

2351

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)**

**по дисциплине «Техническая термодинамика»**

**Минск 2002**

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине «Техническая термодинамика»  
для студентов теплоэнергетических специальностей

В 4-х частях

Часть 1

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Минск 2002

УДК 536.7(075:8)

Издание предназначено для студентов теплоэнергетических специальностей Белорусской государственной политехнической академии, изучающих курс «Техническая термодинамика».

В практикуме приведены основные теоретические сведения по темам лабораторных работ, описание лабораторных установок и методик, лежащих в их основе, порядок выполнения работ.

Первая часть практикума связана с понятием идеального газа, играющим важную роль в изучении дисциплины.

Составители:

В.Н.Романюк, Е.В.Томкунас,  
И.В.Баук, Л.А.Тарасевич

Рецензент Н.Б.Карницкий

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Приступая к лабораторной работе, студенту следует:

изучить соответствующий материал данного практикума и разобратся в методике исследования, на которой базируется работа;

заготовить форму отчета для проведения наблюдений (на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» имеются в электронной форме протоколы лабораторных работ, которые целесообразно использовать).

*Перед началом и в ходе лабораторной работы преподаватель обязан объяснить физическую суть протекающих в ней процессов, связать ее с выполняемыми в ходе работы действиями, что совершенно необходимо для требуемого усвоения материала. Без этого выполнение лабораторной работы теряет смысл.*

С разрешения преподавателя и в присутствии инженера студент выполняет экспериментальную часть работы, строго соблюдая правила техники безопасности, затем производит необходимые расчеты. Если для получения численного значения определяемой величины требуется провести много однообразных расчетов, то приводится подробно один пример расчета, а результаты остальных даются в виде таблицы. При оформлении расчета вначале записывается используемая формула, затем она же с численными значениями входящих в нее величин и только после этого – результат, который, безусловно, снабжается требуемой размерностью.

*На любой стадии выполнения лабораторной работы студент может и должен обращаться к преподавателю за разъяснениями по возникшим вопросам, а обязанностью последнего является качественное объяснение соответствующей проблемы.*

Отчет сохраняется студентом до сдачи экзамена по дисциплине и является составной частью информации, на основе которой оценивается усвоение студентом пройденного материала.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Выполняя отчет, студент должен уделить должное внимание его оформлению. Так, рисунки и таблицы выполняются аккуратно и технически грамотно, они должны иметь номер и название с пояс-

нениями обозначений, расшифровкой аббревиатур и т.д. (см. соответствующие стандарты Республики Беларусь), а также ссылку в отчете, связывающую их с текстом изложения.

Отчет по лабораторной работе может оформляться по традиционной технологии – с помощью ручки, карандаша, линейки и т.п. либо с применением современных компьютерных технологий с использованием соответствующих программных пакетов Word, Excel, Autocad, Mathcad и т.п. В последнем случае можно воспользоваться имеющимися на кафедре электронными шаблонами отчетов, в которых выполнены схемы установок, трафареты таблиц и пр.

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

1. Название и цель работы.
2. Достаточно полное и ясное описание объекта и методики исследования.
3. Схема установки. При оформлении по традиционной технологии выполняется карандашом с использованием чертежных принадлежностей и соблюдением ГОСТа в обозначениях.
4. Протокол наблюдений в виде таблицы.
5. Обработка наблюдений и расчет искомых величин.
6. Описание приборов (класс точности, предел измерений, шкала и пр.). Необходимая статистическая обработка с обоснованием числа тех или иных замеров и расчет погрешности.
7. Сравнение полученных опытных значений величин с имеющимися в литературе данными.
8. Построение протекающих в работе процессов в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах, безусловно, аккуратно, желательно на миллиметровке.
9. Анализ полученных результатов и выводы.

Следует остановиться на тех моментах, которые вызвали непонимание и для разъяснения которых пришлось обратиться к преподавателю, к дополнительной литературе.

Наконец, в новых условиях, когда имеется возможность использовать готовые электронные шаблоны отчетов, следует большее внимание уделять практическому применению методов оценки достоверности наблюдений, правилам расчетов с приближенными числами, грамотной записи полученных результатов.

## ОЦЕНКА ОШИБКИ И ЗАПИСЬ ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЕЛИЧИН

Любое измерение не может быть выполнено точно, поэтому в задачу измерений входит не только нахождение самой величины, но и оценка погрешности. Необходимо понимать, что требования к измерениям зависят как от поставленной задачи и целей, так и от ресурсов, поэтому целесообразно применять *максимум усилий для получения большей точности только тогда, когда это требуется*.

Из общего числа ошибок можно выделить ошибки случайные и систематические. *Случайные ошибки* проявляются в разбросе результатов замеров, они легко определяемы и устраняемы путем проведения повторных замеров. Большой интерес представляет анализ *систематических ошибок*. К последним относятся:

- погрешности методики, лежащей в основе всей работы;
- ошибки приборов, используемых в работе;
- ошибки методик измерения тех или иных величин;
- ошибки установок и лабораторий.

Для ошибок, природа которых известна, необходимо решить вопрос о введении *поправок*. При этом если требуемая величина поправки не превышает 0,005 от средней квадратичной ошибки результата измерения, то данной поправкой можно пренебречь.

Для оценки случайных ошибок используется так называемая средняя квадратичная ошибка, которая находится по формуле

$$S_n = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (x - x_i^2)\right) / (n - 1)}, \quad (1)$$

где  $x$ ,  $x_i$  — соответственно истинное значение определяемой величины и ее значение в  $i$ -м наблюдении;

$n$  — число наблюдений.

Для установления наличия *ошибок методики измерения* необходимо провести измерение той же величины по другой методике. Систематические ошибки, обусловленные свойством измеряемого объекта (например, увеличением отклонения свойств воздуха от свойств идеального газа с ростом давления и понижением температуры), могут быть максимально уменьшены в результате изменения условий опыта. В ряде случаев возможен их перевод в категорию

случайных ошибок при помощи приема, получившего название рандомизации. Систематические *ошибки приборов* обусловлены, прежде всего, классом точности приборов. Для этих ошибок требуется вычислить границы соответствующего диапазона, в пределах которого они должны находиться. Абсолютная ошибка измерения конкретным прибором ( $\Delta x$ ) определяется на основании его класса точности ( $\delta x$ , %), указанного, как правило, на шкале прибора. Определив верхнюю границу измерений ( $x_{\text{макс}}$ ) данного прибора, что нетрудно сделать по его шкале, абсолютную ошибку одного измерения находят по простой формуле

$$\Delta x = \frac{x_{\text{макс}} \cdot \delta x}{100}. \quad (2)$$

Величина абсолютной ошибки служит одним из критериев для выбора числа повторных наблюдений. Если систематическая ошибка является определяющей и существенно больше случайной ошибки, присущей данному методу, то достаточно одного измерения. Если же имеет место обратное, т.е. случайная ошибка является определяющей, то измерения производятся несколько раз. Число измерений выбирают таким, чтобы случайная ошибка среднего арифметического была меньше систематической ошибки, с тем чтобы последняя опять определяла окончательную ошибку результата.

Систематические и случайные ошибки *косвенных измерений* (т.е. тех, когда интересующая экспериментатора величина в конечном итоге рассчитывается по формуле) вычисляются по известным правилам:

$$\begin{aligned} e_{x+y} &= e_x + e_y; & e_{x-y} &= e_x - e_y; \\ e_{x \cdot y} &= ye_x + xe_y; & e_{x/y} &= \frac{1}{y}e_x - e_y \cdot \frac{x}{y^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $e_x$ ,  $e_y$  – соответственно абсолютные ошибки приближенных величин  $x$  и  $y$ .

Более подробные сведения по данной проблеме, весьма важной для инженера, можно найти в специальной литературе [1, 12].

Инженер всегда имеет дело с приближенными величинами. Последнее обязывает его к умению грамотно записывать результаты

приближенных вычислений либо по соответствующей записи приближенного числа определять ошибку той или иной величины, им представленной. Например, в таблицах свойств воды и водяного пара [10, 13] и иных [5] данные приведены с четырьмя-пятью значащими цифрами, что указывает на погрешность предлагаемых величин в 0,01%. Данное знание входит в набор навыков, которыми следует обладать инженеру, а потому напомним основные моменты работы с приближенными числами.

Погрешность правильно записанного приближенного числа определяется количеством значащих цифр записи. *Значащей цифрой* считаются все цифры включая нуль, начиная с первой цифры отличной от нуля, стоящей в записи числа слева. Например, числа 0,0009203; 92,03; 9,200; 9200;  $0,9200 \cdot 10^6$  имеют четыре значащие цифры и, соответственно, одинаковую относительную погрешность 0,01%.

Относительная  $\delta A$ , абсолютная  $\Delta A$  погрешности и само число  $A$ , как известно, связаны соотношением

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

Абсолютная погрешность числа связана с «весом» единицы младшего разряда числа его записи. Следует помнить, что для физических величин она равна единице младшего разряда числа его записи, для математических величин – 0,5 единицы младшего разряда. Например, в представленных выше числах, при равенстве относительных ошибок, абсолютные ошибки каждого из них различны, определяются весом единицы младшего разряда записи числа и соответственно равны:  $1 \cdot 10^{-7}$ ;  $1 \cdot 10^{-2}$ ;  $1 \cdot 10^{-3}$ ;  $1 \cdot 10^0$ ;  $1 \cdot 10^2$ .

Нетрудно видеть, что результат расчета относительной ошибки записанного числа по соотношению (4) в основном определяется первой значащей цифрой записи. Другие цифры, стоящие справа от первой значащей, можно отбросить, не учитывать, заменить нулями. Это несколько увеличит результат расчета относительной погрешности, что при ее оценке вполне приемлемо по ряду причин. С учетом указанного упрощения расчета относительной погрешности, в знаменателе формулы (4) в нашем примере при определении  $\delta A$  для приведенного ряда чисел будут фигурировать соответственно:  $9 \cdot 10^{-4}$ ;  $9 \cdot 10^1$ ;  $9 \cdot 10^0$ ;  $9 \cdot 10^3$ ;  $9 \cdot 10^5$ . Результаты расчетов, в чем



нетрудно убедиться, указывают на одинаковую относительную погрешность (0,01%) записи всех представленных чисел.

Если первая значащая цифра числа не 9, а 1, то для получения той же величины относительной погрешности 0,01% потребуется в записи числа использовать на одну значащую цифру больше. Например, приближенные числа 1,0001; 10000; 123,45; 0, 00010010;  $0,012345 \cdot 10^{10}$  имеют ту же относительную погрешность 0,01%. Последнее отмеченное обстоятельство можно проследить в официальных таблицах, например, свойств воды и водяного пара. Если первая значащая цифра отлична от 1 или от 9, то ответ о требуемом количестве значащих цифр в записи приближенного числа становится менее определенным с приближением этой цифры к середине диапазона 1–9. В этом случае решение принимается на основании дополнительных сведений о представляемой величине.

В заключение приведем еще один пример. Так, рассмотрим запись приближенных чисел  $20,0 \cdot 10^6$ ; 20 млн.; 20000000. Абсолютная величина всех трех чисел одинакова, но точность различна. Первое число имеет относительную погрешность 0,5%, второе – 5%, третье – 0,000005%.

Таким образом, очевиден вывод, что нельзя записывать лишние значащие цифры при работе с приближенными величинами, поскольку при этом происходит искажение информации. Обычно при записи приближенных величин используется следующее соглашение: при проведении расчетов в операциях в записи промежуточных результатов используют одну лишнюю значащую цифру. При записи окончательного результата количество значащих цифр приводится в соответствие с погрешностью представляемой величины. В табл. 1 приведена связь погрешности числа с количеством значащих цифр в его записи и первой значащей цифрой числа.

Заканчивая краткое изложение сведений, связанных с приближенными величинами, следует остановиться на следующей информации, полезной при работе с табличными данными. Поскольку чаще всего искомая в таблицах величина не совпадает с «узлами» таблицы, требуется интерполяция на основании табличных данных. Поэтому официально издаваемые таблицы построены так, что ошибка результата линейной интерполяции, выполненной на их основе, не превышает ошибки табличных данных. Но при этом необходимо соблюдение следующего условия: интерполяция проводит-

ся на минимально возможном отрезке таблиц, содержащем искомую точку, т.е. левая граница интерполяционного отрезка представлена ближайшим к искомой точке меньшим узлом таблицы, в свою очередь правая граница интерполяционного отрезка – ближайшим к искомой точке большим узлом таблицы.

Таблица 1

Связь погрешности приближенного числа с первой значащей цифрой и количеством значащих цифр в его записи

Первая значащая цифра	Относительная погрешность числа, %					
	0,0001	0,001	0,01	0,1	1,0	10
	Количество значащих цифр в записи числа, соответствующее указанной погрешности и первой значащей цифре					
1 – 5	7	6	5	4	3	2
6 – 9	6	5	4	3	2	1

## ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

*Термодинамика – наука о наиболее общих свойствах макроскопических объектов (термодинамических систем – ТС), находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.*

Первоначально термодинамика складывалась как учение об основах теории теплового двигателя. Позднее, в период становления и формирования ее методов – как учение о законах взаимного преобразования теплоты и работы (слово термодинамика происходит от двух греческих слов: *therme* – теплота, жар и *dynamics* – относящийся к силе, силовой). В ходе последующего развития термодинамика далеко вышла за эти первоначальные рамки, что объясняется абсолютным фактом: первичной основой всех процессов, протекающих в окружающем мире, является превращение энергии, имеющее место в ходе этих процессов. В связи с этим все материальные изменения, представляющие сущность любого технологического процесса, протекающего в любой технической системе преобразования энергии либо преобразования вещества, необходимо рассматривать как вторичные, вытекающие из энергетических преобразований.

Следовательно, практически в любой деятельности необходимо анализировать, изучать процессы и законы преобразования энергии. Поскольку одним из столпов термодинамики является универсальный закон природы – закон сохранения энергии, ее методы позволяют устанавливать соотношения между весьма разнородными физическими величинами в самых разных явлениях и областях знаний. Разработка методов для проведения таких исследований является задачей термодинамики, и это придает термодинамике всеобщее методологическое значение.

Работы первой части лабораторного практикума базируются на понятии идеального газа. Понятие идеального газа при изучении термодинамики трудно переоценить, так как:

оно упрощает понимание основных законов;

при изучении процессов, протекающих в технических системах, она позволяет получить простые и стройные аналитические зависимости;

поскольку свойства модели «идеальный газ» являются предельным развитием тех свойств, которыми обладают реальные газы, полученные для идеального газа результаты анализа дают верную качественную картину многих реальных явлений.

