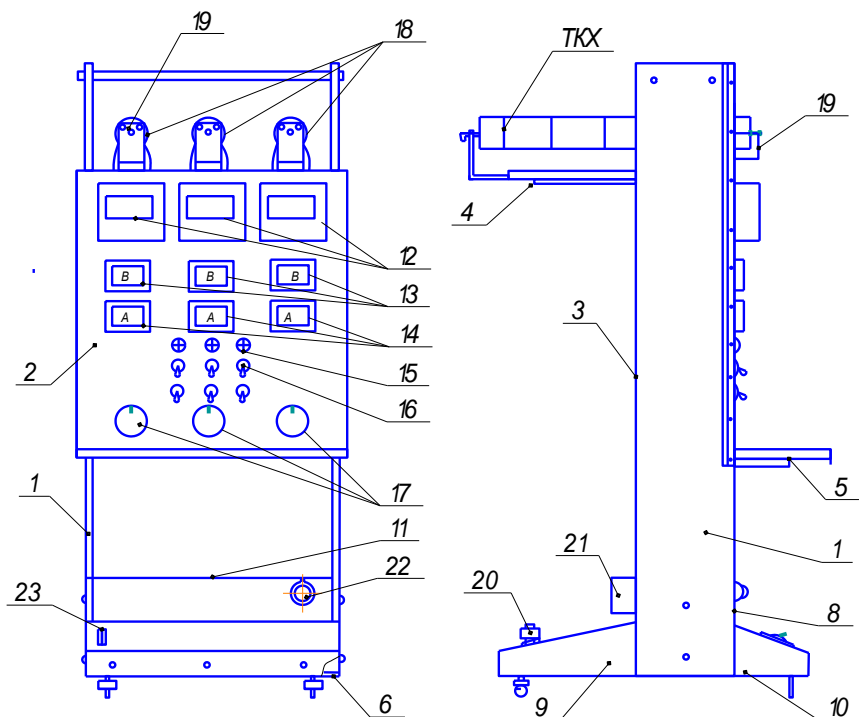


Рис. 3.7. Схема установки для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов

Установка имеет три канала измерения.

Каждый канал обеспечивает обслуживание одного образца. В канал входит образец, термоизмерительный прибор «Сосна-004» с термопреобразователями ТХК-1199, вольтметр, амперметр, выключатель (тумблер) включения термоизмерительного прибора «Сосна-004», тумблер включения автотрансформатора.

На передней панели 2 (см. рис.3.7) установки размещены приборы, предназначенные для регистрации измеряемых значений величин, соответствующих образцов, установленных на платформе 4. Например, к первому образцу относится «Сосна-004», тумблера, под которыми имеются бирки с надписями «Сосна-004» и образец 7.

Индикаторная лампочка Л1 оповещает о включении напряжения на образец 1. Информацией о включении прибора «Сосна-004» 1 служит появление информации о температуре на табло прибора.

Таким образом, к первому каналу относится образец 1, вольтметр 1, амперметр 1, автотрансформатор 1 (ЛАТР 1) и индикаторная лампочка Л1, выключатели с надписью «Сосна-004» 1, образец 1.

Ко второму каналу относится образец 2, прибор «Сосна-004» 2, ЛАТР 2, Л2, выключатели «Сосна-004» 2 и образец 2.

К третьему каналу относится образец 3, прибор «Сосна-004» 3, вольтметр В3, амперметр А3, ЛАТР 3, Л3 и выключатели «Сосна-004» 3, образец 3.

Автотрансформаторы оснащены ограничителями подаваемого напряжения на образцы.

Схема расположения термопар в образце показана на рис. 3.8.

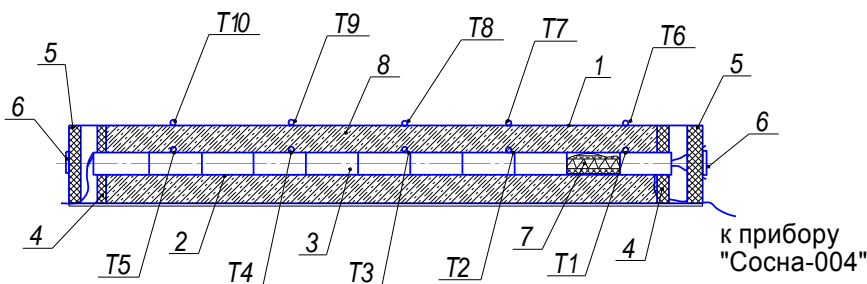


Рис. 3.8. Схема установки термопар в образце:

1 – внешняя труба; 2 – внутренняя труба; 3 – изолятор; 4 – кольцо теплоизолятора; 5 – заглушка; 6 – держатель; 7 – нагреватель из нихрома; 8 – исследуемый теплоизолятор; Т1–Т10 – термопары ТХК-1199

Принципиальная электрическая схема установки для определения коэффициента теплопроводности показана на рис. 3.9.

