

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова

В. В. Р ы н д и н

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ И
ТЕПЛООБМЕНУ**

учебное пособие
для студентов неэнергетических специальностей

Павлодар
Кереку
2011

В. В. Рындин

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ И
ТЕПЛООБМЕНУ**

Учебное пособие
для студентов неэнергетических специальностей

Павлодар

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова

В. В. Рындин

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ И ТЕПЛООБМЕНУ

Учебное пособие
для студентов неэнергетических специальностей

Павлодар
Кереку
2011

УДК 621.1.016.7 (075.8)

ББК 31.31я 73

Р95

**Рекомендовано к изданию Ученым советом
Павлодарского государственного университета
им. С. Торайгырова**

Рецензенты:

Ю. Н. Вивденко – доктор технических наук, профессор Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ);

А. К. Каракаев – доктор технических наук, профессор Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова (ПГУ);

В. П. Белоглазов – кандидат технических наук, доцент Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Рындин В. В.

Р95 Лабораторный практикум по термодинамике и теплообмену : учебное пособие для студентов неэнергетических специальностей / В. В. Рындин. – Павлодар : Кереку, 2011. – 118 с.: ил.

ISBN

Учебное пособие включает в себя краткое описание экспериментальных установок и порядок выполнения лабораторных работ по курсам «Термодинамика и теплообмен», «Теплотехника», «Основы теплотехники», «Термодинамика и теплотехника».

Описаны способы измерения давления, температуры, расхода, теплоёмкости, влажности, теплопроводности, коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи. Приведена методика расчёта погрешностей при проведении экспериментов. Рассмотрены особенности терминологии и буквенных обозначений теплотехнических величин.

Учебное пособие рекомендуется студентам неэнергетических специальностей вузов.

УДК 621.1.016.7 (075.8)

ББК 31.31я 73

ISBN

© Рындин В. В., 2011

© ПГУ им. С. Торайгырова, 2011

За достоверность материалов, грамматические и орфографические ошибки
ответственность несут авторы и составители

Предисловие

Лабораторный практикум является учебным пособием для выполнения лабораторных работ по теоретическим основам теплотехники (термодинамике и теплообмену) студентами неэнергетических специальностей вузов. В основу лабораторного практикума положены работы автора [1, 2], дополненные и переработанные, а также работы других авторов [3 – 7]. При написании теоретической части практикума использовались работы [8 – 10].

Практикум включает в себя описание последовательности выполнения пяти лабораторных работ по термодинамике и трёх лабораторных работ по теории теплообмена. Кроме описания лабораторных работ и методических указаний по их выполнению в книге приведены краткие сведения из области теплотехнических измерений и даны рекомендации по терминологии, обозначению и выбору единиц теплотехнических величин.

Руководства по лабораторным работам начинаются с краткого введения в теорию теплотехнического эксперимента, без предварительного знания которой невозможно сознательное экспериментирование. Перед каждой работой имеется вводная часть, помогающая, наряду с лекционным материалом, освоить уже имеющиеся теоретические и экспериментальные данные по вопросам предстоящей работы. Далее в описании каждой работы излагаются: задачи и цель работы, описание установки, порядок проведения и обработки результатов измерений, оценка погрешности измерений и контрольные вопросы.

Перед приходом на лабораторные занятия студент должен изучить основы теплотехнического эксперимента и вводную часть к очередной лабораторной работе, дополнив эти краткие сведения материалом соответствующей лекции или чтением раздела рекомендованной литературы. Далее студент должен ознакомиться с описанием лабораторной установки. Студент может приступить к проведению опыта только после опроса по теории и сущности данной лабораторной работы.

Перед началом работы студентам необходимо пройти инструктаж по технике безопасности и правилам внутреннего распорядка в лаборатории.

Отчёт о проделанной работе оформляется каждым студентом согласно требованиям, указанным в конце работы, хранится у студента и предъявляется при сдаче зачёта или экзамена. Защита выполненной работы производится путём собеседования преподавателя со студентом и ответа последнего на контрольные вопросы, приведённые в конце работы.

1 Теоретические основы теплотехнического эксперимента

1.1 Подобие процессов теплообмена

Все стадии создания теплоэнергетических установок, двигателей наземных, плавающих и летательных аппаратов тесно связаны с большим объёмом научно-технических экспериментальных исследований. Отладка и настройка теплотехнических устройств производится исключительно опытным путём. При проведении экспериментальных исследований возникают следующие вопросы:

- 1) какие величины надо измерять в опыте?
- 2) как обрабатывать результаты опытов?
- 3) какие явления подобны изучаемому?

Ответ на эти вопросы даёт теория подобия – теория о подобии явлений – теория эксперимента. На первый вопрос отвечает первая теорема подобия: в опытах нужно измерять величины, содержащиеся в числах подобия изучаемого процесса. На второй вопрос ответ даёт вторая теорема подобия: результаты опыта следует обрабатывать в числах подобия; это позволяет найти общую закономерность, справедливую для всех процессов, подобных изучаемому. На третий вопрос ответ даёт третья теорема подобия: подобны те процессы или явления, у которых подобны условия однозначности и равны определяющие числа подобия. Благодаря этим ответам теория подобия по существу является теорией эксперимента.

Применительно к теплообменным аппаратам условия подобия можно сформулировать следующим образом:

- 1) геометрическое подобие элементов, составляющих газожидкостную систему теплообменного аппарата;
- 2) подобие физических параметров в сходных пространственно-временных точках системы теплообмена;
- 3) равенство критериев (чисел) подобия.

Числа подобия представляют собой безразмерные комплексы, составленные из величин, характеризующих данное явление. Числа подобия, равенство которых обеспечивает подобие процессов, называются **критериями подобия** или инвариантности (одинаковости числа). Согласно **первой теореме** подобия – подобные процессы имеют одинаковые числа (критерии) подобия.

Числа подобия принято обозначать первыми двумя буквами фамилий исследователей, внёсших значительный вклад в исследования в области гидродинамики и теории теплообмена, например, **Re** (Reynolds), **Nu** (Nusselt) и др.

Во многих случаях критерии подобия легко могут быть интерпретированы как отношение энергий, сил или однородных физиче-

ских величин.

Так, число **Рейнольдса**

$$\text{Re} = \frac{wd}{\nu} = \frac{\rho w l}{\mu} = \frac{\rho w^2 / 2}{0,5 \mu w / l} = \frac{P_{\text{дин}}}{0,5 \tau} \quad (1.1)$$

определяет гидродинамическое подобие течений теплоносителей (режим течения) и характеризует отношение сил инерции к силам вязкости (динамического давления к касательному напряжению).

$$\text{Число Прандтля} \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (1.2)$$

является теплофизической характеристикой теплоносителя и характеризует соотношение между полями скоростей и температур (здесь ν – кинематическая вязкость, которая характеризует молекулярный перенос импульса посредством внутреннего трения, а температуропроводность a характеризует молекулярный перенос тепла посредством теплопроводности; и первый обусловлен разностью скоростей, а второй – разностью температур).

$$\text{Число Нуссельта} \quad \text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{l}{\lambda / \alpha} \quad (1.3)$$

является **определяемым** (зависимым) **в критериальном уравнении числом подобия**, характеризующим связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока у стенки (из этого числа определяется **коэффициент теплоотдачи α**).

$$\text{Число Грасгофа} \quad \text{Gr} = \frac{g \beta \Delta T l^3}{\nu^2} \quad (1.4)$$

характеризует относительную эффективность подъёмной силы, вызывающей **свободно-конвективное движение** среды.

При исследовании капельных жидкостей теплоотдача оказывается различной в условиях нагрева и охлаждения. Для получения критериальных уравнений одинаково справедливых как для нагревания, так и для охлаждения жидкости, вводится дополнительно **параметрический критерий подобия** в виде соотношения

$$\text{Pr}_{\text{ж}} / \text{Pr}_{\text{с}},$$

где индекс «ж» показывает, что значение величины отнесено к температуре жидкости (газа), а «с» – к температуре стенки.

Согласно **второй теореме подобия** связь между размерными физическими величинами, характеризующими какой-либо процесс, может быть представлена в виде зависимости между числами подобия. Так как числа подобия для подобных процессов равны, то уравнения подобия будут тождественны для подобных процессов. Для того чтобы результаты отдельных опытов можно было распространить на все подобные ему процессы, **обработка результатов опытов** должна производиться **в числах подобия**; получаемые уравнения на-

зываются **критериальными уравнениями**.

Для конвективного теплообмена при свободно-вынужденном движении капельной жидкости уравнение подобия надо составлять в виде зависимости

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}, \text{Pr}_\text{ж}/\text{Pr}_\text{с});$$

для свободной конвекции газа

$$\text{Nu} = f(\text{Pr}, \text{Gr}) \quad (1.5)$$

и для вынужденной конвекции капельной жидкости

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Pr}_\text{ж}/\text{Pr}_\text{с}).$$

Для процессов теплообмена критериальное уравнение принято записывать в виде степенной зависимости типа:

$$\text{Nu} = C \text{Re}^m (\text{Gr Pr})^n (\text{Pr}_\text{ж}/\text{Pr}_\text{с})^k. \quad (1.6)$$

1.2 Определение погрешности результатов измерений

Оценка точности результатов опыта обязательна, так как полученные значения могут лежать в пределах возможной погрешности опыта, а выведенные закономерности – оказаться неясными и даже неверными. **Точность** есть степень соответствия результатов измерений действительному значению измеряемой величины. **Понятие точности** связано с **понятием погрешности**: чем выше точность, тем меньше погрешность измерений, и наоборот. Самые точные приборы не могут показать действительного значения величины, их показания содержат погрешность.

Разность между действительным значением измеряемой величины $A_\text{д}$ и измеренным $A_\text{изм}$ называется **абсолютной погрешностью** измерения. Практически под абсолютной погрешностью $\Delta(A)$ понимают разность между результатом измерения при помощи более точных методов или приборов высшей точности (образцовых) и значением этой величины, полученным прибором, применяемым в исследовании:

$$\Delta(A) = A_\text{д} - A_\text{изм} \approx A_\text{обр} - A_\text{изм}. \quad (1.7)$$

Абсолютная погрешность не может, однако, служить мерой точности, так как, например, $\Delta(X) = 0,5 \text{ мм}$ при $X = 100 \text{ мм}$ достаточно мала, но при $X = 1 \text{ мм}$ очень велика. Поэтому для оценки точности измерений вводится понятие **относительной погрешности** $\varepsilon(A)$, равной отношению абсолютной погрешности результата измерений к измеряемой величине

$$\varepsilon(A) = \frac{|\Delta(A)|}{A_\text{изм}} 100. \quad (1.8)$$

За меру **точности** измеряемой величины понимают величину,

обратную $\varepsilon(A)$. Следовательно, **чем меньше относительная погрешность $\varepsilon(A)$, тем выше точность измерений**. Например, если относительная ошибка измерений получена равной 2 %, то говорят, что измерения выполнены с погрешностью не более 2 % или с точностью не менее 0,5 %, или с точностью не менее $1/0,02 = 50$. Не следует использовать термин "точность" взамен терминов "абсолютная погрешность" и "относительная погрешность". Например, неправильно говорить "масса измерена с точностью $\pm 0,1$ мг", так как $\pm 0,1$ мг не точность, а абсолютная погрешность измерения массы.

Различают систематические, случайные и грубые погрешности измерений.

Систематические погрешности связаны в основном с погрешностями средств измерений и остаются постоянными при повторных измерениях.

Случайные погрешности вызываются неконтролируемыми обстоятельствами, например, трением в приборах. Случайные погрешности измерений можно выразить несколькими понятиями.

Под **предельной Δ_n (максимальной) абсолютной погрешностью** понимают такое её значение, при котором вероятность попадания погрешности Δ в интервал $|\Delta| < |\Delta_n|$ настолько велика, что событие можно считать практически достоверным. При этом лишь в отдельных случаях погрешность может выйти за пределы указанного интервала. Измерение с такой погрешностью называют грубым (или промахом) и при обработке результатов исключают из рассмотрения.

Значение измеряемой величины можно представить формулой

$$A_d = A_{\text{изм}} \pm |\Delta_n(A)|,$$

что следует читать так: истинное значение измеряемой величины находится в пределах от $A_{\text{изм}} - |\Delta_n(A)$ до $A_{\text{изм}} + |\Delta_n(A)$.

Способ обработки опытных данных зависит от характера **измерений**, которые могут быть **прямыми и косвенными, однократными и многократными**. Однократно производятся измерения величин, когда невозможно или затруднительно повторно произвести условия измерения. Обычно это имеет место при измерениях в производственных, а иногда и лабораторных условиях.

Значение измеряемой величины при однократном измерении прибором может отличаться от истинных значений не более чем на значение предельной погрешности, допускаемой классом точности прибора K ,

$$\Delta_n(A) = \frac{K \cdot A_{\text{ном}}}{100}. \quad (1.9)$$

Как следует из соотношения (1.9), **класс точности прибора**

выражает наибольшую допустимую погрешность $\varepsilon_{\text{п}}(A)$ в процентах от номинального значения $A_{\text{ном}}$ (предельного) шкалы прибора. Все приборы делят на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

Необходимо помнить о том, что класс точности прибора ещё не характеризует точность измерений, получаемую при пользовании этим прибором, так как **относительная погрешность измерения в начальной части шкалы больше** (точность меньше), **чем в конечной части шкалы** при почти неизменной абсолютной погрешности. Именно наличием этого свойства показывающих приборов объясняется стремление выбирать предел измерения прибора таким образом, чтобы в процессе эксплуатации прибора **отсчёт по шкале производился** в области между серединой шкалы и её конечной отметкой или, говоря другими словами, **во второй половине шкалы**.

Пример. Пусть ваттметром на 250 Вт ($P_{\text{ном}} = 250$ Вт) с классом точности $K = 0,5$ измерена мощность $P_{\text{изм}} = 50$ Вт. Требуется определить предельную абсолютную погрешность и относительную погрешность измерения. Для этого прибора в любой части шкалы допускаются абсолютная погрешность, равная 0,5 % от верхнего предела измерения, т. е. от 250 Вт, что составляет

$$\Delta_{\text{п}}(P) = \frac{K \cdot P_{\text{ном}}}{100} = 0,5 \cdot 250 / 100 = 1,25 \text{ Вт}.$$

Предельная относительная погрешность при измеренной мощности 50 Вт

$$\varepsilon_{\text{п}}(P) = \frac{\Delta_{\text{п}}(P)}{P_{\text{изм}}} 100 = \frac{1,25}{50} 100 = 2,5 \text{ \%}.$$

Из этого примера видно, что класс точности прибора ($K = 0,5$) и предельная относительная погрешность измерения в произвольной точке шкалы прибора (в примере 2,5 % для 50 Вт) в общем случае не равны (они равны только для номинального значения шкалы прибора).

К косвенным измерениям обращаются, когда прямые измерения искомой величины R неосуществимы или затруднены. **Косвенные измерения** сводятся к измерению независимых величин A, B, C, \dots , связанных с искомой величиной функциональной зависимостью $R = f(A, B, C \dots)$.

Предельная относительная погрешность косвенных измерений величины равна дифференциалу её натурального логарифма, причём следует брать **сумму абсолютных значений** всех членов такого выражения (брать со знаком плюс):

$$\varepsilon_{\text{п}}(R) = \frac{\Delta_{\text{п}}(R)}{R} 100 = \pm d[\ln f(A, B, C \dots)] 100 \quad (1.10)$$

При теплотехнических экспериментах для определения теплопроводности материала λ , коэффициентов теплоотдачи α и теплопередачи k прибегают к косвенным измерениям. В качестве примера рассмотрим вычисление предельной относительной погрешности при косвенном измерении теплопроводности λ .

Теплопроводность материала по методу цилиндрического слоя выражается уравнением

$$\lambda = \frac{\Phi \ln(d_2 / d_1)}{2\pi l(T_1 - T_2)}.$$

Логарифм этой функции имеет вид

$$\ln \lambda = \ln \Phi + \ln \left(\ln \frac{d_2}{d_1} \right) - \ln 2\pi - \ln l - \ln(T_1 - T_2)$$

а дифференциал с учётом правила знаков (всё берётся с плюсом)

$$\begin{aligned} d \ln \lambda &= d\lambda / \lambda = d\Phi / \Phi + d(\ln d_2 - \ln d_1) / \ln \frac{d_2}{d_1} + d l / l + d(T_1 - T_2) / (T_1 - T_2) = \\ &= d\Phi / \Phi + \left[\frac{d d_2}{d_2} + \frac{d d_1}{d_1} \right] / \ln \frac{d_2}{d_1} + dl / l + (dT_1 + dT_2) / (T_1 - T_2). \end{aligned}$$

Тогда относительная погрешность измерения теплопроводности материала, считая $\Delta d_1 \cong \Delta d_2 = \Delta d$ и $\Delta T_1 \cong \Delta T_2 = \Delta T$, определится выражением

$$\varepsilon_{\text{п}}(\lambda) = \Delta \lambda / \lambda = \Delta \Phi / \Phi + \Delta l / l + 2\Delta T / (T_1 - T_2) + \frac{2\Delta d}{d_1} / \ln \frac{d_2}{d_1}. \quad (1.11)$$

Абсолютная погрешность измерения длины и диаметра трубы принимается равной половине цены наименьшего деления шкалы линейки или штангенциркуля, температуры ΔT и теплового потока $\Delta \Phi$ – по показаниям соответствующих приборов с учётом их класса точности.

При определении значений случайных погрешностей, кроме предельной погрешности вычисляют статистическую погрешность неоднократных (нескольких) измерений. Эту погрешность устанавливают после измерений при помощи методов математической статистики и теории ошибок.

В качестве приближённого значения измеряемой величины теория ошибок рекомендует использовать среднее арифметическое $A_{\text{ср}}$:

$$A_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n A_i / n = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n}, \quad (1.12)$$

где n – число измерений величины A .

Для оценки достоверности результатов измерений, принимаемых равными среднему значению $A_{\text{ср}}$, служит **среднее квадратичное отклонение результата нескольких измерений** (среднего арифмети-

ческого)

$$\sigma_{A_{cp}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A_{cp})^2}{n(n-1)}}. \quad (1.13)$$

Среднее квадратичное отклонение отдельного измерения (или стандарт) получается больше среднего квадратичного отклонения среднего арифметического и определяется выражением

$$\sigma = \sqrt{n} \sigma_{A_{cp}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A_{cp})^2}{(n-1)}}. \quad (1.14)$$

Статистическая погрешность среднего арифметического значения (результата измерения) при малом числе наблюдений ($n \leq 20$) и заданной доверительной вероятности P определяется по формуле

$$\Delta_n(A_{cp}) = t_p \sigma_{A_{cp}}. \quad (1.15)$$

Значения t_p для наиболее употребительного интервала доверительных вероятностей P и различных n приведены в таблице П-4-1 [11], которая основана на распределении Стьюдента. Выбор значений доверительной вероятности P зависит от вида измерений. При исследовании закономерностей в самом общем виде (без деталей), например, характера кривых развития явления, достаточна доверительная вероятность $P = 0,68$. Для измерений, связанных с конструкцией машин, вполне достаточна вероятность $P = 0,90$. При определении деталей закономерностей и значений величин, являющихся основой для дальнейшего расчёта, необходима доверительная вероятность $P = 0,99$. Для доверительной вероятности $P = 0,99$ по таблице П-4-1 находим для четырёх опытов $t_p = 5,84$ и при пяти опытах $t_p = 4,6$.

В практических исследованиях чаще всего пренебрегают возможностью отклонений от среднего, больших $3\sigma_{A_{cp}}$ (**правило трёх сигм**). В этом случае истинное значение результата нескольких измерений определяется выражением

$$A = A_{cp} \pm 3\sigma_{A_{cp}}. \quad (1.16)$$

1.3 Физические величины и их единицы

1.3.1 Понятие о физической величине (ФВ). В настоящее время под физической величиной понимают различные понятия – **свойство** объекта (сам объект) и количественную **характеристику** этого **свойства**. Например, в ГОСТе по метрологии [12] и в справочном пособии по физическим величинам [13] даются соответственно такие определения: «Физическая величина – **свойство**, общее в качественном отношении многим **физическим объектам** (физическим си-

стемам, их соотношениям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта» и «Физическая величина (в отличие от математической) – **характеристика** одного из **свойств** физического **объекта** (физической системы, явления или процесса), общая в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта».

Поскольку в состав физической величины входит «чистое число» – продукт человеческого ума, предмет из мира идей, – то и саму физическую величину следует отнести к предметам из мира идей. Следовательно, **физическая величина (ФВ)** – **количественная характеристика** одного из **свойств** физического объекта (системы, явления или процесса). Можно дать и такое определение: **физическая величина** – наиболее общее понятие (категория), служащее для количественного выражения свойств тел, явлений или процессов и для описания явлений природы с помощью математических уравнений.

1.3.2 Атрибуты физической величины. Понятие «физическая величина» включает в себя три неотъемлемые части (атрибута):

1) название физической величины, которое **конкретизирует измеряемое свойство**, выделяя его из бесчисленного множества других свойств. Например, термин «масса» указывает, что данная физическая величина используется для количественной оценки инерционных свойств тел; термины «**импульс**» и «**энергия**» указывают на то, что данные величины являются различными **характеристиками** такого общего **свойства** материи, как **движение**;

Часто свойство, характеристикой которого является рассматриваемая физическая величина, не конкретизируется, т. е. не имеет собственного наименования. В результате чего название свойства отождествляется с названием самой величины, что вызывает многозначность соответствующих терминов. Например, в словосочетаниях «заряд переместился», «сила действует», «измеряется давление манометром» под терминами «заряд», «сила», «давление» следует понимать не физические величины, а соответствующие им свойства. Очевидно, трудно будет отказаться от таких привычных словосочетаний без введения новых наименований для свойств, позволяющих отличать эти свойства от характеристик этих свойств – соответствующих физических величин. Более подробно вопрос о наименованиях физических величин рассмотрен в подразделе 1.3.5.

2) числовое значение физической величины, показывающее во сколько раз размер измеряемого свойства в данном объекте отличается от размера этого свойства, принятого за единицу сравнения;

3) наименование единицы физической величины, указывающее

на размер (порцию) свойства, принятый в качестве основы для количественной оценки рассматриваемого свойства. Например, наименование единицы массы «килограмм» (сокращенно **кг**) указывает на то, что в качестве основы для количественной оценки инерционного свойства тел взят размер (**порция**) этого свойства, содержащегося в специально изготовленной **гире**; данный размер (количество) свойства является мерой, единицей сравнения и ему присвоено числовое значение равное единице, т. е. единицей массы является **1 кг**.

Итак, **единица физической величины** – название порции (размера) **свойства**, принятой за единицу сравнения. Но **единица измерения физического свойства** – **порция** (размер) самого **свойства, принятая за единицу** (в качестве меры) сравнения. Не следует говорить и писать «единица измерения физической величины», т. к. измерить физическую величину (именованное число – мысленный образ) и определить её размер нельзя. Можно определить размер свойства и размер единицы этого свойства. Поэтому **следует писать** «единица физической величины давление **1 Па**» или «**единица давления**

1 Па»; «единица измерения давления **1 Па**» (здесь уже под термином «давление» следует понимать не физическую величину, а свойство, имеющее то же наименование, что и физическая величина «давление», характеризующая это свойство с количественной стороны).

Соотношения между единицами различных величин приведены в приложении А.

Таким образом, **физическая величина** выполняет следующие **функции при измерении размера** какого-либо физического свойства:

- 1) своим **названием конкретизирует** само измеряемое **свойство**;
- 2) **названием своей единицы конкретизирует размер** этого свойства, **принятый за единицу сравнения** (эталон);
- 3) своим **числовым значением** показывает, **во сколько раз размер** данного свойства **отличается от размера** этого свойства, принятого за **единицу сравнения**.

Все перечисленные атрибуты физической величины можно наглядно представить в виде формулы

$$X = \{X\} \cdot [X], \quad (1.17)$$

где X – **значение** конкретной физической величины;

$\{X\}$ – **числовое значение** физической величины (отвлечённое число) в принятой единице (число единичных порций свойства в данном размере свойства);

$[X]$ – **принятая единица** физической величины.

Например, в выражении для давления $P = 101 \text{ кПа}$, **101** – от-

влечённое число, представляющее **числовое** значение давления: $\{P\} = 101$;

кПа – принятая в данном случае **единица давления** (вернее, обозначение единицы давления – килопаскаля): $[P] = 1 \text{ кПа}$;

101 кПа – значение давления.

Как размер (количество) свойства не зависит от размера этого свойства, выбранного в качестве единицы сравнения, так и значение ФВ, не зависит от значения выбранной единицы ФВ. Ещё раз подчеркнём, что нет **размера ФВ**, но есть **значение ФВ**. **Размер имеют** как само измеряемое **свойство** так и **порция** этого **свойства**, принятая за единицу сравнения, – мера свойства.

1.3.3 Размерность физических величин. В большинстве случаев при рассмотрении физических величин знание их размерности не требуется, т. к. достаточно знать единицу этой величины и её связь с единицами основных величин (метод размерностей находит применение, например, в теории подобия при определении чисел подобия, когда уравнения исследуемых процессов неизвестны). В то же время в литературе широко укоренились утверждения (**ошибочные**) типа: «**размерность скорости – метр в секунду**», «**моль – размерность количества вещества**» и т. п. Ошибочность утверждений такого типа обусловлена отождествлением единицы физической величины и её обозначения с размерностью, а также тем, что раньше **квадратные скобки $[X]$** , содержащие обозначение величины X , означали размерность величины, а теперь **означают единицу физической величины (а не размерность)**. Сейчас принята такая запись $[p] = 1 \text{ Па}$, которая читается так: «Единица давления равна паскалю». Неправильно заключать в квадратные скобки единицу величины, например, $[\text{Па}]$, хотя такая запись встречается часто.

Символическое выражение производной (вторичной) величины через основные (первичные) называется **размерностью** физической величины. Она отражает связь данной величины с величинами, принятыми за основные в рассматриваемой системе величин.

Так, система величин, которая определяется Международной системой единиц SI (в русской транскрипции СИ – система интернациональная; СИ читается раздельно: «эс-и», а не слитно «си»), содержит **семь основных системных величин l, m, t, I, T, n и J** , где l – длина, m – масса, t – время, I – сила электрического тока, T – термодинамическая температура, n – количество вещества, J – сила света. Для этих величин условно приняты следующие **размерности**: для длины – **L**, массы – **M**, времени – **T**, силы электрического тока – **I**, термодинамической температуры – **Θ**, количества вещества – **N** и силы света **J**. Размерности записываются прописными буквами и пе-

чатаяются прямым шрифтом.

Над размерными величинами, как и над самими величинами, можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечения корня. **Показатель степени**, в которую возведена размерность основной величины, входящей в степенной одночлен, называют **показателем размерности**.

Размерность величины X обозначается так:

$\dim X$ (англ. dimension – **размерность**). Например, размерности силы $\dim F = \text{LMT}^{-2}$ и работы: $\dim W = \text{L}^2\text{MT}^{-2}$.

Различают размерные и безразмерные величины. **Размерной** физической величиной называют такую величину, в размерности которой хотя бы один из показателей размерности не равен нулю. **Безразмерной** физической величиной называют физическую величину, в размерности которой **все показатели размерности равны нулю**, а **размерность равна единице**. Например, размерность относительной плотности (она равна отношению плотности данного вещества к плотности образцового вещества) равна **1 (единице)**. Поэтому не следует допускать ошибок при установлении **размерности безразмерных относительных величин**: их размерности **равны 1 (единице)**, а не **0 (нулю)**, как нередко ошибочно пишут. Необходимо использовать понятие «размерность физической величины», а не понятие «размерность единицы физической величины».

Следует строго различать следующие понятия: **обозначение** физической величины, **размерность** физической величины, **единица** физической величины, **обозначение единицы** физической величины. Разграничение этих понятий наглядно представлено в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Атрибуты физической величины

Физическая величина (наименование величины)	Обозначение физической величины	Размерность физической величины	Наименование единицы физической величины	Единица физической величины
Скорость	c	$\dim c = \text{LT}^{-1}$	метр в секунду	$[c] = 1 \text{ м/с}$

1.3.4 Определения физических величин в соответствии с уравнениями связи. Определения физических величин должны находиться в строгом соответствии с уравнениями связи между величинами, из которых их выводят. **Уравнениями связи между физическими величинами** являются уравнения, в которых под буквенными символами понимаются физические величины. Определения физических величин в соответствии с уравнениями связи формулируются так:

- 1) плотность однородного вещества – физическая величина, равная отношению массы вещества к его объёму: $\rho = m/V$;
- 2) удельная теплоёмкость – физическая величина, равная отношению

теплоёмкости всего тела (вещества) к его массе: $c_x = C_{\text{тела}}/m$.

В связи с тем, что физическая величина – первичное понятие, а единица физической величины – вторичное понятие и физическая величина не зависит от единиц, в которых её выражают, **неприемлемы** такие определения физических величин, которые содержат единицы или обозначения физических величин, **например**:

1) плотность однородного тела – это масса единицы объёма (1 м^3), или масса тела, отнесённая к единице объёма.

Оба эти утверждения неправильны. **Плотность** это вовсе **не масса**, а физическая величина другой природы с размерностью массы, делённой на объём. Сказать, что плотность – это масса (единицы объёма), значит сказать, что хвост – это животное (без головы и туловища). Плотность не является также массой, отнесенной к единице объёма, т. е. $\rho \neq m/V^1$, где $V^1 = 1 \text{ м}^3$ – единичный объём (СИ). Кроме того, термины «единица объёма», «единичный объём» неоднозначны, поскольку любой объём (1 л , 1 см^3 , 1 м^3 и т. д.), может быть принят в качестве единичного объёма, а физическая величина, как уже отмечалось, не зависит от единиц, в которых её выражают;

2) удельной теплоёмкостью вещества c_x называют величину, равную количеству теплоты (тепла) Q , которое необходимо сообщить 1 кг вещества, чтобы увеличить его температуру на 1°C .

Во-первых, удельная **теплоёмкость не может равняться теплоте** (это разные физические величины); во-вторых, определение физической величины не зависит от единиц, в которых выражены величины; в-третьих, введение в определение обозначений величин усложнило его.

Однако, кроме определения величины, следующего из формулы связи между физическими величинами, полезно давать **дополнительные пояснения**, которые способствуют усвоению физического смысла величины. Например, «**единицей плотности СИ** является килограмм на кубический метр, **равный плотности** однородного вещества, масса которого при объёме 1 м^3 равна 1 кг » или «**числовое значение плотности** равно **числовому значению массы** тела единичного объёма», т. е. **плотность может равняться массе** тела единичного объёма лишь **численно**. Например, **нельзя** говорить, что при единичном объёме плотность $\rho = 5 \text{ кг/м}^3$ равна массе $m = 5 \text{ кг}$, но можно говорить, что числовое значение $\{\rho\} = 5 = \{m\} = 5$ при единичном объёме $V = V^1 = 1 \text{ м}^3$.

Аналогичным образом, **теплоёмкость численно равна теплоте**, которую нужно подвести к телу, чтобы изменить его температуру на один градус.

Расчётные формулы рекомендуется записывать в виде уравнений между физическими величинами, когда отсутствуют коэффициенты, зависящие от единиц, в которых выражены физические величины. При подстановке в такие формулы значений величин (вместо буквенных обозначений величин), выраженных в единицах СИ, результат будет получаться так-

же в единицах СИ. При этом не потребуется затрачивать время на проверку правильности выбора единиц и на выяснение, в каких единицах выражены числовые коэффициенты и сам результат вычисления. Поэтому запись уравнения состояния идеального газа через числовые множители:

$$pV_{\mu} = 8314 T \text{ или } pV_{\mu} = 8,314 T ,$$

как это иногда практикуется в курсах термодинамики, нельзя считать рациональной по трём причинам: **во-первых**, числовое значение величины не является полной характеристикой физической величины и, в отличие от значения физической величины, зависит от выбранной единицы; **во-вторых**, нарушается размерность левой и правой частей уравнения и, **в-третьих**, числовое значение опытной величины, к которым следует отнести молярную газовую постоянную, в процессе повышения точности измерений всё время уточняется [например, $R_{\mu} = 8314,51 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$], а значит постоянно нужно уточнять и запись уравнения состояния.

1.3.5 О наименовании физических величин. Первоначально наименование физических величин осуществлялось по схеме: «**количество свойства**» или «**величина свойства**». Например, «**количество вещества**», «**количество движения**», «**количество теплоты (тепла)**», «**величина массы**», «**величина энергии**» и др. Данные словосочетания имеют смысл, если под словом «**величина**» понимать **количество**, размер свойства, наименование которого следует за словом «**величина**». Например, «**величина массы**» дословно должно означать «**количество**» свойства, именуемого словом «**масса**», «**количество теплоты**» – «**количество свойства**», именуемого словом «**теплота**».