Одним из понятий, с которыми непрерывно приходится сталкиваться при изучении термодинамики, в том числе и при выполнении лабораторных работ, является понятие термодинамического процесса. В этой связи необходимо рассмотреть основные сведения, необходимые для выполнения упомянутых лабораторных работ.

*Термодинамический процесс* – изменение состояния системы, характеризующееся изменением ее термодинамических параметров.

Термодинамический процесс может быть равновесным и неравновесным. Поскольку феноменологическая термодинамика рассматривает только равновесные процессы, необходимо указанное деление рассмотреть более подробно.

*Равновесный термодинамический процесс* – процесс, рассматриваемый как непрерывный ряд равновесных состояний. Его можно изображать в термодинамических диаграммах в виде линии (рис. 1).

*Неравновесный процесс* – процесс, при котором термодинамическая система проходит хотя бы через одно неравновесное состояние.

Этот процесс не имеет графического изображения, но в ходе анализа иногда условно, пунктиром прибегают к его обозначению в термодинамической диаграмме.

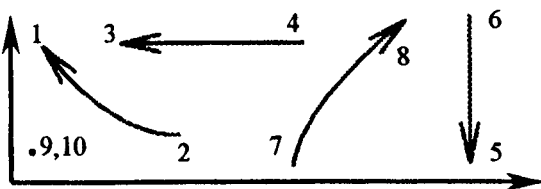


Рис. 1. Изображение равновесных процессов в термодинамических диаграммах

Под *равновесным* понимают такое *состояние*, в которое приходит система при постоянных внешних условиях. При этом она характеризуется неизменностью во времени термодинамических параметров и отсутствием в системе потоков вещества и теплоты. Под *неравновесным* понимают состояние системы, в которой отсутствует равновесие. В соответствии с этим ТС, находящиеся в равновесном состоянии, называют *равновесными ТС*. Если в системах отсутствует равновесие, то их называют *неравновесными ТС*. Всякий реальный процесс неравновесен по своей сути, причем чем выше скорость протекания процесса, тем больше неравновесность. На практике к равновесным процессам можно относить реальные процессы, протекающие с небольшой скоростью, а потому близкие к равновесным. Их называют *квазиравновесными*.

Среди разнообразной классификации термодинамических процессов по тем или иным признакам важное место занимает деление, связанное с закономерностью изменения термодинамических параметров системы. В этой связи различают процессы:

- 1) *изохорный*, протекающий при неизменном объеме ( $v = const$ );
- 2) *изобарный*, протекающий при неизменном давлении ( $p = const$ );
- 3) *изотермический*, протекающий при неизменной температуре ( $T = const$ );
- 4) *адиабатный*, совершающийся при отсутствии теплообмена ( $dq = 0$ );
- 5) *политропный*, обобщающий, частными случаями которого являются первые четыре процесса.

*Уравнение политропы*, связывающее параметры ТС в политропическом процессе:

$$pv^n = const, \quad (5)$$

где  $n$  – *показатель политропы*, определяемый соотношением

$$n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v} \quad (6)$$

Входящие в (6) величины  $c_x$ ,  $c_p$ ,  $c_v$  – теплоемкости термодинамической системы соответственно в политропическом, изобарном и изохорном процессах – рассматриваются ниже.

Возможны процессы с различными значениями показателя политропы ( $-\infty < n < +\infty$ ), но следует помнить, что показатель политропы в каждом конкретном процессе – постоянная величина. Из постоянства величины показателя политропы в каждом конкретном процессе следует, что в логарифмических координатах  $\ln p - \ln v$  политропический процесс изображается прямой линией (рис. 2), при этом показатель политропы  $n$  численно равен тангенсу угла наклона этой прямой. В частном случае для изотермы ( $n = 1$ )  $\alpha = 45^\circ$ , для адиабаты ( $n = \kappa = 1,4$ )  $\alpha = 54^\circ 28'$ .

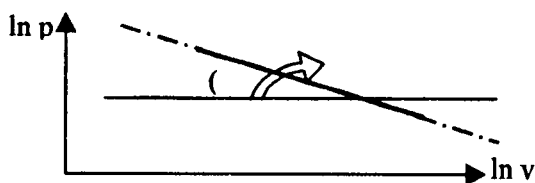


Рис. 2. Изображение политропического процесса в логарифмических координатах

Из всего сказанного выше следует, что политропических процессов может быть бесконечное множество. Их изучение упрощается тем, что все они по характеру протекания, определяющим признакам могут быть раз-

делены на восемь групп. Внутри каждой группы процессы обладают некоторыми общими характерными признаками, к которым относят:

знак работы изменения объема ТС в процессе –  $dl$  (или знак изменения объема ТС  $dv$ , поскольку  $dl = p \cdot dv$ );

знак технической работы ТС в процессе –  $dl_T$  (или знак изменения давления ТС  $dp$ , поскольку  $dl_T = -v \cdot dp$ );

знак потока теплоты процесса –  $dq$ ;

знак изменения внутренней энергии ТС –  $du$ .

В табл. 2 приведены свойства процессов внутри каждой из 8 групп. Группы III и VII отличаются тем, что, во-первых, соответствующие процессы широко распространены в технике, во-вторых, теплоемкость процессов оказывается отрицательной, т.е. при подводе

теплоты ( $dq > 0$ ) к системе в некотором процессе температура ее уменьшается ( $dT < 0$  и, следовательно,  $du < 0$ ), и наоборот. Этот факт имеет простое объяснение, для понимания которого следует обратиться к аналитическому выражению первого закона термодинамики

$$dq = du + dl. \quad (7)$$

Таблица 2

Свойства политропических процессов по группам

Исследуемая характеристика	Группы процессов расширения				Группы процессов сжатия			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$dl$	>0	>0	>0	>0	<0	<0	<0	<0
$dl_T$	>0	<0	<0	<0	<0	>0	>0	>0
$dq$	>0	>0	>0	<0	<0	<0	<0	>0
$du$	>0	>0	<0	<0	<0	<0	>0	>0
$c_x$	>0	>0	<0	>0	>0	>0	<0	>0

Указанное изменение характеристик системы в ходе процессов возможно тогда, когда знак работы изменения объема ТС в процессе тот же, что и знак теплоты процесса, и при этом величина работы процесса превышает величину теплоты процесса. Схематично ситуацию можно проиллюстрировать в виде рис. 3. Численные соотношения между величинами  $dq$ ,  $du$ ,  $dl$  можно определять по величине показателя политропы. Если обозначить долю теплоты, расходуемой в термодинамических процессах на изменение внутренней энергии, через  $\varphi$  и долю теплоты, расходуемой на совершение внешней работы,  $\psi$ , то из соотношений (6), (7), а также из определения составляющих соотношения (7) следует

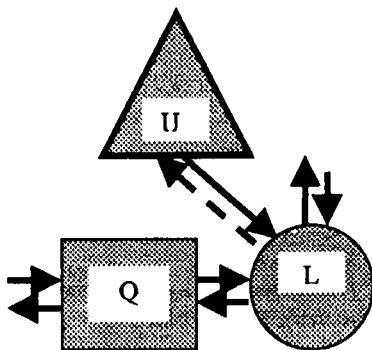


Рис. 3. Схема энергообмена в процессах III и VII групп

$$\varphi = \frac{n-1}{n-\kappa}, \quad \psi = \frac{1-\kappa}{n-\kappa}. \quad (8)$$

На основании полученных выражений несложно рассчитать для характерных основных процессов величины  $\varphi$  и  $\psi$ . В табл. 3 приведены их соответствующие значения.

Таблица 3

Значения доли теплоты, расходуемой на изменение внутренней энергии и совершение работы

Процесс	$\varphi$	$\psi$
Изохорный	1	0
Изобарный	1/κ	κ - 1/κ
Изотермический	0	1
Адиабатный	-	-
Политропный	(n - 1)/(n - κ)	(1 - κ)/(n - κ)

Естественно, что группы политропических процессов располагаются определенным образом в термодинамических диаграммах (рис. 4). В связи с указанным обстоятельством при изображении процессов в той или иной диаграмме следует также обозначать группу политропических процессов, к которой относится интересующий нас процесс. Группа политропических процессов, как следует из рис. 4, обозначается линиями ее граничных процессов. Определение знака той или иной характеристики процесса, используемой в классификации групп, достаточно простое. Не рассматривая обоснование приводимых правил, отметим, что все процессы, «уходящие» из начальной точки, совпадающей с точкой пересечения всех процессов, вправо или вверх от изохоры, относятся к процессам расширения и имеют положительную работу изменения объема. Процессы, «уходящие» вправо или вверх от изотермы, идут с ростом температуры; «уходящие» вправо или вверх от адиабаты идут с подводом теплоты извне; наконец, процессы, «уходящие» от реперной точки влево или вверх от изобары, – это процессы, техническая работа которых положительна.

Естественно, при выполнении работ, связанных со свойствами идеального газа, необходимо рассмотреть это понятие.

Идеальный газ – газ, равновесное состояние которого для одного моля описывается уравнением

$$p \cdot v_{\mu} = R_{\mu} \cdot T, \quad (9)$$

получившим название уравнение *Клапейрона-Менделеева* для идеального газа. В этом уравнении:

$p$ , Па – давление;

$v_{\mu}$ , м<sup>3</sup>/кмоль – молярный объем;

$R_{\mu} = 8314,3$  Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная;

$T$ , К – термодинамическая температура.

Для одного килограмма вещества уравнение состояния идеального газа известно под названием уравнения *Клапейрона* и имеет вид

$$p \cdot v = R \cdot T, \quad (10)$$

где  $v$ , м<sup>3</sup>/кг – удельный объем;

$R$ , Дж/(кг·К) – газовая постоянная.

Для всей термодинамической системы в целом, представленной тем или иным идеальным газом, имеющей массу  $m$  (кг) и объем  $V$  (м<sup>3</sup>), уравнение состояния идеального газа записывается в виде

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T. \quad (11)$$

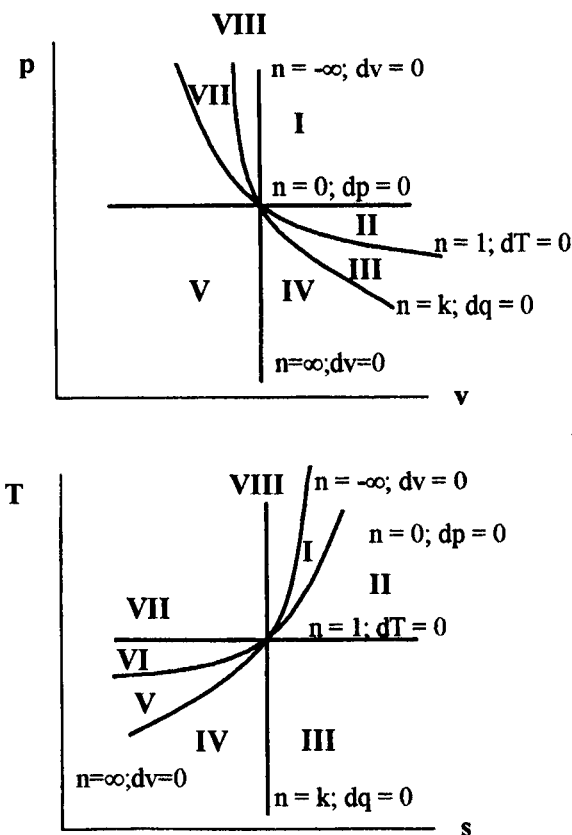


Рис. 4. Группы политропических процессов в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах



Идеального газа в действительности не существует, но его понятие получило широкое применение в технической термодинамике по причинам, которые отмечены выше. Кроме того, ряд технически важных сред, прежде всего, дымовые газы котлов и многих других огнетехнических устройств, атмосферный воздух и воздух, используемый в качестве сушильного агента, можно с большой точностью считать идеальными газами. *Все реальные вещества в условиях значительного разрежения ( $v \rightarrow \infty$ , что имеет место при выполнении условий  $T \rightarrow \infty$ ,  $p \rightarrow 0$ ) достаточно точно моделируются идеальным газом.* На рис. 5 для некоторых веществ представлены диапазоны давлений и температур, в которых в ряде случаев их можно считать идеальным газом.

Понятие идеального газа введено в результате исследования свойств воздуха в условиях близких к атмосферным, на основании обобщения законов его поведения (табл. 4), установленных в ходе этих исследований.

Как отмечено выше, воздух при атмосферных условиях может быть использован в качестве модели идеального газа. При каких других параметрах он остается таковым? Для ответа на этот вопрос следует обратиться к рис. 5. Воздух, прежде всего, является смесью

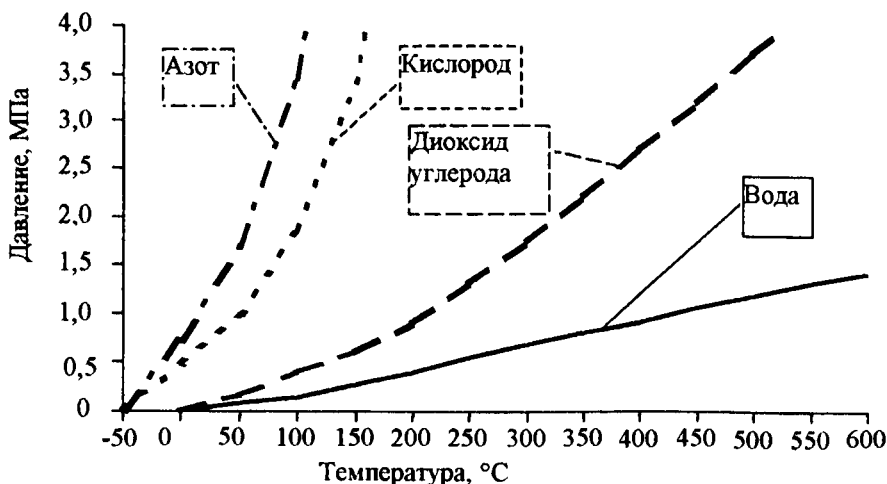


Рис. 5. Пределы применения идеальных газовых соотношений (погрешность до 1%) для расчета calorific свойств веществ (указанная область лежит справа и ниже кривых)

кислорода и азота, и по рис. 5, где отмечена идеально газовая область обоих указанных веществ, можно судить о тех давлениях и температурах, когда и воздух может считаться идеальным газом.