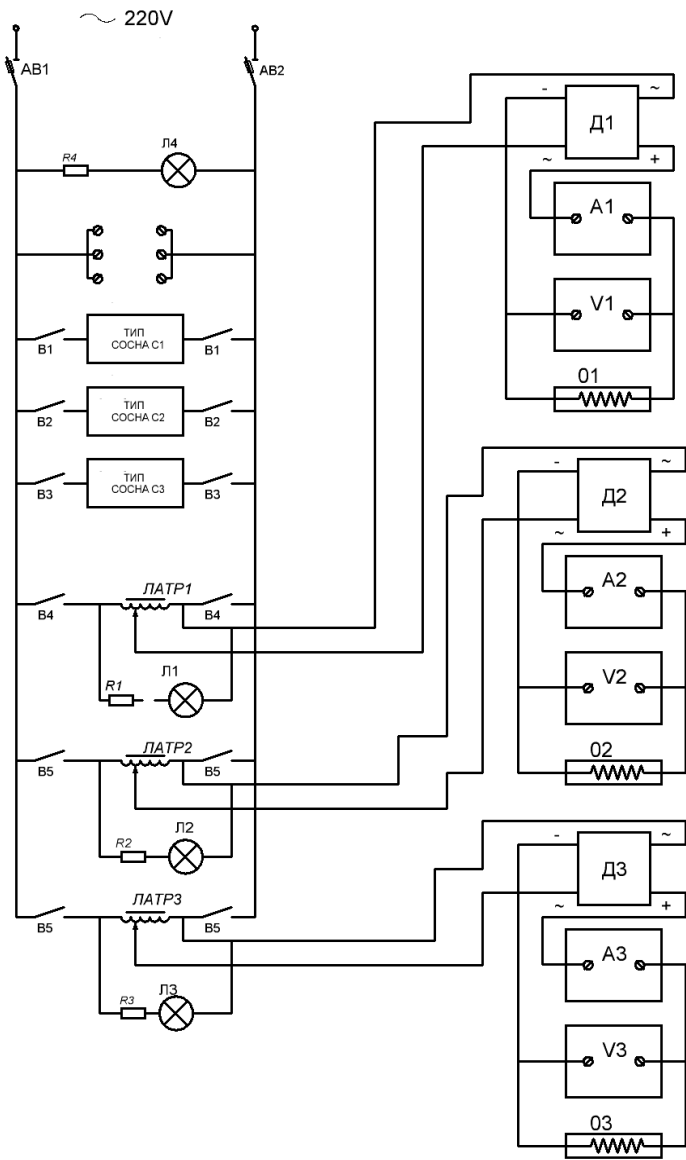


Рис. 3.9. Принципиальная электрическая схема

№ п/п	Наименование	Обоз.	Кол-во
1	ВА60 10А	Р1–Р3	3
2	Сопротивление МЛТ	Р1–Р4	4
3	Розетка	И	3
4	Тумблер ТВ1-2	В1–В6	6
5	«Сосна-004»	С1–С3	3
6	АОСН-4	ЛАТр	3
7	Лампа неоновая	Л1–Л4	4
8	Диодный мостик	Д1–Д3	3
9	Амперметр	А1–А3	3
10	Вольтметр	В1–В3	3
11	Образцы	О1–О3	3

Технические характеристики установки

1. Габариты:
 - длина, мм, – 550;
 - ширина, мм, – 800;
 - высота, мм, – 1600.
2. Рабочее напряжение, В, – 220.
3. Количество образцов, шт., – 3.
4. Габариты образца:
 - длина, мм, – 850;
 - наружный диаметр внешней трубы, мм, – 50;
 - внутренний диаметр внешней трубы, мм, – 49;
 - наружный диаметр внутренней трубы с нагревателем, мм, – 20.
5. Толщина исследуемого слоя термоизоляционного материала, мм, – 14,5.
6. Длина образца теплоизоляционного материала, мм, – 770.
7. Сопротивление нагревателей образцов, Ом, – $30 \pm 0,5$.
8. Потребляемая мощность не более, Вт, – 200.
9. Максимальное напряжение, В, подаваемое
 - на 1-й образец – 40;
 - на 2-й образец – 20;
 - на 3-й образец – 30.
10. Максимально допустимая температура на поверхности образцов, °С, – +65.
11. Количество термомпар на каждом образце, шт., – 10.

Подготовка установки к работе

Перед началом работы на установке обслуживающему персоналу необходимо произвести следующие действия.

1. Проверить наличие и качество крепления заземляющего провода.
2. Установить автоматические выключатели поз. 23 рис. 3.7 в положение «Выкл».
3. Установить выключатели (6 шт.) поз. 16 в положение «Выкл».
4. Визуально осмотреть качество крепления термопар на образцах поз. 18.
5. Подключить установку к сети 220 В, установив вилку питающего провода в сетевую розетку.

Порядок работы на установке

Выполнение работы на установке необходимо осуществлять в следующей последовательности.

1. Выберите нужный образец для исследования.
2. Включите автоматические выключатели 23 (см. рис. 3.7) поставив ручки выключателей в положение ВКЛ, при этом загорится сигнальная лампочка 22.
3. Выведите ручку ЛАТРа выбранного канала в крайнее левое положение до совпадения меток.
4. Включите прибор «Сосна-004» выбранного канала, поставив соответствующий тумблер в положение «ВКЛ».
5. При включении прибора на его табло через некоторое время появится значение температуры на термопаре № 1, установленной в образце на внутренней трубе. Схема образца и расположение термопреобразователей (термопар) в нем показаны на рис. 3.8.
6. Дайте прогреться прибору в течение 15 минут.
7. Последовательным нажатием кнопки на приборе или в автоматическом режиме произведите опрос всех 10 точек измерения.
8. Включите нагреватель, поставив тумблер выбранного канала в положение «Вкл», при этом загорится соответствующая сигнальная лампочка.
9. С помощью ЛАТРа, перемещая его регулируемую ручку по часовой стрелке, установите по вольтметру необходимое напряжение на нагревателе.

10. О том, что нагреватель исправен, будет видно по амперметру, на котором появится показание тока, проходящего через нагреватель.

11. Установку оставьте включенной на время разогрева исследуемого образца и следите за изменением показания прибора по одной (можно по первой) термопаре до достижения стационарного температурного режима, за время выхода на стационарный режим, периодически просматривайте по прибору все 10 точек измеряемой температуры.

12. После достижения стационарного режима (в течение 10 мин температура образца не меняется) через каждые 1–2 минуты определите показания термопар для трех образцов и результаты измерений занесите в табл. 3.5.

13. После окончания работ установите ручку ЛАТРа в исходное положение, повернув ее против часовой стрелки до упора, выключите питание нагревателя, выключите термоизмерительный прибор.

Температура измеряется с помощью преобразователей термоэлектрических ТХК-1199 и регистрируется на приборе «Сосна-004» как в ручном режиме, так и в автоматическом.

Установка позволяет производить исследования также с помощью компьютера. Измеренные термоизмерительным прибором «Сосна-004» показания ТХК-1199 сохраняются в виде файла и одновременно отображаются на экране.

При проведении лабораторных работ на установке с компьютером необходимо:

- соединить СОМ-порт компьютера с СОМ-портом прибора «Сосна-004» специальным кабелем;
- провести подготовку установки согласно настоящей инструкции при проведении лабораторных работ;
- включить компьютер;
- запустить файл: В:\Теплопроводность\теплопроводность. exe;
- после запуска программы установить интервал опроса 60 секунд и нажать кнопку «Установить».

Таблица 3.5

Таблица для занесения результатов эксперимента

№, п/п	Показание амперметра, I , А	Показание вольтметра, U , В	Показания термомпар, °С									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-й образец												
Ср. знач.												
2-й образец												
Ср. знач.												
3-й образец												
Ср. знач.												

Методика определения коэффициента теплопроводности

Коэффициентом теплопроводности называется количество тепла, которое передается в единицу времени через систему поверхностью в 1 м^2 и толщиной 1 м при падении температуры на $1\text{ }^\circ\text{С}$. Обозначается он буквой λ и имеет размерность $\text{Вт/м}\cdot^\circ\text{С}$.

Коэффициент теплопроводности вводится при теплообмене в неподвижных средах и определяется молекулярным способом переноса энергии. Он зависит от природы материала, его физического состояния, влажности, температуры и давления.

При установившемся тепловом состоянии системы (стационарном режиме) все тепло Q , выделившееся от источника тепла, проходит через неподвижный материал и отдается во внешнюю среду. Измеряя количество тепла Q , зная температуру поверхности тела t_1 и t_2 , его длину l и диаметры слоев d_1 и d_2 можно определить коэффициент теплопроводности следующим образом:

$$\lambda = \frac{Q \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{d_1}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot l (t_1 - t_2)}, \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}, \quad (3.18)$$

где λ – эффективный коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/м·°C;

Q – тепловой поток, Дж/с = Вт;

d_1 и d_2 – соответственно внутренний и наружный диаметры трубы, м;

t_1 и t_2 – температуры наружной и внутренней поверхностей, °C;

l – длина трубы, м.

