

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра общей физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА C_p/C_v
МЕТОДОМ АДИАБАТНОГО РАСШИРЕНИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы по физике №6а
для студентов направлений (специальностей) 150200(150202),
280000(280100), 140000(140211), 190600(190601, 190603),
220300(220301), 200000(200503), 190200(190201, 190202),
151000(151001, 151002), 190600(190601), 050501,
260600(260601), 080000(080502), 190700(190702),
220000(220200)

Курган 2009

Кафедра: «Общая физика»

Дисциплина: «Физика»
направлений 150200, 280000, 140000, 190600, 220300,
200000, 190200, 151000, 190600, 050501, 260600, 080000,
190700, 220000,
специальностей 150202, 280100, 140211, 190601, 190603,
220301, 200503, 190201, 190202, 151001, 151002, 190601,
260601, 080502, 190702, 220200

Составил: канд. техн. наук, доц. А.Г. Клабуков

Утверждены на заседании кафедры «24» февраля 2009 г.

Рекомендованы методическим советом университета

«4» марта 2009 г.

Цель работы:

1. Освоение основных понятий и законов термодинамики и молекулярной физики;
2. Изучение теории теплоемкости газов;
3. Определение отношения C_p/C_v для воздуха.

Приборы и принадлежности:

1. Установка для определения отношения C_p/C_v .
2. Манометр водяной.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

1. Тепловые свойства тел изучают термодинамика и молекулярно-кинетическая теория (статистическая физика).

Термодинамическая система – макроскопическое тело или совокупность тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией в виде теплоты и работы, как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

Состояние термодинамической системы задается термодинамическими параметрами (параметрами состояния), характеризующими свойства системы.

Основные параметры термодинамической системы – температура T , давление P , объем V .

2. Уравнение состояния идеального газа

Наиболее простой термодинамической системой является идеальный газ (в термодинамике - газ, подчиняющийся законам Бойля-Мариотти и Гей-Люссака). Связь параметров, характеризующих состояние идеального газа определяется уравнением Клапейрона-Менделеева (уравнением состояния)

$$PV = \frac{m}{\mu}RT \quad \text{или} \quad PV = \nu RT, \quad (1)$$

где $\nu = \frac{m}{\mu}$ - количество вещества (число молей), R - молярная газовая постоянная.

3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа

Идеальный газ в МКТ – модель, вводимая для установления связи между макроскопическими параметрами (давление, температура и микроскопическими (масса молекул и скорость их движения). По этой

модели молекулы газа – это частицы, движение которых подчиняется законам Ньютона, столкновения между молекулами и стенками сосуда абсолютно упругие. При этом силами притяжения и собственным объемом молекул пренебрегаем. По МКТ давление газа определяется суммой импульсов, передаваемых при ударе всех молекул и приходящихся на единицу площади.

Клаузиус установил, что давление идеального газа пропорционально концентрации молекул $n = \frac{N}{V}$ и среднему значению квадрата скорости поступательного движения молекул $\langle v \rangle$

$$P = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \langle v \rangle^2, \quad (2)$$

где m_0 - масса 1 молекулы газа.

Если учесть, что $\frac{m_0 \langle v \rangle^2}{2} = \langle \varepsilon_k \rangle$ средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул, то получим

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \langle \varepsilon_k \rangle. \quad (3)$$

Уравнение (3) носит название основного МКТ для давления.

Средняя кинетическая энергия молекул и ее связь с температурой

Для одного моля газа $n = \frac{N_A}{V_\mu}$, где N_A - число Авогадро; V_μ - молярный объем. Тогда из (3) получим

$$P = \frac{2}{3} \frac{N_A}{V_\mu} \langle \varepsilon_k \rangle \quad \text{или} \quad P V_\mu = \frac{2}{3} N_A \langle \varepsilon_k \rangle.$$

По уравнению Клапейрона- Менделеева для одного моля

$$P V_\mu = R T,$$

тогда

$$\frac{2}{3} N_A \langle \varepsilon_k \rangle = R T \quad \text{и} \quad \langle \varepsilon_k \rangle = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T = \frac{3}{2} k T,$$

где $\frac{R}{N_A} = k$ - постоянная Больцмана.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул пропорциональна абсолютной температуре

$$\langle \varepsilon_k \rangle = \frac{3}{2} k T. \quad (4)$$

4. Первое начало термодинамики

Теплота, переданная системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил $Q = \Delta U + A$.