Постепенно стали применяться сокращенные наименования физических величин, названия которых зачастую совпадали с названиями свойств. Например, под массой стали понимать в первую очередь не свойство тела (инертность), а физическую величину, характеризующую это свойство с количественной стороны. Поэтому стали критиковаться выражения типа «на нити висит масса 5 кг», «элементарный объем вошёл через клапан», «энергия превращается», «заряд перемещается» и т. п. Рекомендуется разделять названия физических величин и физических свойств, например, записывая приведённые выше выражения так: «на нити висит тело массой 5 кг», «элемент среды объёмом δV входит через клапан», «движение изменяет свою форму, или вид», «заряженные частицы перемещаются» и т. п. С этой же целью для вновь вводимых величин стали использовать названия, не совпадающие с названиями физических свойств, например, «энтальпия», «энтропия», «эксергия» (уже никому в голову не придёт мысль сказать, что «энтропия превратилась в энтальпию», т. к. всем ясно, что это – **физические величины**, а они **превращаться** ни во что **не могут**).

В настоящее время не рекомендуется применять термины «**величина**» (в смысле количества) и «**количество**» для выражения количественной стороны рассматриваемого свойства, характеризуемой понятием «**физическая величина**». Например, писать «**величина массы**», «**величина длины**», «**коли-**

чество энергии», «количество теплоты» и т. п., так как эти словосочетания **двусмысленны** из-за многозначности терминов «величина», «**масса**», «длина», «**энергия**», «**теплота**», означающих и **физическую величину** (числовую характеристику свойства), и **само свойство**.

Если под терминами «**масса**», «**энергия**», «**теплота**» и др. понимать **физические величины**, то использование слов «**величина**» и «**количество**» перед наименованием физической величины приводит к **тавтологии** («**величина величины**» или «**количество количества**»), кроме того, физическая величина не имеет размера и, следовательно, нельзя говорить об её количестве (например, термин «количество теплоты» можно понять как количество физической величины «теплота»). В приведённых примерах слово «величина» следует по возможности опускать как излишнее; в отдельных случаях его можно заменить термином «значение», например, «**значение массы**».

Более того, некоторые свойства оказались столь общими, многогранными (например, «**вещество**» и «**движение**»), что для количественной характеристики отдельных сторон этих свойств стали использовать различные величины. В результате **использование общих терминов «количество движения» и «количество вещества» для наименования только одной из ФВ**, характеризующих эти свойства, оказалось **нецелесообразным**.

Например, первоначально термин «**количество движения**» использовался для наименования векторной физической величины, получаемой как произведение массы на вектор скорости: $m\vec{c}$. В последствии выяснилось, что эту векторную величину нельзя использовать для оценки запаса (количества) хаотического движения в телах. Для этой цели стала использоваться новая физическая величина «**энергия**». Следовательно, для характеристики запаса (количества) движения в системе стали использовать две различные величины и, чтобы не использовать общий термин «количество движения» для величины $m\vec{c}$, её стали называть «**импульсом**».

Итак, в настоящее время **общая количественная характеристика движения «количество движения»** стала включать в себя несколько количественных характеристик (физических величин): **импульс, энергию, момент импульса и др.** Следовательно, под **количеством движения КД** следует понимать **обобщающую величину**: КД $\{E, m\vec{c}, \vec{r} \times m\vec{c}$ и др. $\}$.

Аналогичным образом, оказалось, что для **характеристики запаса (размера, количества) вещества (материи)** в системе могут использоваться различные количественных характеристики (физические величины): **масса, число частиц, объём, вес**. Поэтому использование **общего термина «количество вещества» для наименования одной из величин (ν)**, характеризующей запас (количество) вещества **через порцию частиц (моль) нецелесообразно**. Однако до настоящего времени эту величину так и не переименовали (по соображениям, изложенным в разделе 1.4.2, данную величину рекомендуется назвать «**молярность вещества**», или коротко «**молярность**»). По аналогии с количеством движения **количество вещества (материи) КВ (КМ)** следует рассматривать в качестве **обобщающей**

величины: КВ $\{m, V, N, \nu$ и др. $\}$.

Итак, в настоящее время для наименования физических величин используются только два составных термина: «количество вещества» и «**количество теплоты**». В последнем термине слово «**теплота**» должно означать наименование свойства – **хаотического движения**. Однако термин «теплота» часто используется, даже в одних и тех же учебниках, в качестве сокращенного наименования той же физической величины, т. е. термины «**теплота**» и «**количество теплоты**» рассматриваются как **синонимы**. В результате возникает путаница с категориями. Поэтому целесообразно для сокращенного наименования **хаотического движения** использовать термин «**тепло**» (например, «перенос тепла»), а для наименования **ФВ** использовать термины «**теплота**», или «**количество тепла**» – количество хаотического движения (последнее менее предпочтительно, т. к. оно составное).

Для каждой физической величины, как правило, допускается применение только одного наименования. Допускается использовать, кроме основных наименований физических величин, их краткую (так называемую усечённую) форму при неизменном условии, что это не вызовет каких-либо недоразумений, например, «линейная скорость» и «скорость»; «поверхностная плотность теплового потока» и «плотность теплового потока».

Для производных величин, получаемых **от деления** какой-либо величины **на массу** тела, следует дополнительно применять прилагательное «**удельный**»; при отношении к **объёму** – «**пространственный**», или «**объёмный**»; при отношении к **количеству вещества** – «**молярный**», но не «мольный» и не «молекулярный»; при отношении к **числу частиц** – «**молекулярный**»; при отношении к **длине** – «**линейный**»; при отношении к **площади поверхности** – «**поверхностный**».

Примеры: «удельная теплоёмкость» (а не «массовая теплоёмкость»), Дж/(кг·К); «удельная теплота парообразования воды» (сокращённо «теплота парообразования»), кДж/кг; «объёмная энергия», Дж/м³; «**объёмный вес**» (а не «удельный вес», как общепринято), Н/м³; «молярная газовая постоянная» (а не молекулярная), Дж/(моль·К).

Во избежание многозначности терминов, получаемых с применением прилагательных «объёмный» и «поверхностный» и используемых как для разграничения наименований разновидностей одной и той же величины (например, в гидромеханике рассматриваются поверхностные силы, действующие на поверхности выделенного элемента жидкости и объёмные силы, действующие по всему объёму элемента жидкости), так и для наименования производных величин, следует при образовании терминов производных величин после соответствующих прилагательных добавлять слово «**плотность**». Например, «поверхностная плотность потока энергии», «объёмная плотность потока энергии».

Не следует использовать устаревшие наименования физических величин, даже если они встречаются в литературе. Например, следует использовать термины **вместимость** сосуда, а не **ёмкость** сосуда; динамическая

вязкость, а не **коэффициент** динамической вязкости; **теплопроводность** материала, а не **коэффициент** теплопроводности; **количество вещества**, а не **число молей**; **молярная масса**, а не **молярная** или **молекулярная масса**; **массовый** или **объёмный расход**, а не **весовой**, **часовой** или **секундный расход**; **энтальпия**, а не **теплосодержание**, **чёрное тело**, а не **абсолютно чёрное тело**, **теплота сгорания топлива**, а не **теплотворность топлива** и др. Примеры использования современных терминов теплотехнических величин приведены в приложении Б.

1.4 Буквенные обозначения физических величин

1.4.1 Значение упорядочения буквенных обозначений величин. Наряду с унификацией физических величин большое значение имеет унификация обозначений этих величин. В настоящее время отсутствует единая система буквенных обозначений. В отдельных отраслях науки и техники имеются стандарты на основные буквенные обозначения, как, например, в математике, физической и геометрической оптике, светотехнике, электротехнике, термодинамике, гидромеханике, теоретической механике и ряде других. Однако в каждом из этих стандартов на буквенные обозначения зачастую одна и та же величина обозначается различными буквами. Это затрудняет обмен опытом в различных отраслях науки и техники, усложняет учебно-педагогический процесс, а также труд авторов и редакторов. В связи с этим на каждом этапе развития науки и техники постоянно возникает необходимость в упорядочении буквенных обозначений величин.

Основная трудность построения единой системы буквенных обозначений величин заключается в необходимости обозначения многих тысяч величин в различных отраслях науки и техники при крайне ограниченном количестве букв и символов; в необходимости увязки рациональных обозначений, намечаемых к применению, с действующими обозначениями и, наконец, в силе традиции применения нередко нерациональных обозначений.

Результатом упорядочения буквенных обозначений величин в идеальном случае должна быть такая система, в которой каждой букве соответствует одна величина и, наоборот, каждая величина представляется одной буквой. Другими словами, идеальная система не должна содержать многозначных и синонимичных буквенных обозначений. Традиционное обозначение различных величин одной и той же буквой, а также недостаток буквенных обозначений по сравнению с количеством понятий затрудняет создание идеальной системы, когда каждая величина представляется одной буквой, и требуются иные пути создания единой унифицированной системы буквенных обозначений механических, гидромеханических, электрических, тепловых, акустических и световых величин.

Единая система буквенных обозначений величин (ЕСБОВ) должна обеспечить, во-первых, преемственность традиционно установившихся обозначений общетехнических величин (массы, объёма, силы и др.), во-вторых, сопоставимость с существующими системами буквенных обозначений различных разделов науки и, наконец, в-третьих, взаимооднородность соот-

ветствия термина и буквенного обозначения величины.

Ниже приводятся основные принципы построения единой системы буквенных обозначений величин.

1.4.2 Рекомендации по обозначению общенаучных величин. Для обеспечения преемственности между дисциплинами необходимо из всех величин выбрать такие, буквенные обозначения которых во всех дисциплинах должны сохранять свой вид. Следовательно, такие величины не должны иметь синонимичных буквенных обозначений, а только одно единственное и неизменное обозначение. Например, давление везде должно обозначаться символом P , энергия – E , масса – m , сила F и т. п.

К таким **величинам**, имеющим **одно единственное обозначение**, следует отнести, прежде всего, основные величины Международной системы (СИ): длину, массу, время, силу электрического тока, термодинамическую температуру, количество вещества, силу света, плоский и телесный углы, а также наиболее распространённые производные величины СИ.

В физике и химии в основном такая преемственность в обозначении многих величин сохраняется. Однако в термодинамике – одном из разделов физики – многие наиболее распространённые величины обозначаются иначе, чем в физике и химии. Например, в термодинамике (теплотехнике) площадь обозначается символом F , которым принято обозначать силу. В то же время в физике часто работу обозначают буквой A , в теоретической физике – W , в теплотехнике и в термодинамике – L . Поэтому **многим дисциплинам** в процессе создания унифицированной системы буквенных обозначений величин потребуются **пойти на взаимные уступки**.

В настоящее время большинство величин имеют синонимичные буквенные обозначения, поэтому необходимо выбрать одну букву для каждой основной величины. Наибольшие трудности возникают с обозначением площади, скорости, работы и энергии, т. к. они встречаются практически во всех дисциплинах, имея при этом разные обозначения.

Площадь имеет следующие синонимичные обозначения: $A, S, F, f, \omega, \Omega$. В физике площадь наиболее часто обозначается буквой S . Однако эта буква близка по написанию букве S -малое, которой обозначается путь. В результате возникают трудности с написанием выражения для расчета объёма цилиндра двигателя через площадь поршня S и его ход. Но самое главное, буквами S и S обозначаются энтропия системы и удельная энтропия, которые вошли во все отрасли науки и техники. Поэтому в соответствии с международными рекомендациями для обозначения площади рекомендуется буква A (англ. **area** – **площадь**). Несмотря на то, что такое обозначение площади уже встречается в курсах физики, термодинамики и теплотехники, это будет наиболее болезненный шаг для отдельных курсов физики и термодинамики.

Остальные синонимичные обозначения площади должны использоваться для обозначения других основных величин: F – силы, f – удельной силы, Ω – телесного угла и ω – угловой скорости.

Работу принято обозначать буквами A (нем. **arbeit** – **работа**), L

(англ. **labour** – труд, работа) и W (англ. **work** – работа). Поскольку буква A использована для обозначения площади, то остаются буквы L и W для обозначения работы и соответственно l и w для обозначения удельной работы. Поскольку буквой l принято обозначать длину, то для обозначения работы и удельной работы остаются буквы W и w , которые также рекомендуются международными стандартами для обозначения этих величин.

Скорость принято обозначать буквами c, v, w, u . Поскольку буквы w и v используются соответственно для обозначения удельной работы и удельного объёма, то для обозначения скорости остаются буквы c и u . Так как буква c для обозначения скорости потока используется в научной литературе чаще, чем u , которой традиционно обозначается удельная внутренняя энергия, то для обозначения скорости (тела, материальной точки, элемента потока) рекомендуется использовать букву c . Для обозначения скорости света и звука необходимо использовать соответствующие индексы: c_0 и c_a . Такое индексированное обозначение с сохранением основного символа удобно при составлении общих таблиц буквенных обозначений величин. Однако в специальных дисциплинах, где отдельные величины встречаются часто, целесообразно использовать запасное (синонимичное) обозначение, например, для скорости звука в газовой динамике используется символ a .

Количество вещества принято обозначать символами n и V . Поскольку буквой n принято обозначать концентрацию частиц и показатель политропы, то для обозначения количества вещества чаще используется символ V . В то же время через V обозначается общенаучная величина – частота. Целесообразно количество вещества обозначить буквой μ (такое обозначение встречается, например, в [10] на стр. 36), которая созвучна по произношению и близка по написанию символам массы m и молярной массы M – величин, через которые определяется количество вещества $\mu = m/M$, или молярная масса $M = m/\mu$. Использование символа μ в качестве индекса для получения молярных величин (например, молярного объёма V_μ , молярной теплоёмкости C_μ , молярной газовой постоянной R_μ) предпочтительнее использования индекса m , применяемого в настоящее время для обозначения молярных величин (V_m, R_m и др.), т. к. индекс m ассоциируется с массой. Если вместо термина *количество вещества* будет принят термин *молярность вещества* (что весьма вероятно), то наименование символа μ (мю), используемого для обозначения величины, будет созвучно наименованию этой величины (*молярность*). В подразделе 1.4.4 будут представлены и другие соображения в пользу обозначения количества вещества (молярности) символом μ .

В соответствии с Международными и государственными стандартами и рекомендациями по буквенным обозначениям величин, а также соображениям, изложенным выше, для обозначения общетехнических (наиболее распространённых) величин рекомендуются следующие символы (таблица 2).

Таблица .2 – Буквенные обозначения основных величин

Латинский алфавит

A – площадь	P – мощность
c – скорость	p – давление
d – диаметр	Q – теплота
E – энергия	r – радиус
F – сила	s – путь
g – ускорение свободного падения	S – энтропия
H – энтальпия	t – время
I – сила электрического тока	T – температура
K – импульс	U – электрическое напряжение
l – длина	V – объём
m – масса	v – удельный объём
M – молярная масса	W – работа
N – число (частиц, молекул, импульсов, оборотов и т. п.)	w – удельная работа

Греческий алфавит

η – коэффициент полезного действия	τ – касательное напряжение
Θ – электрический заряд	Φ – энергетический поток (поток энергии), Вт (тепловой, световой, звуковой)
μ – количество вещества (молярность)	Φ – поверхностная плотность энергетического потока (теплого потока), Вт/м ²
ν – частота	Ψ – угол (плоский)
Π – период	Ω – телесный угол
ρ – плотность	ω – угловая скорость
σ – нормальное напряжение	χ – химический потенциал

Приведённые символы основных величин предлагается стандартизировать и использовать во всех дисциплинах, начиная со школьных курсов (число этих величин и их обозначения могут уточняться по решению соответствующих комиссий).

Ещё раз подчеркнём, что в отличие от общепринятых обозначений соответствующих величин, когда каждая величина имеет несколько синонимичных обозначений, в предлагаемом стандарте основных величин каждая величина имеет одно единственное обозначение, которое должно неукоснительно использоваться во всех дисциплинах. В этой связи совершенно недопустимо использовать символ одной основной величины для обозначения другой основной величины, например, для массы использовать символ молярной массы **M**, для обозначения работы использовать

символ площади **A**, для обозначения импульса – символ давления **p** и т. п. В то же время за каждым из этих символов сохраняется многозначность, т. е. они могут использоваться для обозначения не только основных величин, но и других величин, не входящих в таблицу основных величин. Например, буквой **U** можно обозначать не только электрическое напряжение, но и внутреннюю энергию; буквой **M** не только молярную массу, но и момент силы и т. п.

1.4.3 Использование индексации при обозначении однородных величин. Расчленение общего понятия на частные может быть достигнуто применением:

1) **самостоятельных буквенных обозначений** в специальных дисциплинах, например, при обозначении составляющих сил (**F, P, Q, R, G**) в теоретической механике;

2) **индексации**, т. е. применения индексов у одних и тех же буквенных обозначений в общих дисциплинах, таких как физика, например, для обозначения различных видов энергии **E**: E_k – для кинетической энергии, E_p – для потенциальной энергии. В этой связи нерационально загружать память обучаемого требованием запомнить, что в одном разделе курса физики буква **T** используется для обозначения кинетической энергии, а в других разделах – для обозначения температуры и периода колебаний. Следовательно, применение индексации позволяет использовать одну и ту же букву для различных видов одной и той же величины и тем самым уменьшить многозначность букв, используемых для обозначения разнородных величин (в теоретической механике массу тела и момент силы принято обозначать одинаковым символом **M**, что создаёт большие трудности при изучении этой дисциплины (некоторые авторы даже вынуждены момент силы обозначать символом **L**, что также нерационально); рационально массу тела обозначать символом **m**, а для обозначения "массы точки" использовать индексацию, например, m_i).

Индексы имеют уменьшенный размер символов и, как правило, располагаются справа внизу у основания буквенного обозначения величины; при этом не рекомендуется использовать для индекса более трёх букв. **Буквы, используемые в индексах, печатают прямым шрифтом.**

Некоторые индексы физических величин имеют специальное значение. Например, звёздочка служит для обозначения параметров заторможенного потока: P^*, T^*, H^* ; знак нуля – для обозначения стандартных состояний: H^0 , или p_0, ρ_0, T_0 ; буква «о» – для указания на обратимость процесса: Q^o, dS^o и др.

Обозначения величин должны быть наглядными и связанными с терминами этих величин, что весьма важно для запоминания и понимания величин. Например: U_{\sin} – синусоидальное напряжение, N_A – число Авогадро; k_A – постоянная Авогадро, моль⁻¹; k_B – постоянная Больцмана и др.

Использование индексации буквенных обозначений величин позволяет не только использовать одну и ту же букву для обозначения различных

видов какой-либо величины (и тем самым облегчить их запоминание), но и даже освободить эту букву для обозначения совершенно других величин. Так, введение символа C для скорости в теплотехнике затруднялось тем, что этой буквой в теплотехнике принято обозначать удельную теплоёмкость произвольного процесса. Однако на практике наиболее часто используются изобарная c_p и изохорная c_v теплоёмкости, обозначения которых нельзя спутать с обозначением скорости C . Введение индексов X для изопроцессов ($X = p, v, T, s = \text{const}$ и n для политропного процесса позволяет ввести обозначения теплоёмкостей произвольного изопроцесса c_x и политропного процесса c_n . Всё это позволяет освободить букву C для обозначения скорости потока, а букву W , используемую в теплотехнике для обозначения скорости потока, – для обозначения удельной работы, что обеспечит преемственность обозначений величин в теплотехнике, физике (физике ради своих обширных приложений – гидромеханики и теплотехники – следует пойти на уступки и ввести для обозначения скорости вместо символа \vec{v} символ \vec{c} , а вместо символа импульса \vec{P} символ $\vec{K} = m\vec{c}$) и механике.

1.4.4 Производные обозначения разнородных величин. Производное обозначение физической величины – это обозначение производной физической величины, состоящее из буквенных обозначений основных величин, входящих в определяющее эту величину уравнение. В качестве основного символа производной величины берётся символ величины, стоящей в числителе определяющего уравнения, а обозначения величин, стоящих в знаменателе, записывается в виде нижнего индекса *курсивом* (с наклоном, как и символ основной величины).

Примерами производных обозначений величин являются обозначения массового расхода: $m_t = m/t$, кг/с; объёмного расхода: $V_t = V/t$, м³/с; молярной теплоёмкости изобарного процесса: $C_{\mu p} = C_{p\text{сист}}/\mu$, Дж/(моль·К) и др. Для сравнения приведём обозначения индексированных величин, например, массы протона m_p и теоретической скорости c_t , у которых индексы записаны без наклона.

Обозначения производных величин весьма наглядны и легко запоминаемы, позволяют просто определять единицы этих величин и сами **формулы**, определяющие эти величины, – по **виду самого символа**. Для этого надо знать основное правило написания уравнения связи по виду производного обозначения величины: буквенное обозначение основного символа необходимо ставить в числитель, а обозначение индекса – в знаменатель уравнения связи. Так, например, единица массового расхода, согласно символу m_t : $[m_t] = [m]/[t] = 1 \text{ кг/с}$.

Для обозначения производных величин, получаемых от деления какой-либо величины на время, всё чаще используется применение точки над символом величины, стоящей в числителе. Например, для массового расхода $\dot{m} = dm/dt$ и объёмного расхода $\dot{V} = dV/dt$.

Производные обозначения физических величин всё чаще применяются

в технической и учебной литературе. Однако такое обозначение величин ещё не нашло широкого и обоснованного применения во всех дисциплинах, начиная со школьных курсов физики. Например, сейчас молярный объём, как уже отмечалось, обозначается символом V_m , что противоречит производному обозначению величин, согласно которому $V_m = V/m = v$ – удельный объём. Правильное производное обозначение молярного объёма: $V_\mu = V/\mu$, где μ – количество вещества (молярность). Последнее ещё раз указывает на необходимость обозначения количества вещества (молярности) символом μ .

Если в теории формула (уравнение) используется редко (однократно), то нет смысла вводить специальные буквенные обозначения для величин, входящих в эту формулу, а лучше для обозначения этих величин использовать производные обозначения, устраняющие многозначность отдельных букв. Усложнение символа в отдельной формуле с лихвой окупается понятностью величин, входящих в эту формулу, без дополнительных разъяснений символов. Например, в термодинамике уравнение, связывающее давление идеального газа с кинетической энергией хаотического движения молекул и их концентрацией n , даётся всего один раз. Поэтому нет надобности для написания этого уравнения вводить специальное обозначение концентрации молекул n (так как этой буквой в термодинамике принято обозначать показатель политропного процесса), а лучше использовать производное обозначение концентрации частиц $N_V = N/V$: $p = (2/3) N_V E_{k \text{ мол}}$.

Если основная величина ЕСБОВ в специальной дисциплине встречается редко и её символ использован для обозначения какой-либо специальной величины, то в случае возникшей необходимости использовать основную величину, у которой был использован символ для обозначения специальной величины, для её обозначения целесообразно использовать производное обозначение, а не вводить многозначное буквенное обозначение. Например, в электротехнике буквой ρ обозначается объёмная плотность заряда. Поэтому при расчёте массы, например проводника, для обозначения его плотности следует использовать производное обозначение m_V : $m = m_V V$.

Усложнение буквенных обозначений величин (в разумных пределах) путём использования производных обозначений в соответствии с уравнениями связи целесообразнее применения синонимичных буквенных обозначений в общетехнических дисциплинах, где данная величина не является главной (основной). Применение производных обозначений позволяет уменьшить многозначность символов, применяемых в общих курсах, и тем самым делает возможным создание таблиц однозначных символов величин и уравнений связи для них, даваемых в приложениях этих курсов. Таблица обозначений величин лабораторного практикума, построенная по такому принципу, приводится в приложении В (полная таблица теплотехнических величин дана в

работе [9].

В заключение отметим, что, хотя идеальную систему буквенных обозначений величин, удовлетворяющую в должной мере всем дисциплинам, создать невозможно, улучшение ЕСБОВ всегда возможно, и оно будет непрерывно происходить по мере развития науки и техники и появления всё новых и новых величин.

1.5 Правила использования единиц физических величин

Для написания значений величин следует применять обозначения единиц буквами или специальными знаками. Обозначения единиц следует писать через пробел после числовых значений величин и помещать в строку с ними (**без переноса на следующую строку**).

Все буквенные обозначения единиц печатают **прямым шрифтом** как при прямом, так и при курсивном шрифте основного текста. Это позволяет отличать буквенные обозначения единиц от обозначения физических величин.

В конце обозначений единиц не следует ставить точку в качестве знака сокращения, за исключением случаев сокращения слов, входящих в наименование единицы, но не являющихся единицами, например, мм вод. ст., мм рт. ст., мм сп. ст.

Обозначения единиц, образованных по фамилиям учёных пишутся с **прописной буквы** независимо от того, имеется ли приставка или она отсутствует, например, Дж, кДж, МДж, мДж (джоуль, килоджоуль, мегаджоуль, миллиджоуль).

Наименования единиц в знаменателях надо писать и читать с предлогом «на», за исключением единиц величин, зависящих от **времени в первой степени** и характеризующих скорость протекания процесса. В этом случае наименование единицы времени следует писать и читать с предлогом «в», например, метр в секунду (м/с) – единица скорости, килограмм в секунду (кг/с) – единица массового расхода, но метр на секунду в квадрате (м/с²) – единица ускорения.

Наименования единиц, образующих произведение, при написании следует разъединять короткой чертой (дефисом), например, паскаль-секунда (Па·с) – единица динамической вязкости, ватт на метр-кельвин (Вт/(м·К)) – единица теплопроводности.

Буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, следует отделять точками на средней линии строки, как **знаками умножения**, например, Н·м, Па·с.

Между последней цифрой числа и обозначением единицы следует оставлять пробел (за исключением обозначений в виде знака, поднятого над строкой: °, …, ′, …, ″).

Примеры:

Правильно	Неправильно
$m = 15 \text{ кг}$ $\alpha = 35^\circ$ $\eta = 80 \%$ $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$m = 15\text{кг}$ $\alpha = 35 \text{ }^\circ$ $\eta = 80\%$ $t = 20^\circ\text{C}, t = 20^\circ \text{C}$

В буквенных обозначениях отношений единиц в качестве знака деления должна применяться только одна черта, косая или горизонтальная. При применении **косой черты** обозначения единиц в числителе и знаменателе следует помещать в строку, произведение обозначений единиц в знаменателе следует заключать в скобки, например, м/с, Дж/(кг·К). Допускается применять обозначения единиц в виде произведения обозначений единиц, возведённых в положительные или отрицательные степени, например, м·с⁻¹, Дж·кг⁻¹·К⁻¹ или $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$. Если для одной из единиц, входящих в соотношение, установлено обозначение в виде отрицательной степени (например, К⁻¹, с⁻¹, м⁻¹, применять косую или горизонтальную черту не допускается.

Примеры:

Правильно	Неправильно
$\mu = 0,15 \text{ Па} \cdot \text{с}$ $c_p = 1,05 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ $c_p = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\mu = 0,15 \text{ Пас}$ $c_p = 1,05 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ $c_p = 1,05 \text{ кДж}/\text{кг}/\text{К}$

Десятичные кратные и дольные единицы, а также их наименования и обозначения следует образовывать с помощью множителей и приставок, приведенных в таблице 3.

Таблица 3 – Множители и приставки образующие кратные и дольные единицы

Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение	
		международное	русское			международное	русское
10 ¹⁸	экса	Е	Э	10 ⁻¹	деци	d	д
10 ¹⁵	пета	Р	П	10 ⁻²	санتي	с	с
10 ¹²	тера	Т	Т	10 ⁻³	милли	m	м
10 ⁹	гига	G	Г	10 ⁻⁶	микро	μ	мк
10 ⁶	мега	М	М	10 ⁻⁹	нано	n	н
10 ³	кило	К	к	10 ⁻¹²	пико	p	п
10 ²	гекто	Н	г	10 ⁻¹⁵	фемто	f	ф
10 ¹	дека	da	да	10 ⁻¹⁸	атто	a	а

Приставку или ее обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или соответственно, с ее обозначением: миллиметр (мм), киловатт (кВт), мегаджоуль (МДж).

Обозначение кратных и дольных единиц от единицы, возведением в степень, следует образовывать добавлением соответствующего показателя степени к обозначению кратной или дольной от этой единицы, причем показатель означает возведение в степень кратной или дольной единицей.

Примеры:

1) $7 \text{ км}^2 = 7 (10^3 \text{ м})^2 = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^2$;

2) $350 \text{ см}^3/\text{с} = 350(10^{-2} \text{ м})^3/\text{с} = 350 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} = 35 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

3) $0,0002 \text{ см}^{-1} = 0,0002(10^{-2} \text{ м})^{-1} = 0,0002 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1} = 0,02 \text{ м}^{-1}$.

При вычислении значения физической величины необходимо сохранять точность исходного значения величины. При этом необходимо руководствоваться следующими правилами записи и округления чисел, установленными СТ СЭВ 543-77:

1 Необходимо различать значащие и незначащие числа, правильно их записывать и округлять.

2 Значащие цифры данного числа – это все цифры от первой слева, не равной нулю, до последней записанной цифры справа. При этом нули, следующие из множителя 10^n , не учитываются.

Например:

число 15,0 имеет три значащие цифры;

число 12 имеет две значащие цифры;

число $110 \cdot 10^3$ имеет три значащие цифры;

число $0,314 \cdot 10^n$ имеет три значащие цифры;

число 0,0016 имеет две значащие цифры.

3 Следует различать записи приближенных чисел по количеству значащих цифр. Например, запись 2,0 означает, что верны только целые и десятые доли числа: истинное значение числа может быть, например, 2,03 и 1,98. Запись 2,00 означает, что верны и сотые доли числа; истинное число может быть 2,002 и 1,997, но не 2,020 и не 1,99;

4 При указании значений величин с предельными отклонениями следует числовые значения заключать в скобки и обозначения единицы помещать после скобок или проставлять обозначения единиц после числового значения величины и после ее предельного отклонения.

Число, для которого указывается допустимое отклонение, должно иметь последнюю значащую цифру того же разряда, как и последняя значащая цифра отклонения.

Примеры:

Правильно	Неправильно
-----------	-------------

(130,0 ± 0,2) кг	130,0 ± 0,2 кг
130,0 кг ± 0,2 кг	130,0 ± 0,2 кг
19,0 ± 0,3	19 ± 0,3
55,40 ± 0,15	55,403 ± 0,15

5 Числа округляются до определенного разряда путем отбрасывания значащих цифр справа, с возможным изменением цифры этого разряда. Например, округление числа 167,54 до четырех значащих цифр будет 167,5.

6 В случае, если первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) меньше 5, то последняя сохраняемая цифра не меняется. Например, округление числа 112,22 до трех значащих цифр дает 112.

7 В случае, если первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) равна или больше 5, то последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу. Например, округление чисел 0,135 и 0,159 до двух значащих цифр дает соответственно 0,14 и 0,16.

8 Округление следует выполнять сразу до желаемого количества значащих цифр, а не по этапам. Например, округление числа 135,47 до трех значащих цифр производится непосредственно на 135. Округление по этапам привело бы к 135,5 на первом этапе и к 136 (ошибочно) на втором этапе.

Для снижения вероятности ошибок при расчетах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10. Обозначение единицы следует помещать после числового значения как в конце расчёта, так и после результатов всех промежуточных расчётов.

Чтобы рассчитать какую-либо величину необходимо выполнить три условия (исходные данные, как правило, известны):

1 Записать правильно расчётную формулу.

2 Перевести единицы величин в единицы СИ и произвести вычисления по формуле.

3 Произвести оценку полученных результатов, сравнив их с известными из практики.

Пример. Пусть требуется определить силу, развиваемую гидроцилиндром $d = 100$ мм при давлении в нём $p = 30$ ат.

1 Расчётная формула $F = p \cdot A = p \frac{\pi d^2}{4}$.

2 Переводим единицы величин в единицы СИ:

$d = 100$ мм = $100 \cdot 10^{-3}$ м = 0,1 м; $p = 30$ ат = $30 \cdot 0,981 \cdot 10^5$ Па.

$$F = p \frac{\pi d^2}{4} = 30 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 23102,6 \text{ Н.}$$

3 Для оценки найденного значения силы определим массу поднимаемого груза $m = F/g = 23\,102,6/9,81 = 2355,0 \text{ кг} = 2,355\text{т}$, что вполне допустимо, например, для подъёма кузова самосвала.

Если единицы не переведены, или переведены частично в СИ, то результаты могут выходить за пределы разумных значений. Например, давление переведено, а диаметр нет. В этом случае результат для силы будет

$F = 30 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \frac{3,14 \cdot 100^2}{4} = 23,1 \cdot 10^9 \text{ Н}$, а массы $m = 23,6 \cdot 10^8 \text{ кг} = 23,6 \cdot 10^5 \text{ т}$, что выходит за пределы разумных значений и, следовательно, необходимо вернуться к пункту 2 (при правильной записи формулы).

Зная единицы физических величин, можно проверить правильность записи формулы – единицы слева и справа должны быть одинаковыми. Например, единица плотности $[\rho] = 1 \text{ кг/м}^3$, а формула для её расчёта имеет вид $\rho = p/(RT)$,

где $[p] = \text{Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}}$; $[R] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $[T] = 1 \text{ К}$.