Обработка результатов эксперимента

1. Определить количество тепла, выделившееся от электрического нагревателя Q , равное его мощности.
2. По средним значениям температур по формуле (3.18) подсчитать коэффициенты теплопроводности трех образцов.
3. С помощью табл. ПЗ определить, к каким теплоизоляционным материалам относятся исследуемые образцы.
4. Определить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы называют теплоизоляционными?
2. Какими свойствами должны обладать теплоизоляционные материалы?
3. Для чего предназначена тепловая теплоизоляция?
4. Какие виды тепловой изоляции применяются в технике?
5. Что называется коэффициентом теплопроводности?
6. Как определить коэффициент теплопроводности?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ВОДОВОДЯНОМ ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ

Цель работы – испытать водоводяной теплообменный аппарат при различных режимах его работы и при разных схемах включения и определить его тепловую мощность, коэффициенты теплопередачи, тепловую эффективность и число переноса единицы вещества на каждом из режимов.

Общие сведения

Процесс переноса теплоты от одной среды к другой через стенку называется теплопередачей.

Тепловой поток при теплопередаче рассчитывается по формуле

$$Q = KF(t_1 - t_2), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где F – площадь поверхности стенки, м^2 ;

t_1, t_2 – соответственно температуры горячей и холодной среды, °C ;

K – коэффициент теплопередачи, характеризующий интенсивность переноса теплоты от одной среды к другой через разделяющую их стенку. Он численно равен количеству теплоты, передаваемому в единицу времени через единицу поверхности стенки от одной среды к другой при разности температур между ними в один градус.

В зависимости от формы стенки, разделяющей горячую и холодную среды, значение Q может быть отнесено к единице поверхности, единице длины или единице объема. При этом изменится единица измерения коэффициента теплопередачи.

При передаче теплоты через цилиндрическую однородную стенку

$$Q = \frac{F(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}},$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи горячего и холодного теплоносителей, Вт/(м²·°С); ориентировочные значения коэффициента теплоотдачи в промышленных теплообменных устройствах приведены в табл. П4;

λ – коэффициент теплопроводности поверхности, Вт/(м·°С);

d_1, d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрической поверхности, м;

l – длина поверхности теплообмена, м.

Линейный коэффициент теплоотдачи

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}.$$

Плотность теплового потока через единицу длины цилиндрической поверхности

$$q_l = K_l F (t_1 - t_2).$$

Теплообменные аппараты

Теплообменным аппаратом называется устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя или несколькими теплоносителями, либо между теплоносителями и твердыми телами (насадкой, стенкой).

По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

Рекуперативными называют аппараты, в которых одновременно протекают горячий и холодный теплоносители, разделенные между собой твердой стенкой. К числу таких аппаратов относятся воздухо- и водоподогреватели, пароперегреватели, конденсаторы, воздухо- и газоохладители, маслоохладители и т.д.

Регенеративными называют аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева попеременно омывается то горячей, то холодной жидкостью. При этом теплота, аккумулированная стенками аппарата при их взаимодействии с горячей жидкостью, отдается холодной жидкости.

Примером регенеративных аппаратов являются воздухоподогреватели котельных агрегатов, мартеновских и доменных печей и т.д.

Рекуперативные и регенеративные аппараты называют также поверхностными, так как процесс передачи теплоты в них неизбежно связан с поверхностью твердого тела.

Смесительными являются аппараты, в которых передача теплоты осуществляется при непосредственном смешивании горячей и холодной жидкости.

Взаимное движение теплоносителей в теплообменных аппаратах может быть различным (рис. 3.10).

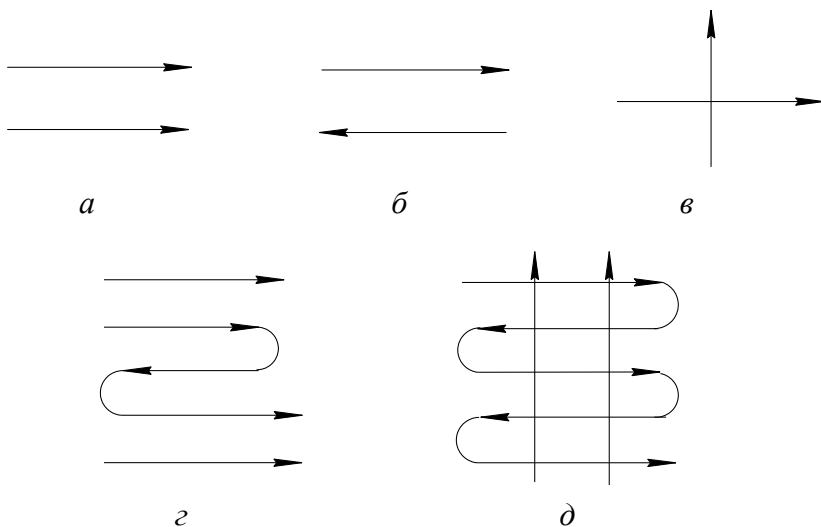


Рис. 3.10. Схема движения теплоносителей в рекуперативных теплообменных аппаратах

Если теплоносители протекают параллельно в одном направлении, то такая схема движения называется прямотоком (рис. 3.10, а). При противотоке теплоносители движутся параллельно, но навстречу друг другу (рис. 3.10, б). Применяются и другие схемы – перекрестный ток (рис. 3.10, в) и более сложные: одновременно прямоток и противоток (рис. 3.10, г); многократно перекрестный ток (рис. 3.10, д) и др.

В основу теплового расчета теплообменных аппаратов положены уравнения теплового баланса

$$Q = M_1 C_p (\overset{\cdot}{t}_1 - \overset{\cdot\cdot}{t}_1) = MC_p (\overset{\cdot\cdot}{t}_2 - \overset{\cdot}{t}_2), \quad (3.19)$$

где M – массовый расход теплоносителя, кг/с;

C_p – удельная массовая изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг град. Штрих соответствует температуре жидкости на входе в аппарат, а два штриха – на выходе.

Уравнение теплопередачи записывается как:

$$Q = K(t_1 - t_2),$$

где t_1, t_2 – температуры первичного и вторичного теплоносителей.

При теплообмене в большинстве случаев изменяются температуры обоих теплоносителей и, следовательно, изменяется температурный напор

$$\Delta t = t_1 - t_2.$$

При вычислении среднего температурного напора необходимо учитывать характер изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.

Если теплоносители одинаковы, например, в водоводяном теплообменнике, то характер изменения температур теплоносителей будет всецело определяться их расходами.

При прямотоке конечная температура t_2'' нагреваемой среды всегда меньше температуры t_1'' греющей среды на выходе из аппарата (рис. 3.11), а при противотоке конечная температура t_2'' может быть выше температуры t_1'' . Следовательно, при одинаковой начальной температуре нагреваемую среду при противотоке можно нагреть до более высокой температуры, чем при прямотоке.