В дифференциальной форме это выражение имеет вид

$$dQ = dU + dA, \quad (5)$$

где dQ - бесконечно малое количество тепла, переданное системе, dU - бесконечно малое изменение внутренней энергии, dA - бесконечно малая (элементарная) работа.

4.1 Внутренняя энергия термодинамической системы

Внутренней энергией тела или системы в термодинамике называется энергия, зависящая только от термодинамического состояния системы (однозначно определяемая параметрами состояния). В МКТ внутренняя энергия определяется суммой энергий хаотического (теплого) движения микрочастиц и энергии их взаимодействия.

Для расчета внутренней энергии идеального газа надо учесть энергию всех видов движения молекул – поступательного, вращательного, колебательного.

Число видов движения зависит от **числа степеней свободы** i - числа независимых координат, определяющих положение тел в пространстве.

Одноатомная молекула как материальная точка имеет три степени свободы.

Двухатомная молекула рассматривается как система двух жестко связанных материальных точек. Эта система имеет пять степеней свободы: три степени поступательного движения и две - вращательного. Трех и более атомные молекулы как твердое тело имеют 6 степеней свободы – 3 поступательного и 3 вращательного движений.

В МКТ Больцманом доказан **закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы** (все движения равновероятны). На каждую степень свободы поступательного и вращательного движения приходится энергия

$$\langle \varepsilon_{k_1} \rangle = \frac{1}{2} kT .$$

В молекулярно-кинетической теории колебания частиц в молекулах газа не учитываются, что справедливо в достаточно широком интервале температур. Тогда средняя энергия теплового движения молекул идеального газа

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT , \quad (6)$$

где i - число степеней свободы молекул газа.

Таким образом, внутренняя энергия идеального газа определяется уравнением

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT, \quad (7)$$

4.2 Работа расширения газа

Работу, совершаемую газом или над газом, можно найти, рассмотрев расширение (сжатие) газа под поршнем в цилиндрическом сосуде (рис.1).

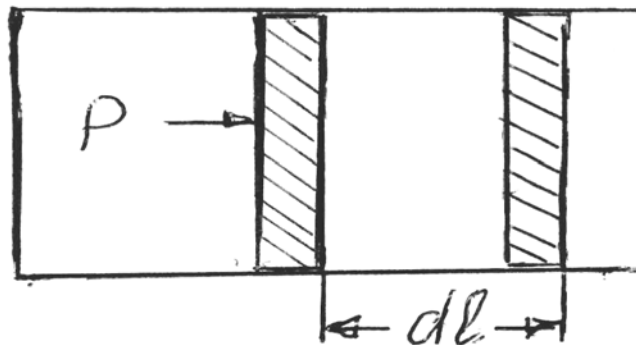


Рис.1. К выводу формулы работы расширения газа

Если при расширении (сжатии) газа поршень передвигается на бесконечно малое расстояние dl , то будет совершена работа $dA = Fdl$. Так как $F = PS$ - сила давления, а $Sdl = dV$ - изменение объема, то

$$dA = PSdl = PdV. \quad (8)$$

Полную работу при расширении газа от V_1 до V_2 найдем интегрированием

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV.$$

Уравнение 1-го начала термодинамики с учетом (8) запишется в виде:

$$dQ = dU + PdV. \quad (9)$$

5. Применение 1-го начала термодинамики к изопроцессам

5.1. Изохорный (изохорический) процесс ($V = \text{const}$).

При изохорном процессе нагревание происходит без изменения объема ($dV = 0$), тогда $dA = PdV = 0$, т.е. газ не совершает работу. Следовательно,

вся теплота, сообщаемая газу, идет на увеличение его внутренней энергии

$$dQ = dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT. \quad (10)$$

5.2 Изобарный (изобарический) процесс ($P = \text{const}$).

При нагревании газа при изобарном процессе ($P = \text{const}$) его объем возрастает, сообщаемое газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил $dQ = dU + PdV$.