На основании положений закона Авогадро определяется величина газовых постоянных, в том числе и универсальной.

Универсальная газовая постоянная – константа, входящая в уравнение состояния для моля идеального газа, одинаковая для всех идеальных газов. Численное значение универсальной газовой постоянной  $R_\mu$  определяется из уравнения Клапейрона-Менделеева по известному молярному объему при нормальных условиях  $v_{\mu,н} = 22,4136 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ . В результате расчетов получена величина  $R_\mu = 8314,31 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$ . Также  $R_\mu$  можно определить как произведение постоянной Больцмана  $k$ , Дж/К, на число Авогадро  $N_A$ , кмоль<sup>-1</sup>:

$$R_\mu = k \cdot N_A = 1,38054 \cdot 10^{-23} \cdot 6,02252 \cdot 10^{26} = 8314,3 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К}).$$

Таблица 4

#### Основные законы идеального газа

Содержание закона	Аналитическое выражение
<u>Закон Авогадро:</u> в равных объемах $V$ различных идеальных газов при одинаковых давлении $p$ и температуре $T$ содержится одинаковое число молекул $N$ .	Число Авогадро $N_A = 6,02252 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$ . $v_\mu = \text{iden}$
<u>Закон Бойля-Мариотта:</u> при постоянной температуре неизменна величина произведения давления на объем данного количества идеального газа.	$pV = \text{const}$
<u>Закон Гей-Люссака:</u> при постоянном давлении неизменна величина отношения объема данного количества идеального газа к его абсолютной температуре.	$V/T = \text{const}$
<u>Закон Шарля:</u> при постоянном объеме данного количества идеального газа неизменна величина отношения его давления к его абсолютной температуре.	$p/T = \text{const}$

Для тех или иных условий (некоторых значений  $p$  и  $T$ ) объем  $V$  определяется произведением ( ~~$m$  —  $R$~~ ), в чем несложно убедиться с

помощью соотношения (10). Далее следует, что для различных газов, занимающих равные объемы при заданных условиях, произведение  $(m \cdot R)$  имеет одинаковое значение. Массы газов пропорциональны их молекулярным массам  $\mu$ , кг/кмоль ( $N \cdot \mu = m$ ), что очевидно. Согласно закону Авогадро, в равных объемах при одинаковых условиях содержится равное количество молекул ( $N$ ) различных идеальных газов. В этом случае неизбежен вывод: значение  $\mu \times R = R_\mu$  должно быть одинаковым для всех газов независимо от их индивидуальных свойств. В результате получаем возможность для определения газовой постоянной вещества. *Газовая постоянная – константа, характерная только для конкретного идеального газа, численно равная отношению универсальной газовой постоянной к молярной массе данного газа*

$$R = R_\mu / \mu. \quad (12)$$

*Константа  $R$  входит в уравнение состояния, записанное для одного килограмма вещества.*

Газовая постоянная определяется только молекулярной массой и, следовательно, имеет индивидуальное значение для каждого газа.

Физический смысл универсальной газовой постоянной и газовой постоянной можно установить из следующих рассуждений. Для двух равновесных состояний ТС, которые характеризуются изобарным переходом из первого во второе, уравнение (9) записывается так:

$$\begin{aligned} p \cdot v_{\mu 1} &= R_\mu \cdot T_1; \\ p \cdot v_{\mu 2} &= R_\mu \cdot T_2. \end{aligned}$$

Вычитая одно из другого, получаем

$$p \cdot (v_{\mu 1} - v_{\mu 2}) = R_\mu \cdot (T_1 - T_2). \quad (13)$$

Левая часть полученного соотношения представляет работу изменения объема рассматриваемого процесса ТС в изобарном процессе, что позволяет дать определение универсальной газовой постоянной: *универсальная газовая постоянная представляет собой работу одного киломоля вещества при изменении температуры на один градус в изобарном процессе изменения состояния ТС.*

Одной из важнейших физических характеристик, присущих веществу в любом агрегатном состоянии, является *теплоемкость вещества в том или ином процессе изменения его состояния*. Теплоемкость системы в термодинамическом процессе является ее важной характеристикой и *представляет отношение количества теплоты  $dQ$ , полученной веществом при бесконечно малом изменении его состояния в каком-либо процессе, к изменению температуры  $dT$  вещества*:

$$C_x = dQ / dT . \quad (14)$$

Нижний индекс «х» в обозначении теплоемкости (14) указывает процесс, к которому относится данная теплоемкость системы. Присутствие индекса в обозначении теплоемкости обязательно.

Теплоемкость, как и теплота, с которой она неразрывно связана, зависит от характера процесса и является свойством ТС лишь в связи с неким термодинамическим процессом. Теплоемкость процесса зависит от вещества, представляющего систему, его агрегатного состояния и термических параметров, при которых протекает процесс. Для реальных индивидуальных веществ на величину теплоемкости вещества в процессе, как правило, влияет пара параметров:  $p$  и  $T$ ,  $p$  и  $v$  или  $v$  и  $T$ . Для идеального газа теплоемкость вещества в процессе определяется только его температурой  $(C_x)_{u.z.} = f(T)$  (рис. 6). Соответствующая зависимость чаще всего аппроксимируется полиномом степени  $n$ :

$$c = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 + \dots , \quad (15)$$

либо линией  $c = a_0 + a_1t$ , либо принимается, что теплоемкость вещества в данном процессе постоянна:

$$(C_x)_{u.z.} = const. \quad (16)$$

Теплоемкость – экстенсивная величина (зависит от количества вещества в системе). В связи с этим различают *теплоемкость всей ТС  $C_x$ , Дж/град*, и *удельную теплоемкость*, например,  $c_x$ , Дж/(кг·град). В зависимости от используемой при нахождении удельной теплоемкости единицы количества вещества, удельная теплоемкость вещества в процессе классифицируется:

массовая  $c_x$ , Дж/(кг·К) либо Дж/(кг·°С);

молярная  $c_{x,\mu}$ , Дж/(кмоль·К) либо Дж/(кмоль·°С);

объемная  $c'_x$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К) либо Дж/(м<sup>3</sup>·°С).

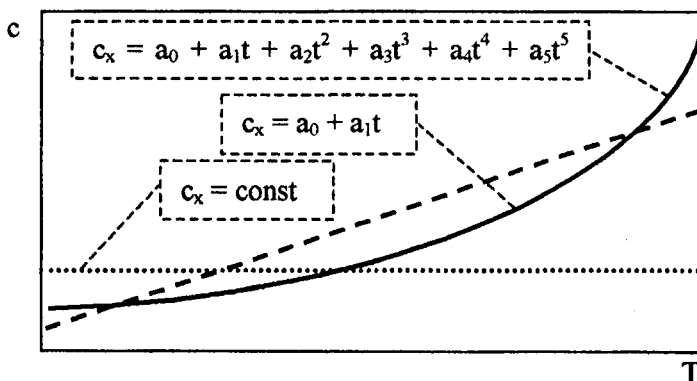


Рис.6. Различные варианты учета зависимости теплоемкости идеального газа в том или ином процессе от температуры

Необходимо помнить, что при каких бы значениях термических параметров ( $p$ ,  $T$ ) и в каком бы процессе ни определялась удельная объемная теплоемкость, относится она к метру кубическому при нормальных условиях (н.у.). Поэтому объем ТС необходимо приводить к н.у. ( $p_n = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ ;  $t_n = 0 \text{ °С}$ ). Если ТС близка к идеально газовому состоянию, для нахождения ее объема при н.у. используется соотношение

$$V_n = V \cdot \left( \frac{p}{p_n} \right) \cdot \left( \frac{T_n}{T} \right). \quad (17)$$

Взаимосвязь различных удельных теплоемкостей ТС в одном и том же процессе достаточно проста:

$$c = c_\mu / \mu; \quad c' = c_\mu / 22,4; \quad c' = c \cdot v_n, \quad (18)$$

где 22,4136 м<sup>3</sup>/кмоль – удельный молярный объем ТС при нормальных условиях;

$v_n$ , м<sup>3</sup>/кг – удельный массовый объем ТС при нормальных условиях.

Теплоемкость в данной точке, т.е. на бесконечно малом участке рассматриваемого термодинамического процесса  $x = const$  изменения состояния системы, называется *истинной*. Она обозначается (с соблюдением всех вышеизложенных правил) с помощью буквы  $c_x$ .

В практике приходится иметь дело с конечными процессами, когда температура ТС изменяется от значения  $t_1$  до значения  $t_2$ . В этом случае удобно использовать понятие *средней* теплоемкости вещества в процессе  $x = const$  в интервале температур  $t_1 - t_2$ . Указанная теплоемкость обозначается следующим образом:

$$\bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2}.$$

С ее помощью удельная теплота процесса на участке с начальной температурой  $t_1$  и конечной температурой  $t_2$  определяется как

$$q = \bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \quad (19)$$

где  $\bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2}$  – средняя удельная теплоемкость ТС в рассматриваемом процессе  $x = const$  на участке с начальной температурой  $t_1$  и конечной температурой  $t_2$ .

Из соотношения (19) очевидно определение средней теплоемкости ТС в том или ином процессе  $x = const$  в интервале температур  $t_1 - t_2$ :

$$\bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (20)$$

Следует помнить, что средняя теплоемкость в таблицах приведена для интервала температур  $0 - t$ . Для этого же интервала приводятся и аппроксимирующие зависимости расчета средней теплоемкости вещества в процессе от температуры  $\bar{c}_x \Big|_0^{t_2}$ . Для нахождения теплоемкости в требуемом интервале температур  $\bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2}$  поступают следующим образом:

определяются средние теплоемкости в интервале температур  $[0 \dots t_1] - \bar{c}_x \Big|_0^{t_1}$  и в интервале температур  $[0 \dots t_2] - \bar{c}_x \Big|_0^{t_2}$ ;

рассчитывается средняя теплоемкость для требуемого интервала

$$\bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\bar{c}_x \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - \bar{c}_x \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}. \quad (21)$$

Взаимосвязь средней и истинной теплоемкости:

$$\bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c_x dT}{t_2 - t_1}; \quad c_x = \lim_{(t_2 - t_1) \rightarrow 0} \bar{c}_x \Big|_{t_1}^{t_2}. \quad (22)$$

Заканчивая рассмотрение обозначения теплоемкости, отметим, что наибольший интерес для практики представляет теплоемкость вещества в изобарном и изохорном процессах: изобарная  $C_p$ , определенная для процесса  $p = const$  и изохорная  $C_v$ , определенная для процесса  $v = const$ .

С помощью последних величин можно рассчитать теплоемкость процесса  $x = const$ , используя уравнение состояния

$$\begin{cases} c_x = c_v + [p + (\partial u / \partial v)_T] \cdot (\partial v / \partial T)_x; \\ c_x = c_p - [v - (\partial i / \partial p)_T] \cdot (\partial p / \partial T)_x. \end{cases} \quad (23)$$

Из последних соотношений можно получить уравнение Майера, дающее связь  $C_p$  и  $C_v$ :

$$\begin{cases} c_p = c_v + [p + (\partial u / \partial v)_T] \cdot (\partial v / \partial T)_p; \\ c_v = c_p - [v - (\partial i / \partial p)_T] \cdot (\partial p / \partial T)_v. \end{cases} \quad (24)$$

Для идеального газа уравнение Майера трансформируется в формулу Майера

$$c_p - c_v = R, \quad (25)$$

которая в случае использования удельных молярных теплоемкостей принимает вид

$$c_{p\mu} - c_{v\mu} = R_{\mu}. \quad (26)$$

Изохорная и изобарная теплоемкости  $C_v$  и  $C_p$  связаны также соотношением

$$k = c_p / c_v, \quad (27)$$

где  $k$  – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

В табл. 5 для различных веществ, отличающихся лишь числом атомов в их молекулах, приведены значения показателя адиабаты, а также значения изобарной и изохорной удельных молярных теплоемкостей идеальных газов, в допущении независимости их от температуры.

Из аналитических выражений первого начала термодинамики для ТС справедливы соотношения

$$\begin{cases} c_p = (\partial i / \partial T)_p; \\ c_v = (\partial u / \partial T)_v, \end{cases} \quad (28)$$

из которых следует, что истинная изобарная теплоемкость определяет темп изменения энтальпии системы в изобарном процессе в зависимости от изменения температуры, а изохорная – соответственно темп изменения внутренней энергии в изохорном процессе.

Таблица 5

Значения удельных молярных теплоемкостей и показателя адиабаты идеальных газов (допущение: теплоемкость газа в процессе не зависит от температуры газа)

Характеристика молекулы идеального газа	Показатель адиабаты $k$	Теплоемкость газов, кДж/(кмоль·К)	
		$c_{v,\mu}$	$c_{p,\mu}$
Одноатомная	1,67	12,56	20,93
Двухатомная	1,4	20,93	29,31
Многоатомная	1,33	29,31	37,68

Для нахождения средней теплоемкости системы в изобарном и изохорном процессах могут быть использованы зависимости



$$\begin{cases} \bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = (i_2 - i_1)/(t_2 - t_1); \\ \bar{c}_v \Big|_{t_1}^{t_2} = (u_2 - u_1)/(t_2 - t_1). \end{cases} \quad (29)$$

Когда температура ТС невелика, а также при качественном анализе явлений в расчетах применимо допущение о независимости от температуры теплоемкости вещества в том или ином процессе ( $c_x = \text{const}$ ). В этом случае для нахождения изобарной и изохорной теплоемкости идеального газа из (24) – (26) несложно получить формулы

$$\begin{cases} c_p = k \cdot R/(k - 1); \\ c_v = R/(k - 1). \end{cases} \quad (30)$$

Из соотношения (6) следует зависимость для нахождения теплоемкости политропного процесса

$$c_x = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1}. \quad (31)$$

С ее помощью можно проследить изменение теплоемкости ТС с переходом от одного процесса к другому, изменяя величину показателя политропы  $n$ . Значения теплоемкостей идеального газа в характерных процессах приведены в табл. 6. Их удобно использовать для изображения графического варианта зависимости (29) на рис. 7. Как видно из графика, теплоемкость идеально газовой системы может иметь любую численную величину, определяемую характером процесса.

В ТС преобразования энергии и преобразования вещества редко приходится иметь дело с чистыми веществами. Чаще всего встречаются смеси веществ (растворы), например, атмосферный воздух, состоящий из азота ( $\approx 79\%$ ), кислорода ( $\approx 21\%$ ) и, в небольших количествах, прочих примесей: воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ), диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) и др. Широко распространены в технике дымовые газы, которые представляют характерный пример смесей.