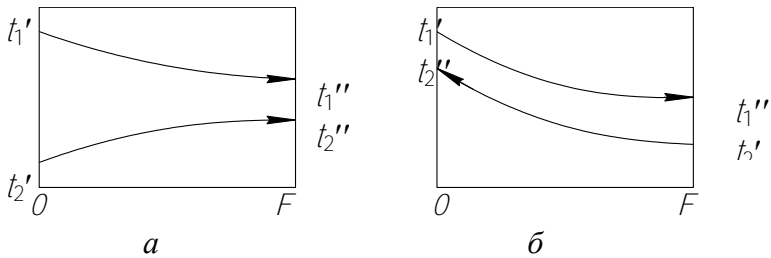


Рис. 3.11. Характер изменения температур рабочих жидкостей по длине теплообменника при прямотоке и противотоке

Средний температурный напор может быть вычислен по формуле

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (3.20)$$

где $\Delta t_{\text{б}}$ – большая разность температур между горячим и холодным теплоносителем (на входе в теплообменник);

$\Delta t_{\text{м}}$ – меньшая разность температур между горячим и холодным теплоносителем (на выходе из теплообменника).

Эта средняя разность температур называется среднелогарифмическим температурным напором.

При $\Delta t_{\text{б}} / \Delta t_{\text{м}} < 2$ среднюю разность температур можно вычислять как среднеарифметическую

$$\Delta t_{\text{a,cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}. \quad (3.21)$$

Описание установки

Установка по определению коэффициента теплопередачи в водоводяном теплообменном аппарате УОКТ-2 разработана лабораторией терморегулирования Институтом тепло- и массообмена НАН Беларуси и кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета.

Установка УОКТ-2 (рис. 3.12) состоит из следующих узлов.

1. Стойка.
2. Теплообменник прямоточный.
3. Теплообменник противоточный.
4. Водонагреватель ЭВАС-10/1,6.
5. Панель приборная.
6. Пульт управления.
7. Насос UPS 25-40-180 фирмы Grunfoss.

Все узлы закреплены на стойке 1 и соединены между собой трубопроводами и запорной арматурой (вентили 8, 9, 10, 11).

Теплообменники прямоточный и противоточный (рис. 3.12), выполнены из труб нержавеющей стали. Диаметр внутренней трубы равен 10,0 мм, а диаметр наружной трубы – 22 мм. Толщина стенок труб – 1 мм. Длина теплообменника равна 1000 мм. Площадь теплообменной поверхности – 0,0314 м².

Приборная панель содержит расходомеры горячей воды 12, 13 и расходомеры холодной воды 14, 15.

Пульт управления содержит измерительный прибор ИР «Сосна-002» 16 и тумблера включения сети, прибора и насоса.

Прибор ИР «Сосна-002» предназначен для измерения температуры и оснащен термopарами. Места крепления термopар в установке указаны символами а, б, в, г, д, е, ж, з.

Насос UPS 25-40-180 фирмы Grunfoss оснащен электродвигателем с мокрым ротором и защищенным статором без сальниковых уплотнений, с двумя уплотнительными кольцами.

Подшипники смазываются перекачиваемой жидкостью. Насос с 3-ступенчатым переключателем частоты вращения. Корпус насоса выполнен с отверстием под воздухоудалитель. Внешний вид насоса и его напорная характеристика приведены на рис. 3.13.

Насос оснащен ручным 3-ступенчатым регулятором скорости вращения, каждой из которых соответствует своя напорная характеристика.

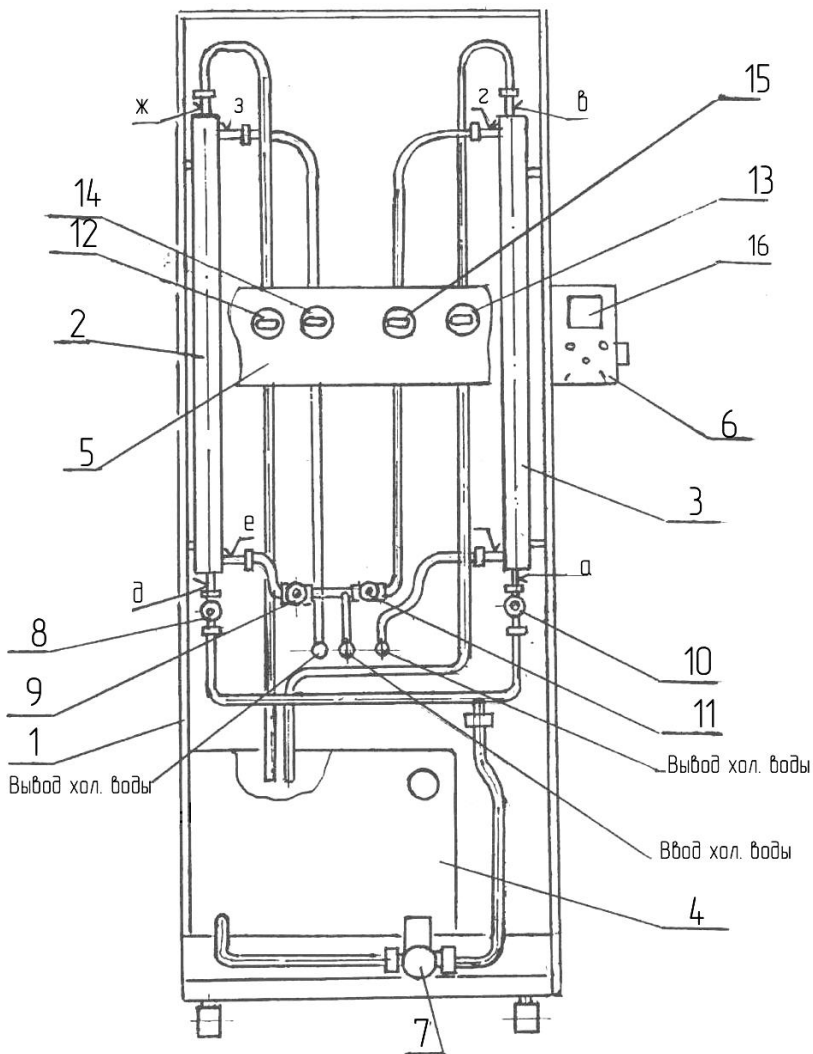
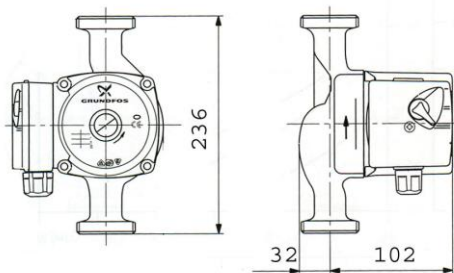
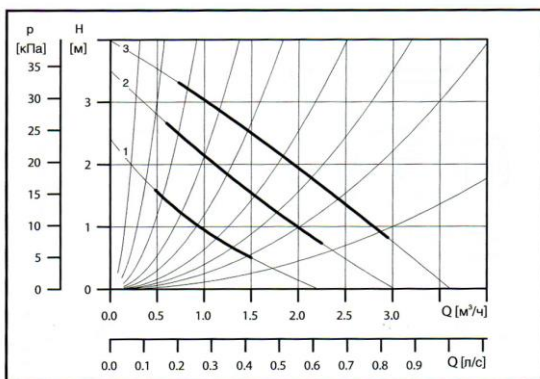


Рис. 3.12. Схема экспериментальной установки



a



б

Рис. 3.13. Внешний вид насоса UPS 25-40-180 (*a*) и его напорная характеристика (*б*)

Технические характеристики установки

1. Габариты:

- длина, мм, – 860;
- ширина, мм, – 760;
- высота, мм, – 2100.