Тогда, подставляя в формулу для плотности вместо буквенных обозначений величин их единицы, записываемые сверху и снизу от одной горизонтальной линии, получим единицу плотности $[\rho] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{Н} \cdot \text{м}} \frac{1}{\text{К}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, соответствующую СИ. Следовательно, формула для плотности записана верно.

2 Исследование термодинамических свойств газов и термодинамических процессов

Лабораторная работа № 1. Определение удельной газовой постоянной воздуха

Цель работы. Ознакомление с методикой экспериментального определения удельной газовой постоянной воздуха, изучение термических параметров и уравнения состояния идеального газа.

Вводная часть

Термические параметры. К термическим параметрам состояния относятся удельный объём (плотность), давление и температура.

Удельным объёмом называется отношение объёма однородного вещества к его массе:

$$v = V/m, \quad [v] = [V]/[m] = 1 \text{ м}^3/1 \text{ кг} = 1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Удельный объём численно равен объёму, занимаемому веществом единичной массы. Кубический метр на килограмм равен удельному объёму однородного вещества, объём которого при массе 1 кг равен 1 м³.

Величину, равную отношению массы однородного вещества к его объёму, т. е. величину, обратную удельному объёму, называют **плотностью**:

$$\rho = m/V = 1/v, \quad [\rho] = 1 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Плотность численно равна массе вещества, заключённого в единице объёма. Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объёме 1 м³ равна 1 кг.

Давление – величина, равная отношению элементарной силы, действующей на элемент поверхности нормально к ней, к элементарной площади этого элемента

$$p = \delta F/\delta A$$

(символом δ принято обозначать элементарность величины, в отличие от символа дифференциала d , который означает малое приращение, изменение величины).

При равномерном распределении силы F по поверхности площадью A давление выражается формулой:

$$p = F/A.$$

Единица давления СИ: $[p] = [F]/[A] = 1 \text{ Н}/1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Па}$.

Единице давления СИ присвоено специальное наименование

паскаль (Па) в честь французского математика Блеза Луи Паскаля (1623–1662).

Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределённой по поверхности площадью 1 м², расположенной перпендикулярно силе.

Давление 1 Па по сравнению с атмосферным давлением очень маленькая величина и для практического пользования используется внесистемная единица бар

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа} \cong 750 \text{ мм рт. ст.}$$

В технической литературе прошлых лет издания, а также при проведении измерений использовались (и до сих пор используются, хотя не рекомендуются) в качестве единицы давления техническая атмосфера (единица системы МКГСС) и внесистемные единицы: бар, физическая атмосфера (атмосфера физическая); мм рт. ст., мм вод. ст., мм сп. ст. (с помощью последних измеренное давление сравнивают с давлением столба жидкости – воды, ртути, спирта).

Связь между различными единицами давления следующая:

$$1 \text{ атмосфера техническая} = 1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = \\ = 0,981 \cdot 10^5 \text{ Па} = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ м вод. ст.},$$

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 \cong 0,1 \text{ МПа};$$

$$1 \text{ атмосфера физическая} = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = \\ = 101325 \text{ Па} = 1,033 \text{ ат} = 10,33 \text{ м вод. ст.},$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па}; \quad 1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}.$$

Различают **абсолютное** давление P (в дальнейшем – просто **давление**, см. приложение Б), **атмосферное** или **барометрическое** давление $P_{\text{ат}} \equiv P_{\text{б}}$, измеряемое барометром, **избыточное** давление $P_{\text{и}}$, измеряемое манометром, и **разрежение** $P_{\text{р}}$ (не следует применять термин «вакуум» вместо разрежения, т. к. вакуум не является физической величиной), измеряемое вакуумметром.

Термодинамическое (абсолютное) давление в сосуде

$$P \equiv P_{\text{абс}} = P_{\text{ат}} + P_{\text{и}}.$$

Избыточным давлением называется разность между давлением газа в сосуде и атмосферным давлением:

$$P_{\text{и}} = P - P_{\text{ат}} \equiv P_{\text{абс}} - P_{\text{атмос}}.$$

Если давление в сосуде меньше атмосферного, то разность между атмосферным давлением и давлением в сосуде называется **разрежением**

$$P_{\text{р}} \equiv P_{\text{раз}} = P_{\text{ат}} - P \equiv P_{\text{атмос}} - P_{\text{абс}}.$$

Из этой формулы видно, что минимальное разрежение равно

нулю (давление в сосуде равно атмосферному), а максимальное – атмосферному (давление в сосуде равно нулю). Поскольку атмосферное давление не постоянно, то и максимальное разрежение не является постоянной величиной. Возникает вопрос: может ли вакуумметр показать разрежение больше 760 мм рт. ст.? Ответ: может, если атмосферное давление в момент измерения превышает 760 мм рт. ст.

На рисунке 1 представлена графическая связь между рассмотренными видами давления, а на рисунке 2 показаны способы их измерения.

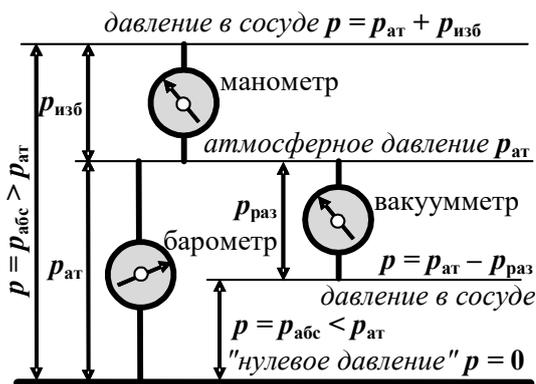


Рисунок 1 – Графическая связь между давлениями

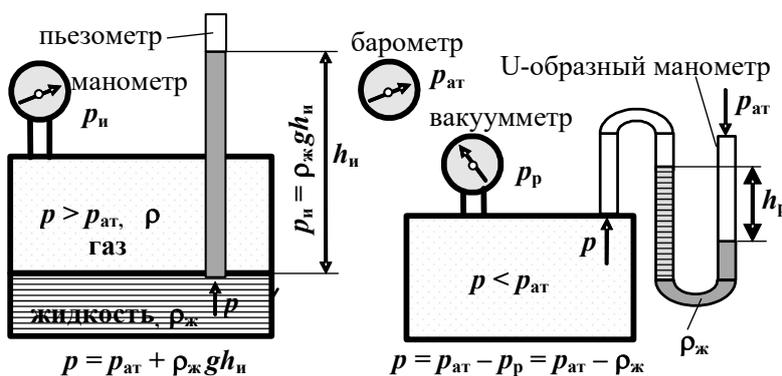


Рисунок 2 – Способы измерения давлений

Температура. Температура характеризует степень нагретости тела (интенсивность хаотического, теплового движения микрочастиц тела). Непосредственно измерить температуру пока не удаётся. Однако с изменением температуры изменяются многие **свойства тел**, которые относительно легко **измерить**, например, **объём, давление, электрическое сопротивление** и другие (как уже отмечалось, наименования физических величин – количественных характеристик свойств тел – могут совпадать с наименованиями самих свойств, которые и измеряются в опытах.). Изобретение термометра (первого измерительного теплового прибора) можно рассматривать как начало развития термодинамики, так как понятие температуры является основным в

учении о тепловых процессах.

В 1592 году Галилей во время лекции демонстрировал прообраз термометра (термоскопа). Термометр Галилея состоял из стеклянного шара, наполненного воздухом; от нижней части шара отходила трубка, частично заполненная водой, которая заканчивалась в сосуде с водой. Когда воздух в шаре нагревался или охлаждался, уровень воды в стеклянной трубке изменялся, что служило указанием на отклонение температуры от первоначального значения.

Наряду с термоскопом **Галилео Галилей** (1564 – 1642) сконструировал телескоп 32^x увеличения, с помощью которого он разрушил догмат о совершенстве небесных тел: на Солнце оказались пятна, Луна – с кратерами, Млечный путь распался на отдельные звёзды. Всё видимое им стали считать оптическим обманом. Суд инквизиции принудил его отречься от своих «заблуждений». Через пять лет после процесса Галилей издал свой основной труд «Беседы о двух новых науках», где его научные взгляды остались непоколебимы.

Слова, произнесённые им согласно легенде сразу после отречения: «**И всё-таки она вертится!**» (Земля вокруг своей оси и Солнца, а не Солнце вокруг неподвижной Земли), – стали синонимом борьбы за научную истину.

Первый современный термометр был описан в 1724 г. немецким физиком **Д. Фаренгейтом** (1686 – 1736). За начало шкалы (нуль температуры) он предложил принять температуру таяния смеси льда с нашатырём или поваренной солью (которая оказалась равной минус 17,8 °С). Вторую точку он получил, погружая термометр в смесь льда и воды. Интервал между этими двумя точками он разделил на 32 части. В качестве третьей опорной точки он брал температуру человека, которую он округлил до 96 единиц (величины, кратной 32), что равняется 35,6 °С (одни исследователи считают, что это была температура здорового человека, которая постепенно приняла значение 36,6 °С в наши дни, а другие, – что в качестве «эталона» был взят человек, которого знобило).

В качестве четвёртой опорной точки он брал температуру кипения воды, составившую 212 единиц (градусов). Таким образом, интервал от точки таяния льда до точки кипения воды по шкале Фаренгейта равен 180°. Применяют термометры со шкалой Фаренгейта (рисунок 3) в англоязычных странах (Великобритания, США, Канада и др.). Читая английские книги, не следует удивляться, что температура ребенка 98° не вызывает тревоги у матери, а температура минус 60° не является такой уж редкой на Аляске.

Во Франции в употребление вошла шкала **Р. Реомюра** (1683 – 1757), предложенная им в 1730 году. В этой шкале в качестве реперных точек выбраны температура таяния льда и кипения воды при нормальном давлении в 1 атмосферу. Интервал между этими точками разбит на 80 частей и 1/80 часть представляет собой градус Реомюра. До революции в России была принята шкала Реомюра – термометры Реомюра висели на улицах и во всех домах. Лишь в тридцатых годах они были вытеснены термометрами Цельсия. В настоящее время шкала Реомюра не применяется.

В 1742 году шведский физик А. Цельсий (1701 – 1744) разделил интервал между температурами плавления льда и кипения воды на 100 частей. Точке кипения воды он присвоил при этом значение температуры, равное 0, точке плавления льда – 100. В 1750 г. Трёмер перевернул местами числа градусов у температуры плавления и кипения воды. Эта шкала получила название стоградусной термодинамической температурной шкалы или шкалы **Цельсия** (см. рисунок 3).

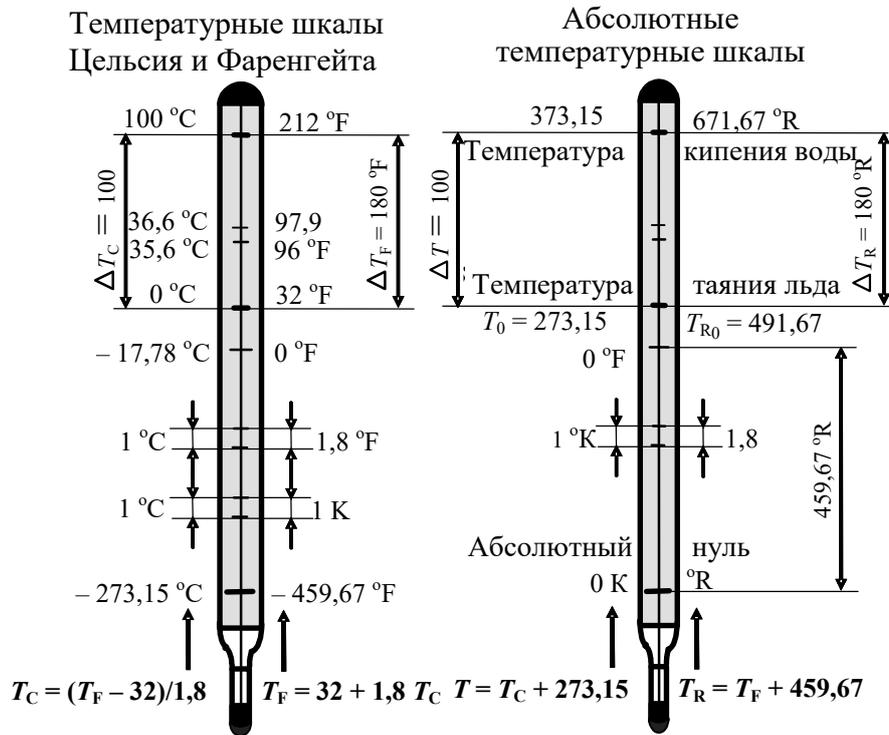


Рисунок 3 – Температурные шкалы

Жидкостные термометры, заполненные ртутью или этиловым спиртом, а при низких температурах – пентаном, применяют и в настоящее время, несмотря на присутствие им недостатки, связанные с зависимостью их показаний от свойств термометрического вещества (с зависимостью температурного коэффициента объёмного расширения от температуры).

Особое место занимают газовые термометры, в которых термометрическим веществом являются газы (азот, водород, гелий) при малых давлениях. Принцип действия газовых термометров основан на линейной зависимости объёма газа от температуры при постоянном давлении, устанавливаемой законом Гей-Люссака

$$V = V_0(1 + \beta T_C), \quad (2.1)$$

где V_0 – объём при температуре Цельсия $T_C = 0$ °C;

$\beta = 1/273,15 \text{ K}^{-1} = 0,003661 \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент объёмного расширения газа при постоянном давлении, остающийся практически постоянным в большом интервале температур при малом давлении для многих газов.

Процесс, протекающий при постоянном давлении, называется изобарным. Для газа такой процесс для различных давлений в соответствии с зависимостью (2.1) изобразится прямыми линиями в диаграмме $T_C - V$ (рисунки 3 и 4). Все изобары пересекают ось T_C в одной и той же точке a , определяемой из условия $V_a = 0$ или $1 + \beta T_{Ca} = 0$, откуда

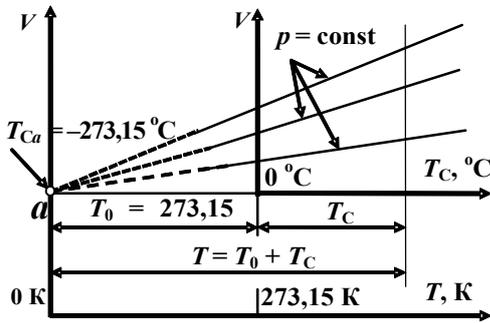


Рисунок 4 – Температурные шкалы Кельвина и Цельсия

$$T_{Ca} = -1/\beta = -273,15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot$$

Сместив начало отсчёта температур в эту точку, мы перейдём от шкалы температур по Цельсию к другой температурной шкале, которая называется абсолютной термодинамической шкалой или шкалой **Кельвина**. Температуру, отсчитанную по такой шкале, стали называть **абсолютной температурой** (в настоящее время эту температуру принято называть **термодинамической температурой**).

Единица температуры в этой шкале получила наименование кельвин (К) в честь английского физика В. Томсона (1824 – 1907), который первым в 1848 году предложил отсчитывать температуру от абсолютного нуля (шкалу Кельвина). В 1892 году Вильяму Томсону был присвоен титул **лорда Кельвина** (по имени реки Кельвин, протекающей вблизи университета в г. Глазго, где он преподавал) за научные заслуги при разработке первого трансатлантического кабеля (1856 – 1865).

Связь между температурой по шкале Кельвина T (**термодинамической температурой**) и температурой T_C по шкале Цельсия (в дальнейшем температурой Цельсия) устанавливается соотношением (см. рисунок 4)

$$T = T_C + 1/\beta = T_C + 272,15\text{К} = T_C + T_0 = t + T_0, \quad (2.2)$$

где T – термодинамическая температура (температура Кельвина), К;

$t \equiv T_C$ – температура Цельсия, $^\circ\text{C}$;

$T_0 = 273,15 \text{ К}$ – термодинамическая температура таяния льда.

Таким образом, шкалы Кельвина и Цельсия смещены друг относительно друга так, что температура Цельсия находится как разность температур Кельвина

$$t \equiv T_C = T - T_0. \quad (2.3)$$

Единицы температур Цельсия и Кельвина равны по значению, так как характеризуют одну и ту же порцию измеряемого свойства (как будет показано далее – интенсивность хаотического движения отдельных молекул газа):

$$[t] = [T_C] = 1 \text{ } ^\circ\text{C} = [T] = 1 \text{ К},$$

следовательно, термины «градус Цельсия» и «кельвин» являются синонимичными наименованиями одной и той же порции измеряемого свойства.

Похожее положение раньше было с давлением, когда единица давле-

ния $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат}$ имела синонимичные наименования: **ата** – атмосфера абсолютная – для абсолютного давления, **ати** – атмосфера избыточная – для избыточного давления. После введения единой единицы давления паскаля (Па) вид давления стал определяться не по наименованию соответствующей единицы давления (5 ати – **избыточное** давление), а по наименованию данного вида давления, например, **избыточное** давление 5 МПа. Аналогичным образом следует выбрать единый термин для наименования единицы термодинамической температуры и температуры Цельсия, например, градус (град) или кельвин (применение кельвина в качестве наименования единицы отрицательной температуры Цельсия может вызвать затруднения), а виды температур различать по их наименованиям: температура Цельсия минус пять градусов ($T_C = -5 \text{ град} = -5^\circ = -5 \text{ К}$), температура Кельвина (термодинамическая) пять градусов ($T = 5 \text{ град} = 5^\circ = 5 \text{ К}$).

Поэтому разность температур (температурный интервал) может выражаться как в кельвинах, так и в градусах Цельсия (см. рисунок 3):

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 116^\circ \text{C} = T_2 - T_1 = 116 \text{ К} = \Delta T \quad (2.4)$$

Для лучшего понимания сказанного можно провести аналогию между термодинамическим (абсолютным) давлением P и термодинамической (абсолютной) температурой T , между атмосферным давлением $P_{\text{ат}}$ и температурой таяния льда T_0 , избыточным давлением $P_{\text{и}}$ и температурой Цельсия T_C . Данные величины имеют аналогичную математическую

$$P = P_{\text{ат}} + P_{\text{и}}$$

$$T = T_0 + T_C$$

и графическую связь (рисунок 5).

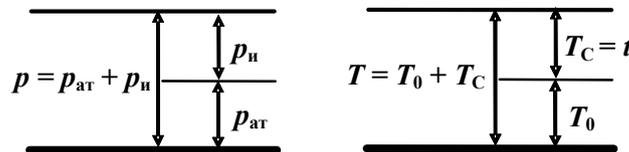


Рисунок 5 – Аналогия между термодинамическими температурами и давлениями

Физический смысл температуры. Согласно кинетической теории газов средняя кинетическая энергия молекулы $E_{\text{к.мол}}$ и термодинамическая температура газа связаны соотношением

$$E_{\text{к.мол}} = \frac{j}{2} k_B T,$$

где j – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа атомов в молекуле, называется числом степеней свободы;

k_B – постоянная Больцмана.

Если разделить кинетическую энергию молекулы на численное значение температуры $\{T\}$, то с учётом (1.17) получим единичную кинетическую энергию молекулы – энергию молекулы при единичной температуре (при $T = 1 \text{ К}$)

$$E_{\text{к.мол}}^1 = (E_{\text{к.мол}})_{T=1\text{К}} = E_{\text{к.мол}} / \{T\} = \frac{j}{2} k_B \cdot [T] = \frac{j}{2} k_B \cdot 1 \text{ К}$$

Отсюда $\{T\} = E_{\text{к мол}} / E_{\text{к мол}}^1$

и физический смысл температуры – термодинамическая температура показывает, во сколько раз кинетическая энергия молекулы газа в данном состоянии отличается от кинетической энергии молекулы при единичной температуре, принятой за основу (1 К). Если представить энергию молекулы при единичной температуре в виде энергетического кубика, то температура (численное значение) будет показывать число таких энергетических кубиков, составляющих энергию молекулы при этой температуре. Таким образом, температура T позволяет сравнить малые энергии молекул и их изменения (для одноатомного газа $j=3$ и $E_{\text{к мол}} = 2,070987 \cdot 10^{-23}$ Дж) в виде конечных значений, удобных для практики.

Количество вещества. Количество (совокупность) частиц (структурных единиц, элементов – атомов, молекул, ионов и т. п.), содержащихся в теле, характеризуется **числом частиц** N , которое не имеет собственной единицы. Число частиц N – величина, имеющая большое числовое значение даже для тел малой массы (например, водород массой 2 г содержит число молекул порядка 10^{23}) и поэтому она мало пригодна для практических расчетов изменения запаса вещества в системе. Поэтому возникла необходимость задавать количество частиц системы не числом отдельных частиц N , а числом укрупнённых порций таких частиц $\{\mu\}$.

В качестве такой **укрупнённой порции частиц** принято брать число атомов, содержащихся в **порции** изотопа углерода ^{12}C **массой** 0,012 кг (**12 г**). Это число частиц можно получить, если разделить массу m этой **порции** углерода на массу одного атома углерода $m(^{12}\text{C}) = 1,9926482 \cdot 10^{-26}$ кг – по данным на 1987 год [ГСССД 1-87],

$$N_A = m/m(^{12}\text{C}) = 0,012 \text{ кг} / 1,9926482 \cdot 10^{-26} \text{ кг} = \mathbf{6,0221367 \cdot 10^{23}}.$$

Этому числу частиц было присвоено наименование «**число Авогадро**» в честь итальянского физика **Амедео Авогадро** (1776 – 1856), сформулировавшего в 1811 г. закон (**закон Авогадро**), согласно которому в равных объёмах различных газов при одинаковых условиях содержится одинаковое количество **молекул**. Несмотря на то, что Авогадро ввёл новое для науки понятие «**молекула**» (от греч. – **массочка**) в 1811 году, только на химическом конгрессе 1860 года была принята резолюция, закрепляющая различные понятия атома и молекулы.

Порция вещества, характеризуемая числом частиц $N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23}$, названа **молем (моль)**, а физическая величина

на, характеризующая запас (количество) вещества в таких укрупнённых порциях, – **количеством вещества μ** , единичное значение которого $[\mu]$ так же названо **молем**.

Числовое значение количества вещества $\{\mu\}$ есть не что иное, как **относительное число частиц** – число укрупнённых порций частиц (молей), содержащихся в данном теле:

$$\{\mu\} = N/N_A \quad (2.5)$$

Именно так и следует пояснять смысл этой величины.

Если в уравнении (2.5) числовое значение количества вещества в соответствии с выражением (1.17) представить в виде $\{\mu\} = \mu/[\mu]$, то можно установить связь между числом частиц N и количеством вещества μ :

$$N = N_A \{\mu\} = N_A \mu / [\mu] = k_A \mu, \quad (2.6)$$

где $k_A = N_A / [\mu] = 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – **постоянная Авогадро**, равная отношению **числа Авогадро** N_A к единице количества вещества $[\mu] = 1 \text{ моль}$.

В настоящее время **постоянную Авогадро** обозначают символом N_A , в основу которого положен символ N , используемый для обозначения числа частиц, что даёт основание, как это иногда встречается, **постоянную Авогадро**, имеющую единицу моль^{-1} , называть **числом Авогадро**, не имеющим обозначения своей единицы. Чтобы избежать такой путаницы, **постоянную Авогадро** рекомендуется обозначать символом K_A (по аналогии с обозначением постоянной **Больцмана** K_B), а **число Авогадро** – N_A

Исходя из (2.6), получаем следующее уравнение связи для **количества вещества**

$$\mu = N / k_A; \quad [\mu] = 1 \text{ моль}.$$

Следовательно, **количество вещества** – физическая величина, характеризующая **количество частиц** (структурных единиц, элементов) системы **в укрупнённых порциях этих частиц – молях**.

Единицей количества вещества является **моль** – одна из основных единиц СИ, – определяемый как количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (такую порцию частиц), сколько содержится атомов в изотопе углерода ^{12}C массой 0,012 кг.

Молярная масса. Отношение массы вещества к количеству вещества (молярности) называется молярной массой

$$M = m/\mu, \quad [M] = 1 \text{ кг/моль}. \quad (2.7)$$

Рекомендуемые дольные единицы молярной массы – **г/моль** и **кг/кмоль**.

Значение молярной массы вещества, выраженной в г/моль или кг/кмоль, численно равно относительной молекулярной массе вещества, определяемой по таблице Д. И. Менделеева: $\{M\} = M_r$. Например, $M_{\text{H}_2} = 2,0158 \text{ г/моль} = 2,0158 \text{ кг/кмоль}$. В связи с этим молярную массу на практике чаще всего выражают в г/моль или кг/кмоль. Не следует отождествлять молярную массу и относительную молекулярную массу, так как последняя является величиной безразмерной, отличающейся по физическому смыслу от молярной массы.

Молярная масса численно равна массе молекул, число которых равно числу Авогадро, $\{M\} = \{m_{\text{мол}} N_A\}$, если в качестве единицы молярной массы берётся 1 кг/кмоль или 1 г/моль.

Молярный объём. Отношение объёма однородного вещества к количеству вещества (молярности) называется молярным объёмом

$$V_\mu = V/\mu, \quad [V_\mu] = 1 \text{ м}^3/\text{моль}. \quad (2.8)$$

Кубический метр на моль равен молярному объёму вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объём 1 м³.

Молярный объём разрежённого газа при **нормальных физических условиях (НФУ)**: $T_0 = 273,15 \text{ К}$ (0° С) и $p_0 = 101\,325 \text{ Па}$ равен (по данным на 1986 год)

$$V_{\mu 0} = 22,4141 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль} = \mathbf{22,4141 \text{ м}^3/\text{кмоль}}.$$

Газовые постоянные. Путём объединения (обобщения) газовых законов Гей-Люссака и Бойля–Мариотта можно получить следующее соотношение

$$pV/T = \text{const} = R_{\text{тела}}; \quad [R_{\text{тела}}] = 1 \text{ Дж/К}, \quad (2.9)$$

из которого следует, что для данного количества (данной массы) разрежённого газа отношение произведения давления на объём к термодинамической температуре есть величина постоянная. Эту постоянную величину, поскольку она относится ко всему телу (системе), назовём **газовой постоянной тела** (газообразного тела) и обозначим $R_{\text{тела}}$.

Удельная газовая постоянная. Отношение газовой постоянной тела к массе газа называется удельной газовой постоянной

$$R = R_{\text{тела}}/m, \quad [R] = 1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \quad (2.10)$$

Молярная (универсальная) газовая постоянная. Отношение газовой постоянной тела к количеству вещества (молярности) газа называется молярной газовой постоянной

$$R_\mu = R_{\text{тела}}/\mu, \quad [R_\mu] = 1 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К}). \quad (2.11)$$

Решая совместно уравнения (2.8), (2.9) и (2.11), можно выразить молярную газовую постоянную через параметры состояния и вычислить её значение по соответствующим значениям параметров состояния, например, для значений параметров состояния при

нормальных физических условиях (по данным на 1986 г)

$$R_{\mu} = p_0 V_{\mu 0} / T_0 = 101\,325 \cdot 22,4141 \cdot 10^{-3} / 273,15 = \\ = \mathbf{8,314\,51} \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = \mathbf{8314,51} \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Поскольку молярный объём $V_{\mu 0}$ при нормальных физических условиях для всех разрежённых газов имеет одинаковое значение, то и **молярная газовая постоянная** R_{μ} для всех газов также имеет одинаковое значение. Это дало основание называть эту газовую постоянную **универсальной газовой постоянной**. Однако этот термин не соответствует уравнению связи (2.11) для молярной газовой постоянной и поэтому считается устаревшим.

Решая совместно уравнения (2.7), (2.10) и (2.11), можно установить связь между удельной газовой постоянной и молярной газовой постоянной

$$R = R_{\text{тела}}/m = R_{\mu} \mu / m = R_{\mu} / M. \quad (2.12)$$

Используя это соотношение, определим в качестве примера удельную газовую постоянную водорода ($M_{\text{H}_2} = 2,0158 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$)

$$R_{\text{H}_2} = 8,31451 / 2,0158 \cdot 10^{-3} = 4124,670 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Отношение газовой постоянной тела к числу молекул газа можно назвать **молекулярной газовой постоянной**

$$R_N = R_{\text{тела}}/N, \quad [R_N] = 1 \text{ Дж}/\text{К}. \quad (2.13)$$

Молекулярная газовая постоянная определяет «долю» газовой постоянной тела, приходящуюся на одну молекулу.

Если $R_{\text{тела}}$ выразить с помощью (2.11) через молярную газовую постоянную, то с учётом (2.6) получим

$$R_N = R_{\mu} \mu / N = R_{\mu} / k_A = k_B. \quad (2.14)$$

Отношение двух констант даёт новую константу, которую принято называть **постоянной Больцмана**

$$k_B = R_{\mu} / k_A = 8,31451 / 6,0221367 \cdot 10^{23} = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}.$$

Следовательно, в соответствии с выражением (2.14), **постоянная Больцмана** есть не что иное, как молекулярная газовая постоянная, определяемая отношением газовой постоянной тела к числу молекул газа (2.13).

Разновидности записи уравнения состояния идеального газа. Уравнение, выражающее связь между параметрами равновесного состояния термодинамической системы или локально равновесных её частей, $F(p, v, T) = 0$ называется уравнением состояния.

В связи с данным определением уравнение (2.9) $pV/T = R_{\text{тела}}$ является уравнением состояния идеального газа. С учётом введённых га-

зовых постоянных это уравнение можно записать в следующих видах:

◆ через удельную газовую постоянную R

– для газа объёмом V $pV = mRT$, (2.15)

– для удельного объёма v $pv = RT$

– и для плотности ρ $p = \rho RT$; (2.16)

◆◆ через молярную газовую постоянную R_μ

– для газа массой m $pV = m \frac{R_\mu}{M} T$ (2.17)

– для количества вещества (молярности) μ $pV = \mu R_\mu T$

– для молярного объёма V_μ $pV_\mu = R_\mu T$; (2.18)

Удельная газовая постоянная для смеси газов находится по формуле

$$R_{см} = R_\mu / M_{см} = \sum g_i R_i, \quad (2.19)$$

где $M_{см}$ – молярная масса смеси, равная

$$M_{см} = \sum r_i M_i = \sum x_i M_i = \frac{1}{\sum g_i / M_i}. \quad (2.20)$$

Здесь $x_i = \mu_i / \mu_{см}$ – молярная доля i -го компонента смеси, равная в случае идеального газа объёмной доле $r_i = V_i / V_{см}$;

$g_i = m_i / m_{см}$ – массовая доля i -го компонента смеси.

$$g_i = r_i M_i / M_{см} = r_i M_i / \sum r_i M_i.$$

Плотностью компонента смеси называется отношение массы компонента смеси к его объёму (парциальному объёму)

$$\rho_i = m_i / V_i. \quad (2.21)$$

Парциальной плотностью, или массовой концентрацией компонента смеси называется отношение массы компонента смеси к объёму смеси

$$\rho'_i = m_i / V_{см} \quad (2.22)$$

В таблице 3 приведён химический состав атмосфер Земли, Венеры и Марса.

Таблица 3 – Химический состав атмосфер Земли, Венеры и Марса

Газ	Молярная масса M_i , кг/кмоль	Массовый состав g_i сухого воздуха Земли	Объёмный состав r_i , % атмосферы		
			Земли	Венеры	Марса
Азот N_2	28,0134	0,7553	78,03	3,5	2,5÷2,7
Кислород O_2	31,9982	0,2314	20,99	$< 10^{-3}$	0,1÷0,15
Аргон Ar	39,948	0,0128	0,94	0,0015	1,5÷1,6
Диоксид углерода CO_2	44,0098	0,0005	0,03	96,5	95
Водород H_2	2,0158	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-3}$	–

Методика определения удельной газовой постоянной воздуха

В основу определения удельной газовой постоянной воздуха положено выражение (2.15), из которого получаем

$$R = pV/(mT). \quad (2.23)$$

Масса воздуха в сосуде определяется двумя способами: путём вакууммирования с помощью насоса – прямой метод и путём нагнетания в сосуд избыточного воздуха массой m_n – косвенный (расчётный метод).

Рассмотрим подробнее второй способ определения массы воздуха в сосуде. Пусть в сосуде вместимостью V находится воздух массой m_a при комнатной температуре T и атмосферном давлении p_a . Уравнение состояния (2.15) в этом случае имеет вид

$$p_a V = m_a R T. \quad (2.24)$$

С помощью насоса добавим в сосуд некоторое количество воздуха m_n , в результате чего давление в сосуде повысится на величину p_n и станет равным

$$p_2 = p_a + p_n.$$

Температура воздуха в результате теплообмена через некоторое время станет прежней T (изменением давления p_2 пренебрегаем). Уравнение состояния в этом случае запишется в виде

$$p_2 V = m_2 R T \quad (2.25)$$

Из уравнения (2.24) и (2.25) получим:

$$p_a/p_2 = m_a/m_2 \quad \text{или} \quad p_a/(p_a + p_n) = m_a/(m_a + m_n).$$

Откуда находим массу воздуха при атмосферном давлении

$$m_a = m_n p_a / p_n. \quad (2.26)$$

Описание лабораторной установки. Мерный сосуд *1* (рисунок б) при открытом кране *2* поочерёдно подсоединяется к трубкам вакууммирования *4* и нагнетания *10*. Включение линии нагнетания осуществляется с помощью трёхходового крана *5*, а отсоединение мерного сосуда от насоса *13* осуществляется вентилями *6* и *7*. Кран *2* на мерном сосуде служит для его отключения от атмосферы перед взвешиванием его на весах *3*. Разрежение измеряется вакуумметром *9*, избыточное давление манометром *11*, атмосферное давление барометром *12*, а температура воздуха термометром *14*. Для включения насоса служит пускатель *8*.