Значения показателя политропы и теплоемкости вещества  
в соответствующих термодинамических процессах

Процесс	$n$	$C_x$
Изохорный	$\pm\infty$	$c_v$
Изобарный	0	$c_p$
Изотермический	1	$\infty$
Адиабатный	$k$	0
Политропный	$n$	$c_v \cdot (n - k) / (n - 1)$

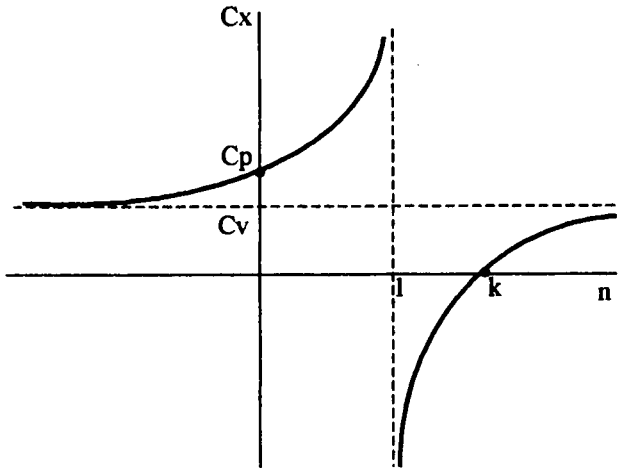


Рис. 7. Зависимость теплоемкости вещества в процессе от характера процесса (показателя политропы процесса)

Для определения теплоемкости газовой смеси необходимо знать состав газовой смеси и теплоемкости отдельных газов, определяемые по таблицам теплоемкостей для соответствующих газов:

а) массовая теплоемкость смеси

$$c_{x,см} = \sum_{j=1}^m g_j \cdot c_{x,j}; \quad (32)$$

б) объемная теплоемкость смеси

$$c'_{x,см} = \sum_{j=1}^m r_j \cdot c'_{x,j}, \quad (33)$$

где  $g_j$ ,  $r_j$ , доли – соответственно массовые и объемные концентрации  $j$ -х компонентов смеси;

$c_{x,j}$ , Дж/(кг·°С),  $c'_{x,j}$ , Дж/(м<sup>3</sup>·°С) – соответственно удельные массовые и удельные объемные теплоемкости  $j$ -х компонентов смеси в процессе  $x = const$ ;

$j$  – номер компонента смеси;

$m$  – число компонентов в смеси.

Показатель адиабаты  $k$ , определяемый соотношением (27), является важной термодинамической характеристикой вещества, используемой при проведении ряда расчетов, например, адиабатного процесса изменения состояния вещества, уравнение которого, как следует из вышеизложенного, имеет вид

$$p \cdot v^k = const. \quad (34)$$

Показатель адиабаты зависит от тех же параметров, что и теплоемкость вещества в соответствующих процессах. Его значения приводятся в таблицах свойств веществ, например, для воды – в [10]. Но в ряде случаев удобно считать величину показателя адиабаты не зависящей от параметров состояния вещества. В таких случаях его определяет только число атомов в молекуле вещества (табл. 5). В последнем легко убедиться с помощью молекулярно-кинетической теории строения вещества. Согласно ее положениям, в условиях независимости теплоемкости вещества в процессах от температуры изобарная и изохорная теплоемкости вещества связаны с числом степеней свободы вращательного движения молекулы  $\delta_{вр}$  соотношениями

$$c_v = \frac{3 + \delta_{вр}}{2};$$

$$c_p = \frac{5 + \delta_{вр}}{2}. \quad (35)$$

Используя соотношение (27), получаем

$$k = \frac{5 + \delta_{вр}}{3 + \delta_{вр}}. \quad (36)$$

Как известно, число степеней свободы вращательного движения молекулы  $\delta_{вр}$  определяется лишь количеством атомов в молекуле вещества:

для одноатомной молекулы –  $\delta_{вр} = 0$ ;

для двухатомной молекулы –  $\delta_{вр} = 2$ ;

для трехатомной и многоатомных молекул –  $\delta_{вр} = 3$ .

На основании последних соотношений, в частности, можно получить данные табл. 5.

## Лабораторная работа №1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

*Цель работы:* закрепление теоретического материала; определение универсальной газовой постоянной опытным путем.

#### Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 1.1) представляет собой цилиндрический сосуд (1) объемом  $420 \text{ см}^3$ , компрессор (6) с электроприводом, позволяющий получить необходимое давление исследуемой среды, и манометр (5) для измерения давления в сосуде.

Кроме того, при проведении лабораторной работы необходимы: барометр для измерения атмосферного давления, лабораторный термометр для определения температуры окружающего воздуха, лабораторные весы и разновесы к ним.

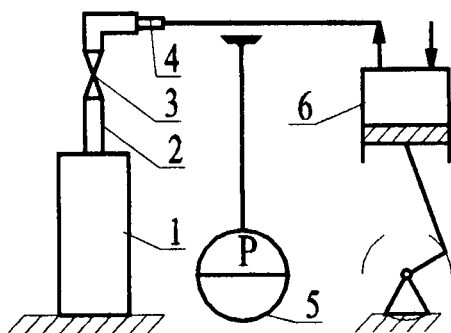


Рис. 1.1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – сосуд с пробой воздуха; 2 – шланг; 3 – зажим; 4 – нагнетательный штуцер компрессора; 5 – манометр; 6 – компрессор

### Методика исследования

Воздух, находящийся в сосуде (1), приводится в равновесное состояние. Параметры воздуха таковы, что его с достаточной степенью точности можно считать моделью идеального газа. В этом случае параметры воздуха связаны уравнениями состояния идеального газа. В частности, термические параметры  $p$ ,  $v$ ,  $T$  объединятся уравнением Менделеева-Клапейрона (9). Для идеально газовой системы массой  $m$  термическое уравнение состояния имеет вид

$$pV = m(R_{\mu} / \mu) \cdot T. \quad (1.1)$$

Из (1.1) можно в явной форме выразить универсальную газовую постоянную  $R_{\mu}$  и рассчитать ее, если будут известны остальные члены равенства. Очевидно следующее соотношение:

$$R_{\mu} = \mu \cdot pV / (m \cdot T), \quad (1.2)$$

где  $\mu$  – молярная масса вещества, равная для воздуха

$$\mu = 28,9 \text{ кг/кмоль};$$

$p$ , Па – давление в системе;

$T$ , К – температура системы;

$V$ , м<sup>3</sup> – объем, занимаемый системой;

$m$ , кг – масса системы.

Определенную трудность при нахождении численных значений составляющих соотношения (1.2) вызывают две величины:  $V$  – объем системы,  $m$  – масса системы.

В нашем случае для определения объема системы можно использовать в качестве внешней оболочки жесткий цилиндрический сосуд известных размеров. Величина объема используемого цилиндрического сосуда определена:  $V = V_{\text{ц}} = 420 \text{ см}^3$ . Во всех состояниях системы ее параметры должны иметь такие значения, при которых жесткость сосуда достаточна, чтобы изменением его объема при переходе из одного состояния в другое можно было пренебречь.

Для определения массы воздуха в сосуде предпримем следующие действия.

Приводим испытываемую систему в два различных равновесных состояния, отвечающих ряду требований:

температуры воздуха в обоих равновесных состояниях системы одинаковы ( $t_1 = t_2$ ). Действия, обеспечивающие соблюдение условия равенства температур, оговорены в п. 5 раздела «Порядок проведения работы»;

объем системы в обоих равновесных состояниях неизменен. Постоянство объема обеспечивается, во-первых, равенством температур обоих состояний, во-вторых, соответствующими механической прочностью сосуда и величинами давлений системы в обоих состояниях ( $p_1$  и  $p_2$ ), при которых деформацией стенок сосуда можно пренебречь.

Для каждого из описанных равновесных состояний воздуха можно записать термическое уравнение состояния (1.1) и таким образом получить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} p_1 V_1 = m_1 R T_1; \\ p_2 V_2 = m_2 R T_2. \end{cases} \quad (1.3)$$

Определить массу сосуда с заключенным в него воздухом в каждом из описанных состояний ( $m_{1 \text{ ч+вз}}$ ;  $m_{2 \text{ ч+вз}}$ ) можно путем взвешивания расширенной системы (цилиндр с заключенным в него воздухом) на лабораторных весах.

Далее сделаем с системой уравнений (1.3) следующие преобразования.

Вычитаем из первого уравнения системы (1.3) второе и разделим на полученную разность первое уравнение. С учетом оговоренных выше условий  $V = V_1 = V_2 = V_{\text{ч}}$  и  $T = T_1 = T_2$ , можно получить

$$p_1 / (p_1 - p_2) = m_1 / (m_1 - m_2), \quad (1.4)$$

откуда

$$m_1 = (m_2 - m_1) \cdot p_1 / (p_2 - p_1). \quad (1.5)$$

Так как масса непосредственно цилиндрической оболочки в обоих измерениях постоянна, то изменение массы воздуха ( $m_2 - m_1$ ) равно изменению масс сосуда с заключенным в него воздухом ( $m_{2 \text{ ч+вз}} - m_{1 \text{ ч+вз}}$ ), т.е. разности результатов обоих взвешиваний:

$$\Delta m = m_{2ц+вз} - m_{1ц+вз} = (m_2 + m_ц) - (m_1 + m_ц) = m_2 - m_1. \quad (1.6)$$

Таким образом, окончательная расчетная формула для нахождения величины универсальной газовой постоянной по результатам работы имеет вид

$$R_\mu = \mu \cdot \frac{(p_2 - p_1) \cdot V}{(m_{2ц+вз} - m_{1ц+вз}) \cdot T}. \quad (1.7)$$

### Порядок проведения работы

1. Изучите необходимый теоретический материал и подготовьте протокол наблюдений.

2. Ознакомьтесь с самой экспериментальной установкой, термометром, барометром и весами, на которых производится взвешивание цилиндра. Распределите функции между участниками работы.

3. Произведите замеры барометрического давления ( $B$ ) и температуры помещения ( $t_{o.c.}$ ). Данные параметры окружающей среды определяют начальное состояние системы (точка 1, рис. 1.2).

4. Полученные данные в ходе замеров занесите в таблицу, форма которой может быть принята в соответствии с табл. 1.1.

5. Взвесьте цилиндр совместно с зажимом (3). При этом сосуд следует держать за шланг (2) и стараться не трогать емкость руками во избежание нарушения равенства её температуры и окружающей среды. Это позволяет температуру воздуха в цилиндре определить косвенно через температуру окружающей среды ( $t_1 = t_{o.c.}$ ).

Таблица 1.1

### Протокол наблюдений

№ п/п	$t$	$P_{ман}$		$P_{абс}$	$m_{ц+вз}$
	$^{\circ}C$	ати	кПа	кПа	кг
1					
2					
...					
Параметры окружающей среды: температура $t_{o.c.} = \quad ^{\circ}C$ , барометрическое давление $B = X \text{ мм рт. ст.} = X \cdot 133,3 \text{ Па}$ .					

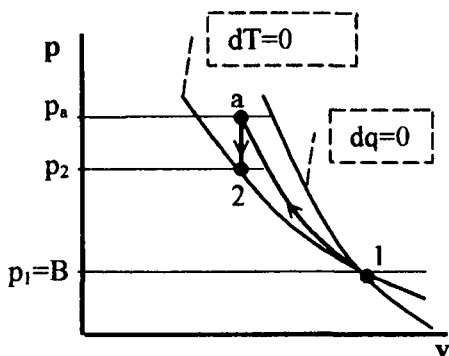


Рис. 1.2. Процессы изменения состояния системы в ходе лабораторной работы: 1-а – политропное сжатие при подаче воздуха из компрессора; а-2 – изохорное охлаждение до температуры окружающей среды

ловое равновесие системы с окружающей средой. Для чего сосуд оставьте подключенным к манометру в течение некоторого времени. В этот период происходит изохорное охлаждение воздуха в цилиндре и падение давления в нем, пока не восстановится первоначальная температура  $T_1$ , процесс а-2.

7. Согните шланг и пережмите зажимом с одновременной регистрацией давления системы. Следует помнить, что манометр измеряет избыточное давление над давлением окружающей среды:

$$p_{\text{ман}} = p_{\text{абс}} - B.$$

8. Определите массу воздуха и цилиндра путем взвешивания последнего при давлении  $p_2$  (точка 2, рис. 1.2).

9. Снимите зажим и повторите действия, начиная с п. 5. Количество замеров той или иной величины необходимо установить на основании анализа возможных погрешностей определения ее значения.

### Обработка результатов измерений

Значение универсальной газовой постоянной определяем по формуле (1.7), используя полученные в ходе работ соответствующие величины. Относительную ошибку при определении величины  $R_d$  можно найти из соотношения

6. Шланг сосуда соедините со штуцером (4) компрессора, включите последний.

По достижении избыточного давления 0,1 – 0,12 МПа (точка а, рис. 1.2) прекратите нагнетание воздуха в цилиндр. В системе происходило политропное сжатие (процесс 1-а), а значит, ее температура выросла. Для соблюдения условия равенства температур нам необходимо восстановить тепловое равновесие системы с окружающей средой.



$$\varepsilon_R = \Delta\mu/\mu + \Delta V/V + 2 \cdot \Delta p/p + \Delta T/T + 2 \cdot \Delta m/m, \quad (1.8)$$

где  $\Delta\mu$ ,  $\Delta V$ ,  $\Delta p$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta m$  – соответственно абсолютные погрешности при нахождении молярной массы, объема, давления, температуры и массы воздуха.

Проведите анализ систематических ошибок, которые, на ваш взгляд, присутствуют в данной работе. Используя данные наблюдений и расчетов всех участников работы, получите величину случайной ошибки отдельных измерений и конечного результата, используя формулу (1).

### *Вопросы для самопроверки*

1. Определите молярные массы различных газов, найдите удельные объемы этих газов при нормальных условиях.

2. Оцените влияние, которое оказывает на точность определения массы газа в сосуде нарушение условий опыта  $T_1 = T_2$ .

3. Для воздуха как смеси газов рассчитайте газовую постоянную, если известны газовые постоянные и концентрации компонентов.

4. Задавшись недостающими величинами и обосновав принятые их значения, рассчитайте оба процесса, протекающие в системе во время опыта.

5. Запишите зависимость универсальной газовой постоянной от молярных теплоемкостей идеального газа.