2. Рабочее напряжение, В, –

220.

3. Мощность нагревателя ЭВАС, кВт, –

1,6.

4. Насос/расход, м³/ч, –

2,4; 6.

5. Время разогрева установки до 80 °С, мин, –

60

6. Максимальная температура, °С, –

85.

Подготовка установки к работе

Перед началом проведения работ на установке необходимо произвести следующие действия.

1. Убедиться в надежности крепления рукавов подвода и отвода холодной воды.
2. Залить (долить) воду в водонагреватель от 8 до 10 л.
3. Подключить стенд к сети 220 В.

Работа установки

На установке УОКТ-2 установлены два теплообменника, работающих по принципу «труба в трубе» (рис. 3.14). Один подключен в режиме прямотока, другой – в противотоке.

Благодаря такому устройству установка УОКТ-2 может работать в нескольких режимах:

- 1) исследование прямоточного теплообмена;
- 2) исследование противоточного теплообмена;
- 3) одновременное исследование противоточного и прямоточного теплообмена.

При этом необходимая температура горячей воды регулируется терморегулятором водонагревателя 5, а расход – вентилями 8, 11 и переключателем насоса 7, регистрируется счетчиками горячей воды 12 и 13. Расход холодной воды регулируется вентилями 9 и 10 и регистрируется счетчиками холодной воды 14 и 15.

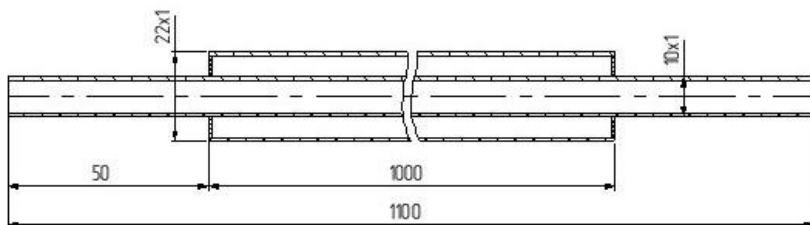


Рис. 3.14. Водоводяной теплообменный аппарат типа «труба в трубе»

Температура измеряется с помощью преобразователей термоэлектрических ТХК-1199 и регистрируется на приборе «Сос-

на-002» при нажатии клавиши в ручном режиме или автоматически. Установка позволяет проводить исследования с помощью компьютера.

Измеренные термоизмерительным прибором показания датчиков ТХК-1199 сохраняются в виде факта, и одновременно на экране строятся графики изменения температуры от времени. При проведении лабораторной работы на установке с компьютером необходимо:

– при выключенных установке и компьютере соединить COM-порт компьютера с COM-портом прибора «Сосна-002» специальным кабелем, подготовить установку к проведению исследований согласно настоящей инструкции;

- включить компьютер;
- запустить файл: D: UOKT UOKT.exe;
- ввести имя файла, например: лаб/Иванов.

Электрическая схема установки показана на рис. 3.15.

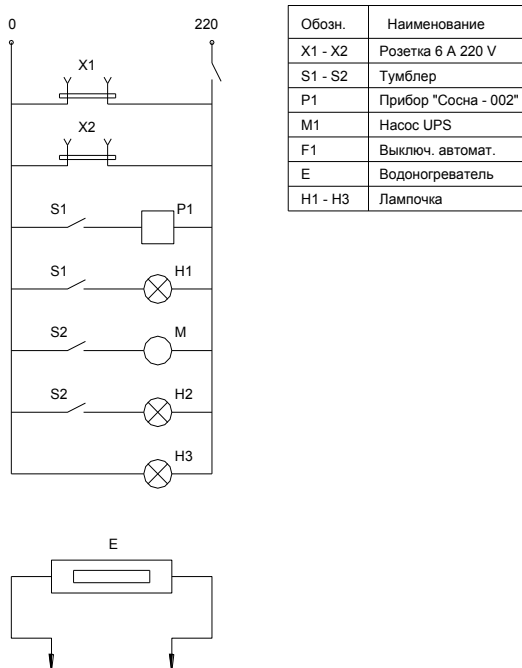


Рис. 3.15. Электрическая схема установки

Порядок проведения работы

1. Перед пуском установки в работу необходимо визуально убедиться в наличии достаточного количества воды в водонагревателе 4.

2. Открываются вентили 9, 11 для подачи холодной (водопроводной) воды через теплообменники. Вентили остаются в неизменном положении до окончания опыта. Контроль наличия расхода холодной воды осуществляется по расходомерам 14, 15.

3. Открываются вентили 8, 10, включается насос 7 для подачи теплоносителя из водонагревателя 4 через теплообменники 2, 3. Контроль наличия расхода греющего теплоносителя осуществляется по расходомерам 12, 13. Положение переключателя частоты вращения насоса определяется в соответствии с вариантом (табл. 3.6), заданным преподавателем.

4. Включается водонагреватель 4. Положение регулятора мощности водонагревателя определяется в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

5. Засекается время опыта – 20 минут. Фиксируются показания расходомеров 12, 13, 14, 15 на начало опыта.

6. Через 20 минут фиксируются значения температур греющего теплоносителя и нагреваемой среды на входе и выходе из теплообменников. Фиксируются показания расходомеров 12, 13, 14, 15. Результаты опытов отображаются на экране персонального компьютера. Графики перерисовываются студентами в отчет о лабораторной работе.

7. Определяются объемные расходы греющего теплоносителя и нагреваемой среды через оба теплообменника как частное от разности показаний расходомеров и времени продолжительности опытов.

Таблица 3.6

Варианты выполнения лабораторной работы

Номер варианта	Положение переключателя частоты вращения насоса	Положение регулятора мощности водонагревателя
1	1	1
2	2	2
3	3	1
4	1	2
5	2	1
6	3	2

Обработка результатов испытаний

1. Определить по формулам (3.20) и (3.21) средний температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$.

2. Определить количество передаваемой теплоты по формуле (3.19)

$$Q = GC_p(t_2'' - t_2'), \text{ Вт,}$$

где $C_p = 4186 \text{ Дж/кг град.}$

3. Определить коэффициент теплопередачи по формуле

$$K = \frac{Q}{F\Delta t_{\text{ср}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

4. По полученному значению расхода воды определяется рабочая точка насоса на его напорной характеристике. Напорная характеристика и полученная рабочая точка зарисовываются студентами в отчет о лабораторной работе.