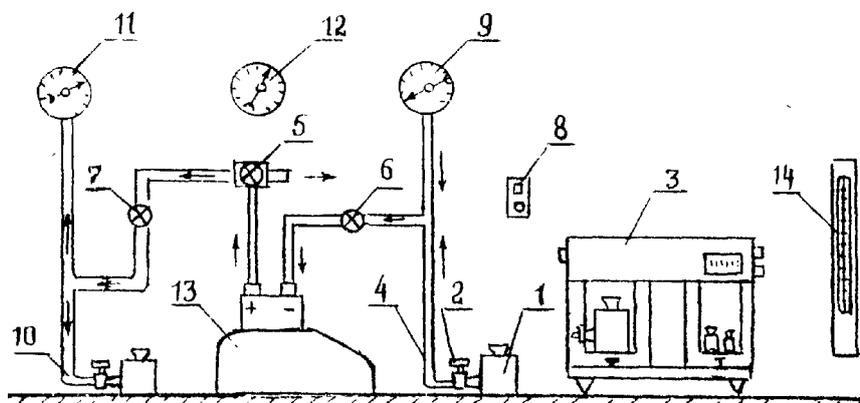


Рисунок 6 – Схема опытной установки для определения R

Порядок выполнения работы

Опыт первый:

1) под руководством преподавателя или лаборанта определить массу сосуда m_{c1} при открытом кране *2* с помощью весов *3*;

2) подсоединить сосуд к трубке *4*. Установить кран *5* в положение «атмосфера», вентили *6* и *7* открыть, включить насос пускателем *8*;

3) при достижении полного вакууммирования (стрелка вакуумметра должна зайти за отметку 100, соответствующую разрежению 736 мм рт. ст) закрыть кран *2* и плавно отсоединить сосуд от трубки.

Выключить насос (во избежание попадания масла из насоса в трубки его следует выключать только после снятия разрежения в системе, т. е. **после отсоединения сосуда от трубки *4* и открытым вентиле *6***);

4) определить путём взвешивания массу сосуда без воздуха m_c ;

5) рассчитать массу воздуха в сосуде при атмосферном давлении

$$m'_a = m_{c1} - m_c;$$

б) рассчитать удельную газовую постоянную воздуха (2.23)

$$R' = p_a V / (m'_a T);$$

- Здесь p_a – атмосферное давление, Па (1мм рт.ст. = 133,322 Па);
 $T = T_C + T_0 = t + 272,15$ – температура воздуха, К;
 $V = 360 \text{ мл} = 360 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – вместимость сосуда;
 7) опытные и расчётные значения величин занести в таблицу 4.

Таблица 4– Опытные и расчётные данные по первому опыту

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	p_a			$m_{c1},$ МГ	$m_c,$ МГ	m'_a		$R',$ Дж/(кг.К)	$\varepsilon(R'), \%$
		мм рт. ст.	Па	МГ			кг			

Опыт второй:

1) подсоединить сосуд к трубке 10. Кран 5 установить в положение «насос». Вентиль 6 и 7 открыть. Включить насос пускателем 8.

2) при показаниях манометра 120–160 делений (манометр на 1,6 ат) закрыть вентиль 7 и сразу же установить кран 5 в положение «атмосфера»). Выключить насос;

3) дать выдержку 10–15 секунд и записать число делений манометра p_n . Перевести показания манометра вначале в атмосферы (с учётом того, что вся шкала на 1,6 ат), а затем в паскалы (1 ат = $0,981 \cdot 10^5$ Па). Закрыть кран 2 и отсоединить сосуд;

4) путём взвешивания определить массу сосуда m_{c2} при давлении воздуха в нём $p_2 = p_a + p_n$;

5) При обработке результатов опыта вычислить:

а) массу избыточного воздуха в сосуде $m_n = m_{c2} - m_{c1}$;

б) массу воздуха в сосуде при атмосферном давлении m'_a по (2.26);

в) удельную газовую постоянную воздуха по формуле (2.23)

$$R'' = p_a V / (m''_a T)$$

6) при расчётном определении газовой постоянной воздуха вычислить:

а) молярную массу воздуха M_v по формуле (2.20), используя молярные массы и объёмные доли газов, приведённые в таблице 3;

б) расчётное значение удельной газовой постоянной воздуха R по формуле (2.19);

в) плотность воздуха при нормальных физических условиях ρ_0 и плотность воздуха ρ_2 при давлении p_2 ;

7) Результаты измерений и расчётов занести в таблицу 5.

Таблица 5 – Опытные и расчётные данные по второму опыту

$p_{и}$			$m_{с2},$ мг	$m_{и},$ мг			R' Дж/(кг·К)	R	$p_2,$ Па	ρ_0 кг/м ³	ρ_2	$\varepsilon(R'')$ %
Число делений	ат	Па			мг	кг						

Вычислить относительные погрешности (1.8) опытного определения газовой постоянной и сравнить их с предельной относительной погрешностью опыта

$$\varepsilon_{п}(R) = (\Delta V/V + \Delta p/p_{и} + \Delta T/T + \Delta m/m_{и})100 ,$$

где $\Delta V = 5$ мл, $\Delta T = 0,5$ К, $\Delta m = 1$ мг – абсолютные предельные погрешности измерения объёма, температуры, массы; предельную погрешность измерения давления Δp вычислить по формуле (1.9) с учётом класса точности манометра.

Используя значения газовой постоянной, определённые разными подгруппами студентов (3 – 4 подгруппы), рассчитать статистическую погрешность среднего арифметического значения результата измерения газовой постоянной по формуле (1.13). Используя выражение (1.16), записать истинное значение результата нескольких измерений удельной газовой постоянной.

Обычно статистическая погрешность при измерении неизменной величины меньше предельной, т. к. отклонения отдельных измерений от среднего не однозначны, как это принято для предельной погрешности. Если же измерения проводить небрежно, статистическая погрешность может быть больше предельной. Точность разовых измерений оценивают только по предельной погрешности.

Отчёт о работе. Отчёт о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения удельной газовой постоянной воздуха, схему лабораторной установки, таблицы и расчёты.

Контрольные вопросы

1. Написать уравнения состояния для полного и удельного объёмов.
2. Виды давлений и их определение.
3. Температурные шкалы.
4. Методика экспериментального и расчётного определения удельной газовой постоянной воздуха.
5. Как рассчитать плотность воздуха при нормальных условиях, плотность воздуха на улице, массу воздуха в комнате?
6. Выразить давление 5 ат в паскалях, барах, мм рт. ст. и мм вод. ст.

Лабораторная работа № 2. Первый закон термодинамики

Цель работы. Изучение первого закона термодинамики путём практического применения его к изобарному процессу.

Вводная часть

Первый закон термодинамики (ПЗТ). Первый закон термодинамики (первое начало термодинамики) – аналитическое (математическое) выражение закона сохранения движения при изменении его формы, записываемое в виде балансового уравнения для изменения физической величины – энергии.

В настоящее время под термином «**энергия**» понимают как **само движение** (свойство материи), так и **физическую величину** (E , Дж), являющуюся (наряду с импульсом и моментом импульса) количественной (числовой) характеристикой запаса движения в системе. Очевидно, что само движение и его числовая характеристика не одно и то же (см. подраздел 1.3.1).

Движение – неотъемлемое **свойство** (атрибут) **материи**, способ существования материи: нет материи без движения и нет движения без материи; наиболее общее понятие, включающее в себя перемещение, изменение (развитие, регресс), взаимодействие и т. п.

В технической термодинамике различают две формы (вида) движения: **хаотическую** (тепловую) – **ХФ** и **упорядоченную** (направленную, механическую) – **УФ**; **два способа (процесса) передачи движения** – хаотический (**теплообмен**) и упорядоченный (**совершение работы**).

Хаотическая (тепловая) форма движения – носителями движения являются микрочастицы (атомы, молекулы и др.), совершающие хаотические микроскопические перемещения в пространстве вблизи их центра инерции.

Упорядоченная (механическая) форма движения – носителями движения являются макроскопические тела или микрочастицы (атомы, молекулы и др.), совершающие упорядоченное перемещение в пространстве.

Наиболее **универсальной** количественной **характеристикой** (мерой) движения, применимой для любых форм движения (хаотической и упорядоченной) является **энергия** (импульс – менее универсальная мера количества движения, т. к. для хаотического движения он равен нулю, однако и энергия учитывает не все свойства движения – она не учитывает направление движения).

Энергия – скалярная физическая величина (именованное число – предмет из мира идей), характеризующая количество (запас) движения как в самой системе (теле), так и количество движения, передава-

емого через границы системы, и определяемая как произведение силы на перемещение:

$$E = \int (\vec{F}' d\vec{r})_{\text{внеш}} = - \int (\vec{F} d\vec{r})_{\text{внутр}}, \quad (2.27)$$

где \vec{F}' – внешняя сила (например, сила действия поршня на газ);
 \vec{F} – внутренняя сила (например, сила действия газа на поршень), $\vec{F}' = -\vec{F}$;
 $d\vec{r} = \vec{c} dt$ – перемещение, на котором действует сила.

Например, **кинетическая** энергия определяется интегралом от силы инерции $\vec{F}_{\text{ин}} = -m d\vec{c}/dt$ (внутренняя сила) или от результирующей внешних сил $\vec{F}_{\text{рез}} = m d\vec{c}/dt$

$$E_k = - \int \vec{F}_{\text{ин}} d\vec{r} = \int \vec{F}_{\text{рез}} d\vec{r} = \int m (d\vec{c}/dt) d\vec{r} = m \int_0^c \vec{c} d\vec{c} = mc^2/2,$$

а гравитационная **потенциальная** энергия – интегралом от внешней (результатирующей) силы, равной и противоположной по знаку внутренней силы тяжести $\vec{F}_{\text{рез}} = -\vec{F}_g = -m\vec{g} = \vec{k}mg$ ($\vec{g} = -\vec{k}g$), которую нужно приложить к телу извне, чтобы поднять его на высоту h от поверхности Земли,

$$E_p = \int \vec{F}_{\text{рез}} d\vec{r} = - \int m\vec{g} d\vec{r} = \vec{k}mg \int_0^{z=h} \vec{k} dz = mgh,$$

где \vec{k} – единичный вектор, направленный вертикально вверх.

Внутренняя энергия U – энергия хаотического (теплового) движения собственных микрочастиц (атомов, молекул, электронов, а также так называемых частиц-связников, обеспечивающих взаимодействие атомов на расстоянии) системы относительно их центра инерции. В понятие внутренней энергии включаются кинетическая энергия хаотического движения молекул, потенциальная энергия взаимодействия между молекулами и внутримолекулярная энергия (химическая и ядерная). В технической термодинамике внутримолекулярная («нулевая») энергия не рассматривается и внутренняя энергия отождествляется с кинетической и потенциальной энергиями молекул.

Следовательно, **внутренняя энергия** – это суммарная кинетическая и потенциальная энергия всех молекул рабочего тела

$$U = E_{\text{внутр}} = \sum (E_k + E_p)_{\text{молек } i} = U_k + U_p.$$

Кинетическая энергия беспорядочного теплового движения молекул пропорциональна температуре $U_k = U(T)$, потенциальная энергия взаимодействия зависит от расстояния между молекулами, т. е. от объёма тела $U_p = U(V)$. Поэтому внутренняя энергия реального газа является функцией макроскопических параметров, например, температуры и объёма: $U = U(T, V)$.

В идеальном газе пренебрегают силами межмолекулярного взаи-

модействия на расстоянии и внутреннюю энергию рассматривают как сумму кинетических энергий беспорядочного движения всех молекул, т. е. как функцию одной только температуры

$$U_{\text{ид.газ}} = \sum E_{\text{кмолек } i} = U_k = U(T).$$

Для вывода уравнения изменения энергии какой-либо системы в самом общем виде рассмотрим изолированную систему, состоящую для простоты вывода только из трёх взаимодействующих тел (рисунок 7) и применим к ней закон сохранения энергии.

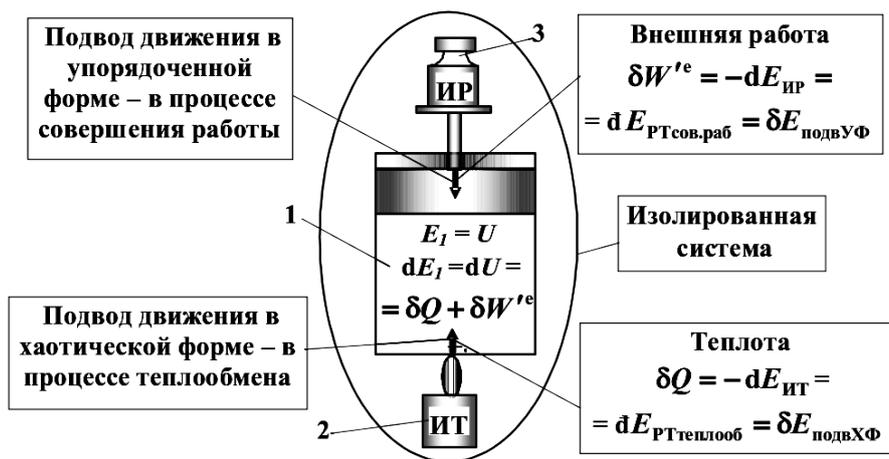


Рисунок 7 – К выводу уравнения первого закона термодинамики из ЗСЭ

Пусть рабочее тело (РТ) 1 (например, газ в цилиндре с подвижным поршнем и теплопроводными стенками) получает движение в процессе (путём) теплообмена (микроскопическим неупорядоченным путём) от источника тепла (ИТ) 2 и в процессе совершения работы (макроскопическим упорядоченным путём) от источника работы – тела 3 (например, от гири, пружины, штока или от жидкой среды, оказывающей давление на поршень с внешней стороны).

Согласно ЗСЭ для этих трёх тел, образующих изолированную систему, можно записать следующее равенство:

$$E_{\text{ис}} = \sum E_i = E_1 + E_2 + E_3 = E + E_{\text{ИТ}} + E_{\text{ИР}} = \text{const.} \quad (2.28)$$

Продифференцируем это уравнение и перепишем его так

$$dE \equiv dE_1 = -dE_2 - dE_3 \equiv -dE_{\text{ИТ}} - dE_{\text{ИР}} = -dE_{\text{ос}}. \quad (2.29)$$

Из соотношения (2.29), полученного из ЗСЭ, следует физическое утверждение: приращение энергии системы (первого тела) равно убыли энергии окружающей среды, состоящей из источников тепла 2 и источников работы 3.

Убыли энергий тел ($-dE_2 \equiv -dE_{\text{ИТ}}$) и ($-dE_3 \equiv -dE_{\text{ИР}}$) можно рассматривать как элементарные энергии δE движения, переданного

через границы рабочего тела I соответственно в хаотической и упорядоченной формах. Следовательно, можно записать

$$dE \equiv dE_1 = \delta E_{\text{ХФ}} + \delta E_{\text{УФ}}. \quad (2.30)$$

Здесь для обозначения элементарных энергий, характеризующих переданное движение через границы системы, используется символ элементарности δ .

Согласно балансовому уравнению энергии (2.30) полное приращение энергии тела (системы) равно сумме элементарных энергий, характеризующих движение, переданное через границу системы в хаотической форме (ХФ) и в упорядоченной форме (УФ); при этом число взаимодействующих тел может быть любым.

Исходя из балансового соотношения (2.30) вводятся физические величины – теплота и работа. Процессы переноса движения в упорядоченной форме, которые можно охарактеризовать макроскопическими силами и перемещениями, принято называть **процессами совершения работы**, а энергию движения, переданного в упорядоченной макроскопической форме, или частичное изменение энергии системы в процессе совершения работы – **работой**

$$\delta W' \equiv \delta E_{\text{передУФ}} = (\vec{F} d\vec{s})_{\text{макро}}. \quad (2.31)$$

Процессы переноса движения в хаотической форме, которые можно охарактеризовать только микроскопическими силами и микроперемещениями, принято называть **процессами теплообмена**, а энергию движения, переданного в хаотической форме, или частичное приращение энергии системы в процессе теплообмена – **теплотой**

$$\delta Q \equiv \delta E_{\text{передХФ}} = \sum (\vec{F} d\vec{s})_{\text{микро}}. \quad (2.32)$$

Теплоту как изменение энергии системы в соответствующем процессе принято рассчитывать через изменение температуры и теплоёмкость $\delta Q = C dT$ или через изменение энтропии системы $\delta Q = T dS$, а как переданную энергию в процессах теплообмена – через тепловые потоки $\delta Q = \Phi dt$, определяемые из соответствующих уравнений теории теплообмена (Фурье, Ньютона-Рихмана и др.).

Итак, **теплота и работа** – это энергии движения, переданного соответственно в процессах теплообмена и совершения работы (в связи с этим их иногда называют энергиями перехода, или энергиями в процессе перехода).

В теории переноса энергия подводимого движения является положительной величиной, а энергия отводимого движения – отрицательной величиной. Следовательно, теплота и работа также будут алгебраическими величинами: подводимая теплота и совершаемая над системой работа положительны, так как они согласно (2.30) увели-

чивают энергию системы. Такая работа совершается внешними силами и обозначается W' – внешняя работа.

С учётом введённых величин – работы (2.31) и теплоты (2.32) – уравнение энергии (2.30) может быть записано для полной энергии в виде

$$dE = \delta Q + \delta W'.$$

Впервые уравнение ПЗТ получил Р. Клаузиус, которое он записал для изменения внутренней энергии $dU \equiv dE_{\text{внутр}}$ в таком виде:

$$\delta Q = dU + \delta W, \quad (2.33)$$

где $\delta W = -\delta W'$ – работа внутренних сил, равная и противоположная по знаку работе внешних сил.

В учебниках по термодинамике уравнение ПЗТ не выводится, а сразу записывается в виде (2.33) и читается так: теплота идёт на изменение внутренней энергии и на совершение работы.

Единицей энергии, теплоты и работы СИ являются джоуль:

$$[E] = [Q] = [W] = [F] \cdot [r] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Дж}.$$

Применительно к газу, заключённому в цилиндре, наибольшее значение имеет работа **изменения объёма** внутренних сил давления по перемещению поршня. Если давление газа в цилиндре P , то на поршень действует сила $F = p \cdot A$. При перемещении поршня на пути dx совершается работа $\delta W = p \cdot A dx = p dV$.

Тогда уравнение ПЗТ (2.33) с учётом элементарной и конечной работ изменения объёма примет вид:

$$\begin{aligned} \delta Q &= dU + p dV, \\ Q &= \Delta U + \int p dV. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Что касается теплоты, то её так просто не удаётся рассчитать через микроскопические силы и перемещения (2.32) и она исторически определяется пропорционально изменению температуры рабочего тела

$$\begin{aligned} \delta Q &= C_x dT = c_x m dT, \\ Q &= c_x m (T_2 - T_1) = c_x m (t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (2.35)$$

где C_x – теплоёмкость тела, Дж/К;

$c_x = C_x/m$ – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К).

Теплоёмкость зависит от процесса и имеет соответствующие обозначения. Так, в случае изобарного процесса ($X = p$) она обозначается c_p , а изохорного ($X = V$) – c_v .

В случае **изохорного** процесса ($V = \text{const}$) работа изменения объёма $p dV$ равна нулю ($dV = 0$ – нет изменения объёма газа и поршень неподвижен), и изменение внутренней энергии равно теп-

лоте

$$\begin{aligned}dU &= \delta Q_v = c_v m dT, \\ \Delta U &= Q_v = c_v m \Delta T.\end{aligned}\quad (2.36)$$

Выражение (2.36) справедливо только для идеального газа, т. к. в случае реального газа внутренняя энергия зависит ещё от объёма.

С учётом выражений для теплоты (2.35) и изменения внутренней энергии (2.36) уравнение ПЗТ (2.34) примет вид

$$Q = c_x m \Delta T = c_v m \Delta T + \int p dV = \Delta U + W. \quad (2.37)$$

Уравнение (2.37) справедливо для любых процессов. В случае изохорного процесса работа равна нулю, изотермического – изменение внутренней энергии равно нулю, а в адиабатном процессе теплота равна нулю.

Методика практического применения первого закона термодинамики к процессу изобарного нагрева воздуха в сосуде

Уравнение первого закона термодинамики (2.37) для изобарного процесса ($p = \text{const}$), протекающего в конечном интервале изменения параметров, запишется в виде

$$Q_p = c_p m (T_2 - T_1) = c_v m (T_2 - T_1) + p (V_2 - V_1). \quad (2.38)$$

В процессе опыта измеряются начальные и конечные температуры (T_1, T_2) и объёмы (V_1, V_2), давление газа P и рассчитывается масса газа m . Затем все величины подставляются в (2.38) и отдельно подсчитываются левая и правая части этого уравнения, а затем значения левой и правой частей сравниваются между собой. При тщательно проведённом опыте и расчётах левая часть получается близкой правой части, что указывает на справедливость записи первого закона термодинамики в виде (2.38).

Для уменьшения числа величин и, соответственно, погрешности расчёта левой и правой частей уравнения (2.38) оно приводится к виду

$$V_2/V_1 = T_2/T_1. \quad (2.39)$$

Справедливость уравнения (2.39) и, следовательно, уравнения (2.38) будет доказана, если погрешность опыта

$$\varepsilon = \frac{|T_2/T_1 - V_2/V_1|}{T_2/T_1} 100 \quad (2.40)$$

(при отсутствии заклинивания поршенька и наличия капелек воды в сосуде) будет меньше **предельной относительной погрешности**, вычисляемой по формуле

$$\varepsilon_{\Pi} = (\Delta V/V_1 + \Delta V/V_2 + \Delta T/T_1 + \Delta T/T_2) 100, \quad (2.41)$$

где абсолютные **погрешности** изменения объёмов ΔV и температур ΔT берутся равными половине цены наименьшего деления шкалы приборов.

Описание лабораторной установки. Установка состоит из цилиндра с подвижным поршнем (стеклянный шприц со стеклянным поршнем: металлический поршень будет заклиниваться при нагревании) 1, сосуда с водой 2, в нижней части которого установлен электронагреватель 3, отключающийся при замыкании контактного термометра 4 и срабатывании реле усилительного устройства 5, термометра 6 для измерения температуры воды и, следовательно, воздуха в шприце (рисунок 8).

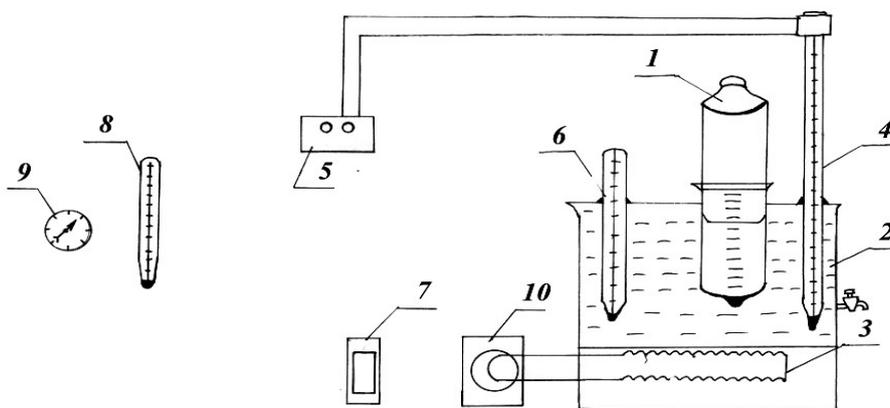


Рисунок 2

Рисунок 8 – Установка для исследования изобарного процесса

Порядок выполнения работы

1 Проверить наличие воды в сосуде 2. При необходимости долить (уровень воды должен быть ниже крышки сосуда на 5–10 мм).

2 Вставить вилку электронагревателя в розетку 10 и включить выключатель 7. При включении зажигается левая индикаторная лампочка усилительного устройства 5. Нагрев проводить до момента замыкания цепи в контактном термометре 4 и отключения нагревателя (зажигается правая индикаторная лампочка усилителя).

3 Взять шприц при комнатной температуре и установить поршень так, чтобы начальный объём воздуха в шприце составлял 90% от максимального объёма шприца. Вращая поршень, добиться, чтобы усилие для его перемещения было минимальным (в случае тугого хода процесс уже будет не изобарным, либо давление воздуха в шприце будет превышать атмосферное). Закрывать шприц иглой с расплюснутым концом и установить его в сосуд с водой. В результате нагрева объём воздуха увеличивается и поршень перемещается.

4 Во время опыта измерить:

а) начальный объём воздуха в цилиндре V_1 , мл, по делениям шприца l при комнатной температуре;

б) начальную температуру воздуха в шприце t_1 , °С (равна температуре комнатного воздуха) термометром δ ;

в) давление воздуха в шприце P , мм рт.ст. (равно атмосферному давлению $p_{ат}$) барометром θ ;

г) конечную температуру воздуха в шприце t_2 , °С (равна температуре воды) термометром β ;

д) конечный объём воздуха V_2 , мл, по делениям шприца, не вынимая его из воды.

5 При обработке результатов опыта вычислить:

а) массу воздуха (кг) в шприце из уравнения состояния

$$m = pV_1/(RT_1),$$

где p , Па; V_1 , м³; $R = 287$ Дж/(кг·К); $T_1 = t_1 + 273,15$ К;

б) теплоту изобарного процесса, Дж,

$$Q_p = c_p m (T_2 - T_1);$$

в) изменение внутренней энергии воздуха в шприце, Дж,

$$\Delta U = c_v m (T_2 - T_1)$$

теплоёмкости воздуха принять : $c_p = 1005$ Дж/(кг·К) и $c_v = 718$ Дж/(кг·К);

г) работу изменения объёма, Дж,

$$W = p(V_2 - V_1);$$

д) относительную погрешность опыта по формуле (2.40);

е) предельную относительную погрешность $\varepsilon_{п}$ по (2.41);

6 Данные измерений и расчётов занести в таблицу 6

Таблица 6 – Данные измерений и расчётов

t_1	t_2	$p = p_{ат}$		T_1	T_2	V_1		V_2		ΔU	Q_p	W	m	ε	$\varepsilon_{п}$
°С	мм рт.ст.	Па	К	мл	м ³	мл	м ³	Дж		кг	%				

7 Подставить все найденные величины в (2.38) и (2.39) и сравнить левые и правые части этих уравнений, сделать выводы о точности опыта.

Отчёт о работе. Отчёт о работе должен содержать наименование и цель работы, схему установки, основные расчётные формулы, таблицу, расчёт погрешностей измерений.

Контрольные вопросы

1. Аналитическое выражение первого закона термодинамики и

его физический смысл.

2. Физический смысл теплоты и внутренней энергии и их расчётные формулы.

3. Как определяется работа изменения объёма?

4. Какая связь между температурами и объёмами в изобарном процессе?

5. Как записывается уравнение первого закона термодинамики для изобарного, изохорного, изотермического и адиабатного процессов?

Лабораторная работа № 3. Определение средней изобарной теплоемкости воздуха

Цель работы. Ознакомление с методикой экспериментального определения теплоемкости газа в проточном калориметре, изучение различных видов теплоемкостей.

Вводная часть

Виды теплоёмкостей. Согласно первому закону термодинамики

$$dU \equiv dE_{\text{внутр}} = \delta E_{\text{микро}} + \delta E_{\text{макро}} = \delta Q + \delta W' = \delta Q - pdV$$

или для удельных величин

$$du = \delta q + \delta w' = \delta q - pdv \quad (2.42)$$

изменение внутренней энергии системы по способу подвода движения и расчета его энергии разбивается на две части (составляющие):

– **работу** – энергию движения, подводимого (отводимого) к системе макроскопическим путем (та часть изменения внутренней энергии, которая рассчитывается через макроскопические силы и перемещения) и

– **теплоту** – энергию движения, подведённого (отведенного) к системе микроскопическим путём (та часть изменения внутренней энергии, которая в общем случае не рассчитывается через силы и перемещения).

Возникает вопрос, как же рассчитать теплоту δQ , если её в общем случае не удаётся рассчитать через силы и перемещения (в отдельных случаях теплоту можно рассчитать так же, как и работу через силы и перемещения, например при трении).

Из опыта известно, что при подводе тепла, как правило, растёт температура рабочего тела. Поэтому количество подведённого к телу тепла исторически определяли как величину, пропорциональную изменению температуры тела: $\delta Q = C dT$. Коэффициент пропорциональности C , позволяющий установить связь между теплотой и изменением температуры тела, называется теплоёмкостью тела. Таким

образом, **теплоёмкость тела** определяется как физическая величина, равная отношению теплоты к изменению температуры тела

$$C = \delta Q/dT, \quad [C] = 1 \text{ Дж/К.}$$

Теплоёмкость тела численно равна теплоте, вызывающей изменение температуры тела на один градус.

Следует заметить, что и при свершении работы изменяется температура тела. Поэтому и работу можно рассчитывать пропорционально изменению температуры: $\delta W = C_w dT$, где C_w можно назвать «работоёмкостью», для которой создать специальные таблицы. Однако этого не требуется, т. к. работу гораздо проще рассчитать через силы и перемещения. Следовательно, введение двух физических величин – теплоты и работы – при рассмотрении первого закона термодинамики обусловлено, в первую очередь, различными методами их расчёта.

В теплотехнических расчётах вместо теплоёмкости тела широко используются удельная, объёмная и молярная теплоёмкости.

Удельной теплоёмкостью называется отношение теплоёмкости тела к его массе

$$c = C/m = \delta Q/(m dT) = \delta q/dT, \quad [c] = 1 \text{ Дж/(кг·К)},$$

где $\delta q = \delta Q/m$ – удельная теплота, Дж/кг (неправильно называть удельную теплоёмкость массовой теплоёмкостью, см. приложение Б).

Молярной теплоёмкостью называется отношение теплоёмкости тела к количеству вещества (молярности) этого тела:

$$C_\mu = C/\mu, \quad [C_\mu] = 1 \text{ Дж / (моль·К)}.$$

Объёмной теплоёмкостью называется отношение теплоёмкости тела к его объёму, приведённому к нормальным физическим условиям ($p_0 = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$; $T_0 = 273,15 \text{ К} (0^\circ \text{C})$):

$$c' = C/V_0, \quad [c'] = 1 \text{ Дж/(м}^3\text{·К)}.$$

В случае идеального газа его объём при нормальных физических условиях (НФУ) вычисляется из уравнения состояния

$$V_0 = mRT_0/p_0.$$

Связь между различными видами теплоёмкости:

$$c = C_\mu/M; \quad c' = C_\mu/V_{\mu 0} = c\rho_0,$$

где $\rho_0 = m/V_0$ – плотность газа при НФУ,

$V_{\mu 0} = V_0/\mu = 22,4141 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ – молярный объём, приведённый к НФУ.

Теплоёмкость идеального газа зависит от температуры $c = c(T)$. По этому признаку различают **истинную и среднюю** теплоёмкости.

Истинная теплоёмкость соответствует определённой температуре тела (теплоёмкость в точке), так как определяется при бесконечно

малом изменении температуры тела dT

$$c = \delta q/dT .$$

Значение теплоёмкости, которое принимается постоянным в заданном интервале температур от T_1 до T_2 , называется **средней теплоёмкостью** в данном интервале температур. Она определяется как отношение теплоты к конечному интервалу температур

$$\bar{c}_{1-2} = q_{1-2}/\Delta T = \left(\int_1^2 c dT\right)/\Delta T = \left(\int_1^2 c dt\right)/\Delta t .$$

Согласно первому закону термодинамики (2.42) одному и тому же изменению внутренней энергии соответствует бесчисленное множество сочетаний различных значений теплоты и работы, т. е. при одном и том же изменении температуры (внутренней энергии) тела теплота, а значит и теплоёмкость, будут различными в различных термодинамических процессах.

В случае **изотермного процесса** ($T = \text{const}$) температура тела не изменяется ($dT = 0$ и $C_T = \delta Q/0 = \pm\infty$) и теплоту уже нельзя определить как величину, пропорциональную изменению температуры. В этом случае она определяется из первого закона термодинамики, как работа изменения объёма ($dU = 0$): $\delta Q_T = p dV$.