6. Объясните, почему значение универсальной газовой постоянной (для заданных условий) одинаково для всех газов независимо от их индивидуальных свойств.

7. Что лучше для достоверности результатов с методической точки зрения: воздух в сосуд накачивать (процесс 1-а, рис. 1.2) или воздух откачивать из сосуда? Как будут выглядеть процессы в  $p$ - $v$ -,  $T$ - $s$ -диаграммах в этом случае?

8. Решите следующие задачи:

а). Определите отношение плотностей двух идеальных газов при одинаковых условиях. Отношение молярных масс газов равно 1,4.

б). Газовая постоянная смеси равна  $R = 922$  Дж/(кг·К). Определите кажущуюся молярную массу смеси.

в). Определить количество метана ( $\text{CH}_4$ ), которое необходимо закачать в баллон, объем которого равен  $1\text{ м}^3$ , если в начальном со-

стоянии при  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  показание вакуумметра 20 кПа. В конечном состоянии при  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  показание манометра 1 МПа. Давление окружающей среды 745 мм рт. ст. Определить объем этого количества газа, приведенный к нормальным условиям.

г). В условии предыдущей задачи метан заменен гелием (He). Какие изменения в этой связи требуются в решении задачи?

д). Определить массовый и объемный составы смеси водорода с азотом, если газовая постоянная ее равна  $R = 922 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Определить также парциальные давления компонентов, если абсолютное давление смеси  $p = 0,2 \text{ МПа}$ . На сколько больше вмещается в баллон, объем которого  $V = 40 \text{ л}$ , диоксида углерода, чем водорода, при температуре  $t = 15^\circ\text{C}$  и давлении по манометру  $P = 15 \text{ МПа}$ , если барометрическое давление  $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$ ? (Задачу решить в единицах СИ.)

## Лабораторная работа №2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

*Цель работы:* закрепление теоретического материала; ознакомление с методикой определения теплоемкости газообразной среды при использовании проточного калориметра; экспериментальные проверки величины теплоемкости воздуха, полученной расчетным путем.

#### *Описание установки*

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.1. В ее основе лежит проточный калориметр (1). Через канал калориметра при помощи вентилятора (8) продувается воздух. Его расход регулируется изменением частоты вращения электропривода (9) вентилятора, для чего изменяется напряжение питания с помощью автотрансформатора (6). Для измерения напряжения используется вольтметр (7). Расход среды определяется косвенно, расчетным путем на основании данных замера скорости потока. Для измерения скорости потока в установке могут использоваться либо крыльчатый анемометр, либо пневмометрическая трубка (11). При использовании пневмометрической трубки измеряется динамический напор потока, а уже затем определяется его скорость. Для измерения динамического напора в комплекте с пневмометрической трубкой необходимо использовать дифференциальный микроманометр (12).

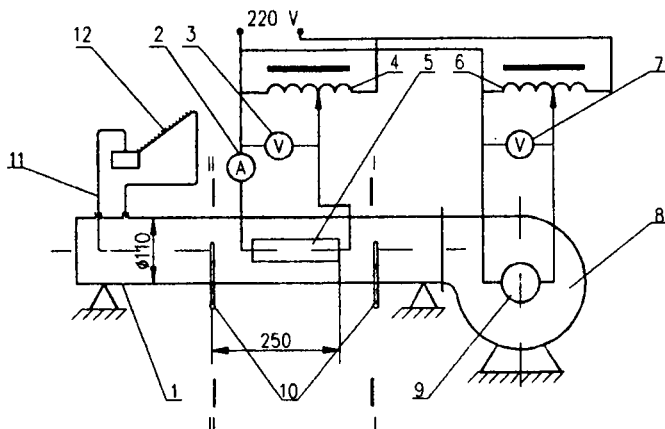


Рис. 2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Между сечениями I-I и II-II канала калориметра установлен электрический нагреватель (5), с помощью которого производится нагрев протекающего воздуха. Для определения количества энергии, выделяемой нагревателем в поток воздуха за время  $\tau$ , необходимо знать его текущую мощность. Для определения мощности нагревателя  $N_э$ , Вт, служат вольтметр (3) и амперметр (2), по показаниям которых несложно рассчитать мощность поступающего потока энергии. Возможно измерение мощности нагревателя непосредственно ваттметром. Изменяется мощность нагревателя путем изменения питающего напряжения с помощью автотрансформатора (4).

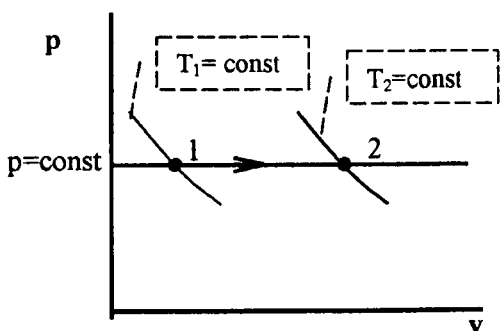


Рис. 2.2. Процессы изменения состояния системы в ходе лабораторной работы:  
1-2 – изобарный нагрев воздуха

К потоку воздушной среды в калориметре подводится энергия в форме теплоты изобарного процесса, происходящего с воздухом между сечениями I-I и II-II (рис. 2.2). В результате температура потока повышается от  $t_1$  до  $t_2$ . Начальная температура воздуха определяется параметрами окружающей среды. Конечная температура воздуха зависит от расхода среды и мощности электронагревателя. Измеряются температуры воздушного потока в контрольных сечениях I-I и II-II лабораторными термометрами (10).

При проведении лабораторной работы необходим также барометр для измерения атмосферного давления.

$\bar{c}_p|_{t_1}^{t_2}$  – среднюю в интервале температур  $t_1 - t_2$  теплоемкость воздуха в изобарном процессе, протекающем в потоке между контрольными сечениями – требуется найти в ходе данной работы.

### *Методика исследования*

При выполнении работы оговорим допущения, положенные в основу при ее создании. Кроме того, что воздух в условиях опыта считаем идеальным газом, следует помнить, что поток среды в канале калориметра:

стационарный, т.е. в каждой точке потока параметры его не изменяются с течением времени;

одномерный, т.е. в каждой точке сечения калориметра параметры потока одинаковы, а их изменение имеет место лишь при переходе вдоль оси канала от одного сечения к другому.

Определение средней в интервале температур  $t_1 - t_2$  изобарной удельной теплоемкости воздуха осуществляется на основе известного соотношения, вытекающего из определения средней теплоемкости вещества в процессе. Для нахождения удельной массовой теплоемкости в изобарном процессе можно записать

$$\bar{c}_p|_{t_1}^{t_2} = Q / (M \cdot (t_2 - t_1)), \quad (2.1)$$

соответственно для удельной объемной теплоемкости

$$\bar{c}'_p|_{t_1}^{t_2} = Q / (V_n \cdot (t_2 - t_1)), \quad (2.2)$$

где  $Q$ , кДж – теплота процесса;

$M$ , кг, и  $V_n$ , м<sup>3</sup> – соответственно масса воздуха и его объем, приведенный к нормальным условиям;

$t_1, t_2$ , °С – соответственно температуры воздуха в сечениях I-I и II-II.

При нахождении величин, входящих в приведенные соотношения (2.1), (2.2), необходимо учесть, что процесс изобарного нагрева происходит в движущемся потоке. Потому в соотношениях (2.1) и (2.2) вместо массы и объема системы соответственно используются такие характеристики потока, как массовый расход  $G$ , кг/с, или объемный расход  $V_n$ , м<sup>3</sup>/с. Кроме того, теплота изобарного процесса относится ко времени, за которое определяется расход среды через калориметр.

Для нахождения теплоты изобарного процесса, протекающего с воздухом в потоке, запишем в самом общем виде уравнение первого начала термодинамики для стационарного одномерного потока для участка, лежащего между сечениями I-I и II-II:

$$Q_{ЭЛ} - Q_{ТП} = G[(i_2 - i_1) + l_T + (\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}) + g(h_2 - h_1)], \quad (2.3)$$

где  $Q_{ЭЛ}$ ,  $Q_{ТП}$ , кДж/с – соответственно тепловые потоки в единицу времени от электронагревателя к воздуху, протекающему через калорифер и от поверхности калорифера к окружающей среде;

$G$ , кг/с – массовый расход потока;

$i_1, i_2$ , кДж/кг – соответственно удельная массовая энтальпия воздуха при начальном и конечном параметрах;

$l_T$ , кДж/кг – удельная массовая техническая работа вещества в процессе, протекающем с потоком на выделенном участке;

$w_1, w_2$ , м/с – скорость потока соответственно в начальном и конечном сечениях;

$g = 9,80665$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;

$h_1, h_2$ , м – высота центра сечения потока.

Применительно к конкретному случаю можно констатировать:

изменением скорости потока, при имеющем место в опыте незначительном нагреве воздуха, можно пренебречь;

очевидно, техническая работа на контрольном участке не совершается, т.е.  $l_T = 0$ , что, как известно, является одним из свойств всякого изобарного процесса;

$h_2 = h_1$ , поскольку калориметр установлен горизонтально.

С учетом отмеченных особенностей выражение (2.3) получает вид

$$Q_{ЭЛ} - Q_{ТП} = G(i_2 - i_1). \quad (2.4)$$

Так как воздух в условиях опыта является идеальным газом, а энтальпия идеального газа зависит только от его температуры ( $i_{и.г.} = c_p \cdot t$ ), можно далее записать

$$Q_{ЭЛ} - Q_{ТП} = G \cdot [c_{p,2} \cdot t_2 - c_{p,1} \cdot t_1] = G \cdot [\bar{c}_p]_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \quad (2.5)$$

где  $c_{p,1}$ ,  $c_{p,2}$ , кДж/(кг·°С) – истинная удельная массовая теплоемкость воздуха соответственно при начальных и конечных параметрах.

Из последнего соотношения получаем расчетную формулу

$$\bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = (Q_{ЭЛ} - Q_{ТП}) / (G \cdot (t_2 - t_1)) \quad (2.6)$$

или для объемной теплоемкости

$$\bar{c}'_p \Big|_{t_1}^{t_2} = (Q_{ЭЛ} - Q_{ТП}) / (V_n \cdot (t_2 - t_1)), \quad (2.7)$$

где  $V_n$  – расход воздуха через калориметр за время  $\tau$ , приведенный к нормальным условиям (н. у.).

Рассмотрим определение величин, входящих в (2.6), (2.7).

Тепловой поток от нагревателя  $Q_{ЭЛ}$  определяется следующим образом:

$$Q_{ЭЛ} = N_{Э} \cdot \tau = U \cdot I \cdot \tau, \quad (2.8)$$

где  $U$ , В – падение напряжения в цепи на участке электронагревателя;

$I$ , А – ток в цепи электронагревателя;

$\tau$ , с – отрезок времени, к которому относится тепловыделение от нагревателя в поток.

Тепловые потери  $Q_{ТП}$  в данном случае невелики, поскольку температура воздуха в калориметре мало отличается от температуры окружающей среды (разность  $t_2 - t_1$  не превышает 5 - 10°С, а

$t_1 = t_{o.c.}$ ). Это позволяет применить приближенные методики определения величины потерь. В этом случае можно воспользоваться следующей приближенной оценкой тепловых потерь:

$$Q_{ТП} = (\pi \cdot d \cdot l) \cdot k \cdot \left( \frac{t_2 + t_1}{2} - t_{o.c.} \right) \cdot \tau, \quad (2.9)$$

где  $(\pi \cdot d \cdot l)$ ,  $m^2$  – поверхность теплообмена (боковая поверхность цилиндра) между сечениями I-I и II-II;

$k$ ,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$  – коэффициент теплопередачи от потока воздуха в калориметре к окружающему воздуху через стенку канала; в условиях опыта можно принять его величину  $k \approx 5 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$ .

Температуры среды  $t_1$  в сечении I-I и  $t_2$  в сечении II-II удобно измерять, как уже отмечалось, с помощью лабораторных термометров. Для уменьшения ошибки показаний, вызванной лучистым теплообменом между нагретым термометром и более холодной стенкой калориметра, с одной стороны, и разогретой спиралью нагревателя и более холодным термометром, с другой стороны, датчики температуры необходимо экранировать, например, с помощью металлических цилиндров.

Расход воздуха при параметрах потока в сечении II-II определяется очевидным соотношением

$$V_2 = w_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \tau, \quad (2.10)$$

где  $\tau$ , с – тот же отрезок времени, что использовался при определении тепловых потоков  $Q_{ЭЛ}$  и  $Q_{ТП}$ ;

$d_2$ , м – диаметр канала в сечении II-II.

Воспользовавшись уравнением состояния идеального газа, расход среды несложно привести к нормальным условиям:

$$V_n = V_2 \cdot \left( \frac{p_2}{p_n} \right) \cdot \left( \frac{T_n}{273 + t_2} \right), \quad (2.11)$$

где  $p_n$ ,  $p_2$ , Па – соответственно нормальное давление и давление в данном сечении потока, которое можно принять равным барометри-

ческому давлению  $p_2 = B$  (в формуле (2.9) оба давления допускается одновременно подставлять в любых, обязательно одних и тех же единицах измерения, поскольку множитель является безразмерным);

$T_n$ , К – температура, соответствующая нормальным условиям;  
 $T_n = 273$  К.

При использовании для измерения скорости потока крыльчатого анемометра, который дает осредненное значение скорости по сечению канала, изложенного выше материала достаточно для проведения обработки наблюдений в контексте данной работы. При использовании пневмометрической трубки, определяющей скорость потока в локальной области сечения потока, необходимы дополнительные расчеты, непосредственно не имеющие отношения к теме лабораторной работы. Эти расчеты обусловлены тем, что допущение об одномерности потока неприемлемо в отношении скорости: скорости потока в разных точках радиуса канала различны настолько, что невозможно получить приемлемый по точности результат. В этой связи актуален вопрос о нахождении средней по сечению скорости потока при использовании пневмометрической трубки для измерения скорости. Ответ на вопрос о нахождении средней скорости потока дает дисциплина «газодинамика».

Для нахождения средней по сечению трубы скорости потока необходимо, прежде всего, знать ее значение на оси цилиндра. Последнее удобно, так как по оси канала достаточно просто установить пневмометрическую трубку. Динамический напор потока с показаниями микроманометра связывает соотношение

$$p_D = H \cdot k, \text{ мм спирт. ст.}, \quad (2.12)$$

где  $H$ , мм спирт. ст. – отсчет по шкале микроманометра;

$k$  – индивидуальная постоянная микроманометра, связанная с выбранными диапазоном и чувствительностью измерения.