Содержание отчета

В отчете должны быть приведены краткие сведения о процессе теплопередачи, теплообменных аппаратах, схемах, описание и рисунок установки.

Должны содержаться результаты измерений и расчетов, графики изменения температуры теплоносителей в теплообменнике.

Ответы на контрольные вопросы.

Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое теплопередача?
2. Что характеризует коэффициент теплопередачи?
3. Как подразделяются теплообменные аппараты по принципу действия?
4. Какие применяются схемы движения теплоносителей?
5. Какие уравнения положены в основу расчета теплообменных аппаратов?
6. Что такое температурный напор и как он определяется?
7. Чем отличается теплоотдача от теплопередачи?

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы – экспериментальное определение зависимости температуры кипения воды от давления $t_{\text{н}} = f(p)$ в интервале температур от 0 до 100 °С, анализ зависимости $t_{\text{н}} = f(p)$, полученной экспериментальным путем, и установление характера этой зависимости.

Общие сведения

В практике теплотехнического эксперимента различают *абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление*.

Давление, создаваемое жидкостью или газом внутри сосуда, называется *абсолютным*. Снаружи на стенки сосуда давит атмосферный воздух. Следовательно, стенки сосуда находятся под воздействием *избыточного давления*, т.е. разности внутреннего и наружного давления.

Абсолютное давление жидкости или газа, называемое просто давлением жидкости или газа, является одной из величин, характеризующих их физическое состояние. Таким образом, *абсолютное давление* есть полное давление, испытываемое газом или жидкостью, равное сумме избыточного и атмосферного давлений:

$$P = p_{\text{изб}} + p_{\text{б}}, \quad (3.22)$$

где P – абсолютное давление;

$p_{\text{изб}}$ – избыточное давление;

$p_{\text{б}}$ – давление окружающей среды (наружного воздуха).

Если абсолютное давление меньше атмосферного, то в этом случае стенки сосуда испытывают разность давления окружающей среды и абсолютного давления в сосуде. Такое давление называют вакуумметрическим:

$$p_{\text{в}} = p_{\text{б}} - P, \quad (3.23)$$

где $p_{\text{в}}$ – вакуумметрическое давление (разряжение).

Приборы, предназначенные для измерения абсолютного давления и избыточного давления, называются манометрами, для измерения атмосферного давления – барометрами, для измерения разряжения – вакуумметрами. Для измерения разности давлений используют дифференциальные манометры (дифманометры).

В Международной системе единиц (СИ) единицей давления является паскаль (Па). Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м², расположенной перпендикулярно направлению силы (1 Па = 1 Н/м²). С целью сокращения значащих цифр используют также кратные единицы от СИ, например МПа = 10⁶ Па, кПа = 10³ Па.

Используются также внесистемные единицы измерения давления: техническая атмосфера (ат), равная кгс/см²; миллиметр водяного столба (мм вод. ст.); миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.), отнесенные к нормальным условиям: для воды к 4 °С, для ртути к 0 °С и нормальному ускорению свободного падения, равному 9,80665 м/с². Соотношения между единицами давления приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Соотношения между единицами давления

Единица	Па	ат (кгс/см ²)	мм вод. ст.	мм рт. ст.	бар	атм
1 Па	1	0,10197·10 ⁻⁴	0,10197	7,5006·10 ⁻³	10 ⁻⁵	9,869·10 ⁻⁶
ат (кгс/см ²)	9,80665·10 ⁴	1	10 ⁴	735,56	0,9807	0,986
мм вод. ст.	9,80665	10 ⁻⁴	1	73,56·10 ⁻³	9,806·10 ⁻⁵	9,68·10 ⁻⁵
мм рт. ст.	133,322	13,595·10 ⁻⁴	13,595	1	1,333·10 ⁻³	1,316·10 ⁻³
бар	100 000	1,02	10197	750,06	1	0,987
1 атм	101352	1,033	10332	760	0,013	1

Процесс кипения жидкости, сопровождающийся парообразованием во всей массе, начинается при некоторой температуре t_n , которая называется температурой кипения (насыщения).

Эта температура зависит от давления среды, в которой происходит процесс кипения. Связь между температурой кипения и внешним давлением для водяного пара в интервале температур от 0 до 100 °С выражается эмпирическим уравнением вида

$$\lg P = \left[-3,142 \frac{10^3 - 10^2}{t_n} + 8,2 \cdot \lg \frac{373,15}{t_n} - 0,00248 \cdot (373,15 - t_n) + 4,224 \right] \cdot 9,81, \text{ Па,}$$

где t_n – температура насыщения, °С.

На основании таких уравнений составлены таблицы параметров состояния воды на линии насыщения.

Абсолютное давление, при котором происходит кипение воды, определяется по формулам (3.22) и (3.23).

Описание установки

Установка (рис. 3.16) состоит из стойки 1, на которой смонтирована вакуумная камера для кипения жидкости 2 и закреплены приборная и информационная панели.

На приборной панели установлены прибор для измерения и регистрации температуры «Сосна-003» 3, вольтметр 4 и амперметр 5.

На информационной панели расположены тумблер, сигнальная арматура и неоновая лампочка включения подсветки поз. 6, 7, тум-

блер, сигнальная арматура и неоновая лампочка включения нагревателя поз. 8, 9, тумблер, сигнальная арматура и неоновая лампочка включения прибора «Сосна-003» поз. 10, 11. Ниже установлен лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 12.

На нижней панели установки расположен автоматический выключатель, сигнальная арматура и неоновая лампочка сети поз. 13, 14.

Вакуумная камера для кипения, изображенная на рис. 3.17, состоит из корпуса 15, электронагревателя 16, смотрового окна 17, лампочки подсветки 18, датчика температуры 19, мановакуумметра 20, вакуумного вентиля заправочного 21 и предохранительного клапана 22.