В случае **изобарного процесса** ($p = \text{const}$) уравнение первого закона термодинамики (2.42) запишется в виде

$$c_p dT = c_v dT + p dv .$$

Откуда выводится известное **уравнение Майера**

$$c_p - c_v = R , \quad (2.43)$$

согласно которому разность удельной изобарной и изохорной теплоёмкостей для данного газа есть величина постоянная и равная удельной газовой постоянной.

В случае **адиабатного процесса** теплота равна нулю ($\delta q = 0$), а значит и теплоёмкость равна нулю: $c_{\text{ад}} = 0/dT = 0$.

Уравнение первого закона термодинамики в этом случае запишется в виде

$$c_v dT + p dv = 0 .$$

Откуда выводится **уравнение адиабатного процесса** (адиабаты)

$$p v^k = \text{const} . \quad (2.44)$$

Показатель степени, входящий в это уравнение и равный отношению теплоёмкостей, называется **показателем адиабаты k** :

$$k = c_p / c_v . \quad (2.45)$$

Решая совместно (2.43) и (2.45), можно выразить теплоёмкости через k и R :

$$c_v = \frac{R}{k-1}; \quad c_p = \frac{k}{k-1} R \quad (2.46)$$

Значения **истинных теплоёмкостей** и их отношения **k** некоторых газов в идеальном состоянии (при $p \rightarrow 0$ и $T_C = 0$ °С) приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Некоторые характеристики идеальных газов

Газ	Химическая формула	M	$C_{\mu p}$	$C_{\mu v}$	c_p	c_v	$k = c_p/c_v$
		кг/кмоль	кДж/(кмоль·К)		кДж/(кг·К)		
Гелий	He	4,0026	20,93	12,60	5,229	3,148	1,661
Водород	H ₂	2,0158	28,58	20,270	14,180	10,056	1,410
Метан	CH ₄	16,0426	34,74	26,42	2,165	1,647	1,315
Аммиак	NH ₃	17,0304	35,00	26,67	2,055	1,566	1,312
Водяной пар	H ₂ O	18,016	33,504	25,190	1,8597	1,3982	1,330
Оксид углерода	CO	28,0104	29,099	20,785	1,0389	0,7421	1,400
Азот	N ₂	28,0134	29,103	20,789	1,0389	0,7421	1,400
Воздух		28,9642	29,050	20,736	1,0030	0,7159	1,401
Кислород	O ₂	31,9988	29,224	20,910	0,9132	0,6534	1,398
Аргон	Ar	39,948	20,79	12,48	0,520	0,312	1,666
Диоксид углерода	CO ₂	44,0098	35,989	27,675	0,8178	0,6288	1,301
Диоксид серы	SO ₂	64,0588	38,85	30,52	0,607	0,476	1,273
Пары ртути	Hg	200,59	20,83	12,52	0,104	0,062	1,664

В **среднем** по всем газам одинаковой атомарности принято считать, что для одноатомных газов $k \approx 1,67$, для двухатомных $k \approx 1,40$, для трёхатомных $k \approx 1,29$ (для водяных паров часто берут точное значение $k = 1,33$).

В случае произвольного процесса уравнение первого закона термодинамики запишется в виде

$$c_n dT = c_v dT + p dv .$$

Откуда по аналогии с уравнением адиабатного процесса (2.44), полученного исторически первым, выводится уравнение **политропного** процесса (политропы) в виде

$$p v^n = \text{const} ,$$

где показатель степени n , постоянный для данного процесса, называется показателем политропы

$$n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v} = \text{const} .$$

Таким образом, если процесс политропный и показатель политропы n известен, то теплоёмкость политропного процесса c_n этого процесса может быть определена расчётным путём, не прибегая к эксперименту, по формуле

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}.$$

Расчёт теплоты через средние теплоёмкости осуществляется по формулам:

– для изохорного процесса $Q_v = \bar{c}_v m (T_2 - T_1) = \bar{c}_v m (t_2 - t_1)$

– для изобарного процесса $Q_p = \bar{c}_p m (T_2 - T_1) = \bar{c}_p m (t_2 - t_1)$.

Методика опытного определения средней изобарной теплоёмкости воздуха в проточном калориметре

Определение изобарной теплоёмкости воздуха осуществляется методом нагрева воздуха, движущегося в канале постоянного сечения практически при постоянном давлении. Расчёт средней изобарной теплоёмкости ведётся по формуле

$$\bar{c}_p = \Phi / [\dot{m} (t_2 - t_1)] \quad (2.47)$$

где Φ – тепловой поток, отводимый от нагревателя к воздуху, Вт;

\dot{m} – массовый расход воздуха, кг/с;

$(t_2 - t_1)$ – изменение температуры воздуха в калориметре, К.

Принять, что электрическая мощность нагревателя $P_{эл}$ равна тепловой мощности (тепловому потоку), т. е. $\Phi = P_{эл}$.

Массовый расход воздуха (кг/с) определяется по формуле

$$\dot{m} = \rho c_{ср} A_{сеч}, \quad (2.48)$$

где ρ – плотность воздуха при входе в калориметр, кг/м³;

$c_{ср}$ – средняя по сечению скорость воздуха в трубе, м/с;

$A_{сеч}$ – площадь поперечного сечения трубы, м².

Плотность воздуха на входе в трубу принимается равной плотности воздуха в помещении и определяется из уравнения состояния:

$$\rho = p_{ат} / (RT_1), \quad (2.49)$$

где $p_{ат}$ – атмосферное давление, Па;

$T_1 = t_1 + 273,15$ К – температура воздуха при входе в калориметр (принимается равной температуре воздуха в помещении);

$R = 287$ Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная воздуха.

Поскольку скорость изменяется по сечению трубы (рисунок 9), а измерение скорости производится на оси трубы, то средняя по сечению скорость определяется по формуле

$$c_{ср} = \beta_o c_o, \quad (2.50)$$

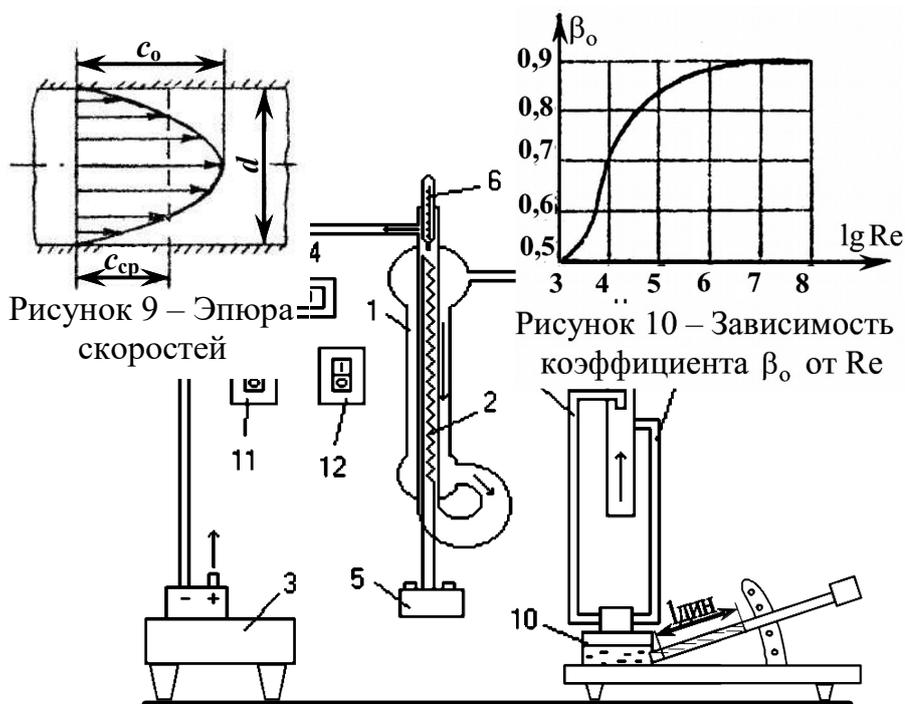
где коэффициент осреднения скорости β_o определяется по

графику (рисунок 10) в зависимости от числа Рейнольдса

$$Re = c_0 d / \nu, \quad (2.51)$$

d – внутренний диаметр трубки, м;

ν – кинематическая вязкость воздуха (таблица Г.1), м²/с.



Осевая скорость потока определяется по измеренному динамическому давлению $p_{дин}$, Па:

$$c_0 = \sqrt{2p_{дин}/\rho}. \quad (2.52)$$

Динамическое давление определяется как разность полного и статического давлений с помощью двух трубок и определяется по показаниям микроманометра $l_{дин}$ (рисунок 11)

$$p_{дин} = 9,81 \cdot K \cdot l_{дин}, \quad (2.53)$$

где K – коэффициент микроманометра (учитывает угол наклона трубки и плотность спирта и служит для перевода показаний микроманометра $l_{дин}$ в мм вод. ст.), значение K указано на дуге микроманометра; 9,81 – коэффициент перевода мм вод. ст. в Па.

Описание лабораторной установки. Рабочим участком установки (см. рисунок 11) является проточный калориметр с самоулавливанием тепловых потерь. Корпус 1 калориметра представляет собой двухходовой теплообменник, внутри которого в стеклянной трубке помещён электронагреватель 2. Поток воздуха во внешнем канале уменьшает тепловые потери от нагревателя.

Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки

Движение воздуха через калориметр осуществляется за счёт раз-

режения, создаваемого вакуум-насосом 3.

Напряжение и сила электрического тока, проходящего по спирали нагревателя, измеряются вольтметром 4 и амперметром 5. Температура воздуха измеряется термометром 6. Атмосферное давление определяется по барометру 7, динамическое давление измеряется с помощью трубки Пито (полного давления) 8 и пьезометра (трубки статического давления) 9, подсоединённых к микроманометру 10.

Порядок выполнения работы

1 Записать начальную температуру воздуха t_1 , °С, атмосферное давление $p_{ат}$, мм рт. ст., диаметр трубки d , мм.

2 Включить вакуумный насос выключателем 11 и нагреватель выключателем 12 (при правильной работе столбик спирта микроманометре отклоняется на 5 – 6 мм, показания вольтметра не должны превышать 5 В, а амперметра 2 А). Нагрев проводить 15 – 20 минут. Стационарный процесс теплообмена можно считать достигнутым, если в течение 3-х минут показания термометра не изменяются.

3 Во время опыта зарегистрировать:

а) температуру воздуха t_2 на выходе из калориметра;

б) показания микроманометра $l_{дин}$ в мм вод. ст., и коэффициент микроманометра K ;

в) показания вольтметра $U_{эл}$, В, и амперметра $I_{эл}$, А.

4 При обработке результатов опыта вычислить:

а) динамическое давление $p_{дин}$ по формуле (2.53);

б) плотность воздуха ρ , кг/м³, по формуле (2.49);

в) осевую скорость c_o , м/с, по формуле (2.52);

г) число Рейнольдса по формуле (2.51);

д) среднюю по сечению скорость $c_{ср}$, м/с, по формуле (2.50)

е) массовый расход воздуха \dot{m} , кг/с по формуле (2.48)

ж) тепловой поток $\Phi = P_{эл} = U_{эл} I_{эл}$, Вт;

и) среднюю удельную изобарную теплоёмкость воздуха \bar{c}_p , Дж/(кг·К), по формуле (2.47) и изохорную теплоёмкость из формулы (2.43);

к) показатель адиабаты k по формуле (2.45);

л) удельную внутреннюю энергию воздуха $u_2 = c_v T$, Дж/кг.

5. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу 8.

Таблица 8 – Опытные и расчётные данные

t_1	t_2	$p = p_{ат}$		$I_{эл}$	$U_{эл}$	Φ	$l_{дин}$	$c_{ср}$	\dot{m}	\bar{c}_p	\bar{c}_v	k	u_2	$\varepsilon_{п}$
°С		мм рт. ст.	Па	А	В	Вт	мм сп. ст.	м/с	кг/с	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$			Дж/кг	%

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

6. Сравнить значение показателя адиабаты k для воздуха с табличным значением (см. таблицу 7) и теплоёмкости c_p (таблица Г.1).

7. Вычислить предельную относительную погрешность измерения \bar{c}_p , по формуле

$$\varepsilon_{II}(\bar{c}_p) = [\Delta I_{эл}/I_{эл} + \Delta U_{эл}/U_{эл} + 0,5\Delta l_{дин}/l_{дин} + 0,5\Delta p_{ат}/p_{ат} + 0,5\Delta T/T_1 + 2\Delta d/d + 2T/(t_2 - t_1)]100.$$

Абсолютные предельные погрешности измерения напряжения $U_{эл}$ и силы электрического тока $I_{эл}$ а также атмосферного давления $p_{ат}$ определяются в соответствии с классом точности приборов по формуле (1.9).

Абсолютные погрешности измерения температуры ΔT , диаметра трубы Δd и длины столбика спирта $\Delta l_{дин}$ принять равным 0,5 цены наименьшего деления соответствующей шкалы прибора.

Отчёт о работе. Отчёт о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения \bar{c}_p , схему установки, таблицу, расчёт погрешности измерения теплоёмкости.

Контрольные вопросы

1. Виды теплоёмкостей. Уравнение Майера.
2. Показатель адиабаты k .
3. Как в работе определяется массовый расход?
4. Методика экспериментального определения \bar{c}_p .
5. Истинная и средняя теплоёмкости.
6. Расчёт теплоты в изохорном и изобарном процессах через средние теплоёмкости.
7. Как рассчитывается внутренняя энергия идеального газа?

Лабораторная работа № 4. Исследование процессов во влажном воздухе

Цель работы. Исследование состояния влажного воздуха и процессов, протекающих в сушильной камере.

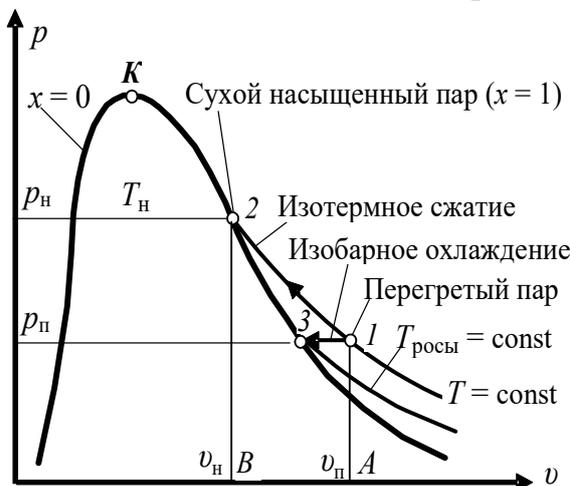
Вводная часть

Параметры влажного воздуха. Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха с водяным паром, а в наиболее общем случае – с водяным паром, капельками воды и кристаллами льда. В атмосферном воздухе (даже над пустынями) всегда содержится некоторое количество влаги в виде водяного пара.

Смесь сухого воздуха и сухого насыщенного водяного пара называется **насыщенным влажным воздухом**. Смесь сухого воздуха и перегретого водяного пара называется **ненасыщенным влажным воздухом**.

Насыщенный влажный воздух можно получить из ненасыщенного двумя способами – путём изотермного сжатия 1-2 до давления насыщения p_n (рисунок 12) и изобарного охлаждения 1-3 до температуры насыщения. Температура, до которой необходимо изобарно охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы содержащийся в нём **перегретый пар стал насыщенным**, называется **температурой точки росы**. При дальнейшем охлаждении влажного воздуха (ниже температуры точки росы) происходит конденсация пара.

Насыщенный влажный воздух насыщен влагой и поэтому парциальное давление водяного пара и его плотность будут максимальными при данной температуре:



$$p_n = p_{n\max}, \quad \rho_n = \rho_{n\max} = 1/v_n,$$

где v_n – удельный объём сухого насыщенного пара.

Обычно влажный воздух имеет низкое давление (атмосферное), а парциальное давление водяного пара во влажном воздухе ещё меньше (таблица Д.1). Вследствие этого свойства его мало отличаются от идеального газа. Поэтому к влажному воздуху применимы уравнения состояния идеального газа, а для паровоздушных смесей

Рисунок 12 – Процессы насыщения влажного воздуха

можно применять уравнения для идеальных газовых смесей (см. ЛР 1).

В соответствии с законом Дальтона давление влажного воздуха (как правило, атмосферное) равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара

$$p_{в.в} = p_{ат} = p_{с.в} + p_{п},$$

где $p_{в.в}$ – давление влажного воздуха, равное атмосферному $p_{ат}$;

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

$p_{п}$ – парциальное давление водяного пара.

Абсолютной влажностью воздуха [парциальной плотностью водяного пара, массовой концентрацией водяного пара (2.21)] называется отношение массы водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, к объёму влажного воздуха (штрих у парциальной плотности далее опускаем)

$$\rho_{п} \equiv \rho'_{п} = m_{п}/V_{в.в} = p_{п}/(R_{п} T_{в.в}), \quad (2.54)$$

где $R_{\text{п}} = 461 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ – удельная газовая постоянная водяного пара.

Абсолютная влажность воздуха численно равна массе пара в 1 м^3 влажного воздуха.

Относительной влажностью воздуха Φ называется отношение массы пара в воздухе к массе пара в насыщенном воздухе при той же температуре; отношение парциальной плотности пара к плотности насыщенного пара при той же температуре; отношение давления пара к давлению насыщенного пара при той же температур (отношение отрезков $A1/B2$ на рисунке 12):

$$\Phi = m_{\text{п}}/m_{\text{н}} = \rho_{\text{п}}/\rho_{\text{н}} = p_{\text{п}}/p_{\text{н}}. \quad (2.55)$$

Относительную влажность выражают в долях согласно (2.55) или в процентах. Чтобы получить Φ в процентах, выражение (2.55) следует умножить на 100. Величина Φ характеризует степень удалённости данного состояния влажного воздуха от состояния, в котором выпадают капельки воды $\Phi = 100\%$. Значение относительной влажности Φ может изменяться от 0 для сухого воздуха до 1 (или 100%) для насыщенного воздуха.

Содержание влаги в атмосфере является одним из важнейших факторов, определяющих погоду. Относительная влажность влияет не только на условия погоды, но также и на здоровье и самочувствие. Так, например, можно хорошо себя чувствовать при $25-30 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\Phi = 25\%$, но при $\Phi = 80-90\%$ ощущается жара и чувствуется подавленность (организм плохо охлаждается, так как испарение ухудшается – плохое самочувствие перед грозой). Для хорошего самочувствия надо $\Phi = 40-60\%$. Однако, зимой в домах $\Phi = 10-20\%$. Такие условия вызывают быстрое испарение и высыхание слизистой оболочки носа, горла и лёгких, что приводит к простудным заболеваниям.

Формулу (2.55) широко используют для определения относительной влажности воздуха. При этом максимальное давление насыщения $p_{\text{н}}$ определяют с помощью таблиц насыщенного водяного пара по действительной температуре влажного воздуха. Действительное парциальное давление водяного пара $p_{\text{п}}$ находят с помощью таблиц насыщенного водяного пара по температуре точки росы, которая определяется с помощью специального прибора, называемого **гигрометром** (от греч. **hygros** – **влажный**). Гигрометр имеет посеребренную металлическую пластинку-зеркальце, которую можно искусственно охлаждать. Температуру пластинки и, следовательно, влажного воздуха, соприкасающегося с ней, измеряют термометром гигрометра. Запотевание пластинки (выпадение росы) свидетельствует о том, что воздух около пластинки стал насыщенным. Показания термометра в этот момент соответствуют **температуре точки росы**, т. е. температуре насыщения при данном парциальном давлении пара $p_{\text{п}}$ в

смеси его с воздухом. Зная температуру насыщения пара в воздухе, можно по таблицам определить давление этого пара в смеси с воздухом, т. е. определить его парциальное давление.

Более точное определение относительной влажности производится с помощью **психрометра** (от греч. **psychros** – **холодный**) по показаниям двух термометров: обычного "сухого" и "мокрого", шарик которого обернут влажной тканью. Вода с ткани испаряется, и температура мокрого термометра понижается и становится ниже температуры сухого термометра, показывающего температуру влажного воздуха. Чем сильнее испаряется жидкость влажного термометра, тем ниже его температура, а сильнее она испаряется при более сухом воздухе: чем меньше температура мокрого термометра, тем меньше Φ . По показаниям мокрого и сухого термометров с помощью специальных психрометрических диаграмм определяют относительную влажность воздуха. После определения Φ и p_n по температуре влажного воздуха по таблицам определяют парциальное давление пара по формуле $p_{\Pi} = \Phi p_n$.

Величиной, широко применяемой в технических расчетах для характеристики состояния влажного воздуха, является влагосодержание.

Влагосодержанием d , г/кг, называют отношение массы водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха:

$$d = m_{\Pi} / m_{c.v} = 10^3 \cdot \rho_{\Pi} / \rho_{c.v} \quad (2.56)$$

где m_{Π} – масса пара, г; $m_{c.v}$ – масса сухого воздуха, кг;

ρ_{Π} – парциальная плотность пара, кг/м³;

$\rho_{c.v} = (p_{at} - p_{\Pi}) / (R_{c.v} T_{v.v})$ – парциальная плотность сухого воздуха, кг/м³.

Массовое влагосодержание численно равно массе пара, приходящейся на 1 кг сухого воздуха, и измеряется в кг (или г) на 1 кг сухого воздуха.

Выражая массы в (2.56) с помощью уравнения Клапейрона (2.15), получим связь влагосодержания с парциальным давлением водяного пара (кг/кг сухого воздуха)

$$d = (R_v / R_{\Pi})(p_{\Pi} / p_{c.v}) = 0,622 p_{\Pi} / (p_{at} - p_{\Pi}), \quad (2.57)$$

или для влагосодержания, выраженного в г/кг сухого воздуха,

$$d = 622 p_{\Pi} / (p_{at} - p_{\Pi}),$$

где $R_v / R_{\Pi} = 287 / 461,53 \cong 0,622$.

Из (2.57) можно найти давление пара

$$p_{\Pi} = p_{at} d / (0,622 + d). \quad (2.58)$$

Поскольку масса влажного воздуха складывается из масс сухого воздуха и пара $m_{v.v} = m_{c.v} + m_{\Pi}$, то, выражая массу пара или массу су-

хого воздуха из (2.56), получим:

$$m_{с.в} = m_{в.в}/(1 + d), \quad (2.59)$$

$$m_{п} = \frac{d}{1+d} m_{в.в}. \quad (2.60)$$

При протекании процессов во влажном воздухе масса сухого воздуха не изменяется. Переменными величинами являются массы водяного пара и влажного воздуха.

Энтальпию влажного воздуха определяют как сумму энтальпий сухого воздуха и водяного пара

$$H \equiv H_{в.в} = H_{с.в} + H_{п} = m_{с.в} h_{с.в} + m_{п} h_{п}.$$

Для удобства расчётов энтальпию влажного воздуха относят к 1 кг сухого воздуха

$$h \equiv h_{в.в} = h_{с.в} + d h_{п},$$

где $h = H/m_{с.в}$ – удельная (по сухому воздуху) энтальпия влажного воздуха; $h_{с.в}$ и $h_{п}$ – удельные энтальпии сухого воздуха и водяного пара, кДж/кг.

Для получения расчетной формулы, выражающей энтальпию влажного воздуха в зависимости от температуры, выразим энтальпию компонентов через теплоемкость и температуру Цельсия (d , кг/кг):

$$h = c_{р.с.в} t + d(r_0 + c_{р.п} t), \quad (2.61)$$

где $c_{р.с.в} = 1,01$ кДж/(кг·К) – удельная изобарная теплоемкость воздуха;

$r_0 = 2501$ кДж/кг – теплота парообразования воды в тройной точке;

$c_{р.п} = 1,92$ кДж/(кг·К) – удельная изобарная теплоемкость водяного пара.

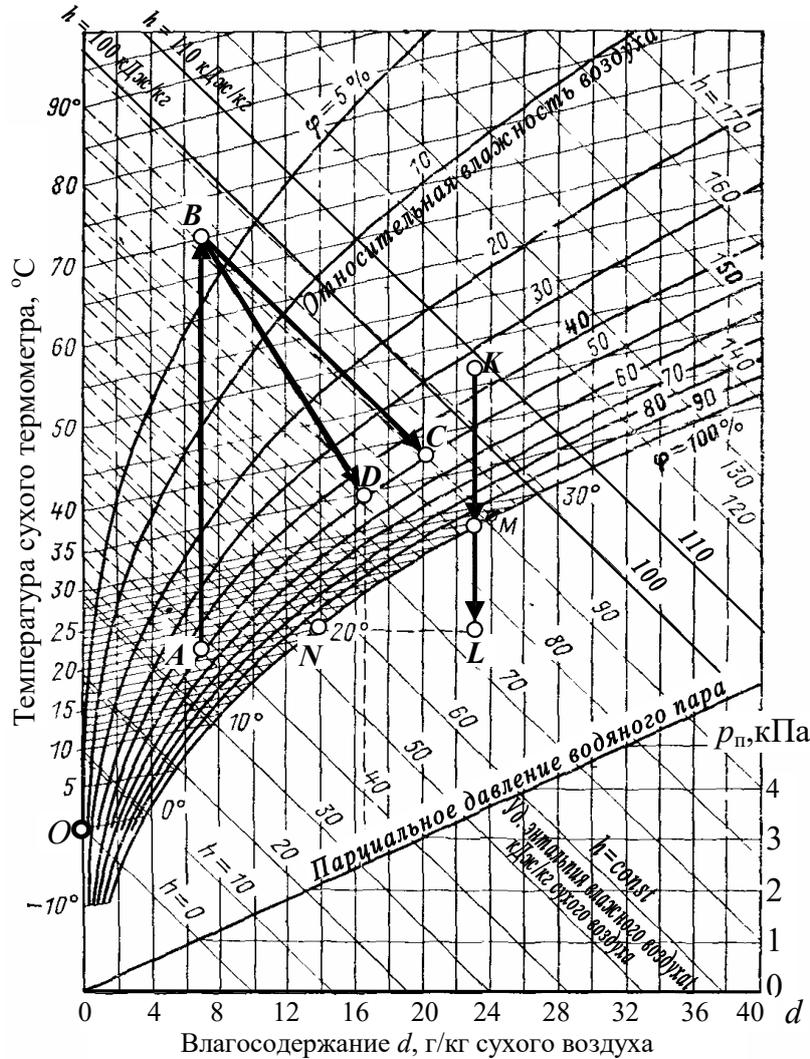
Подставив в (2.61) значения теплоемкостей и r_0 , получим расчетную формулу для энтальпии влажного воздуха

$$h = 1,01t + d(2501 + 1,92t). \quad (2.62)$$

Приведённые уравнения позволяют провести расчет процессов изменения состояния влажного воздуха. Однако расчеты значительно упрощаются и становятся нагляднее, если используются графические методы с применением dh -диаграммы, которая строится на основании этих уравнений.

dh -диаграмма влажного воздуха, предложенная в 1918 г. Л. К. Рамзиным, широко применяется в расчётах систем кондиционирования, сушки, вентиляции и отопления. В этой диаграмме представлена графическая зависимость основных параметров влажного воздуха при атмосферном давлении $P = 745$ мм рт. ст. = 99,33 кПа.

По оси ординат (рисунок 13) откладывают удельную (по сухому воздуху) энтальпию влажного воздуха h , кДж на 1 кг сухого воздуха, а по оси абсцисс – влагосодержание d , г/кг сухого воздуха. Для лучшего использования площади диаграммы координатные оси расположены под углом 135° друг к другу. На данном рисунке вместо наклонной оси абсцисс проведена горизонтальная линия, на которой



нанесены действительные значения d . На dh -диаграмме линии $h = \text{const}$ – это наклонные линии, а $d = \text{const}$ – вертикальные прямые. Из уравнения (2.62) следует, что в координатах d, h изотермы будут изображаться прямыми линиями.

Рисунок 13 – dh -диаграмма влажного воздуха

Кроме того, на диаграмму наносят кривые $\varphi = \text{const}$. Кривая $\varphi = 100\%$ делит поле на две области и является своего рода **пограничной кривой**. В состояниях, соответствующих точкам на этой кривой, парциальное давление водяного пара и его плотность достигают мак-

симально возможных при данной температуре значений (сухой насыщенный пар). Влажный воздух в таких состояниях называют **насыщенным**. Область, для которой $\varphi < 100\%$, характеризует состояние **ненасыщенного** влажного воздуха (в воздухе содержится **перегретый** пар). Под кривой $\varphi = 100\%$ расположена **область тумана** (**пересыщенный** влажный воздух), в которой влага находится в воздухе частично в капельном состоянии (влажный насыщенный пар).

За начало отсчета параметров влажного воздуха выбирают точку O , для которой $T = 273,15 \text{ К}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), $d = 0$, $h = 0$.

На диаграмме **штриховой** линией нанесены также линии постоянной **температуры мокрого термометра**, под которой понимают температуру, приобретаемую водой, если поверхность ее обдувается потоком влажного ненасыщенного воздуха. Если поверхность воды обдувается потоком насыщенного воздуха, то температура воды совпадает с температурой воздуха. Поэтому на dh -диаграмме **изотермы, сухого и мокрого** термометров, соответствующие одному и тому же значению температуры, **пересекаются** на линии насыщенного воздуха, т. е. **на линии** $\varphi = 100\%$.

В нижней части диаграммы по формуле (2.58) построена линия парциального давления пара $p_{\text{п}} = f(d)$. Ось ординат для этого графика расположена на диаграмме справа.

Любая точка на dh -диаграмме определяет физическое состояние воздуха. Для этого должны быть заданы два параметра (например, φ и T или h и d). Изменение состояния влажного воздуха изобразится на диаграмме линией процесса. Рассмотрим ряд примеров. В процессе **нагревания** влажного воздуха (например, в калорифере сушилки) влагосодержание его не изменяется. Поэтому в dh -диаграмме (см. рис. 13) такой процесс изображается прямой линией $d = \text{const}$. В данном процессе повышаются температура и энтальпия воздуха и уменьшается его относительная влажность. Если точка A изображает состояние влажного воздуха перед подогревом, то, проведя вертикально вверх прямую линию $d = \text{const}$ до пересечения с изотермой, соответствующей температуре подогретого воздуха, получим точку B , которая определяет состояние влажного воздуха после подогрева.

Соответственно процесс охлаждения влажного воздуха изобразится прямой вертикальной линией, направленной вниз от начальной точки (линия KM). При этом может оказаться, что влажный воздух в процессе охлаждения становится насыщенным (точка M) и при дальнейшем охлаждении будут появляться капельки воды. Температуру, при которой в процессе охлаждения достигается состояние насыщенного воздуха (т. е. $\varphi = 100\%$), называют **температурой точки росы**. При дальнейшем охлаждении ниже точки росы (точка L) смесь

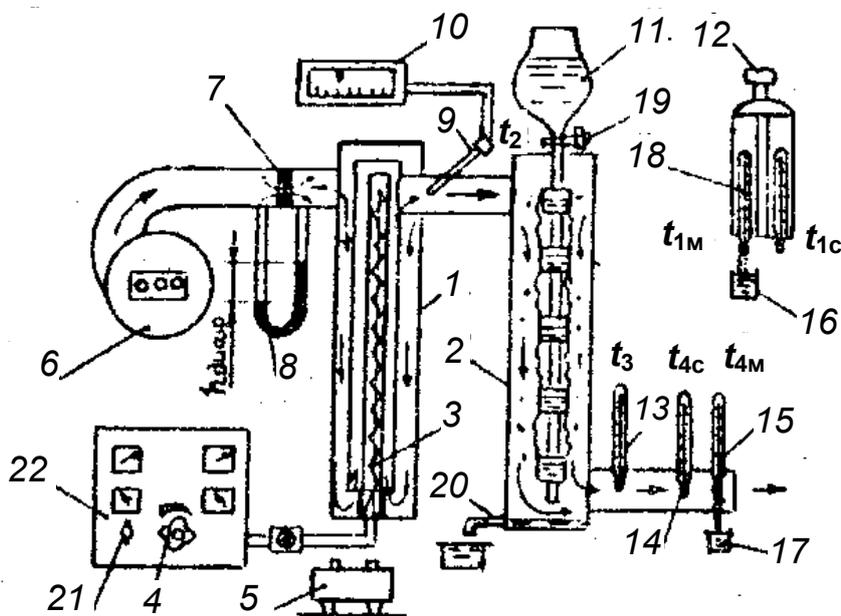
будет содержать воду в виде сухого насыщенного пара в количестве $d_{\text{п}} = d_{\text{н}}$ и в виде жидкости в количестве $d_{\text{ж}} = d_{\text{л}} - d_{\text{н}}$.

Процесс сушки материалов воздухом в сушилке, не имеющей тепловых потерь, происходит при постоянной энтальпии влажного воздуха, отнесенной к 1 кг сухого воздуха (это положение справедливо, если пренебречь энтальпией испаряемой жидкости). В $d h$ -диаграмме этот процесс изображается прямой линией $h = \text{const}$ (линия BC).

Если процесс сушки сопровождается тепловыми потерями, то он может быть условно изображен линией BD . При этом энтальпия влажного воздуха на выходе из сушилки уменьшится на размер тепловых потерь: $q_{\text{пот}} = h_{\text{с}} - h_{\text{д}}$.