Поскольку в качестве рабочей жидкости микроманометра используется, как правило, спирт, то результат измерения получается в мм спирт. ст., который требуется перевести в мм вод. ст. В прецизионных измерениях необходимы также поправки, например, на отличие температуры рабочей жидкости манометра от  $0^\circ\text{C}$ . В данном случае величина поправок и цели измерения позволяют ограничиться лишь переводом результата из одних единиц измерения в другие. Перевод из



1 мм спирт. ст. в 1 мм вод. ст. осуществляется через отношение плотностей воды и этилового спирта при  $t = 0^\circ\text{C}$  ( $\rho_{\text{э.сп}} = 0,8095 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{\text{в}} = 0,9999 \text{ г/см}^3$ , 1 мм вод. ст. = 0,80958 мм спирт. ст. = 9,80665 Па).

Величина динамического напора, определенная таким образом, позволяет рассчитать скорость потока среды, ему соответствующую:

$$w_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{Д}}}{\rho_{\text{в}}}}, \quad (2.13)$$

где  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\text{кг/м}^3$  – плотность воздуха при условиях опыта, т.е. при параметрах воздуха в сечении II–II. Рассчитывается по термическому уравнению состояния идеального газа  $p = R \cdot \rho \cdot T$ .

Искомая величина средней по сечению скорости потока  $w_{\text{ср}}$  определяется по осевой скорости  $w_0$  из соотношения

$$w_{\text{ср}} = c \cdot w_0, \text{ м/с}, \quad (2.14)$$

где  $c$  – скоростной коэффициент, определяемый по графической зависимости  $c = f(Re)$ , приведенной в прил.13. Здесь  $Re$  – безразмерная величина, критерий Рейнольдса, являющийся важнейшей характеристикой любого потока. Рассчитывается критерий Рейнольдса по выражению

$$Re = \frac{w_0 \cdot d}{\nu}, \quad (2.15)$$

где  $d$ , м – определяющий размер, в данном случае диаметр трубы;  
 $\nu$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$  – коэффициент кинематический вязкости воздуха при параметрах данного сечения, определяемый с помощью прил. 8.

После нахождения средней скорости производится расчет искомой величины по соотношению (2.10), где под обозначением  $w_2$  понимается средняя по сечению скорость потока воздуха.

### *Порядок проведения работы*

1. Изучите необходимый теоретический материал и подготовьте протокол наблюдений.

2. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой. Распределите функции между участниками работы.

3. Произведите замеры параметров окружающей среды (барометрического давления  $B$  и температуры помещения  $t_{o.c.}$ ).

4. С разрешения преподавателя в присутствии лаборанта включить установку и произвести следующие действия:

установить рукоятки лабораторных автотрансформаторов в нулевое положение;

подать напряжение к электромотору вентилятора и, плавно вращая регулятор автотрансформатора, установить такое его значение, при котором скорость воздуха в калориметре находится в пределах 2-7 м/с;

подать напряжение к электронагревателю и плавно довести его до величины, когда перепад температур достигнет указанного ранее уровня;

добиться стационарного режима работы установки, для чего необходимо поддерживать постоянным напряжение в цепи электропривода вентилятора и электронагревателя. В установившемся режиме температуры  $t_1$  и  $t_2$  в соответствующих сечениях во времени не должны меняться;

приступить к измерениям и провести требуемое количество их для каждой величины;

в соответствии с заданием, полученным от преподавателя, перейти на новый режим работы либо выключить установку. Все операции производить в присутствии лаборанта. Последовательность выключения обратная включению;

полученные результаты эксперимента занести в табл. 2.1, обработать экспериментальный материал, после чего выполнение лабораторной работы считается окончанным.

Таблица 2.1

Протокол наблюдения

№ п/п	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$I, \text{A}$	$U, \text{B}$	$H, \text{мм спирт. ст.}$
1					
2					
...					
Параметры окружающей среды: температура $t_{o.c.} = \quad ^\circ\text{C}$ , барометрическое давление $B = X \text{ мм рт. ст.} = X \cdot 133,3 \text{ Па}$ .					

## Обработка результатов измерений

1. Рассчитать количество теплоты, выделяющейся в нагревателе, и тепловые потери по формулам (2.8) и (2.9).

2. Определить расход воздуха при нормальных условиях, используя формулы (2.10) - (2.11).

3. Определить объемную изобарную среднюю теплоемкость воздуха по формуле (2.7). *Полученные значения  $\bar{c}'_p \Big|_{T_1}^{T_2}$  сравнить с*

*табличными и расчетными значениями по эмпирическим формулам.* Рассчитать также значения теплоемкости воздуха как смеси газов через теплоемкости и концентрации компонентов. Проанализировать полученные значения.

4. Изобразить процессы изменения состояния воздуха в калориметре в  $p, v$ - и  $T, s$ -диаграммах.

5. Оценить относительную погрешность определения полученной величины, используя выражение

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{2\Delta T}{T_2 - T_1} + \frac{0,5\Delta H}{H},$$

где  $\Delta I, \Delta U, \Delta T, \Delta H$  – абсолютные погрешности при измерении силы тока, падения напряжения, температуры и показаний микроманометра.

Провести анализ случайных и систематических ошибок.

### Вопросы для самопроверки

1. Может ли теплоемкость иметь отрицательное значение? Ответ обосновать.

2. Как определяется теплоемкость идеального газа в любом политропном процессе изменения состояния вещества?

3. От чего зависит теплоемкость идеального и реального газов?

4. Как привести объем идеального газа к нормальным условиям?

5. Объясните, почему для идеального газа при низких температурах теплоемкость остается практически постоянной.

6. Какие значения теплоемкости имеют воздух, вода и другие вещества (не менее четырех примеров), с которыми мы имеем дело в повседневной жизни?

7. Получите формулу Майера из одноименного уравнения.
8. Укажите интервал температур, для которого средняя теплоемкость приводится в таблицах или рассчитывается по аппроксимирующим формулам?
9. Как рассчитать среднюю теплоемкость в интервале температур  $t_1 - t_2$ , если известны теплоемкости в интервалах температур  $0 - t_1$  и  $0 - t_2$ ?
10. Какая из теплоемкостей больше: истинная при данной температуре  $t$  или средняя в интервале температур  $0 - t$ ?
11. Почему удельная объемная теплоемкость отнесена к кубическому метру вещества, определяемому при нормальных условиях?
12. Как связаны удельные массовая, молярная и объемная теплоемкости? Как связаны перечисленные теплоемкости с теплоемкостью системы в целом?
13. Как рассчитать теплоемкость идеального газа в том или ином процессе, если считать ее не зависящей от температуры?
14. Как интерполировать таблицы теплоемкости для нахождения ее вне узлов таблицы и сохранить точность, характерную для данных таблиц?
15. Как найти погрешность данных по теплоемкости при использовании тех или иных таблиц?
16. Уравнение политропического процесса  $\frac{V}{T} = const$ . Определите теплоемкость вещества (воздуха, метана, гелия) в данном процессе.
17. Определите мощность потока тепловой энергии и ее количество, которое надо затратить, чтобы сохранить температуру в данном помещении на уровне  $18^\circ\text{C}$ , если наружная температура сохранилась равной  $8^\circ\text{C}$ , а барометрическое давление выросло в течение 4 часов с 735 до 750 мм рт. ст. Кроме того, в течение часа вытяжная система вентиляции удаляет из помещения  $10 \text{ м}^3$  воздуха. В помещении находится 20 человек, мощность тепловыделений каждого из которых равна 100 Вт. Рассеянием энергии через стенки пренебречь.

### Лабораторная работа №3

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ДЛЯ ВОЗДУХА

*Цель работы:* закрепление теоретического материала; рассмотрение процессов изменения состояния идеального газа; опытное определение показателя адиабаты или коэффициента Пуассона ( $k$ ).

## Описание установки

Принципиальная схема экспериментальной установки дана на рис. 3.1. Стекланный баллон (1) имеет три соединительных патрубка, два из которых снабжены двухходовыми кранами. Патрубок (2) соединяет баллон с U-образным дифференциальным водяным манометром (3), другой патрубок (4) – с атмосферой, третий (5) – с насосом (6). Кроме того, при проведении лабораторной работы необходимы барометр для измерения атмосферного давления и термометр, показывающий температуру окружающей среды.

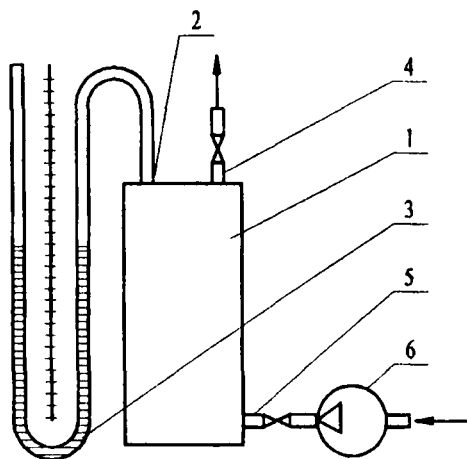


Рис. 3.1. Принципиальная схема экспериментальной установки

## Методика исследования

Используемая в работе методика определения показателя адиабаты наиболее отвечает целям и условиям лабораторных работ. Ее отличает простота выполнения, поскольку в ходе опыта требуется лишь должное измерение давления в системе при соблюдении теплового равновесия с окружающей средой в начальном и конечном состояниях системы. Вместе с тем в ходе работы со всей полнотой прослеживается действие основных законов и протекание термодинамических процессов. В качестве модели идеального газа, необходимого для реализации методики, используется воздух, находящийся при условиях, близких к атмосферным.

Рассмотрим два последовательных процесса изменения состояния некоторой системы: адиабатное расширение и затем изохорный нагрев газа до начальной температуры (рис. 3.2). Начальная точка обозначена номером 2 из соображений удобства сопряжения данных выкладок с последующими.

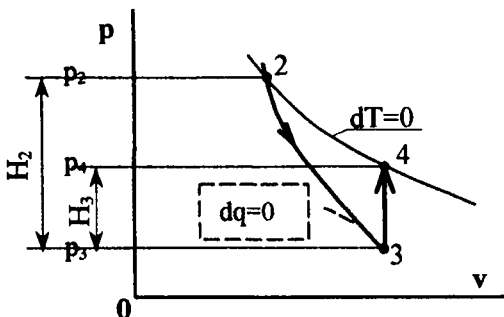


Рис. 3.2. Процессы изменения состояния испытываемой системы в p-v- диаграмме

В адиабатном процессе 2-3 изменение параметров состояния выражается зависимостью

$$(T_2/T_3) = (p_2/p_3)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (3.1)$$

Для изохорного нагрева газа (процесс 3-4) имеем

$$(T_4/T_3) = (p_4/p_3). \quad (3.2)$$

Поскольку из условия имеем  $T_2 = T_4$ , из последних двух уравнений получаем

$$(p_4/p_3) = (p_2/p_3)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (3.3)$$

Обозначим  $P_4 = P_3 + H_3$ ;  $P_2 = P_3 + H_2$  (см. рис. 3.2) и подставим их в уравнение (3.3). Разделив обе части уравнения (3.3) на  $P_3$ , получаем

$$1 + H_3/P_3 = (1 + H_2/P_3)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (3.4)$$

В ходе работы требуется выполнение следующих условий:  $p_3 = B \approx 10^5$  Па, а величины  $H_2$  и  $H_3$  находятся в диапазоне 500 – 5000 Па. Обеспечив условия  $p_3 \ll H_3$  и  $p_3 \ll H_2$ , воспользуемся известным разложением из [9]

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n} \quad (3.5)$$

для логарифма выражения (3.4). При этом ограничиваемся первым членом разложения, что при соответствующих величинах  $H_2$ ,  $H_3$  и  $p_3$  даст ошибку лишь в четвертом знаке:

$$kH_3/p_3 = (k-1)H_2/p_3. \quad (3.6)$$

В итоге получаем

$$k = H_2/(H_2 - H_3). \quad (3.7)$$

Таким образом, для нахождения величины  $k$  требуется получить состояние системы (рис. 3.2, точка 2), позволяющее провести непосредственно процессы, необходимые для определения показателя адиабаты воздуха в соответствии с формулой (3.7).

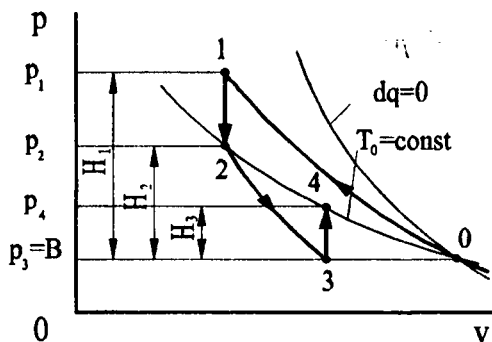


Рис. 3.3. Последовательность процессов, происходящих в опыте, в  $p-v$ -диаграмме: 0-1 – политропное сжатие; 1-2 – изохорное охлаждение; 2-3 – адиабатное расширение; 3-4 – изохорное сжатие

Обратимся далее к диаграмме (рис. 3.3). В начальном состоянии (точка 0) в баллоне находится воздух при температуре  $T_0$  и давлении  $p_0 = B$ . С помощью насоса (6) при закрытом кране на патрубке (4) и открытом кране на патрубке (5) в емкости создается избыточное давление газа величиной 400-600 мм вод. ст. При этом протекает процесс 0-1 изменения состояния воздуха. Нетрудно

убедиться, что процесс этот политропный и значение показателя политропы лежит в пределах  $1 < n < k$ .