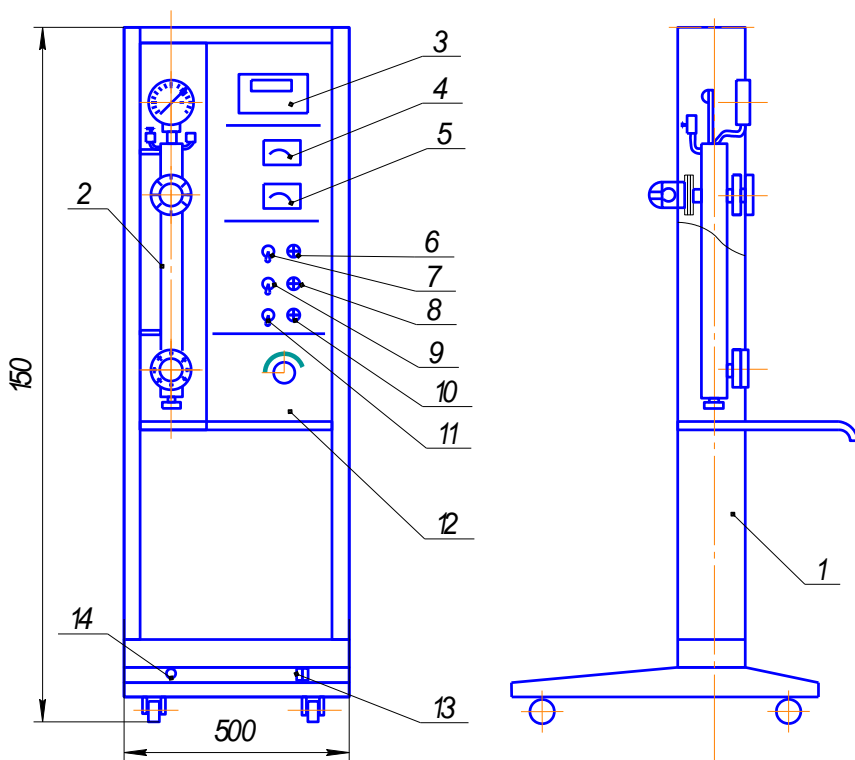


Рис. 3.16. Схема установки для изучения зависимости температуры кипения от давления

Подготовка вакуумной камеры для кипения жидкости к работе

Подготовка вакуумной камеры для кипения жидкости к работе производится в процессе наладки и установки. Подготовка состоит из следующих операций.

1. Залить в камеру дистиллированную воду через заправочный вентиль 21 (рис. 3.17) до верхнего уровня смотрового окна 17.

2. Закрыть заправочный вентиль.

3. Включить тумблер поз. 8 нагревателя поз. 16 и с помощью ЛАТРа подать напряжение 50 В и довести температуру дистиллированной воды в камере до температуры 105 °С и давления 115 кПа. Напряжение контролируется с помощью вольтметра 4 (рис. 3.16), температура – с помощью прибора «Сосна-003» поз. 3 (рис. 3.16), давление – по мановакуумметру поз. 20 (рис. 3.17).

4. Открыть вентиль поз. 21 (рис. 3.17), выпустить неконденсирующийся газ и закрыть вентиль. Вакуумная камера готова к работе на установке.

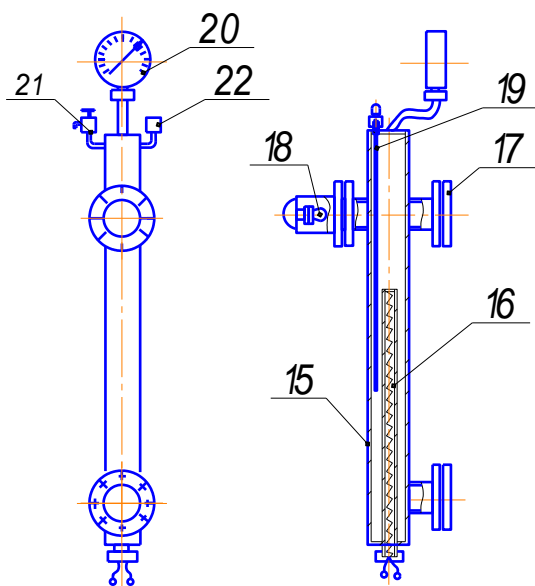


Рис. 3.17. Вакуумная камера для кипения жидкости

Принципиальная электрическая схема установки изображена на рис. 3.18.

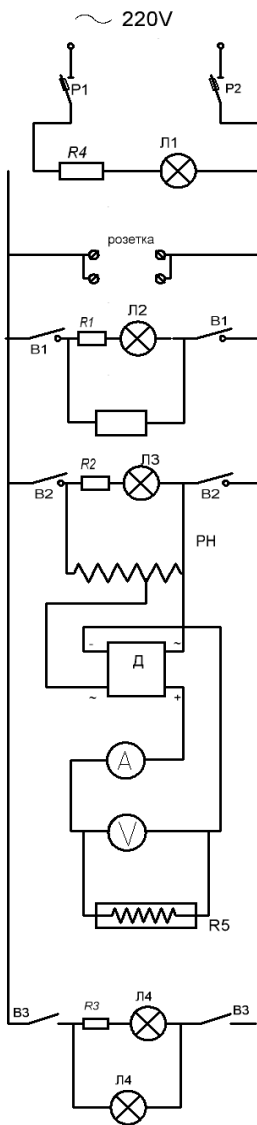


Рис. 3.18. Принципиальная электрическая схема установки

№ п/п	Наименование	Обоз.	Кол-во
1	Автотрансформатор	P1, P2	2
2	Сопротивление	R1-R4	4
3	Розетка		2
4	Лампа неоновая	Л1-Л5	5
5	Прибор «Сосна-004»	П	1
6	Тумблер ТВ1-2	В1-В3	3
7	ЛАТР	РН	1
8	Диодный мостик	Д	1
9	Амперметр	А	1

Подготовка установки к работе

Перед началом работы на установке обслуживающему персоналу необходимо произвести следующие действия.

1. Проверить наличие и качество крепления заземляющего провода.
2. Установить автоматические выключатели *13* (см. рис. 3.16) в положение «Выкл».
3. Установить тумблера поз. *6, 8, 10* (см. рис. 3.16) в положение «Выкл».
4. Проверить наличие вакуума по показанию мановакуумметра. Произвести подключение установки к сети 220 В.

Выполнение работы

Установка может работать в трех режимах.

1. Установив на нагревателе с помощью ЛАТРа фиксированное напряжение (до 30 В по вольтметру), доводим жидкость до кипения. При выходе на стационарный режим фиксируем температуру по прибору «Сосна-003», а давление – по мановакуумметру.
2. С помощью ЛАТРа подаем на нагреватель повышенное напряжение (50 В по вольтметру) и нагреваем жидкость до кипения при температуре 95 °С. Отключаем нагреватель и в процессе остывания жидкости фиксируем температуру по прибору «Сосна-003», а давление – по мановакуумметру.
3. С помощью ЛАТРа ступенчато (10 В; 20 В; 30 В) подаем напряжение на нагреватель и в процессе кипения жидкости одно-

временно фиксируем температуру по прибору «Сосна-003», а давление – по мановакуумметру.

Во всех случаях процесс кипения наблюдается визуально через смотровое окно с подсветкой.

Пределы измерений напряжения на электрическом нагревателе указываются руководителем работы. Для точности построения графика зависимости температуры насыщения от давления $t_n = f(p)$ необходимо получить не менее 5 экспериментальных точек.

Результаты измерений заносятся в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Таблица для занесения результатов измерений

№ п/п	Напряжение U , В	Температура кипения, t_n , °С	Давление, измеренное прибором, Па	Барометрическое давление, Па	Абсолютное давление, Па

Установка позволяет проводить исследования с помощью компьютера. Измеренные термоизмерительным прибором величины температур сохраняются в виде файла на компьютере.