Описание лабораторной установки. Установка представляет собой модель сушильной установки, в которой сушильным агентом является воздух, а высушиваемым материалом – марля, смоченная водой. Схема установки показана на рисунке 14. Основными её элементами являются калорифер 1 и сушильная камера 2. В калорифере воздух нагревается для повышения его способности испарять влагу. В сушильной камере за счет нагретого воздуха вода, содержащаяся в ткани, испаряется и уносится потоком воздуха.

Калорифер состоит из двух металлических труб и одной фарфоровой трубы, расположенных соосно. Внутри фарфоровой трубы установлен электронагреватель 3. Мощность электронагревателя регулируется лабораторным автотрансформатором 4 и измеряется ваттметром 5.



лируется лабораторным автотрансформатором 4 и измеряется ваттметром 5.

Рисунок 14 – Схема опытной установки

Воздух в калорифер подается воздуходувкой 6. Расход воздуха определяется по перепаду давления на диафрагме 7, измеряемого с помощью U-образного манометра 8. Температура воздуха на выходе из калорифера (около 70 °С) измеряется с помощью термометра сопротивления 9 и логометра 10.

В центре сушильной камеры помещена хлопчатобумажная ткань, подвергаемая сушке. Ткань разделена по высоте на четыре секции, и нижний конец каждой секции опущен в специальный стаканчик с водой, прикрепленный к центральной металлической трубке с отверстиями для поступления воды в стаканчики из емкости 11. Во время опыта происходит постоянное увлажнение высушиваемого материала, что обеспечивает стационарность процесса сушки.

Состояние воздуха на входе в калорифер определяется психрометром 12. Температура воздуха после сушилки измеряется термометром 13, а состояние воздуха в выходной трубке определяется по показаниям сухой 14 и мокрой 15 термопар.

Порядок выполнения работы

1 Залить воду в ёмкости 11, 16 и 17 и увлажнить марлю внутри сушильной камеры и мокрых термометров 15 и 18 (в процессе опыта кран 19 должен быть слегка приоткрыт, чтобы из трубки 20 вода вытекала слабой струйкой).

2 Вращая по часовой стрелке ручку регулятора оборотов воздуходувки 6, установить желаемый расход воздуха.

3 Вставить вилку электронагревателя в розетку и установить ручку выключателя 21 электропитания 22 в положение «вкл» (при этом загорается сигнальная лампочка). Вращая ручку ЛАТРа 4, установить по ваттметру мощность электронагревателя $P_{эл} = 200$ Вт.

4 Дождаться наступления стационарного процесса сушки (через 20–25 минут температуры термометров t_3 и $t_{4м}$ перестают изменяться)

5 Заводить пружину психрометра 12 на 2–3 оборота в течение трёх минут до понижения температуры мокрого термометра до минимального значения.

6 Во время опыта измерить:

а) температуры сухого $t_{1с}$ и $t_{1м}$ мокрых термометров психрометра;

б) температуры t_3 и $t_{4м}$ на выходе воздуха из сушильной камеры (температуру сухого термометра $t_{4с}$ принять на 2 °С меньше t_3);

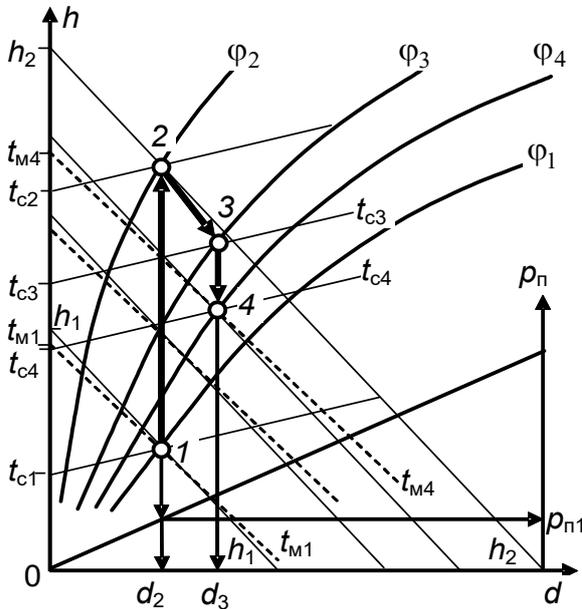
в) температуру t_2 на выходе воздуха из калорифера;

г) барометрическое давление (атмосферное) $P_{ат}$, мм рт. ст. по

барометру;

д) перепад на диафрагме $h_{\text{диаф}}$ по U-образному манометру.

7 На диаграмме dh для влажного воздуха (имеется на стенде установки) по найденным температурам построить, согласно рисунку 14, процессы во влажном воздухе и определить относительную влажность Φ , влагосодержание d (г/кг), парциальное давление пара $p_{\text{п1}}$ энтальпию h (кДж/кг) в точках 1, 2, 3 и 4.



1-2 – подогрев; 2-3 – сушка

Рисунок 15 – Процессы во влажном воздухе

Состояние комнатного воздуха на входе в калорифер (точка 1 на рисунке 15) определяется по показаниям психрометра.

Точка 2 определяет состояние воздуха после подогрева его в калорифере. Так как подогрев воздуха в калорифере происходит при постоянном влагосодержании, то положение точки 2 определяется пересечением вертикали ($d_1 = d_2 = \text{const}$) с изотермой $t_{c2} = \text{const}$.

Положение точек 3 и 4 на dh -диаграмме определяется так. Сначала находят точку 4 по показаниям сухого и мокрого термометров $t_{4\text{м}}$ и $t_{4\text{с}}$ на выходе из установки.

Процесс охлаждения воздуха в выходном патрубке также характеризуется постоянством влагосодержания, поэтому точка 3 определяется по dh -диаграмме как точка пересечения вертикали $d_4 = \text{const}$ с изотермой t_{c3} . Процесс сушки влажной ткани сопровождается увеличением влагосодержания воздуха, проходящего через сушильную камеру. На dh -диаграмме этот процесс условно изображается прямой линией 2-3.

8 По тарировочной кривой расходомера (имеется на стенде) по найденному перепаду $h_{\text{диаф}}$ определить объёмный расход воздуха \dot{V} .

9 При, обработке результатов опыта вычислить:

а) парциальную плотность сухого воздуха на входе в калорифер

$$\rho_{\text{с.в}} = (p_{\text{ат}} - p_{\text{п1}}) / (R_{\text{с.в}} T_{1\text{с}}), \text{ кг/м}^3$$

б) массовый расход сухого воздуха $\dot{m}_{\text{с.в}} = \rho_{\text{с.в}} \dot{V}$;

в) массовый расход влаги, испаряемой в сушильной камере, кг/с,

$$\dot{m}_{\text{воды}} = (d_3 - d_2) \dot{m}_{\text{с.в}} / 1000;$$

г) тепловой поток к воздуху в калорифере

$$\Phi_{\text{кал}} = \dot{m}_{\text{с.в}}(h_2 - h_1);$$

д) тепловые потери в калорифере $\Phi_{\text{пот}} = P_{\text{эл}} - \Phi_{\text{кал}}$;

в) действительный расход теплоты на испарение 1 кг воды

$$q = P_{\text{эл}} / \dot{m}_{\text{воды}}$$

10 Результаты опыта и расчёта занести в таблицу 9.

Таблица 9 – Опытные и расчётные данные

$p_{\text{ат}}$	$t_{1с}$	$t_{1н}$	$t_{с1}$	$t_{с2}$	$t_{4с}$	$t_{4н}$	$h_{\text{диаф}}$	\dot{V}	$p_{\text{п}}$	φ_1	φ_2	φ_3	d_2	d_3	h_1	h_2	q	$\Phi_{\text{кал}}$
мм рт.ст.	°С						мм вод.ст.	м ³ /с	Па	%			г/кг		кДж/кг		Вт	

Контрольные вопросы

1. Основные параметры, определяющие состояние влажного воздуха.
2. Дайте определение абсолютной и относительной влажности воздуха.
3. Что такое «влагосодержание» влажного воздуха и укажите его единицу.
4. Имея dh -диаграмму, изобразите на ней процессы нагрева, сушки и охлаждения влажного воздуха.
5. Как определяется парциальное давление пара?

Лабораторная работа № 5. Исследование адиабатного истечения воздуха из сопла

Цель работы. Исследование зависимостей скорости потока, скорости звука, расхода и давления в сопле от перепада давлений в ресивере и в окружающей среде. Изучение первого закона термодинамики для потока путем его практического применения к процессу истечения из сопла.

Вводная часть

При рассмотрении неравновесных процессов, протекающих при движении сплошной среды, в подвижной среде выделяется элемент потока (макрочастица, или жидкая частица). Объём макрочастицы должен быть, с одной стороны, элементарным, чтобы в пределах его можно было пренебречь изменением термодинамических параметров и

считать состояние макрочастицы равновесным, а с другой стороны, он должен быть достаточно большим, чтобы число содержащихся в нём молекул было достаточно для статистического осреднения их кинетических энергий и однозначного определения макроскопических величин.

Элемент потока при движении деформируется и изменяет свой объём, но масса его остается неизменной, т. е. рассматривается подвижная закрытая равновесная термодинамическая система, состояние которой однозначно определяется параметрами p, v, T . Изучаемое течение среды (поток) рассматривается как движение совокупности непрерывно распределённых в пространстве элементов среды (жидких частиц).

Абсолютное движение микрочастиц (атомов, молекул), составляющих элемент потока, относительно неподвижных стенок канала можно представить как сумму двух движений: хаотического (теплого) – относительного движения относительно центра инерции элемента потока и направленного механического (переносного) движения вместе с центром инерции (полюсом) относительно стенок канала. Для каждого вида движения микрочастиц составляется соответствующее балансовое уравнение изменения энергии:

1) для **хаотического** движения микрочастиц относительно их центра инерции – уравнение первого закона термодинамики для хаотического движения (2.42)

$$\delta q = \delta q_{\text{внеш}} + \delta q_{\text{тр}} = du + pdv = dh - vdp; \quad (2.63)$$

2) для **направленного** движения микрочастиц относительно стенок канала – уравнение энергии для потока в механическом виде (для направленного движения) – обобщённое уравнение Бернулли для стационарного течения

$$-vdp = dc^2/2 + gdz + \delta w_{\text{тр}} + \delta w_{\text{тех}}; \quad (2.64)$$

3) для **абсолютного** движения микрочастиц относительно стенок канала – уравнение первого закона термодинамики для стационарного потока

$$\delta q_{\text{внеш}} = dh + dc^2/2 + gdz + \delta w_{\text{тех}}, \quad (2.65)$$

где h – удельная энтальпия, Дж/кг.

Течение газа без внешнего теплообмена ($q_{\text{внеш}} = 0$) и совершения технической работы называется **энергоизолированным**. Такое течение происходит в различных каналах (соплах, диффузорах). Интегрируя (2.64) в случае энергоизолированного течения вязкой несжимаемой жидкости ($\rho = 1/v = \text{const}$), получим известное в гидромеханике уравнение Бернулли в виде баланса напоров

$$z_1 + p_1/(\rho g) + c_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + c_2^2/(2g) + H_{\text{пот}}$$

или баланса давлений

$$p_1^* = p_1 + \rho c_1^2/2 = p_2 + \rho c_2^2/2 + \Delta p_{\text{пот}} = p_2^* + \Delta p_{\text{пот}}. \quad (2.66)$$

Особенности адиабатного течения газа. Процесс, протекающий без внешнего теплообмена, называется **адиабатным**. Следует различать адиабатный процесс с трением – реальный адиабатный процесс ($q_{\text{внеш}} = 0$, $q_{\text{тр}} > 0$), протекающий с изменением энтропии ($ds = \delta q_{\text{тр}}/T > 0$) и описываемый уравнением политропы $p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$ или уравнением реальной адиабаты $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k e^{-\Delta s/c_v}$, и адиабатный процесс без трения – теоретический (идеальный, обратимый, равновесный) адиабатный процесс или изоэнтропный (без внешнего и внутреннего теплообмена), протекающий без изменения энтропии $s = \text{const}$ и описываемый уравнением идеальной адиабаты или изоэнтропы

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k. \quad (2.67)$$

Уравнение первого закона термодинамики для стационарного потока (2.65) в случае энергоизолированного изоэнтропного (без трения) течения газа (изменением гравитационной потенциальной энергии газа в канале обычно пренебрегают $g dz = 0$) запишется в интегральном виде:

$$h_1 + c_1^2/2 = h_{2s} + c_{2s}^2/2, \quad (2.68)$$

где индекс «s» указывает, что процесс изоэнтропный ($s = \text{const}$).

При течении с трением кинетическая энергия элемента среды уменьшается, а энтальпия увеличивается, но баланс этих величин сохраняется в прежнем виде

$$h_1 + c_1^2/2 = h_2 + c_2^2/2. \quad (2.69)$$

Таким образом, уравнения первого закона термодинамики для течения с трением (2.69) и без трения (2.68) имеют одинаковый вид и, если опустить индекс «s» (что часто и делают), то они ничем не будут отличаться по внешнему виду. Различие этих уравнений состоит лишь в соотношении между энтальпией и кинетической энергией для течений с трением и без трения. Эти уравнения являются основными в газовой динамике при рассмотрении энергоизолированных течений сжимаемых газов и паров в каналах.

При течении идеального газа энтальпия зависит только от температуры и её можно выразить так

$$h = c_p T = \frac{k}{k-1} RT = \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho}. \quad (2.70)$$

С учётом (2.70) уравнения (2.68) и (2.69) примут вид

$$\frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} + c_1^2/2 = \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} + c_2^2/2 = \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_{2s}} + c_{2s}^2/2. \quad (2.71)$$

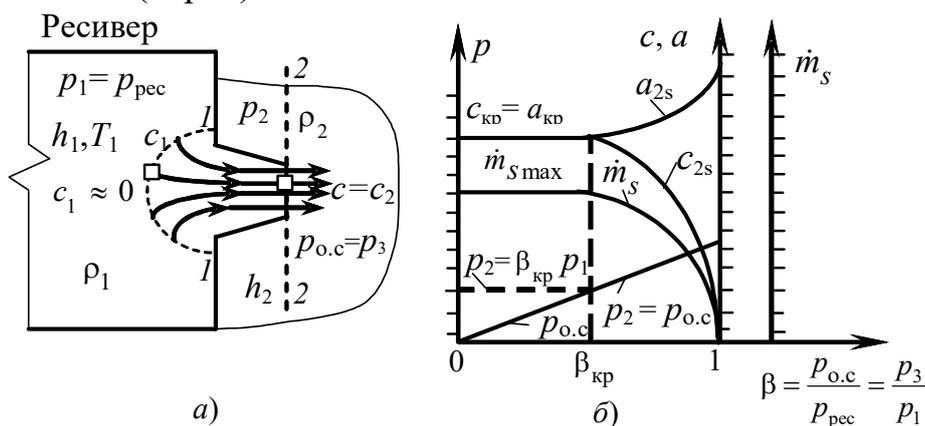
Это уравнение играет ту же роль для сжимаемого газа, что и

уравнение Бернулли (2.66) для несжимаемого газа.

При **истечении газа из ресивера** (сосуда большого объёма) кинетическая энергия элемента потока в начале разгона мала и ею можно пренебречь $c_1^2/2 \approx 0$. Тогда уравнение (2.69) примет вид $h_1 = h_2 + c_2^2/2$. Из этого уравнения определяется скорость потока по значениям энтальпий в ресивере h_1 и на выходе из сопла h_2 (рис. 16)

$$c = c_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}. \quad (2.72)$$

Это уравнение применяется для расчёта скорости истечения реальных газов (паров).



а) – схема течения газа в сопле; б) – зависимость параметров потока на выходе из сопла от отношения

Рисунок 16 – К расчёту истечения газа из сопла

При истечении идеальных газов формула (2.72) с учётом (2.70) принимает вид

$$c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 (1 - T_2/T_1)}. \quad (2.73)$$

Выражения (2.72) и (2.73) могут применяться для расчёта скорости истечения как с трением, так и без трения. В случае истечения без трения (изоэнтропное течение) отношение температур можно представить в виде отношения давлений по уравнению изоэнтропы

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \quad (2.74)$$

и для расчёта **теоретической скорости** в сопле из (2.73) получается формула

$$c_s = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}]}. \quad (2.75)$$

Теоретический массовый расход определяется по формуле

$$\dot{m}_s = \rho_{2s} c_s A, \quad (2.76)$$

где A - площадь проходного сечения на выходе из сопла.

Плотность в выходном сечении сопла определяется из уравне-

ния изоэнтропы (в случае течения с трением это уравнение не справедливо)

$$\rho_{2s} = \rho_1 (p_2/p_1)^{1/k}. \quad (2.77)$$

Если выражения для скорости (2.75) и для плотности (2.77) подставить в (2.76), то получим формулу для расчета теоретического массового расхода (кг/с)

$$\dot{m}_s = A \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 \rho_1 [(p_2/p_1)^{2/k} - (p_2/p_1)^{(k+1)/k}]}. \quad (2.78)$$

Отношение давления окружающей среды, в которую происходит истечение, к давлению в ресивере принято обозначать

$$\beta = p_{o.c}/p_{pec} = p_3/p_1 \quad (2.79)$$

и в функции от этой величины анализировать скорость и расход.

Опыт показывает, что по мере понижения давления в окружающей среде при постоянном давлении в ресивере (по мере уменьшения β) давление на выходе из сопла также понижается и равняется давлению в окружающей среде $p_2 = p_{o.c} = p_3$, одновременно растёт скорость истечения и расход газа (см. рисунок 16). Однако при достижении определённого соотношения между давлением в ресивере и окружающей среде расход и скорость истечения достигают максимального значения и при дальнейшем понижении β параметры на выходе из сопла становятся постоянными (в этом случае говорят, что происходит «запирание сопла»).

Отношение давлений β , при котором происходит запирание сопла, называется **критическим**. Критическое отношение давлений может быть определено, если исследовать уравнение расхода (2.78) на максимум,

$$\beta_{кр} = (p_{o.c}/p_{pec})_{кр} = (p_3/p_1)_{кр} = (p_2/p_1)_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (2.80)$$

Для воздуха $k = 1,40$ и $\beta_{кр} = 0,528$.

При **критическом истечении скорость на выходе из сопла становится равной местной скорости звука** в потоке (т. е. скорости звука, определяемой параметрами газа в данном сечении сопла). Скорость звука зависит от температуры и определяется по формуле

$$a = \sqrt{kRT} = \sqrt{kp/\rho}. \quad (2.81)$$

Если в (2.75) подставить (2.80), то получим выражение для расчёта критической скорости истечения (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К))

$$c_{кр} = a_{кр} = \sqrt{\frac{2}{k+1} RT_1} \cong 18,31 \sqrt{T_1}. \quad (2.82)$$

При **критическом режиме истечения** расход газа достигает максимума и остаётся постоянным, несмотря на дальнейшее понижение давления в окружающей среде,

$$\dot{m}_s^{\max} = A \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} p_1 \rho_1} \cong 0,686 A \sqrt{p_1 \rho_1}. \quad (2.83)$$

Для расчета действительной скорости истечения и действительного расхода надо знать коэффициенты скорости и расхода, которые определяются опытным путём и зависят от конструкции сопла и чистоты его поверхности.

Отношение действительной скорости истечения к теоретической называется **коэффициентом скорости** или скоростным коэффициентом

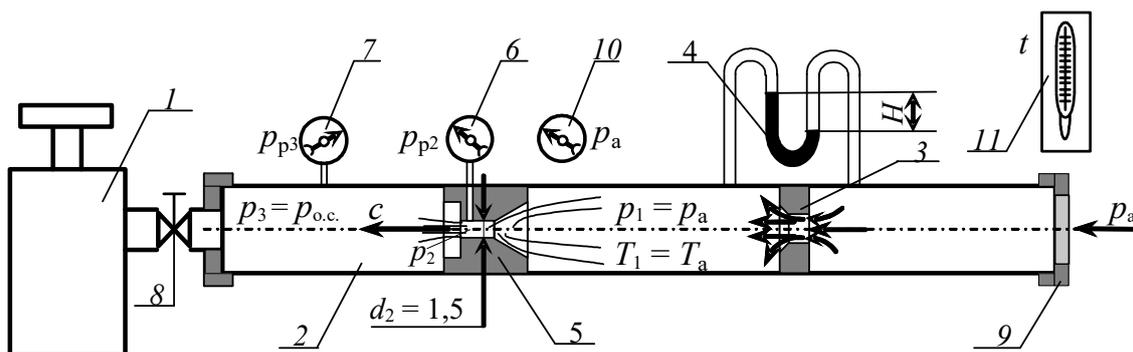
$$\varphi = c/c_s. \quad (2.84)$$

Отношение действительного расхода к теоретическому называется **коэффициентом расхода**

$$\mu = \dot{m}/\dot{m}_s \quad (2.85)$$

Возникновение критического истечения можно пояснить так. Если считать давление $p_{\text{рес}}$ неизменным, то уменьшение давления $p_{\text{о.с}}$ приводит к перераспределению давления вдоль сопла, при этом в выходном сечении устанавливается давление p_2 . Оно равно давлению $p_{\text{о.с}}$ до тех пор, пока скорость потока газа в выходном сечении не достигнет критического значения, т. е. не станет равной местной скорости звука. Дальнейшее уменьшение давления $p_{\text{о.с}}$ уже не будет сказываться на перераспределении давлений в сопле, т. к. внешние возмущения (изменения давления), распространяющиеся со скоростью звука относительно потока, не могут проникнуть внутрь сопла; таким образом давление в выходном сечении сопла остаётся неизменным, равным критическому $p_2 = p_{\text{кр}} = p_1 \beta_{\text{кр}}$.

Описание лабораторной установки. Установка (рисунок 17) состоит из вакуумного насоса 1 производительностью 20 л/с, трубы 2 диаметром 25 мм и длиной 1000 мм, мерной шайбы 3 и U-образного манометра 4 для измерения действительного расхода воздуха через сопло, сопла 5 диаметром $d_2 = 1,5$ мм на выходе, вакуумметров 6 и 7, 8 – вентиль; 9 – сеточка; 10 – барометр; 11 – термометр



- 1 – вакуумный насос; 2 – труба; 3 – мерная шайба;
4 – U-образный манометр; 5 – сопло; 6 и 7 – вакуумметры;
8 – вентиль; 9 – сеточка; 10 – барометр; 11 – термометр

Рисунок 17 – Схема установки для исследования истечения воздуха из сопла

служащих для определения разрежения в выходном сечении сопла и в пространстве за соплом – окружающей среде. Разрежение в окружающей среде, а значит и в сопле, регулируется вентилем 8. Сеточка 9 предохраняет насос и сопло от попадания различных частиц. Для измерения параметров атмосферы служат барометр 10 и термометр 11.

Поскольку скорость воздуха в трубе перед соплом мала (менее 0,5 м/с), то значения параметров воздуха перед соплом близки значениям параметров атмосферного воздуха в лаборатории: $p_1 \cong p_a$, $T_1 \cong T_a$.

Порядок выполнения работы

1 Работу проводить только под руководством преподавателя или лаборанта. Ознакомиться с приборами и схемой лабораторной установки. Проверить по мерному стеклу наличие масла в насосе и в случае необходимого долить специальное масло для вакуумных насосов. **Проверить насос с помощью шкива вручную.**

2 Закрыть вентиль 8 и включить насос (**нельзя допускать пуск насоса при открытом вентиле**, т. к. возможен выброс масла в атмосферу; с этой же целью установлен маслоуловитель на выхлопном патрубке насоса). Если насос сразу не пускается (в течение 1–2 с), то его следует отключить, а затем включить вновь.

3 Приоткрывая вентиль 8, последовательно понизить давление в участке трубы за соплом (в окружающей среде) до показаний вакуумметра 7 (разрежения) $p_{p3} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,44; 0,48; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ат. Для каждого фиксированного значения p_{p3} из этого ряда записать показания вакуумметров 6 и 7 и дифманометра 4 (H , мм вод. ст), а также термометра t_1 , °С и барометра $p_a = p_1$, мм рт.ст.

4 Выключить вакуумный насос; **вентиль оставить открытым** для разгерметизации насоса и тем самым исключения попадания масла во всасывающую линию.

5 При обработке результатов измерений вычислить:

а) значения давлений p_3 и p_2 по формуле $p = p_a - p_p$;

б) отношение давлений $\beta = p_3/p_a = p_3/p_1$;

в) теоретическую скорость истечения по формуле (2.75) (при $\beta < 0,528$ принять $p_2/p_1 = 0,528$);

г) плотность воздуха на входе в сопло $\rho_1 = p_1/(RT_1)$, кг/м³;

д) плотность воздуха на выходе из сопла по формуле (2.77);

е) скорость звука в выходном сечении сопла $a_{2s} = \sqrt{kp_2/\rho_{2s}}$,

(где p_2 берётся в Паскалях: 1 ат = 0,981·10⁵ Па); при критическом истечении скорость звука рассчитывается по формуле (2.82);

ж) теоретический массовый расход по формулам (2.78) – при $\beta > 0,528$ и (2.83 при критическом истечении);

и) действительный массовый расход по графику в зависимости от перепада H на диафрагме (рисунок 18);

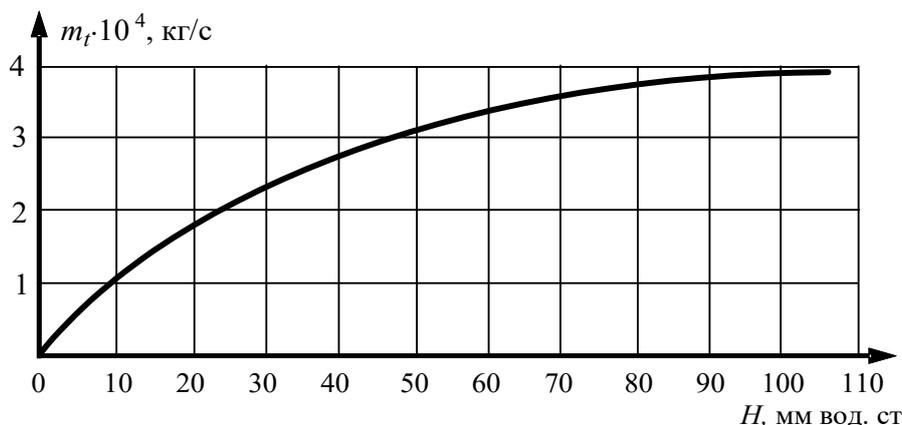


Рисунок 18 – Зависимость действительного массового расхода воздуха через сопло от перепада давления на диафрагме

к) коэффициент расхода сопла по формуле (2.85).

6 Построить на миллиметровой бумаге графики зависимости давлений p_2 и p_3 , скорости потока c_s , скорости звука a_{2s} , расхода \dot{m}_s от β .

7 По графикам давлений определить $\beta_{кр}$ и сравнить с теоретическим.

Обработку результатов эксперимента можно ускорить, если использовать компьютерную программу Mathcad. Ниже даётся алгоритм вычисления параметров истечения для первых четырёх точек опыта (остальные точки следует просчитать с использованием этой программы).

Исходные данные: $p_1 := 748$ мм рт. ст. $\rho_1 := 748/735.6 = 1.01686$ ат.

(1 ат = 735.6 мм рт. ст.). $R := 287$ Дж/(кг·К). $T_1 := 296$ К.

$$\rho_1 := \frac{p_1 \cdot 0.981 \cdot 10^5}{R \cdot T_1}. \quad \rho_1 = 1.1739 \text{ кг/м}^3.$$

Записываем массив p_{p3} . Вычисляем давление p_3 . Вычисляем β .

Переводим давления в паскали:

$$p_1 := 0.981 \cdot 10^5 \cdot p_1, \text{ Па}; \quad p_2 := 0.981 \cdot 10^5 \cdot p_2, \text{ Па} \quad (1 \text{ ат} = 0,981 \cdot 10^5 \text{ Па}).$$

Записываем расчётные формулы:

$$\rho_{2s} := \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad c_s := \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

$$d := 0.0015 \text{ м}. \quad A := \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad A = 1.7672 \times 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$\dot{m}_s := A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}.$$

Вводим значения индекса $i := 0..12$ (для 13 величин массива).

$$a_{s_i} := \sqrt{\frac{k \cdot p_{2_i}}{\rho_{2s_i}}}, \quad \mu_i := \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{s_i}}.$$

Ниже приведены результаты расчёта в системе Mathcad теоретических значений плотности, скорости потока, скорости звука и массового расхода в сопле.

0	1.1739
1	1.0902
2	1.0039
3	0.9145
4	
5	
6	кг/м ³
7	
8	
9	
10	
11	
12	0.7438

0	0
1	131.65
2	189.92
3	237.76
4	
5	
6	м/с
7	
8	
9	
10	
11	
12	314.96

0	0
1	344.92
2	339.85
3	334.29
4	
5	
6	м/с
7	
8	
9	
10	
11	
12	314.96

0	0
1	$2.54 \cdot 10^{-4}$
2	$3.37 \cdot 10^{-4}$
3	$3.84 \cdot 10^{-4}$
4	
5	
6	кг/с
7	
8	
9	
10	
11	
12	$4.14 \cdot 10^{-4}$

Опытные и расчётные данные занести в таблицу 10.

Таблица 10 – Опытные и расчётные данные параметров потока в сопле

$p_{p3},$ ат	$p_3,$ ат	$p_{p2},$ ат	$p_2,$ ат	β	$\rho_{2s},$ кг/м ³	$c_s,$ м/с	$a_{2s},$ м/с	$\dot{m}_s \cdot 10^4,$ кг/с	$H,$ мм вод.ст.	$\dot{m} \cdot 10^4,$ кг/с	μ
0	1,017	0	1,017	1	1,174	0	344,9	0	0	0	0
0,1	0,917	0,1	0,917	0,90	1,090	131,6	339,9	2,54	35	2,5	0,986
0,2		0,2		0,80							
0,3	0,717	0,3	0,717	0,70	0,915	237,8	328,1	3,84	85	3,7	0,963
0,4	0,617	0,42	0,597	0,61							
0,44											
0,48											
0,5											
0,6											
0,7											
0,8											
0,9											
p_a	0	0,48	0,537	0							

Отчёт о работе. Отчёт о работе должен содержать наименование и цель работы, схему лабораторной установки, таблицу и необходимые расчёты по формулам, графики на миллиметровой бумаге.

Контрольные вопросы

1. Уравнения энергии для хаотического, упорядоченного и абсолютного движения в дифференциальном и интегральном виде.
2. Уравнение Бернулли для сжимаемого и несжимаемого газа.
3. Как объясняется явление запираания сопла?
4. Критическое отношение давлений для воздуха.
5. Как рассчитать давление на выходе из сопла, если давление в ресивере 10 ат?
6. По каким формулам рассчитываются скорость и расход при истечении?
7. Как в работе определяется действительный расход?
8. Что такое коэффициенты скорости и расхода?

3 Исследование процессов теплообмена и теплофизических свойств веществ

Лабораторная работа № 6. Исследование теплопроводности материалов методами шарового и цилиндрического слоя

Цель работы. Ознакомление с методикой экспериментального определения теплопроводности материалов шаровой и цилиндрической формы и углубление знаний по теплопроводности.

Вводная часть

Теория теплообмена – наука о законах распространения (переноса) тепла (хаотического движения – ХД) в пространстве. При этом следует различать три категории:

– свойство материи (**объективную реальность**) – **тепловое** (хаотическое) **движение**, или **тепло**, которое переносится в пространстве;

– **физическую величину** (предмет из мира идей), которая не может переноситься в пространстве, – количество тепла (количество переданного хаотического движения), или **теплоту Q** ;

– **процесс** переноса тепла (ХД) – **теплообмен**.

Элементарные способы переноса тепла (ХД). Обмен хаотическим движением между двумя телами может происходить как путём непосредственного соударения молекул этих тел при их соприкосновении, так и за счёт молекул теплоносителя, перемещающегося между телами, а также с помощью электронов и частиц электромагнитных полей, т. е. для передачи движения необходимо иметь частицы – материальные носители движения.

В зависимости от вида частиц – носителей движения – и особенностей их перемещения в пространстве различают **три элементарных способа переноса тепла (ХД)**: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность – способ переноса тепла (ХД) в однородной среде частицами этой среды **без результирующего переноса вещества** в направлении переноса тепла. Теплопроводность в подвижной среде обусловлена движением молекул этой среды, в электропроводных телах – электронами, в диэлектриках – фононами – виртуальными (возможными) частицами, ответственными за силы взаимодействия в неэлектропроводных телах.

В чистом виде теплопроводность имеет место в твёрдых телах и неподвижных слоях жидкости и газа.

Конвекция (конвекция, от лат *convection* – перенос, доставка)

– способ переноса тепла (ХД) в подвижной среде за счёт макроскопического переноса этой среды из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция имеет место в движущихся средах (жидкостях, газах, сыпучих средах, плазме).