Сжимая газ, мы совершаем работу, которая приводит к увеличению его внутренней энергии. Поскольку мы имеем дело с идеальным газом, внутренняя энергия которого зависит только от температуры, в тот же момент увеличивается температура системы. Нарушение теплового равновесия системы с окружающей средой неизбежно приводит к появлению теплового потока между ними. Согласно второму началу термодинамики, этот тепловой поток только от более горячей системы к более холодной окружающей атмосфере-

ре. Работа процесса 0-1, подведенная к системе, таким образом, в полном соответствии с первым началом термодинамики, расходуется на теплообмен с окружающими телами и изменение внутренней энергии системы. Соотношение между последними двумя величинами определяется скоростью протекания процесса сжатия газа. В предельных случаях имеет место адиабатное сжатие – при очень быстром проведении процесса, когда теплообмен системы с окружающей средой не успевает произойти, и изотермическое сжатие – при очень медленном проведении процесса, когда в любой момент времени успевает установиться тепловое равновесие системы с окружающей средой. Поскольку сжатие происходит с конечной скоростью, отличной от вышерассмотренных предельных вариантов, в конце процесса (рис. 3.3, точка 1) имеем некоторую температуру  $t_1 > t_0$  и давление  $p_1 > B$ , что позволяет вычислить показатель политропы из соотношения

$$(p_1 / p_0)^{\frac{n-1}{n}} = (T_1 / T_0). \quad (3.8)$$

Далее закрывается кран на патрубке (5), при этом продолжается теплообмен между газом в баллоне и окружающей средой, но поскольку масса и объем системы неизменны, процесс 1-2 идет изохорно и приводит к некоторому падению давления в системе. В конце его имеем состояние (рис. 3.3, точка 2), в котором  $t_2 = t_0$  и давление  $p_2 > B$ , что позволяет рассчитать температуру  $t_1$  начала изохорного охлаждения по зависимости, аналогичной (3.2). Таким образом, следует констатировать, что получено состояние системы, требуемое для проведения процессов, описанных ранее (рис. 3.2), на основании результатов наблюдения которых рассчитывается показатель адиабаты.

Адиабатное расширение можно осуществить двумя путями. Первый заключается в изменении окружающей среды синхронно с температурой системы, что исключает движущую силу теплообмена – разность температур между телами. Второй путь в рассматриваемых условиях более приемлемый и заключается в очень быстром проведении процесса. Процесс расширения наиболее целесообразно вести до достижения величины давления  $p_3 = B$ , поскольку момент выполнения данного равенства легче фиксировать по одинаковому уровню положения столбов жидкости в трубках дифференциально-го манометра. Так как теплообмен в описанном процессе произойти



не успевает, работа расширения, как и следует для адиабатного процесса, совершается за счет внутренней энергии. Внутренняя энергия уменьшается (последняя для идеального газа зависит только от температуры), и температура воздуха в баллоне неизбежно понижается (рис. 3.3, точка 3), становится ниже начальной и, следовательно, ниже температуры окружающей среды.

Таким образом, после окончания процесса изохорного охлаждения 1-2 открывается кран на патрубке (4) и воздух выпускается из баллона (1). Давление в системе падает до атмосферного (столбы жидкости в обоих коленах дифференциального манометра (3) выравниваются на одном уровне), и кран без промедления закрывается. На этом процесс адиабатного расширения системы заканчивается. Воздух в баллоне охладился до температуры ниже температуры окружающей среды.

Теперь к холодной термодинамической системе из окружающей атмосферы подводится тепловой поток. Происходит изохорный нагрев воздуха в баллоне (1) до температуры окружающей среды, в ходе которого давление в баллоне увеличивается, что отмечается ростом разницы уровней столбов жидкости в дифференциальном манометре. Прекращение роста давления в системе означает окончание процесса – наступление теплового равновесия между системой и окружающей средой (рис. 3.3, точка 4) – и опыта в целом.

На рис. 3.3 в  $pV$ -диаграмме изображены рассмотренные процессы в последовательности и в связи друг с другом, как следует из вышеизложенного. Избыточное давление, которое фиксирует манометр, обозначается  $H$ .

Таким образом, как следует из проведенной работы, измерению подлежат избыточные давления  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  в соответствующих состояниях системы (рис. 3.3), барометрическое давление и температура окружающей среды.

### *Порядок проведения работы*

1. Закрывается кран на патрубке (4) при открытом кране на патрубке (5), воздух с помощью насоса нагнетается в баллон. Не следует стремиться получить давление более 600 мм вод. ст., так как можно выдавить воду из дифференциального манометра и сорвать опыт.

2. Закрывается кран на патрубке (5) и фиксируется давление  $H_1$ . После прекращения падения давления в сосуде, которое будет про-

исходить сразу после закрытия крана на патрубке (5), когда наступит тепловое равновесие с окружающей средой, регистрируется давление  $H_2$ .

3. Открывается кран на патрубке (4). Как только давление газа в баллоне упадет до атмосферного (уровни столбов воды в дифференциальном манометре выравняются), кран на патрубке (4) закрывается. Напоминаем, что процесс этот будет адиабатным лишь при соответствующей скорости его проведения.

4. После прекращения роста давления, наблюдающегося после последнего закрытия крана на патрубке (4), измеряется давление  $H_3$ .

Опыт закончен. Полученные результаты заносим в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Протокол наблюдения

№ п/п	$H_1$		$H_2$		$H_3$	
	мм вод. ст.	кПа	мм вод. ст.	кПа	мм вод. ст.	кПа
1						
2						
...						
Параметры окружающей среды: температура $t_{o.c.} = \quad ^\circ\text{C}$ , барометрическое давление $B = X \text{ мм рт. ст.} = X \cdot 133,3 \text{ Па}$ .						

Обработка результатов измерений

1. Рассчитываются величина показателя адиабаты и все процессы изменения состояния системы, происходившие с ней в опыте:

все термические параметры в характерных точках состояния системы (точки 0, 1, 2, 3, 4);

изменение удельных внутренних энергий, энтальпии и энтропии; энергетические характеристики процессов – работа и теплота; показатель политропы и теплоемкость газа для каждого процесса.

2. Изображаются все процессы, протекающие в ходе опыта, как в  $pV$ -, так и в  $Ts$ -диаграммах.

3. Определяется относительная погрешность полученной величины, для чего можно использовать выражение

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta H}{H_2} + \frac{2\Delta H}{H_2 - H_3},$$

где  $\Delta H$  – абсолютные погрешности при измерении давления.

4. Проводится анализ случайных и систематических ошибок.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Как изменяется температура идеального газа при адиабатном расширении?

2. Запишите уравнение адиабаты и получите из него формулу (3.1).

3. Используя зависимость показателя адиабаты от числа атомов в молекуле, рассчитайте показатель адиабаты одно-, двух-, многоатомных газов.

4. Какой знак имеет теплоемкость в процессе 0-1 (рис. 3.3)? Запишите формулу для определения теплоемкости политропного процесса.

5. Запишите в дифференциальной форме выражения для первого начала термодинамики для закрытых термодинамических систем в различных формах (с использованием внутренней энергии, энтальпии, энергий Гельмгольца и Гиббса), объясните их.

6. Сформулируйте второе начало термодинамики применительно к протекающим в лабораторной работе процессам.

7. Можно ли провести подобное определение показателя адиабаты, положив в основу не адиабатное расширение газа, а адиабатное сжатие его? Если да, то какие изменения в установке потребуются? Получите расчетную формулу, аналогичную (3.7), изобразите процессы в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах для такого варианта работ. Какой из этих вариантов методически более точен?

### Л и т е р а т у р а

1. З а й д е л ь А. Н. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974.

2. З у б а р е в В. Н., А л е к с а н д р о в А. А. Практикум по технической термодинамике. – М.: Энергия, 1971.

3. Д ж о н с о н Н., Л и о н О. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. В 2 ч. – М.: Мир, 1980. – Ч. 1: Методы обработки данных.

4. В а р г а ф т и к Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматгиз, 1963.
5. Р и в к и н С. Л. Термодинамические свойства газов. – М.: Энергия, 1974.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – М.: Энергия, 1971.
7. В у к а л о в и ч М. П., Н о в и к о в И. И. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1968.
8. К р у т о в В. И. Техническая термодинамика. – М.: Высш. школа, 1971.
9. Д е м и д о в и ч Б. П., М а р о н И. А. Основы вычислительной математики. – М.: Физматгиз, 1960.
10. Р и в к и н С. Л., А л е к с а н д р о в А. А., К р е м е н е в с к а я Е. А. Термодинамические производные для воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1977.
11. К и р и л л и н В. А., С ы ч е в В. В., Ш е й н д л и н А. Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1968.
12. Теория и техника теплофизического эксперимента: Учеб. пособие для вузов / Ю.Ф.Гортышов, Ф.Н.Дресвянников, Н.С.Идиатуллин и др.; Под ред. В.К.Щукина. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
13. Р и в к и н С. Л., А л е к с а н д р о в А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980.

Международная система единиц

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единиц
<b>Некоторые основные единицы</b>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
<b>Некоторые производные единицы</b>		
Площадь	квадратный метр	м <sup>2</sup>
Объем, вместимость	кубический метр	м <sup>3</sup>
Скорость	метр в секунду	м/с
Сила, вес	ньютон	Н; (кг·м/с <sup>2</sup> )
Давление	ньютон на квадратный метр	Н/м <sup>2</sup>
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>
Удельный объем	кубический метр на килограмм	м <sup>3</sup> /кг
Энергия, работа, количество теплоты, энтальпия	джоуль	Дж; (Н·м)
Мощность, поток энергии	ватт	Вт
Энтропия	джоуль на кельвин	Дж/К
Удельная массовая теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)
Теплота фазового превращения	джоуль на килограмм	Дж/кг

Некоторые внесистемные единицы

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение
Время	час, сутки	ч, сут
Работа, энергия	киловатт-час	кВт·ч
Масса вещества в килограммах, численно равная его молекулярной массе	киломоль	кмоль
Давление	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.
	миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.
	бар	бар

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Кратные единицы				Дольные единицы			
Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение	
		русское	международное			русское	международное
$10^{12}$	тера	Т	T	$10^{-1}$	деци	д	d
$10^9$	гига	Г	G	$10^{-2}$	санци	с	c
$10^6$	мега	М	M	$10^{-3}$	милли	м	m
$10^3$	кило	к	K	$10^{-6}$	микро	мк	μ
$10^2$	гекто	г	h	$10^{-9}$	нано	н	n
10	дека	да	da	$10^{-12}$	пико	п	p

**Таблица перевода некоторых величин, измеренных в единицах МКГСС (техническая система) или в СГС (абсолютная физическая система), или во внесистемных единицах, в единицы международной системы СИ**

Наименование величин	Коэффициент пересчета единиц измерений
Масса	1 т. е. м. = 1 (кгс · с <sup>2</sup> )/м = 9,80665 кг
Время	1 час = 3600 с
Температура	T = (273,15 + t) · К
Плоский угол	1 <sup>0</sup> = 0,0174533 рад
Сила	1 кгс = 9,80665 Н; 1 дин = 10 <sup>-5</sup> Н
Давление	1 кгс/м <sup>2</sup> = 9,80665 Н/м <sup>2</sup> ; 1 дин/см <sup>2</sup> = 10 <sup>-1</sup> Н/м <sup>2</sup>
Атмосфера техническая	1 ат = 10000 кгс/м <sup>2</sup> = 98066,5 Н/м <sup>2</sup>
Атмосфера физическая	1 атм = 101325 Н/м <sup>2</sup>
Удельный вес	1 кгс/м <sup>3</sup> = 9,80665 Н/м <sup>3</sup> ; 1 дин/см <sup>3</sup> = 10 Н/м <sup>3</sup>
Плотность	1 (т. е. м.)/м <sup>3</sup> = 1 кгс·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> = 9,80665 кг/м <sup>3</sup>
Динамическая вязкость	1 кгс·с/м <sup>2</sup> = 9,80665 Н·с/м <sup>2</sup> ; 1 п = 10 <sup>-1</sup> Н · с/м <sup>2</sup>
Кинематическая вязкость	1 ст = 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с
Работа	1 кгс · м = 1/426,94 ккал = 9,80665 Дж; 1 эрг = 10 <sup>-7</sup> Дж
Мощность	1 кгс · м/с = 9,80665 Вт; 1 эрг/с = 10 <sup>-7</sup> Вт; 1 л.с. = 735,499 Вт
Теплота, энтальпия, внутренняя энергия	1 ккал = 1/859,845 кВт · ч = = 4,1868 · 10 <sup>3</sup> Дж
Энергия	1 кВт · ч = 3,6 · 10 <sup>6</sup> Дж

**Молярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях,  
газовые постоянные и критические параметры некоторых газов**

Газ	Химическое обозначение	Молярная масса, кг/кмоль	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объем киломоля, м <sup>3</sup> /кмоль	Критическая температура, °С	Критическое давление, МПа	Критический объем, м <sup>3</sup> /кг	Газовая постоянная, Дж/(кг·град)
Воздух	—	28,97	1,2928	22,40	-140,6	3,769	0,003196	287,0
Кислород	O <sub>2</sub>	31,9968	1,42895	22,39	-118,38	5,087	0,0024600	259,8
Азот	N <sub>2</sub>	28,0134	1,2505	22,40	-146,9	3,396	0,003835	296,8
Гелий	He	4,0026	0,1785	22,42	-267,95	0,226	0,014343	2078,0
Аргон	Ar	39,944	1,7839	22,39	-122,50	4,858	0,001876	208,2
Водород	H <sub>2</sub>	2,0159	0,08987	22,43	-239,9	1,2568	0,032258	4124,0
Оксид углерода	CO	28,009	1,2500	22,40	-140	3,496	0,003322	296,8
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44,0079	1,9768	22,26	31,05	7,383	0,002137	188,9
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	64,0658	2,9263	21,89	157,5	8,147	0,001904	129,8
Метан	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	22,39	-82,5	4,641	0,00617	518,8
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,052	1,251	22,41	9,90	5,097	0,00474	296,6
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,0306	0,7714	22,08	132,4	11,298	0,0042553	488,3
Вода (пар)	H <sub>2</sub> O	18,014	(0,804)	(22,4)	374,12	22,115	0,003147	(461)



## Соотношения между единицами измерения давления

Наименование единиц	Н/м <sup>2</sup> , Па	бар	ат (техническая атмосфера)	атм (физическая атмосфера)	мм вод. ст.*	мм рт. ст.**	lbf/in <sup>2</sup> (англ. фут на кв. дюйм)
1 Н/м <sup>2</sup> (1 Па)	1	1·10 <sup>-5</sup>	1,01972·10 <sup>-5</sup>	9,86923·10 <sup>-6</sup>	0,101972	750,062·10 <sup>-5</sup>	14,5038·10 <sup>-5</sup>
1 бар	10 <sup>5</sup>	1	1,01972	0,986923	10197,2	750,062	14,5038
1 кгс/м <sup>2</sup> (1 мм вод. ст.)	9,80665	9,80665·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	9,67841·10 <sup>-5</sup>	1	73,5559·10 <sup>-3</sup>	14,2233·10 <sup>-4</sup>
1 атм	1,01325·10 <sup>5</sup>	1,01325	1,03323	1	1,03323·10 <sup>4</sup>	760	14,6959
1 ат (1 кгс/см <sup>2</sup> )	98,0665·10 <sup>3</sup>	0,980665	1	0,967841	10 <sup>4</sup>	735,559	14,2233
1 мм рт. ст.	133,322	0,00133322	1,35951·10 <sup>-3</sup>	1,31579·10 <sup>-3</sup>	13,5951	1	19,3367·10 <sup>-3</sup>
1 lbf/in <sup>2</sup>	6894,76	68,9476·10 <sup>-3</sup>	0,0703070	0,0680460	703,07	51,7150	1

\* При  $t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$  и нормальном ускорении свободного падения  $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$ .