При проведении лабораторных работ на установке с использованием компьютера необходимо провести следующие работы:

- при выключенных установке и компьютере соединить СОМ-порт компьютера с СОМ-портом термоизмерительного прибора специальным кабелем;
- провести подготовку установки к проведению исследований, как было описано выше;
- включить компьютер;
- запустить файл В:\Кипение\кипение.exe.
- после запуска программы установить интервал опроса 60 с и нажать кнопку «установить».

Обработка результатов опыта

1. Определить абсолютное давление, при котором происходит кипение жидкости по формулам (3.22) и (3.23).

2. По абсолютному давлению и температуре насыщения по точкам построить экспериментальный график зависимости температуры кипения воды от давления, т.е. $t_n = f(p)$. При построении графика по вертикальной оси откладывается температура в градусах, по горизонтальной – абсолютное давление в Па.

3. На этом же графике построить кривую зависимости температуры кипения воды по данным таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара и сделать выводы.

4. Оценить погрешность измерений, используя данные по классу точности приборов в табл. П2.

Контрольные вопросы

1. Что такое абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление?

2. В каких единицах измеряется давление, какие пересчетные коэффициенты?

3. Чему равно абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает 1,3 МПа, 12 кгс/см²?

4. Как определить абсолютное давление в дымовой трубе?

5. Что называется температурой кипения?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Физические параметры сухого воздуха при нормальном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\rho,$ кг/м ³	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	Pr
10	1,005	1,274	2,51	20,06	14,16	0,705
20	1,005	1,205	2,59	21,42	15,06	0,703
30	1,005	1,165	2,67	22,54	16,00	0,701
40	1,005	1,128	2,75	24,26	16,96	0,699
50	1,005	1,093	2,82	25,72	17,95	0,698
60	1,005	1,060	2,89	27,26	18,97	0,696
70	1,009	1,029	2,96	28,85	20,02	0,694
80	1,009	1,000	3,04	30,48	21,09	0,692
90	1,009	0,972	3,12	32,03	22,10	0,690
100	1,009	0,946	3,20	33,62	23,13	0,688
120	1,009	0,898	3,33	37,10	25,45	0,686
140	1,013	0,854	3,48	40,64	27,80	0,684
160	1,017	0,815	3,63	44,12	30,09	0,682
180	1,022	0,779	3,77	47,71	32,49	0,681
200	1,026	0,746	4,55	51,25	34,85	0,680

Таблица П2

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи
в промышленных теплообменных устройствах $\alpha, \text{Вт}/\text{м}^2 \text{град.}$

1	При нагревании и охлаждении воздуха	1–60
2	При нагревании и охлаждении перегретого пара	25–120
3	При нагревании и охлаждении масел	60–1750
4	При нагревании и охлаждении воды	230–11600
5	При кипении воды	580–52000
6	При пленочной конденсации водяных паров	4650–17500
7	При капельной конденсации водяных паров	46500–140000
8	При конденсации органических паров	580–2300

Таблица ПЗ

Табличные значения коэффициента теплопроводности λ , Вт/м·°С различных материалов при нормальных атмосферных условиях

Медь	392	Асбест	0,15–0,20
Латунь	110	Кирпич	0,33–0,49
Алюминий	230	Вата минеральная	0,045–0,055
Дюралюминий	160	Вермикулитовые листы	0,1
Чугун	64	Гипс строительный	0,35
Сталь	63	Картон строительный	0,13
Накипь котельная	1,3	Керамзит	0,2–0,3
Глина	1,1	Пенопласт	0,037–0,05
Бетон	0,693–1,205	Пеностекло	0,06–0,08
Стекло	0,655	Пенобетон	0,3
Вода	0,53	Пробка	0,031–0,037
Бумага	0,14	Песок 0 % влажности	0,33
Древесина	0,15	Стекловолокно	0,036
Водород	0,175	Шлак котельный	0,29
Углекислый газ	0,015	Изювер	0,015

Таблица П4

Метрологические характеристики измерительных приборов

№ п/п	Наименование	Класс точности	Предел измерений
1	Прибор для измерения температуры образца ИР «Сосна-004» с термопреобразователем типа ТХК-1199	0,5	0–200 мВ
2	Прибор для измерения температуры образца ИР «Сосна-003» с термопреобразователем типа ТХК-1199	0,5	0–200 мВ
3	Прибор для измерения температуры образца ИР «Сосна-002» с термопреобразователем типа ТХК-1199	0,5	0–200 мВ
4	Вольтметр Э 8032-М1 0-250В для измерения рабочего напряжения, подаваемого на образец	2,5	0–250 В
5	Амперметр для измерения потребляемого тока образцом Э 8030-М1 0-5А	2,5	0–5 А
6	Термопреобразователи типа ТХК-1199	0,5	0–800 °С
7	Мановакуумметр ДМ02-100	2,5	–
8	Вольтметр М4230	2,5	0–150 В
9	Амперметр М4230	2,5	0–5 А

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВО-ПОЖАРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	3
1. ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	4
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Средства измерений.....	5
1.3. Погрешности измерений.....	6
1.4. Метрологические характеристики средств измерений....	7
1.5. Оценка погрешностей при технических измерениях.....	8
1.6. Оценка случайных погрешностей при точных измерениях.....	10
1.7. Оценка погрешностей измерительных систем при технических измерениях.....	15
2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	17
2.1. Средние арифметические и средние квадратические отклонения.....	17
2.2. Закон распределения ошибок Гаусса.....	18
2.3. Взвешенное среднее.....	20
2.4. Сглаживание экспериментальных зависимостей по методу наименьших квадратов.....	21
2.5. Прямая выравнивания.....	23
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ.....	26
3.1. Основные понятия.....	26
3.2. Обобщение результатов эксперимента и моделирование	31
3.3. Основные критерии подобия.....	32
Лабораторная работа № 1. Изучение свободной конвекции.....	39
Лабораторная работа № 2. Теплоотдача горизонтального цилиндра при вынужденной конвекции (поперечное омывание воздухом).....	50
Лабораторная работа № 3. Теплоотдача горизонтального цилиндра при вынужденной конвекции (продольное омывание воздухом).....	53
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов.....	57
	91

Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента теплопередачи в водоводяном теплообменном аппарате.....	68
Лабораторная работа № 6. Определение зависимости температуры кипения от давления.....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	89

Учебное издание

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ.
ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

Лабораторный практикум
для студентов специальностей
1-43 01 01 «Электрические станции»,
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение»

С о с т а в и т е л и:

ГЕРАСИМОВА Алина Георгиевна
КАРНИЦКИЙ Николай Борисович
ПРОНКЕВИЧ Елена Васильевна и др.

Редактор И.Ю. Никитенко
Компьютерная верстка Д.А. Исаева

Подписано в печать 26.08.2010.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 5,41. Уч.-изд. л. 4,23. Тираж 100. Заказ 1202.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.