Тепловое излучение – способ переноса тепла (ХД) с помощью электромагнитных волн, возбуждаемых молекулами горячего тела и поглощаемых молекулами холодного тела. В чистом виде теплообмен излучением имеет место в вакууме (космосе).

Совместные способы переноса тепла. Разделение на **элементарные** способы переноса тепла (теплопроводность, конвекцию и излучение) производится в основном из методологических соображений. В действительности же перенос тепла зачастую осуществляется сразу несколькими способами

Совместный перенос тепла конвекцией и теплопроводностью называется **конвективным** способом переноса тепла (конвективным теплообменом).

Совместный перенос тепла излучением и теплопроводностью называется **радиационно-кондуктивным** способом переноса тепла (радиационно-кондуктивным теплообменом).

Совместный перенос тепла всеми тремя способами (теплопроводностью, конвекцией и излучением) называется **сложным**, или **радиационно-конвективным** способом переноса тепла (сложным теплообменом). Примером сложного теплообмена является теплообмен между движущимся многоатомным газом и стенкой, жидким металлом и стенкой.

Тепловым потоком, или **потоком теплоты** называется отношение элементарной теплоты δQ , характеризующей порцию движения переданного в ХФ через какую-либо поверхность системы, к элементарному промежутку времени dt (Вт)

$$\Phi = \delta Q / dt . \quad [\Phi] = [Q] / [t] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}.$$

Тепловой поток численно равен количеству тепла, проходящего через нормально расположенную поверхность в единицу времени.

Поверхностная плотность теплового потока, или **плотность теплового потока** – отношение теплового потока $\delta\Phi$ к площади δA_{\perp} поверхности, расположенной перпендикулярно направлению теплового потока, (Вт/м²)

$$\varphi = \delta\Phi / \delta A_{\perp} .$$

Поверхностная плотность теплового потока численно равна тепловому потоку, равномерно распределённому на поверхности единичной площади.

Градиент (от латин. – *шагающий*), вектор, характеризующий наи-

большее изменение некоторой величины на единицу длины и показывающий направление этого изменения в пространстве. Существует градиент давления, температуры, скорости, плотности морской воды и т. п.

Градиентом температуры – вектор, указывающий направление наибольшего изменения температуры в пространстве и численно равный частной производной от температуры в направлении нормали, называется

$$\text{grad}T = \vec{n}_o (\partial T / \partial n) = (\partial T / \partial x) \vec{i} + (\partial T / \partial y) \vec{j} + (\partial T / \partial z) \vec{k} .$$

Согласно **закону Фурье (1807)** вектор плотности теплового потока пропорционален градиенту температуры и противоположно ему направлен

$$\vec{\phi} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \vec{n}_o \partial T / \partial n . \quad (3.1)$$

Таким образом, векторы $\vec{\phi}$ и $\text{grad}T$ лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны. Это объясняет наличие знака минус в уравнении (3.1).

Плотность теплового потока (модуль вектора $\vec{\phi}$)

$$\phi = |\vec{\phi}| = -\lambda \partial T / \partial n , \quad (3.2)$$

где λ – **теплопроводность** – физическая величина, характеризующая теплопроводящие свойства вещества, Вт/(м·К); зависит от агрегатного состояния вещества (таблица Е.1), его атомно-молекулярного строения, температуры и давления, состава (в случае смеси и раствора) и т. д.;

\vec{n}_o – единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры;

$\partial T / \partial n$ – производная от температуры по направлению нормали \vec{n} .

На основании закона Фурье (3.2) выводятся зависимости для расчёта тепловых потоков через:

– плоскую стенку $\Phi = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) A ; \quad (3.3)$

– цилиндрическую стенку $\Phi = 2\pi\lambda l (T_1 - T_2) / \ln(d_2/d_1) ; \quad (3.4)$

– шаровую стенку $\Phi = 2\pi\lambda (T_1 - T_2) / (1/d_1 - 1/d_2) , \quad (3.5)$

где T_1 и T_2 – температуры горячей и холодной поверхностей стенки, К;

δ – толщина стенки, м;

A – площадь стенки, м²;

d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрической и шаровой стенок, м;

λ – теплопроводность материала стенки, Вт/(м·К).

Отношение λ/δ называется тепловой проводимостью стенки, а обратная величина $R_\lambda = \delta/\lambda$ – **термическим сопротивлением** стенки, м²·К/Вт.

Значения теплопроводности λ для различных материалов приведены в таблице Е.1 приложения.

Методика опытного определения теплопроводности материала

В работе определяется теплопроводность сыпучего материала методами шарового и цилиндрического слоя. Сущность метода состоит в том, что сыпучий материал засыпают в пространство между двумя соосными шарами или трубами. Во внутреннем шаре и цилиндрической трубе располагаются электронагреватели. Для уменьшения тепловых потерь через торцы трубы, они дополнительно теплоизолируются. Для создания одномерного теплового потока через слой исследуемого материала длина трубы должна в 30 раз превышать её диаметр.

Если пренебречь тепловыми потерями через торцы трубы, то тепловой поток Φ , Вт, проходящий через слой исследуемого материала, может быть найден непосредственно путём измерения мощности P , потребляемой электронагревателем и замеряемой ваттметром: $\Phi = P$.

Теплопроводность исследуемых материалов находится из уравнений (3.4) и (3.5):

$$\text{– для трубы} \quad \lambda = \Phi \ln(d_2/d_1) / [2\pi l(t_1 - t_{II})]; \quad (3.6)$$

$$\text{– для шара} \quad \lambda = \Phi(1/d_1 - 1/d_2) / [2\pi(t_1 - t_{II})], \quad (3.7)$$

где t_1 и t_{II} – средние арифметические температуры внутренней и наружной поверхностей шарового и цилиндрического слоёв, °С.

Определение теплопроводности материала методом шарового слоя

Описание лабораторной установки. В экспериментальной установке для определения теплопроводности λ по методу шара (рисунок 19) исследуемый материал 1 в виде шарового слоя расположен между двумя шаровыми стенками 2 и 3 из стали. Внутренний диаметр шарового слоя $d_1 = 70$ мм, а наружный диаметр $d_2 = 100$ мм. Толщина слоя составляет 15 мм.

Метод шарового слоя позволяет получить одномерный тепловой поток без применения каких-либо охранных устройств. Однако шаровой прибор отличается сложностью монтажа, требует строгой центровки шаров; применение шарового прибора связано с трудностями равномерного заполнения исследуемым веществом шарового про-

странства между двумя полыми концентрическими шаровыми поверхностями. При испытании сыпучих и волокнистых материалов неравномерность заполнения шарового слоя исследуемых материалов может привести к значительным ошибкам в определении теплопро-

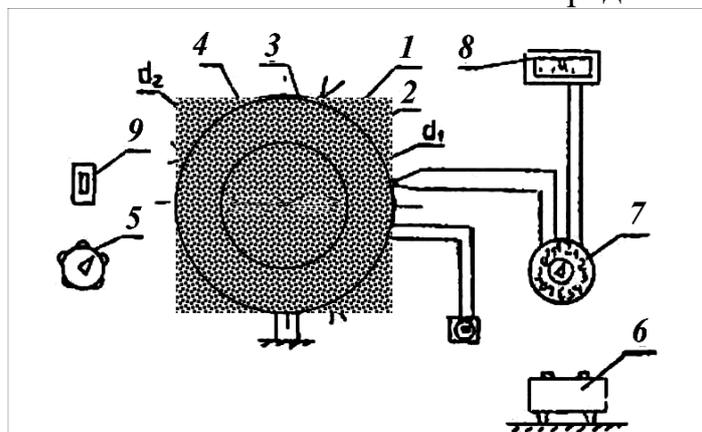


Рисунок 19 – Схема установки для определения теплопроводности по методу шара

водности материала.

Внутри меньшего шара находится электронагреватель 4 из нихромовой проволоки изолированной фарфоровыми бусами. Мощность нагревателя регулируется автотрансформатором 5 и измеряется ваттметром 6. Вся теплота, выделяемая нагревателем, передаётся теплопроводностью через шаровой слой исследуемого материала.

На внутренней и наружной поверхностях шарового слоя материала установлено по пять термопар из хромель-копелевой термоэлектродной проволоки, подключённых к переключателю 7. Каждая термопара установлена в середине равных площадей, составляющих внутреннюю и наружную шаровые поверхности. Температура измеряется пирометрическим милливольтметром 8.

Порядок выполнения работы

1 Вставить вилку электронагревателя в розетку и включить автоматический выключатель 9.

2 Вращая ручку автотрансформатора 5 установить по ваттметру мощность нагревателя $P = 20$ Вт.

3 Подключить пирометрический милливольтметр к одной из термопар с помощью переключателя термопар 7 и дождаться наступления стационарного теплового режима, о чём будет свидетельствовать неизменность показаний милливольтметра во времени (25 – 30 минут после включения на соответствующий режим).

4 Во время опыта измерить:

- а) мощность нагревателя P , Вт;

б) температуры участков стенки внутреннего шара

$$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, ^\circ\text{C};$$

в) температуры участков стенки внешнего шара

$$t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, ^\circ\text{C}.$$

5 Повторить пункты 2–4 для мощностей нагревателя 40 и 60 ватт.

6 При обработке результатов опыта вычислить:

а) среднюю температуру стенок внутреннего шара

$$t_I = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)/5$$

и внешнего шара $t_{II} = (t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10})/5;$

б) среднюю температуру исследуемого материала

$$t_{\text{мат}} = (t_I + t_{II})/2;$$

в) теплопроводность материала λ для трёх исследованных режимов по формуле (3.7), где $d_1 = 0,07$ м, а наружный диаметр $d_2 = 0,10$ м.

7 Определить предельную относительную погрешность измерений теплопроводности материала

$$\varepsilon_{\text{п}}(\lambda) = \left[\frac{\Delta\Phi/\Phi + (\Delta t_I + \Delta t_{II})/(t_I - t_{II}) + (\Delta d_1 + \Delta d_2)/(d_2 - d_1) + \Delta d_1/d_1 + \Delta d_2/d_2}{+} \right] \cdot 100.$$

8 Результаты опытов и расчётов занести в таблицу 11.

9 Построить график зависимости теплопроводности материала от его средней температуры $\lambda = f(t_{\text{мат}})$.

Таблица 11 – К расчёту теплопроводности материала методом шарового слоя

$\Phi = P,$ Вт	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_I	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{II}	$t_{\text{мат}}$	$\lambda,$ Вт/(м·К)	$\varepsilon_{\text{п}}$
	°С														
20															
40															
60															

Определение теплопроводности материала методом цилиндрического слоя

Описание лабораторной установки. Опытная установка состоит из внешней металлической трубы 1 диаметром d_2 , внутри которой концентрично установлена металлическая труба 2 диаметром d_1 , а промежуток между этими трубами заполнен исследуемым сыпучим материалом 3 (рис. 20). В стенки труб заделаны горячие спаи термодпар 4 (по три термодпары на трубу). Внутри трубы 2 вставлена фарфо-

ровая труба 5, в которой установлен электронагреватель 6. Мощность нагревателя измеряется ваттметром 7 и может регулироваться с помощью автотрансформатора 8.

Температура измеряется милливольтметром 9, который поочередно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя 10.

Выход установки на стационарный тепловой режим определяется по температурным кривым разгона, регистрируемым на ленте потенциометра 11 (КСП-4).

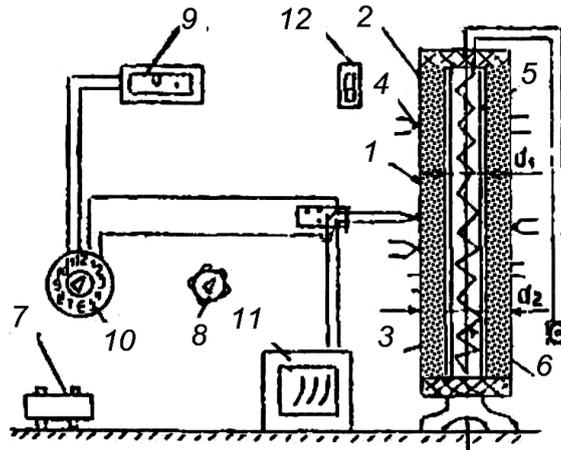


Рисунок 20 – Схема установки для определения теплопроводности по методу цилиндрического слоя

Порядок выполнения работы

1 Вставить вилку электронагревателя в розетку и включить автоматический выключатель 12 и потенциометр 11.

2 Вращая ручку автотрансформатора 8, установить по ваттметру мощность электронагревателя $P = 50$ Вт.

3 Дождаться наступления стационарного теплового режима, о наступлении которого можно судить по неизменности показаний температур.

4 Во время опыта измерить:

а) мощность нагревателя P , Вт;

б) температуры отдельных участков внутренней трубы t_1, t_2, t_3 , °С, и внешней трубы t_4, t_5, t_6 , °С с помощью милливольтметра 9 и переключателя термопар 10.

5 Повторить пункты 2–4 для мощностей нагревателя 100 и 150 Вт.

6 При обработке результатов опыта вычислить:

а) средние температуры стенок внутренней трубы

$$t_1 = (t_1 + t_2 + t_3)/3$$

и внешней трубы $t_{II} = (t_4 + t_5 + t_6)/3$;

б) среднюю температуру исследуемого материала

$$t_{\text{мат}} = (t_I + t_{II})/2;$$

в) теплопроводность материала λ для трёх исследованных режимов по формуле (6), где $d_1 = 0,020$ м и $d_2 = 0,036$ м – диаметры труб; $l = 0,72$ м – длина рабочего участка трубы;

г) предельную относительную погрешность измерений теплопроводности материала по формуле (1.11)

$$\varepsilon_{II}(\lambda) = [\Delta\Phi/\Phi + \Delta l/l + 2\Delta t(t_I - t_{II}) + 2\Delta d/(d_1 \ln d_2/d_1)] \cdot 100.$$

Абсолютные погрешности измерения диаметров принять $\Delta d = 1$ мм, а длины $\Delta l = 5$ мм. Абсолютные погрешности измерения температуры и мощности вычислить по формуле (1.9)

$$\Delta_{II}(A) = K \cdot A_{\text{ном}}/100$$

в соответствии с классом точности K приборов.

7 Результаты опытов и расчетов занести в таблицу 12.

8 Построить зависимость теплопроводности материала от его средней температуры $\lambda = f(t_{\text{мат}})$.

Таблица 12 – К расчёту теплопроводности материала методом цилиндрического слоя

$\Phi = P,$ Вт	t_1	t_2	t_3	t_I	t_4	t_5	t_6	t_{II}	$t_{\text{мат}}$	$\lambda,$ Вт/(м·К)	ε_{II}
	°С										
50											
100											
150											

Отчет о работе. Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, схему лабораторных установок, таблицы и необходимые расчеты, графики зависимости $\lambda = f(t_{\text{мат}})$ для материалов, исследованных по методу шарового и цилиндрического слоя.

Контрольные вопросы

1. Сущность методов определения теплопроводности сыпучих материалов – шарового и цилиндрического.
2. Элементарные способы переноса теплового движения.
3. Закон Фурье.
4. Градиент температуры.
5. Формулы расчета теплового потока путем теплопроводности для плоской, цилиндрической и шаровой стенок.
6. Уметь рассчитывать тепловой поток через стенку и окна ауди-

тории.

Лабораторная работа № 7. Исследование теплоотдачи горизонтальной трубы при естественной конвекции воздуха в неограниченном объёме

Цель работы. Ознакомление с методикой опытного определения коэффициентов теплоотдачи на поверхности горизонтальной трубы в условиях естественной конвекции и обобщение результатов опыта.

Вводная часть

Сложный теплообмен. Совместный перенос тепла теплопроводностью, конвекцией и излучением называется **сложным**, или **радиационно-конвективным** способом переноса тепла (сложным теплообменом). Примером сложного теплообмена является теплообмен между движущимся многоатомным газом и стенкой, жидким металлом и стенкой. В данной работе исследуется сложный теплообмен между нагретым горизонтальным цилиндром и окружающей средой (воздухом), где в качестве основного явления рассматривается конвективный теплообмен.

Конвективный теплообмен. Конвективный теплообмен происходит при движении жидкости или газа, когда перенос теплового движения осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Конвекция, как уже отмечалось в работе № 6, имеет место в движущихся средах (жидкостях, газах, сыпучих средах, плазме).

Различают естественную (свободную) и вынужденную конвекцию. При **естественной конвекции** перемещение жидкости (газа) происходит без внешнего возбуждения в результате самого процесса теплообмена. При теплообмене температура жидкости переменна по её объёму, поэтому возникает разность плотностей и как следствие разность гравитационных сил, действующих на горячие и холодные слои жидкости. Например, при соприкосновении воздуха с нагретым телом воздух нагревается, становится легче и вытесняется вверх холодными слоями воздуха, которые опускаются вниз под действием силы тяжести.

При **вынужденной конвекции** перемещение жидкости происходит под действием посторонних возбудителей, например, насоса, компрессора, вентилятора и пр. В общем случае наряду с вынужденной конвекцией одновременно может развиваться свободная конвекция. Относительное влияние последней тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Уже первые опыты по конвективному теплообмену показали, что плотность теплового потока пропорциональна разности темпера-

тур между жидкостью и поверхностью тела (закон теплоотдачи Ньютона-Рихмана):

$$\varphi = \alpha (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}) \quad \text{или} \quad \Phi = \int \varphi dA = \bar{\alpha} (\bar{T}_{\text{ж}} - \bar{T}_{\text{с}}) A, \quad (3.8)$$

где α – местный (локальный) коэффициент теплоотдачи;

$\bar{\alpha}$ – средний по поверхности теплообмена коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность конвективного теплообмена и равен отношению плотности теплового потока Φ к разности температур между жидкостью и стенкой

$$\alpha = \varphi / (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}). \quad [\alpha] = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи является сложной функцией формы канала, размеров l , например, диаметра d , температур стенки $T_{\text{с}}$ и жидкости $T_{\text{ж}}$, скорости жидкости c и её физических свойств – теплопроводности λ , теплоёмкости c_p , плотности ρ , динамической μ и кинематической ν вязкости и других факторов:

$$\alpha = [c, d, \nu, \mu, c_p, \lambda, T_{\text{ж}}, T_{\text{с}}, \Delta T, \rho, l, \dots].$$

Эту зависимость можно существенно упростить, если представить её в виде критериального уравнения, записываемого через числа подобия в общем случае конвективного теплообмена при **свободно-вынужденном** движении **капельной** жидкости (1.5),

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}, \text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}}). \quad (3.9)$$

Числа подобия – безразмерные комплексы, составленные из величин, характеризующих данное явление. Согласно первой теореме подобия – подобные процессы имеют одинаковые числа (критерии) подобия.

Числа подобия, как уже отмечалось, принято обозначать первыми двумя буквами фамилий учёных, внёсших значительный вклад в исследования в области гидродинамики и теории теплообмена, например, Re (Reynolds), Nu (Nusselt) и др.

Для процессов теплоотдачи режим движения жидкости имеет очень большое значение, т. к. им определяется механизм переноса тепла. Режим движения определяется по значению числа Рейнольдса (1.1)

$$\text{Re} = \frac{cd}{\nu} = \frac{\rho cl}{\mu}.$$

При ламинарном режиме ($\text{Re} < 2300$) перенос движения в направлении нормали к стенке в основном осуществляется путем теплопроводности. При турбулентном режиме ($\text{Re} > 2300$) перенос теплового движения осуществляется путем теплопроводности лишь в вязком подслое, а внутри турбулентного ядра перенос осуществляется путём интенсивного перемешивания (конвекции) частиц жидкости. Интен-

сивность теплообмена при турбулентном режиме значительно выше, чем при ламинарном режиме. Число Рейнольдса является определяющим критерием при рассмотрении теплообмена при вынужденной конвекции.

Число Нуссельта (1.3) является **определяемым** (зависимым) в критериальном уравнении (3.9) **числом подобия**; оно характеризует интенсивность теплоотдачи в пограничном слое потока у стенки (из этого числа определяется **коэффициент теплоотдачи** α):

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (3.10)$$

где d – диаметр трубы, м; λ – теплопроводность жидкости (воздуха), выбирается в зависимости от температуры, Вт/(мК).

$$\text{Число Прандтля (1,2)} \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (3.11)$$

является теплофизической характеристикой теплоносителя.

Число Грасгофа (1.4) характеризует относительную эффективность подъемной силы, вызывающей свободно-конвективное движение среды

$$\text{Gr} = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\nu^2}, \quad (3.12)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – температурный коэффициент объемного расширения среды, 1/К (для газов $\beta = 1/T_{\text{ж}}$);

$\Delta T = T_c - T_{\text{ж}}$ – характерный температурный напор, К;

d – диаметр трубы, м; ν – кинематическая вязкость жидкости (выбирается в зависимости от температуры жидкости по соответствующим таблицам, например, для воздуха по таблице Г1), м²/с.

При естественной (свободной) конвекции газа, исследуемой в данной лабораторной работе, определяющими числами (критериями) подобия являются числа Грасгофа и Прандтля и общее критериальное уравнение (3.9) принимает вид (1.5)

$$\text{Nu} = f(\text{Pr}, \text{Gr}).$$

Для газов $\text{Pr} \cong \text{const}$ и тогда общая запись критериального уравнения (1.6) в случае естественной конвекции газа примет вид

$$\text{Nu} = C \text{Gr}^n. \quad (3.13)$$

Постоянные C и n являются искомыми величинами в этом уравнении при выполнении данной лабораторной работы.

Тепловое излучение. Тепловое излучение представляет собой процесс переноса тепла (хаотического движения) с помощью электромагнитных волн. Тепловое излучение свойственно всем телам, и каждое из них не только непрерывно излучает электромагнитные волны,

но и непрерывно поглощает их.

Излучение, которое определяется природой данного тела и его температурой, называется **собственным** излучением. Согласно закону Стефана-Больцмана поверхностная плотность потока собственного излучения тела пропорциональна четвертой степени его температуры

$$\varphi_{\text{л}} = \varepsilon C_0 (T/100)^4, \quad (3.14)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – излучательная способность чёрного тела, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию и воспринимается зрением как черное тело;

$\varepsilon = \varphi_{\text{л}}/\varphi_0$ - **степень черноты** – отношение плотности потока собственного излучения $\varphi_{\text{л}}$ тела к плотности потока излучения черного тела φ_0 при той же температуре ($0 \leq \varepsilon \leq 1$).

Поверхностная плотность теплового потока излучением тела с температурой T_1 , в окружающую среду с температурой T_2 определяется по формуле

$$\varphi_{\text{л}} = \varepsilon C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]. \quad (3.15)$$

Методика опытного определения коэффициента теплоотдачи α и постоянных C и n критериального уравнения (3.13)

В условиях опыта тепловое движение, рассеиваемое нагревателем, передаётся боковой поверхности горизонтального цилиндра и далее в окружающее пространство путём теплового излучения, свободной конвекцией и теплопроводностью.

Суммарный тепловой поток равен мощности электронагревателя

$$\Phi = P_{\text{эл}}, \text{ Вт.}$$

Суммарная плотность теплового потока φ складывается из плотности теплового потока излучением (лучеиспусканием) $\varphi_{\text{л}}$ и плотности теплового потока, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена (конвекции совместно с теплопроводностью) $\varphi_{\text{к}}$:

$$\varphi = \Phi/A = \varphi_{\text{л}} + \varphi_{\text{к}}. \quad (3.16)$$

Плотность теплового потока излучением определяется по формуле (3.15), которая для нашего случая записывается так:

$$\varphi_{\text{л}} = \varepsilon C_0 (T_{\text{с}}^4 - T_{\text{в}}^4) \cdot 10^{-8}, \quad (3.17)$$

где $T_{\text{с}}$ и $T_{\text{в}}$ - температуры соответственно стенки трубы и комнатного воздуха на удалении от трубы.

Плотность теплового потока, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена, определяется по формуле

$$\varphi_{\text{к}} = \varphi - \varphi_{\text{л}}. \quad (3.18)$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи α , коэффициенты тепло-

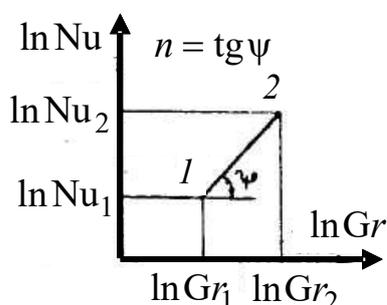
отдачи излучением $\alpha_{\text{л}}$, и конвективным теплообменом $\alpha_{\text{к}}$ определяются по формулам:

$$\alpha = \varphi / (T_{\text{с}} - T_{\text{в}}); \quad (3.19)$$

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varphi_{\text{л}}}{(T_{\text{с}} - T_{\text{в}})}; \quad (3.20)$$

$$\alpha_{\text{к}} = \alpha - \alpha_{\text{л}}. \quad (3.21)$$

Для определения постоянных C и n в уравнении (3.13) вычисляются значения критериев Нуссельта и Грасгофа. Затем по найденным значениям этих критериев строится график в логарифмических координатах $\ln \text{Nu} = f(\ln \text{Gr})$. В этих координатах опытные данные описываются прямолинейной зависимостью вида $\ln \text{Nu} = \ln C + n \ln \text{Gr}$. Значение n в этом уравнении характеризует угловой коэффициент (тангенс наклона) прямой на графике. Взяв на этой прямой две какие-либо произвольные точки с координатами $\ln \text{Nu}_1, \ln \text{Gr}_1$ и $\ln \text{Nu}_2, \ln \text{Gr}_2$, можно вычислить угловой коэффициент (рисунок 21):



$$n = \frac{\ln \text{Nu}_2 - \ln \text{Nu}_1}{\ln \text{Gr}_2 - \ln \text{Gr}_1}. \quad (3.22)$$

Используя уравнение (3.13), можно найти постоянную

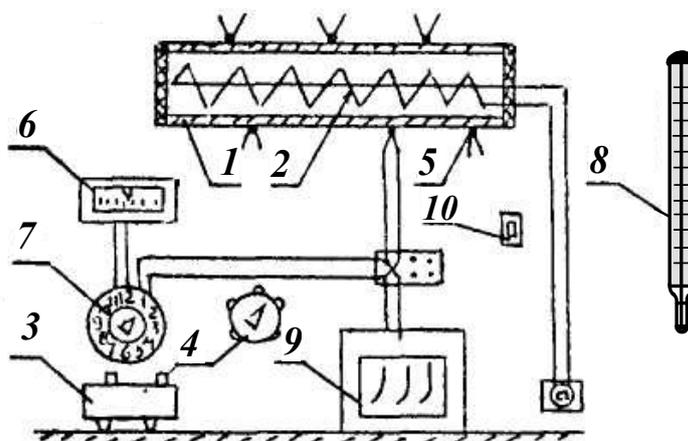
$$C = \text{Nu}_1 / \text{Gr}_1^n. \quad (3.23)$$

Рисунок 21 – К расчёту n

Подставляя найденные значения C и n в уравнение (3.13), получим конкретный вид критериального уравнения для горизонтальной трубы при свободной конвекции в неограниченном пространстве.

Описание лабораторной установки. Установка состоит из горизонтального цилиндра 1 из фарфора с вмонтированным в него нагревателем 2 (рисунок 22). Мощность нагревателя измеряется ваттметром 3 и может регулироваться с помощью автотрансформатора 4 . Для измерения средней температуры стенки трубы на ее поверхности установлены горячие спаи термопар 5 . Значение температур измеряются с помощью милливольтметра 6 , который поочередно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя 7 . Температура воздуха измеряется термометром 8 , который должен быть расположен на расстоянии не менее одного метра от трубы.

Выход установки на стационарный тепловой режим определяется



по температурным кривым разгона, регистрируемых потенциометром 9.
Рисунок 22 – Опытная установка для исследования теплоотдачи

Порядок выполнения работы

1 Вставить вилку электронагревателя в розетку, включить автоматический выключатель и потенциометр.

2 Вращая ручку автотрансформатора 4, установить по ваттметру 3 мощность нагревателя $P_{эл} = 100$ Вт.

3 Дождаться наступления стационарного теплового режима, о наступлении которого можно судить по появлению вертикальных линий на диаграмме потенциометра (температура перестаёт изменяться через 15 – 20 минут).

4 Во время опыта измерить:

а) тепловой поток Φ , равный мощности нагревателя P , Вт;

б) температуру воздуха $t_{в}$, °С;

в) температуры отдельных участков трубы $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$, °С, с помощью милливольтметра 6, подключаемого к соответствующим термопарам переключателем 7.

5 Повторить пункты 2–4 для мощностей нагревателя 200 и 300 Вт.

6 При обработке результатов опыта вычислить:

а) среднюю температуру стенки трубы:

$$t_c = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6) / 6 \quad \text{и} \quad T_c = t_c + 273,15 \text{ К};$$

б) суммарный тепловой поток через единицу площади по формуле

$$\varphi = \Phi / A,$$

где $A = \pi d l$ – площадь боковой поверхности цилиндра диаметром $d = 0,022$ м и длиной $l = 0,75$ м².

в) плотность теплового потока излучением по формуле (3.17), приняв степень черноты фарфора $\varepsilon = 0,92$.

г) плотность теплового потока, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена, по формуле (3.18);

д) коэффициенты теплоотдачи α , $\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{к}}$ по формулам (3.19) – (3.21);

е) числа подобия Нуссельта и Грасгофа по формулам (3.10) и (3.12), где $T_{\text{ж}} = T_{\text{в}}$; температурный коэффициент объемного расширения воздуха $\beta = 1/T_{\text{в}}$; кинематическая вязкость воздуха ν берется из таблицы (Г.1) по температуре воздуха;

ж) показатель степени n и коэффициент C по формулам (3.22) и (3.23);

и) получить критериальное уравнение для рассматриваемого случая теплообмена путём подстановки в уравнение (3.13) числовых значений C и n .

7 Результаты измерений и расчётов занести в таблицу 13.

Таблица 13 – К расчёту теплоотдачи горизонтальной трубы при естественной конвекции

$\Phi = P$, Вт	$t_{\text{в}}$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	$t_{\text{с}}$	$T_{\text{с}}$	Φ	$\Phi_{\text{л}}$	α	$\alpha_{\text{л}}$	$\alpha_{\text{к}}$	Nu	Gr	C	n	ε , %
	°С									К	Вт/м ²	Вт/(м ² ·К ⁴)							
100																			
200																			
300																			

8 Построить график зависимости $\ln \text{Nu} = f(\ln \text{Gr})$

9 Определит погрешность измерений суммарного коэффициента теплоотдачи

$$\varepsilon_{\alpha}(\alpha) = \left(\frac{\Delta \Phi}{\Phi} + \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4}{t_1 - t_2} + \frac{\Delta l}{l} \right) \cdot 100$$

Абсолютные погрешности измерения диаметра принять $\Delta d = 1$ мм, а длины $\Delta l = 5$ мм. Абсолютные погрешности измерения температуры и мощности вычислить по формуле (1.9)

$$\Delta_{\Pi}(A) = K \cdot A_{\text{ном}} / 100$$

в соответствии с классом точности K приборов.

Отчет о работе. Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи α , схему лабораторной установки, таблицу и необходимые расчеты, графики зависимости $\ln \text{Nu} = f(\ln \text{Gr})$.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под сложным теплообменом?

2. Конвективный теплообмен. Уравнение Ньютона-Рихмана.
3. Что такое коэффициент теплоотдачи α и от каких факторов он зависит?
4. Критериальное уравнение для естественной конвекции в неограниченном пространстве.
5. Критерии Рейнольдса, Нуссельта, Грасгофа и Прандтля.
6. Теплообмен излучением. Уравнение Стефана-Больцмана.
7. Формула расчёта плотности теплового потока, излучаемого телом в окружающее пространство.
8. Как в работе определялись постоянные критериального уравнения C и n ?

Лабораторная работа № 8. Исследование теплообмена в рекуперативном теплообменнике

Цель работы. Изучение методики опытного определения коэффициента теплопередачи рекуперативного теплообменника и углубление знаний по теории теплообмена и теплообменным аппаратам.

Вводная часть

Теплопередача. Наиболее общим случаем теплообмена является перенос тепла (хаотического движения) от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку. В зависимости от того, где рассматривается процесс переноса движения (от способа расчета), различают теплоотдачу, теплопроводность и теплопередачу.

Теплоотдачей называется процесс переноса тепла от жидкости к стенке или от стенки к жидкости (процессы 1-2 и 3-4 на рисунке 23). Иначе, теплоотдачей называется процесс конвективного теплообмена между жидкой средой и стенкой.