\*\* При  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  и нормальном ускорении свободного падения  $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$ .

## Соотношения между единицами измерения энергии

Единица измерения	кДж	ккал	кВт · ч	кгс · м	л.с. · ч
10 кДж	10,0000	2,38846	0,002778	1019,72	0,0037767
10 ккал	41,868	10	0,011630	4269,4	0,015813
1 кВт · ч	3600	859,845	1	367098	1,35962
100 кгс · м	0,980665	0,23423	0,00027239	100	0,00037037
1 л.с. · ч	2647,80	632,41	0,73550	270000	1
10 <sup>3</sup> мм рт. ст.	1,33322 · 10 <sup>5</sup>	1,31579 · 10 <sup>4</sup>	1,35951 · 10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	19,3368
10 lb/sq.in	0,68948 · 10 <sup>5</sup>	0,68046	0,70307 · 10 <sup>4</sup>	517,15	10

Физические свойства сухого воздуха ( $B = 760$  мм рт. ст.)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p,$ $\text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2,$ $\text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6,$ $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{Pr}$
1	2	3	4	5	6	7	8
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	$12,79 \cdot 10^{-6}$	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	27,2	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

Интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей газов

Газ	Истинная мольная теплоемкость при $p = \text{const}$ $c_{pM}$ , кДж/(кмоль · град)	Средняя мольная теплоемкость при $p = \text{const}$ $\overline{c_{pM}}_0^t$ , кДж/(кмоль · град)
В пределах от 0 до 1000 °С		
O <sub>2</sub>	29,5802+0,0069706·t	29,2080+0,0040717·t
N <sub>2</sub>	28,5372+0,0053905·t	28,7340+0,0023488·t
CO	28,7395+0,0058862·t	28,8563+0,0026808·t
Воздух	28,7558+0,0057208·t	28,8270+0,0027080·t
H <sub>2</sub> O	32,8367+0,0116611·t	33,1494+0,0052749·t
SO <sub>2</sub>	42,8728+0,0132043·t	40,4386+0,0099562·t
В пределах от 0 до 1500 °С		
H <sub>2</sub>	28,3446+0,0031518·t	28,7210+0,0012008·t
CO <sub>2</sub>	41,3597+0,0144985·t	38,3955+0,0105838·t
В пределах от 1000 до 2700 °С		
O <sub>2</sub>	33,8603+0,0021951·t	31,5731+0,0017572·t
N <sub>2</sub>	32,7466+0,0016517·t	29,7815+0,0016835·t
CO	33,6991+0,0013406·t	30,4242+0,0015579·t
Воздух	32,9564+0,0017806·t	30,1533+0,0016973·t
H <sub>2</sub> O	40,2393+0,0059854·t	34,5118+0,0045979·t
В пределах от 1500 до 3000 °С		
H <sub>2</sub>	31,0079+0,0020243·t	28,6344+0,0014821·t
CO <sub>2</sub>	56,8768+0,0021738·t	48,4534+0,0030032·t

## Интерполяционные формулы для средних теплоемкостей газов

Газ	Удельная массовая теплоемкость, кДж/(кг · град)		Удельная объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> · град)	
	$\overline{c_p} _0^t$	$\overline{c_v} _0^t$	$\overline{c'_p} _0^t$	$\overline{c'_v} _0^t$
В пределах от 0 до 1000 °С				
O <sub>2</sub>	0,9127+0,00012724·t	0,6527+0,00012724·t	1,3046+0,00018183·t	0,9337+0,00018183·t
N <sub>2</sub>	1,0258+0,00008382·t	0,7289+0,00008382·t	1,2833+0,00010492·t	0,9123+0,00010492·t
CO	1,0304+0,00009575·t	0,7335+0,00009575·t	1,2883+0,00011966·t	0,9173+0,00011966·t
Воздух	0,9952+0,00009349·t	0,7084+0,00009349·t	1,2870+0,00012091·t	0,9161+0,00012091·t
H <sub>2</sub> O	1,8401+0,00029278·t	1,3783+0,00029278·t	1,4800+0,00023551·t	1,1091+0,00023551·t
SO <sub>2</sub>	0,6314+0,00015541·t	0,5016+0,00015541·t	1,8472+0,00004547·t	1,4763+0,00004547·t
В пределах от 0 до 1500 °С				
H <sub>2</sub>	14,2494+0,00059574·t	10,1241+0,00059574·t	1,2803+0,00005355·t	0,9094+0,00005355·t
CO <sub>2</sub>	0,8725+0,00024053·t	0,6837+0,00024053·t	1,7250+0,00004756·t	1,3540+0,00004756·t

Таблица истинных и средних молярных теплоемкостей идеальных газов в кДж/(кмоль · К)

$t, ^\circ\text{C}$	Воздух				Кислород			
	$c_{p\mu}$	$c_{v\mu}$	$\overline{c_{p\mu}}^t$	$\overline{c_{v\mu}}^t$	$c_{p\mu}$	$c_{v\mu}$	$\overline{c_{p\mu}}^t$	$\overline{c_{v\mu}}^t$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	29,073	20,759	29,073	20,758	29,274	20,959	29,274	20,959
100	29,266	20,951	29,153	20,838	29,877	21,562	29,538	21,223
200	29,676	21,361	29,299	20,984	30,815	22,500	29,931	21,616
300	30,266	21,951	29,521	21,206	31,832	23,517	30,400	21,667
400	30,949	22,634	29,789	21,474	32,758	24,443	30,878	22,563
500	31,640	23,325	30,095	21,780	33,549	25,234	31,334	23,019
600	32,301	23,986	30,405	22,090	34,202	25,887	31,761	23,446
700	32,900	24,585	30,723	22,408	34,746	26,431	32,150	23,835
800	33,442	25,117	31,028	22,713	35,203	26,888	32,505	24,187
900	33,905	25,590	31,321	23,007	35,584	27,259	32,825	24,510
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	35,914	27,599	33,118	24,803
1200	35,002	26,687	32,109	23,794	36,488	28,173	33,633	25,318
1400	35,546	27,231	32,565	24,250	36,999	27,684	34,076	25,761
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	37,480	29,165	34,474	26,159
1800	36,346	28,031	33,319	25,004	37,945	29,630	34,834	26,519
2000	36,655	28,340	33,641	25,326	38,406	30,093	35,169	26,854
2200	36,928	28,613	33,926	25,611	38,858	30,543	35,483	27,168
2400	37,170	28,855	34,185	25,870	39,293	30,978	35,785	27,470

1	2	3	4	5	6	7	8	9
t, °C	Азот				Водород			
	$c_{p\mu}$	$c_{v\mu}$	$\overline{c_{p\mu}} _0^t$	$\overline{c_{v\mu}} _0^t$	$c_{p\mu}$	$c_{v\mu}$	$\overline{c_{p\mu}} _0^t$	$\overline{c_{v\mu}} _0^t$
0	29,115	20,800	29,115	20,800	28,617	20,302	28,617	20,302
100	29,199	20,884	29,144	20,829	29,128	20,813	28,935	20,620
200	29,471	21,156	29,288	20,913	29,241	20,926	29,073	20,758
300	29,952	21,637	29,383	21,068	29,299	20,984	29,125	20,808
400	30,576	22,261	29,601	21,286	29,396	21,081	29,186	20,871
500	31,250	22,935	29,864	21,549	29,559	21,244	29,249	20,934
600	31,920	23,605	30,149	21,834	29,793	21,478	29,316	21,001
700	32,540	24,225	30,451	22,136	30,099	21,784	29,408	21,093
800	33,101	24,785	30,748	22,433	30,472	22,157	29,517	21,202
900	33,599	25,284	31,037	22,722	30,869	22,544	29,647	21,332
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	31,284	22,969	29,789	21,474
1200	34,763	26,448	31,828	23,513	31,155	23,840	30,107	21,792
1400	35,320	27,005	32,293	23,978	33,000	24,685	30,467	22,152
1600	35,747	27,432	32,699	24,384	33,762	25,447	30,832	22,517
1800	36,090	27,775	33,055	24,740	34,445	26,130	31,192	22,877
2000	36,377	28,052	33,373	25,058	35,056	26,741	31,548	23,233
2200	36,603	28,278	33,658	25,343	35,605	27,290	31,891	23,576
2400	36,795	28,470	33,909	25,594	36,090	27,775	32,222	23,907

1	2	3	4	5	6	7	8	9
t, °C	Водяной пар				Окись углерода			
0	33,499	25,184	33,499	25,184	29,123	20,808	29,123	20,808
100	34,055	25,740	33,741	25,426	29,262	20,947	29,178	20,863
200	34,964	26,649	34,118	25,803	29,647	21,332	29,303	20,988
300	36,036	27,721	34,575	26,260	30,254	21,939	29,517	21,202
400	37,191	28,876	35,090	26,775	30,974	22,659	29,789	21,474
500	38,406	30,091	35,630	27,315	31,707	23,393	30,099	21,784
600	39,662	31,347	36,195	27,880	32,402	24,087	30,426	22,111
700	40,951	32,636	36,789	28,474	33,026	24,711	30,752	22,437
800	42,249	33,934	37,392	29,077	33,574	25,259	31,070	22,755
900	43,513	35,198	38,008	29,693	34,055	25,740	31,376	23,061
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	34,470	26,155	31,665	23,350
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	35,140	26,825	32,192	23,877
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	35,646	27,331	32,653	24,338
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	36,040	27,725	33,051	24,736
1800	51,782	43,467	43,070	34,755	36,350	28,035	33,402	25,087
2000	52,930	44,615	43,995	35,680	35,597	28,282	33,708	25,393
2200	53,930	45,615	44,853	36,538	36,802	28,487	33,980	25,665
2400	54,780	46,465	45,645	37,330	36,978	28,663	34,223	25,908
t, °C	Углекислый газ				Метан			
0	35,860	27,545	35,860	27,545	34,739	26,423	34,738	26,423
100	40,206	31,891	38,112	29,797	39,281	30,966	36,806	28,491



1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	43,689	35,374	40,059	31,744	45,029	36,714	39,427	31,112
300	46,515	38,200	41,755	33,440	50,941	42,626	42,274	33,959
400	48,860	40,515	43,250	34,935	56,622	48,307	45,180	36,865
500	50,815	42,500	44,574	36,258	61,856	53,541	47,977	39,662
600	52,452	44,137	45,753	37,438	66,621	58,305	50,673	42,358
700	53,826	45,511	46,814	38,498	70,929	62,614	53,277	44,962
800	54,977	46,662	47,763	39,448	74,747	66,432	55,902	47,587
900	55,952	47,637	48,617	40,302	78,168	69,853	58,331	50,016
1000	56,776	48,458	49,392	41,077	81,195	72,880	60,503	52,189
1200	57,071	49,756	50,740	42,425	83,845	75,530	62,455	54,140
1400	58,030	50,715	51,858	43,543	86,106	77,791	64,175	55,860
1600	59,737	51,422	52,800	44,485	—	—	—	—
1800	60,269	51,954	53,604	45,289	—	—	—	—
2000	60,654	52,339	54,290	45,975	—	—	—	—
2200	60,918	52,603	54,881	46,566	—	—	—	—

Таблица теплоемкости  $c_p$  воздуха в зависимости от давления и температуры, кДж/(кг · град)

T, К \ p, ат	0,01	1	4	7
50	1,005	-	-	-
100	1,003	1,029	-	-
200	1,003	1,007	1,019	1,032
300	1,006	1,007	1,012	1,016
400	1,014	1,015	1,017	1,019
500	1,030	1,030	1,032	1,034
600	1,052	1,052	1,053	1,054
700	1,076	1,076	1,077	1,077
800	1,099	1,099	1,100	1,101
900	1,122	1,122	1,122	1,123
1000	1,143	1,143	1,143	1,144
2000	1,530	1,339	1,329	1,326
3000	-	2,861	2,184	2,008

$$c = w_{cp} / w_0$$

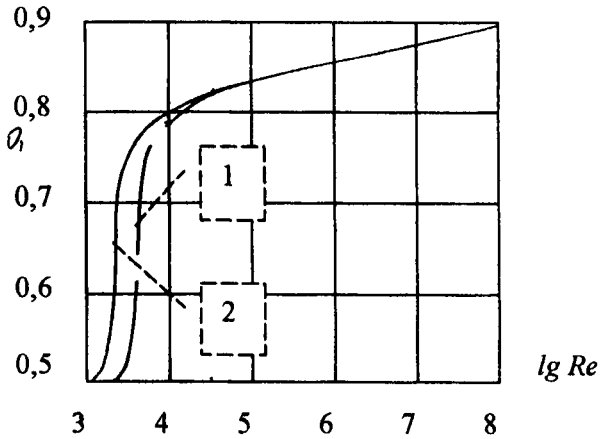


Рис. П.1. Зависимость скоростного коэффициента  $c$  от значения критерия Рейнольдса  $Re$ : 1 – скорость на оси потока ( $w_0$ ); 2 – скорость средняя по сечению ( $w_{cp}$ )

## Содержание

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ. ....	3
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ. ....	3
ОЦЕНКА ОШИБКИ И ЗАПИСЬ ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЕЛИЧИН. ....	5
ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ. ....	9
Лабораторная работа № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ. ....	27
Лабораторная работа № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА. ....	33
Лабораторная работа № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ДЛЯ ВОЗДУХА. ....	43
Литература. ....	50
ПРИЛОЖЕНИЯ. ....	52

Учебное издание

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)**

по дисциплине «Техническая термодинамика»  
для студентов теплоэнергетических специальностей

В 4-х частях

Часть 1

**ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ**

Составители: РОМАНИЮК Владимир Никанорович  
ТОМКУНАС Елена Валерьевна  
БАУК Ирина Владимировна  
ТАРАСЕВИЧ Леонид Александрович

Редактор Г.В.Ширкина. Корректор М.П.Антонова  
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

---

Подписано в печать 06.05.2002.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,1. Тираж 100. Заказ 64.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия ЛВ №155 от 30.01.98. 220027, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.