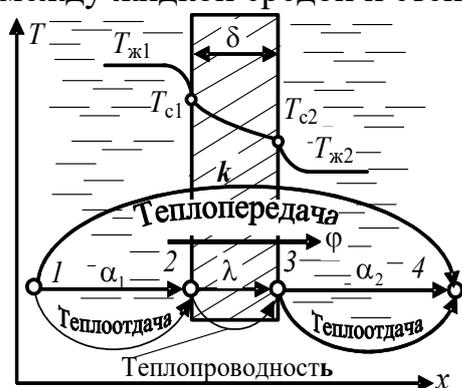


Рисунок 23 – К расчёту теплопередачи через плоскую стенку

При установившемся тепловом состоянии тепловые потоки от горячего теплоносителя к стенке Φ_{12} и от стенки к холодному теплоносителю Φ_{34} равны и определяются по формуле Ньютона-Рихмана:

$$\Phi = \Phi_{12} = \alpha_1 (T_{ж1} - T_{с1}) A, \quad (3.24)$$

$$\Phi = \Phi_{34} = \alpha_2 (T_{с2} - T_{ж2}) A, \quad (3.25)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно со стороны горячего и холодного теплоносителей; A – площадь поверхности

теплообмена; $T_{ж1}$ и $T_{ж2}$ – температуры горячего и холодного теплоносителей; $T_{с1}$ и $T_{с2}$ – температуры стенки со стороны горячего и холодного теплоносителей.

Процесс передачи тепла по самой стенке (процесс 2-3) называется **теплопроводностью**. Уравнение теплопроводности для плоской стенки (3.3) имеет вид

$$\Phi = \Phi_{23} = (\lambda/\delta)(T_{с1} - T_{с2})A, \quad (3.26)$$

где λ – теплопроводность материала стенки; δ – толщина стенки.

Теплопередачей называется процесс переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному через стенку – процесс 1-4 на рисунке (23). Процесс теплопередачи включает в себя процессы теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке 1-2, теплопроводности по самой стенке 2-3 и теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю 3-4.

Тепловой поток при теплопередаче, Вт,

$$\Phi = k(T_{ж1} - T_{ж2})A, \quad (3.27)$$

где $k = 1/(1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2)$ – коэффициент теплопередачи для плоской стенки, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи k является лишь количественной, чисто расчетной характеристикой процесса теплопередачи. Физическая сторона сложного процесса теплопередачи всецело определяется явлениями теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Взаимная связь между коэффициентом теплопередачи и коэффициентами теплопроводности и теплоотдачи зависит от формы стенок (плоская, цилиндрическая, шаровая, ребристая), разделяющих горячую и холодную жидкости.

Теплообменным аппаратом (теплообменником) называется устройство, предназначенное для осуществления теплообмена между теплоносителями или между теплоносителями и твёрдыми телами (стенкой, насадкой). По принципу действия их делят на рекуперативные, регенеративные и смешительные, а также теплообменники с внутренними источниками тепла.

Рекуперативными называются такие аппараты, в которых тепло от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их стенку (радиаторы отопления, парогенераторы, подогреватели и т. д.).

Регенеративными называются такие аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева поочередно омывается то горячим, то холодным теплоносителями (регенераторы мартеновских и стеклоплавильных печей).

В **смесительных** аппаратах процесс теплообмена происходит путем непосредственного соприкосновения и смешения горячего и хо-

лодного теплоносителей (градирни, скрубберы и др.).

Тепловой расчёт теплообменных аппаратов сводится к совместному решению уравнений теплового баланса и теплопередачи. Согласно уравнению теплового баланса при отсутствии тепловых потерь тепловой поток, отдаваемый горячим теплоносителем Φ_1 равен тепловому потоку, воспринимаемому холодным теплоносителем Φ_2 :

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi. \quad (3.28)$$

Процесс течения жидкости в трубах теплообменников близок к изобарному (падение давления из-за гидравлического сопротивления мало по сравнению с самим давлением), поэтому подведенную к малому элементу потока массой δm за время dt теплоту можно определить в соответствии с первым законом термодинамики (2.63) как изменение энтальпии:

$$\delta^2 Q = d^2 H = \delta m dh.$$

Разделив обе части этого уравнения на промежуток времени dt , найдем элементарный тепловой поток $\delta\Phi$:

$$\delta\Phi = \delta(\delta Q/dt) = (\delta m/dt) dh = \dot{m} dh, \quad (3.29)$$

где $\dot{m} = \delta m/dt$ – массовый расход теплоносителя, кг/с.

Если теплоноситель не изменяет своего фазового состояния (не кипит и не конденсируется) в процессе теплообмена, то теплоту и тепловой поток можно определить по формуле (3.29), выразив $dh = c_p dt$,

$$\delta\Phi = \dot{m} c_p dt.$$

Интегрируя это уравнение, получим формулы для расчета тепловых потоков от горячего теплоносителя

$$\Phi_1 = c_{p1} \dot{m}_1 (T_1' - T_1'') \quad (3.30)$$

и к холодному теплоносителю

$$\Phi_2 = c_{p2} \dot{m}_2 (T_2'' - T_2'). \quad (3.31)$$

где $\dot{m}_1 = \rho_1 c_1 A_1$ и $\dot{m}_2 = \rho_2 c_2 A_2$ – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с; c_1 и c_2 – скорости течения теплоносителей в соответствующем сечении канала; A_1 и A_2 – площади поперечного сечения каналов.

Здесь и в дальнейшем индекс «1» означает, что данная величина отнесена к горячей, а индекс «2» – к холодной жидкости. Величины с одним штрихом характеризуют состояние теплоносителя на входе в теплообменник, а величины с двумя штрихами – на выходе из теплообменника.

Вторым основным уравнением при расчете теплообменных аппаратов является уравнение теплопередачи

$$\Phi = k (T_1 - T_2) A = k \Delta \bar{T} A, \quad (3.32)$$

чих равных условиях максимальная температура стенки $T_{ст}$ при прямотоке ниже, чем при противотоке (пунктирная линия на рисунке). Это позволяет применять рекуператор из обыкновенной стали даже при сравнительно высоких температурах дымовых газов (800–850 °С) и температуре нагретого воздуха 350 – 400 °С.

Как видно из рисунка, температурный напор $\Delta\bar{T} = T_{ж1} - T_{ж2}$ непрерывно изменяется вдоль поверхности теплообмена. Для расчета теплопередачи надо знать среднее значение температурного напора $\Delta\bar{T}$. В общем случае температурный напор вдоль поверхности теплообмена изменяется по экспоненциальному закону. В этом случае средний температурный напор определяется по формуле

$$\Delta\bar{T} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_6}{\Delta T_M}} \quad (3.33)$$

и называется **среднелогарифмическим**.

Если предположить, что температура теплоносителей линейно изменяется вдоль поверхности теплообмена, то средний температурный напор можно определить как **среднеарифметическое** значение большего ΔT_6 и меньшего ΔT_M температурных напоров

$$\Delta\bar{T} = (\Delta T_6 + \Delta T_M)/2. \quad (3.34)$$

Среднеарифметическое значение температурного напора всегда больше среднелогарифмического. Но при $\Delta T_M/\Delta T_6 < 0,6$ они отличаются друг от друга меньше чем на 3 %.

Описание лабораторной установки. Установка состоит из рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе» 1 (рисунок 25). По внутренней трубе теплообменника движется горячая вода, подаваемая насосом термостата 2, а по внешней трубе – холодная вода, подаваемая насосом термостата 3.

Температуры теплоносителей на входе и выходе из теплообменника измеряются с помощью термометров 4 горячего и 5 холодного теплоносителей. Массовые расходы теплоносителей определяются объемным методом.

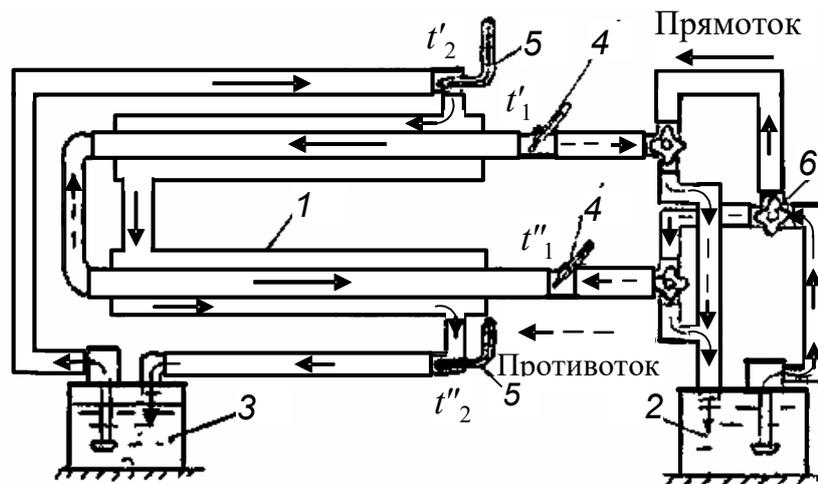


Рисунок 25 – Схема лабораторной установки с теплообменником типа «труба в трубе»

Переключение схемы теплообменника с проточной на противоточную осуществляется трехходовыми кранами 6.

Порядок выполнения работы

1 С помощью кранов 6 включить теплообменник по проточной схеме.

2 Включить электронагреватель термостата 2 и циркуляционные насосы термостатов 2 и 3 (вода в термостатах должна быть налита до самого верха).

3 Дождаться наступления стационарного теплового режима, достижения которого можно судить по миганию лампочки термостата 2, отрегулированного на предельную температуру 70 °С, и повышению температуры горячего теплоносителя при выходе его из теплообменника более 52 °С.

4 Во время опыта измерить:

а) время наполнения мерной емкости объемом 0,5 л (масса воды $m = 0,5$ кг) горячим теплоносителем τ_1 и холодным теплоносителем τ_2 , с;

б) температуры горячего t'_1 , t''_1 и холодного t'_2 , t''_2 теплоносителей.

5 С помощью кранов включить теплообменник по противоточной схеме и дождаться наступления стационарного теплового режима. Повторить пункт 4.

6 При обработке результатов опыта вычислить:

а) массовые расходы теплоносителей $\dot{m}_1 = m/\tau_1$ и $\dot{m}_2 = m/\tau_2$;

б) тепловой поток отдаваемый горячим теплоносителем $\Phi_1 = c_{p1}\dot{m}_1(T'_1 - T''_1)$ и получаемый холодным теплоносителем

$$\Phi_2 = c_{p2} \dot{m}_2 (T_2'' - T_2'), \text{ Вт,}$$

(удельную теплоемкость воды взять из таблицы Д.1, Дж/(кг·К));

в) в соответствии с температурными кривыми вычислить больший ΔT_6 и меньший ΔT_M температурные напоры;

г) среднелогарифмический температурный напор по (3.33);

д) коэффициент теплопередачи $k = \Phi / (A \Delta \bar{T})$,

где $A = 0,045 \text{ м}^2$ – площадь поверхности теплообмена.

7 Вычислить предельную относительную погрешность измерения k

$$\varepsilon_{\text{п}}(k) = \left\{ \frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\delta T}{(T_1' - T_1'')} + \frac{4 \delta T}{\Delta T_6 - \Delta T_M} + 4 \frac{\delta T}{[\Delta T_M \ln(\Delta T_6 / \Delta T_M)]} \right\} 100\%$$

где $\Delta \dot{m}$, Δd , Δl и δT – абсолютные погрешности при измерении расхода, диаметра, длины и температуры (см. подраздел 1.1).

8. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 14.

9. Сравнить численные значения коэффициентов теплопередачи, полученные для прямотока и противотока.

Таблица 14 – Результаты опытных и расчётных данных

Схема движения теплоносителей	t_1'	t_2'	t_2''	ΔT_6	ΔT_M	$\Delta \bar{T}$	τ_1	τ_2	\dot{m}_1	\dot{m}_2	Φ_1	Φ_2	k ,	ε ,
	°C						с	кг/с	Вт	Вт/(м ² ·К)	%			
Прямоток														
Противоток														

Отчёт о работе. Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, схему установки, основные расчетные формулы, таблицу и графики изменения температуры теплоносителей при прямотоке и противотоке, сравнение прямотока и противотока.

Контрольные вопросы

1. Из каких процессов состоит процесс теплообмена между двумя жидкостями, разделенными твердой стенкой?
2. Формула расчёта коэффициента теплопередачи для плоской стенки.
3. Типы теплообменных аппаратов.
4. Как рассчитываются тепловые потоки при расчете теплообменных аппаратов.
5. Уравнение теплопередачи.
6. Что такое средний температурный напор $\Delta \bar{T}$?
7. Кривые изменения температуры теплоносителей при прямотоке и противотоке.
- 8 Сравнение прямотока и противотока.

Литература

- 1 Рындин В. В. Термодинамика и теплопередача. Методические указания к лабораторным работам для студентов машиностроительных специальностей. – Алма-Ата : НМК, 1992. – Ч. 1. – 53 с. : ил.
- 2 Рындин В. В. Термодинамика и теплопередача. Методические указания к лабораторным работам для студентов машиностроительных специальностей. – Алма-Ата : НМК, 1992. – Ч. 2. – 40 с. : ил.
- 3 Зубарев В. Н. и др. Практикум по технической термодинамике : учеб. пособие для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 304 с. : ил.
- 4 Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / под ред. В. И. Крутова, Е. В. Шишова. – М. : Высш. шк., 1988. – 216 с : ил.
- 5 Общая теплотехника: Лабораторный практикум / под ред. А. И. Вейника. – Минск : Высш. школа, 1965. – 132 с. : ил.
- 6 Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена : учеб. пособ. для вузов. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.
- 7 Практикум по теплопередаче : учеб. пособие для вузов / Под ред. А. П. Солодова. – М. : Энергоатомиздат, 1966. – 296 с. : ил.
- 8 Исаченко В. П. и др. Теплопередача : учеб. для вузов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с. : ил.
9. Рындин В. В. Теплотехника : Монография. – Павлодар : Кереку, 2007. – 460 с. : ил.
10. Техническая термодинамика : учеб. для вузов / под ред. В. И. Крутова. – М. : Высш. шк., 1991. – 384 с. : ил.
- 11 Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». – М. : Энергия, 1978. – 704 с. : ил.
- 12 ГОСТ 16263–70. Метрология. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1970.
- 13 Чертов А. Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) // справ. пособие. – М. : Высш. шк., 1990. – 335 с. : ил.
- 14 Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент : Справочник / под. общ. ред. В. А. Григорьева, В. М Зорина. – 2-е изд. перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 550 с.: ил. – (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 2).

Приложение А (справочное)

Соотношения между единицами различных величин

Таблица А.1 – Соотношения между единицами работы, энергии, теплоты

Единица	Дж	кал	ккал	кВт·ч
1 Дж	1,00	0,239	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$
1 ТДж	10^{12}	$2,39 \cdot 10^{11}$	$2,39 \cdot 10^8$	$2,78 \cdot 10^5$
1 ГДж	10^9	$2,39 \cdot 10^8$	$2,39 \cdot 10^5$	278
1 МДж	10^6	$2,39 \cdot 10^5$	239	0,278
1 кДж	10^3	239	0,239	$2,78 \cdot 10^{-4}$
1 мДж	10^{-3}	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$2,39 \cdot 10^{-7}$	$2,78 \cdot 10^{-10}$
1 кал	4,187	1,00	10^{-3}	$1,163 \cdot 10^{-6}$
1 ккал	4 187	10^3	1,00	$1,163 \cdot 10^{-3}$
1 Вт·ч	3 600	860	0,860	10^{-3}
1 кВт·ч	$3,6 \cdot 10^6$	$8,60 \cdot 10^5$	860	1,00
1 кгс·м	9,81	2,34	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$

Таблица А.2 – Соотношения между единицами мощности, теплового потока (тепловой мощности)

Единица	Вт	ГВт	МВт	кВт	ккал/ч
1 Вт	1,00	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	0,860
1 ГВт	10^9	1,00	10^3	10^6	$8,60 \cdot 10^8$
1 МВт	10^6	10^{-3}	1,00	10^3	$8,60 \cdot 10^5$
1 кВт	10^3	10^{-6}	10^{-3}	1,00	860
1 Ткал/ч	$1,163 \cdot 10^9$	1,163	$1,163 \cdot 10^3$	$1,163 \cdot 10^6$	10^9
1 Гкал/ч	$1,163 \cdot 10^6$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1,163	$1,163 \cdot 10^3$	10^6
1 Мкал/ч	$1,163 \cdot 10^3$	$1,163 \cdot 10^{-6}$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1,163	10^3
1 ккал/ч	1,163	$1,163 \cdot 10^{-9}$	$1,163 \cdot 10^{-6}$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1,00
1 кал/с	4,187	$4,187 \cdot 10^{-9}$	$4,187 \cdot 10^{-6}$	$4,187 \cdot 10^{-3}$	3,60
1 Мкал/сут	48,5	$4,85 \cdot 10^{-8}$	$4,85 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-2}$	41,7
1 л. с.	736	$7,36 \cdot 10^{-7}$	$7,36 \cdot 10^{-4}$	0,736	632,96

Таблица А.3 – Соотношения между единицами давления

Единица	Па	МПа
1 МПа	10^6	1,00
1 бар	10^5	0,100
1 кгс/см ² (1 ат)	$0,981 \cdot 10^5$	0,0981
1 атм (760 мм.рт.ст.)	101 325	0,101325
1 мм вод. ст (кгс/м ²)	9,81	$9,81 \cdot 10^{-6}$
1 мм рт ст (Торр)	133,322	$1,333 \cdot 10^{-4}$

Приложение Б

Наименования теплотехнических величин

Современное наименование физической величины	Устаревшее наименование физической величины
Белое тело	Абсолютно белое тело
Вместимость сосуда	Ёмкость сосуда
Вязкость (динамическая, кинематическая)	Динамический (или кинематический) коэффициент вязкости жидкости
Давление (под термином «давление» понимается абсолютное давление; если рассматривается не абсолютное давление, то вводятся термины «избыточное давление» и «разрежение»)	Абсолютное давление
Давление воды 0,3 МПа \approx 30 м вод. ст	Напор воды 0,3 МПа
Напор воды 30 м = 30 Дж/Н	Давление воды 30 м
Количество вещества ¹ , моль	Число молей вещества
Массовый расход, кг/с	Весовой расход, кг/с, или кгс/с
Молярная масса	Молярная масса, молекулярная масса
Молярный объём, м ³ /моль	Молярный объём, молекулярный объём
Относительная атомная масса	Атомный вес, атомная масса
Парциальное давление водяного пара в воздухе	Упругость водяного пара в воздухе
Площадь поверхности равна 5 м ²	Поверхность стола равна 5 м ²
Площадь сечения трубы 15 см ²	Сечение трубы составляет 15 см ²
Поверхностное натяжение	Коэффициент поверхностного натяжения
Поверхностная плотность теплового потока (плотность теплового потока)	Удельный тепловой поток
Подача (массовая, объёмная) насоса, компрессора, вентилятора	Производительность насоса, компрессора, вентилятора
Расход (массовый, молярный, объёмный)	Расход (секундный, часовой)
Свет, видимое излучение	Видимый свет (свет всегда видимый)
Температура точки росы 17 °С	Точка росы равна 17 °С
Температура тройной точки воды	Тройная точка воды 0,01 °С
Тепловая мощность котла	Теплопроизводительность котла
Теплопроводность материала, Вт/(м·К)	Коэффициент теплопроводности материала
Теплота, количество тепла	Теплота, количество теплоты
Удельная теплота сгорания топлива, Дж/кг	Теплотворная способность, теплотворность топлива
Холодильная мощность установки	Холодопроизводительность установки
Частота вращения вала	Число оборотов вала в минуту
Чёрное тело	Абсолютно чёрное тело
Энтальпия	Теплосодержание

¹ По соображениям, изложенным в разделе 1, данную величину рекомендуется называть «молярность вещества», или коротко «молярность».

Приложение В (справочное)

Принятые обозначения величин [9]

Таблица В.1 – Основные теплотехнические величины

Наименование	Обозначение	Единица СИ
Влажосодержание воздуха	$d = m_{\text{п}}/m_{\text{с.в}}$	кг/кг (сухого воздуха)
Влажность воздуха абсолютная (2.54)	$\rho'_{\text{п}} = m_{\text{п}}/V$	кг/м ³
относительная (2.55)	$\varphi = \rho'_{\text{п}}/\rho'_{\text{н}} = p_{\text{п}}/p_{\text{н}}$	в долях единицы или %
Время	t	с (секунда)
Вязкость динамическая	μ	Па·с
кинематическая	$\nu = \mu/\rho$	м ² /с
Давление атмосферное (барометрическое)	$p = \delta F/\delta A_{\perp}$	Па = Н/м ²
избыточное (3.6)	$p_{\text{ат}} = p_{\text{с.в}} + p_{\text{п}}$	Па
насыщения пара	$p_{\text{н}} = p - p_{\text{ат}} \equiv p_{\text{абс}} - p_{\text{атмос}}$	Па
при нормальных физических условиях (НФУ)	$p_0 = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст}$	Па
Длина	l	м
Доля i – го компонента смеси массовая	$g_i = m_i/m_{\text{см}}$	в долях единицы или %
молярная	$x_i = \mu_i/\mu_{\text{см}}$	
объёмная	$r_i = V_i/V_{\text{см}}$	
Количество вещества (молярность) (2.5)	$\mu = N/k_A$; $\{\mu\} = N/N_A$	моль
Коэффициент объёмного расширения температур- ный идеального газа	$\beta = 1/T$	К ⁻¹
расхода (сопла, диафрагмы) (2.85)	$\mu = \dot{m}/\dot{m}_{\text{с}} = \dot{m}_{\text{дей}}/\dot{m}_{\text{теор}}$	Вт/(м ² ·К) Вт/(м ² ·К)
скорости (сопла) (2.84)	$\varphi = c/c_{\text{с}} = c_{\text{дей}}/c_{\text{теор}}$	
теплоотдачи (3.19)	$\alpha = \Phi/(T_{\text{ж}} - T_{\text{с}} A)$	
теплопередачи (3.27)	$k = \Phi/[(T_{\text{ж1}} - T_{\text{ж2}})A]$	
Критерий подобия Грасгофа (1.4)	$Gr = g\beta\Delta T l^3/\nu^2$	
Прандтля (1.2)	$Pr = \mu c_p/\lambda$	
Рейнольдса (1.1)	$Re = c l/\nu$	
Масса молярная (3.19)	$m = \rho V$ $M = m/\mu$	кг кг/моль
воздуха	$M_{\text{воз}} = 28,97 \text{ кг/кмоль}$	
Мощность механическая (двигателя)	$N \equiv P = \delta W/dt$	Вт = Дж/с
тепловая (тепловой поток)	$\Phi = \delta Q/dt$	Вт Вт

Продолжение таблицы В.1

Сила (поток импульса) давления инерции (собственный поток импульса) тяжести	$\vec{F} = \delta\vec{K}/dt = \delta(m\vec{c})/dt$ $F_{\text{дав}} = \int p dA$ $\vec{F}_{\text{и}} = -d\vec{K}/dt = -m\vec{a}$ $\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$	Н Н Н Н
Скорость линейная звука света	$\vec{c} = d\vec{r}/dt$ $a = \sqrt{kp/\rho} = \sqrt{kRT}$ $c_0 = 299\,792,457 \text{ км/с}$	м/с м/с м/с
Способность излучательная серого тела чёрного тела	$C = \epsilon C_0$ $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	Вт/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)
Степень сухости пара (сухость пара)	$x = m_{\text{с.п}}/m_{\text{в.п}}$	
Степень черноты	$\epsilon = \Phi_{\text{соб}}/\Phi_{\text{чёр}}$	
Температура термодинамическая (Кельвина) Цельсия таяния льда тройной точки воды	$T = T_C + T_0 = t + T_0$ $T_C \equiv t = T - T_0$ $T_0 = 273,15 \text{ К} (0 \text{ }^\circ\text{C})$ $T_{\text{тт}} = 273,16 \text{ К} (0,01 \text{ }^\circ\text{C})$	К °C К К
Теплоёмкость истинная тела (системы) молярная объёмная удельная изобарная средняя удельная при $X = p, v = \text{const}$	$C_{\text{тела}} = \delta Q/dT$ $C_\mu = C_{\text{тела}}/\mu$ $c' = C_{\text{тела}}/V_0 = C_\mu/V_{\mu 0} = c\rho_0$ $c_p = C_{p\text{ тела}}/m = C_{\text{мр}}/M$ $\bar{c}_X = q_X/\Delta T$	Дж/К Дж/(моль·К) Дж/(м ³ ·К) Дж/(кг·К) Дж/(кг·К)
Теплопроводность	$\lambda = \Phi/ \text{grad } T $	Вт/(м·К)
Теплота удельная	$Q = \bar{c}_X m \Delta T = \int \Phi dt = m \int T d$ $q = Q/m = \bar{c}_X \Delta T$	Дж Дж/кг
Уравнение первого закона термодинамики второго закона термодинамики	$\delta q = du + \delta w = du + p dv$ $dS_{\text{ис}} \geq 0, dS_{\text{рт}} \geq \delta Q_{\text{внеш}}/T_{\text{ит}}$	
Число (частиц, оборотов и т. п.) Авогадро Нуссельта (12.10)	N $N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23}$ $\text{Nu} = \alpha l/\lambda$	
Энергия внутренняя молярная (идеального газа) удельная (идеального газа)	E U $U_\mu = U/\mu = C_{\mu v} T$ $u = U/m = c_v T$	Дж Дж Дж/моль Дж/кг
кинетическая потенциальная (гравитационная)	$E_k = mc^2/2$ $E_p = mgz$	Дж Дж
Энтальпия удельная (идеального газа)	$H = U + pV$ $h = u + pv = c_p T$	Дж Дж/кг
Энтропия удельная	$S = \int \delta Q/T$ $s = S/m = \int \delta q/T$	Дж/К Дж/(кг·К)

Приложение Г (справочное)

Физические свойства сухого воздуха

Таблица Г.1 – Некоторые параметры сухого воздуха
($p_{\text{ат}} = 760 \text{ мм рт ст.} = 101\,325 \text{ Па}$) [14]

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	P_r
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

**Приложение Д
(справочное)**

Теплофизические свойства воды и водяного пара [14]

Таблица Д.1 – Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}$ Па	$\rho',$ кг/м ³	$h',$ кДж/кг	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/ (м·К)	$a \cdot 10^8,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6$ Па·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	$\beta \cdot 10^4$ К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$ Н/м	Pr = $\frac{\mu c_p}{\lambda}$
0,01	0,0061	999,9	0,00	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	- 0,63	756,4	13,67
10	0,0123	993,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+ 0,70	741,6	9,52
20	0,0234	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	0,0424	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	0,0738	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	0,1234	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	0,1992	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	0,3117	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	0,4736	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	0,7011	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,0132	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35

370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1.86	56,9	0,126	264	4,709	6,79
-----	--------	-------	--------	--------	------	------	------	-------	-----	-------	------

Таблица Д.2 – Физические свойства водяного пара на линии насыщения (сухой насыщенный пар $x = 1$)

t , °C	$p \cdot 10^{-5}$	ρ'' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	c_p , кДж/	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	$Pr =$ $= \mu c_p / \lambda$
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,4	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	18,25	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	18,84	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	20,60	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	21,29	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	22,86	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	23,94	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	25,21	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,0580	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,0386	29,14	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	33,75	0,166	11,10

**Приложение Е
(справочное)**

Теплофизические свойства некоторых материалов

Таблица Е.1 – Плотность ρ , теплопроводность λ и теплоёмкость c строительных, теплоизоляционных и других материалов [14]

Материалы	ρ , кг/м ³	t , °С	λ , Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)
Альфонь при толщине воздушных слоев 10 мм	–	–	$0,0302+0,85 \cdot 10^{-4} t$	–
Асбест распушенный: 3-й сорт	340	–	$0,087+0,24 \cdot 10^{-3} t$	0,816
Асбестовый картон	900	–	$0,16-0,17 \cdot 10^{-3} t$	0,816
Асбестовый шнур	800	–	$0,13-0,15 \cdot 10^{-3} t$	0,816
Асбошифер: с высоким содержанием асбеста	1800	20	0,17–0,35	–
с 10–50 % асбеста (сухой)	1800	20	0,64–0,52	–
Асфальт	2120	0–30	0,60–0,74	1,67
Бетон с каменным щебнем	2000	0	1,28	0,84
То же сухой	1600	0	0,84	–
Железобетон набивной	2200	0	1,55	0,84
Шлакобетон	1000	0	0,70	0,80
Бумага обыкновенная	–	20	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	80	30	0,042	–
Гипс (формованный сухой)	1250	20	0,43	0,80–92
Глина огнеупорная	1845	450	1,04	1,09
Гравий	1840	20	0,36	–
Дерево: дуб поперек волокон	825	0–15	0,20–0,21	2,39
дуб вдоль волокон	819	12–50	0,35–0,43	2,39
сосна поперек волокон	546	0–50	0,14–0,16	2,72
сосна вдоль волокон	–	20–25	0,35–0,72	2,72
Каменный уголь твёрдый	1275	20	0,24–0,27	–
Каменноугольная пыль	730	30–150	0,12–0,13	–
Картон	–	20	0,14–0,35	1,51
Кирпич: красный машинной формовки	1800	0	0,77	0,88
силикатный	1900	0	0,81	0,84
Кладка из красного кирпича	1700	0	0,81	0,88
Кладка из силикатного кирпича	1900	0	0,87	0,84
Кладка бутовая из камня	2000	0	1,28	0,88
Кокс порошкообразный	449	100	0,191	1,21
Ламповая сажа	165	40	0,07–0,12	–
Лёд	917	0	2,2	2,26
Лёд	928	– 100	3,5	1,17

Продолжение таблицы Е.1

Материалы	ρ , кг/м ³	t , °С	λ , Вт/(м·К)	C , кДж/(кг·К)
Льняная ткань	–	–	0,088	–
Магнезия для изоляции труб	266	50–200	0,073–0,084	–
Мел	2000	50	0,9	0,88
Миканит	–	20	0,21–0,41	–
Мрамор	2800	0	3,5	–
Парафин	920	20	0,27	–
Песок кварцевый (сухой)	1320	45	0,44	0,75
Песок речной мелкий (сухой)	1520	20	0,33–0,38	0,80
Плексиглас	–	20	0,184	–
Пробковые плиты сухие	175	80	0,042–0,053	1,76
Резина твердая обыкновенная	1200	0–100	0,157–0,160	1,38
Сахарный песок	1600	0	0,58	1,26
Сланец	–	94	1,49	–
Слюда (поперек слоев)	2800	20	0,49–0,58	–
Снег:				
свежевыпавший	200	–	0,10	2,09
уплотненный	400	–	0,46	2,09
Стекло				
зеркальное	2550	0–100	0,78–0,88	0,779
обыкновенное	2500	20	0,74	0,67
термометрическое	2590	20	0,96	–
кварцевое	–	800	2,40	–
Стекланная вата	154–206	88	0,051–0,059	–
Текстолит	1350	20	0,23–0,34	1,46–1,51
Фарфор	2400	95	1,04	1,09
То же	2400	1055	1,96	1,09
Целлулоид	1400	30	0,21	–
Шелк	100	0–93	0,043–0,06	–
Эбонит	1200	20	0,157–0,17	–
Шлак котельный	1000	0	0,29	0,75
Штукатурка цементно-песчаная	1800	0	1,2	0,84
Фанера клееная	600	0	0,15	2,51
Древесный уголь кусковой	190	80	0,074	
Алюминий	2705	20	237	0,90
Висмут	9747	20	7,9	
Железо	7870	20	80,2	0,45
Золото	19300	20	317	0,13
Медь	8930	20	401	0,39
Олово	7184	20	66,6	1,00
Платина	21370	20	71,6	0,13
Свинец	11342	20	35,3	0,13
Серебро	10500	20	429	0,24
Сталь	7800	20	45–60	0,46–0,50

Содержание

	Предисловие	3
1	Теоретические основы теплотехнического эксперимента . . .	4
1.1	Подобие процессов теплообмена	4
1.2	Определение погрешности результатов измерений	6
1.3	Физические величины и их единицы	11
1.4	Буквенные обозначения физических величин	19
1.5	Правила использования единиц физических величин	26
2	Исследование термодинамических свойств газов и термодинамических процессов	31
	Лабораторная работа № 1. Определение удельной газовой постоянной воздуха	31
	Лабораторная работа № 2. Первый закон термодинамики . . .	42
	Лабораторная работа № 3. Определение средней изобарной теплоемкости воздуха	55
	Лабораторная работа № 4. Исследование процессов во влажном воздухе	63
	Лабораторная работа № 5. Исследование адиабатного истечения воздуха из сопла	73
3	Исследование процессов теплообмена и теплофизических свойств веществ	84
	Лабораторная работа № 6. Исследование теплопроводности материалов методами шарового и цилиндрического слоя . . .	84
	Лабораторная работа № 7. Исследование теплоотдачи горизонтальной трубы при естественной конвекции воздуха в неограниченном объёме	92
	Лабораторная работа № 8. Исследование теплообмена в рекуперативном теплообменнике	99
	Литература	106
	Приложение А. Соотношения между единицами различ- ных величин	107
	Приложение Б. Наименования теплотехнических величин . .	108
	Приложение В. Принятые обозначения величин	109
	Приложение Г. Физические свойства сухого воздуха	112
	Приложение Д. Теплофизические свойства воды и водяного пара	113
	Приложение Е. Теплофизические свойства некоторых материалов	115