При изобарном расширении работа газа равна

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P(V_2 - V_1).$$

Если использовать уравнение Менделеева-Клапейрона для выбранных двух состояний, то $PV_1 = \frac{m}{\mu} RT_1$ и $PV_2 = \frac{m}{\mu} RT_2$, откуда

$$V_2 - V_1 = \frac{m}{\mu} \frac{R}{P} (T_2 - T_1)$$

$$A = \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} R \Delta T. \quad (11)$$

Из уравнения (11) получим, что молярная газовая постоянная R равна работе изобарного расширения одного моля газа при повышении температуры на 1К. ($R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$).

Подставив в уравнение (9)

$$dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT \quad \text{и} \quad dA = \frac{m}{\mu} R dT, \quad \text{получим}$$

$$dQ = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT + \frac{m}{\mu} R dT = \frac{i+2}{2} R \frac{m}{\mu} dT. \quad (12)$$

5.3 Изотермический процесс ($T = \text{const}$).

Внутренняя энергия газа в этом процессе не изменяется $dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT = 0$. Вся теплота идет на совершение работы $dQ = dA$.

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{\mu} RT \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (13)$$

6. Теплоемкость газов C_V и C_p

Теплоемкостью тела (термодинамической системы) называется величина, равная количеству теплоты, необходимой для его нагревания на один Кельвин (градус) $C = \frac{dQ}{dT}$.

Теплоемкость единицы массы называется удельной теплоемкостью

$$C_{уд} = \frac{dQ}{m \cdot dT}.$$

Молярной теплоемкостью называется величина, равная количеству теплоты, необходимой для нагревания одного моля на один Кельвин (градус):

$$C_{\mu} = \frac{dQ}{\nu dT}. \quad (14)$$

Удельная теплоемкость связана с молярной соотношением:

$$C_{\mu} = C_{уд} \cdot \mu,$$

где μ - масса одного моля.

Величина теплоемкости газа зависит от условий нагревания.

6.1 Теплоемкость газа при постоянном объеме C_V (в изохорном процессе)

Молярную теплоемкость идеального газа при постоянном объеме получим из уравнения (14) и (10):

$$C_{(V\mu)} = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT} = \frac{\frac{i}{2} \nu R dT}{\nu dT} = \frac{i}{2} R. \quad (15)$$

6.2 Молярная теплоемкость при постоянном давлении C_p (в изобарном процессе)

Из уравнения (12) и (14) получим

$$C_{(P\mu)} = \frac{\frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT + \frac{m}{\mu} R dT}{\frac{m}{\mu} dT} = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R. \quad (16)$$

Следовательно,

$$C_{P\mu} = C_{V\mu} + R. \quad (17)$$

Выражение (17) называется **уравнением Майера**. Оно показывает, что

$C_{p\mu}$ всегда больше $C_{v\mu}$ на величину молярной газовой постоянной.

7. Адиабатный процесс

Адиабатный процесс происходит без теплообмена термодинамической системы с окружающей средой. Из первого начала термодинамики для адиабатного процесса $dU + dA = 0$. При адиабатном расширении $dA > 0$ ($dA = -dU$) - работа совершается против внешних сил за счет уменьшения внутренней энергии (температура понижается). Если внешние силы совершают работу над системой (газ сжимается), то внутренняя энергия системы возрастает (температура повышается).

Связь параметров состояния газа при адиабатном процессе описывается уравнением Пуассона

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma, \quad (18)$$

где

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (19)$$

Связь температуры и давления получим, подставив из уравнения Менделеева-Клапейрона V_1 и V_2 :

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^\gamma. \quad (20)$$

Непосредственное измерение теплоемкости C_v экспериментально затруднено, так как теплоемкость газа составляет ничтожную долю теплоемкости сосуда, в котором находится газ, и поэтому измерения будут неточными. Обычно измеряют C_p и отношение теплоемкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, а затем находят C_v .

8. Описание установки и метода измерений

Установка.

Установка содержит стеклянный баллон (7), который при помощи пневмопривода (резиновых трубок) соединен с водяным манометром и компрессором (рис.2б). На передней панели установки (рис.2а) расположены: водяной U-образный манометр (1) с измерительной шкалой (2), кран К1 напуска воздуха (3), кран К2 сброса давления (4), тумблер включения микрокомпрессора «Компрессор» (5) с индикацией включения (6).

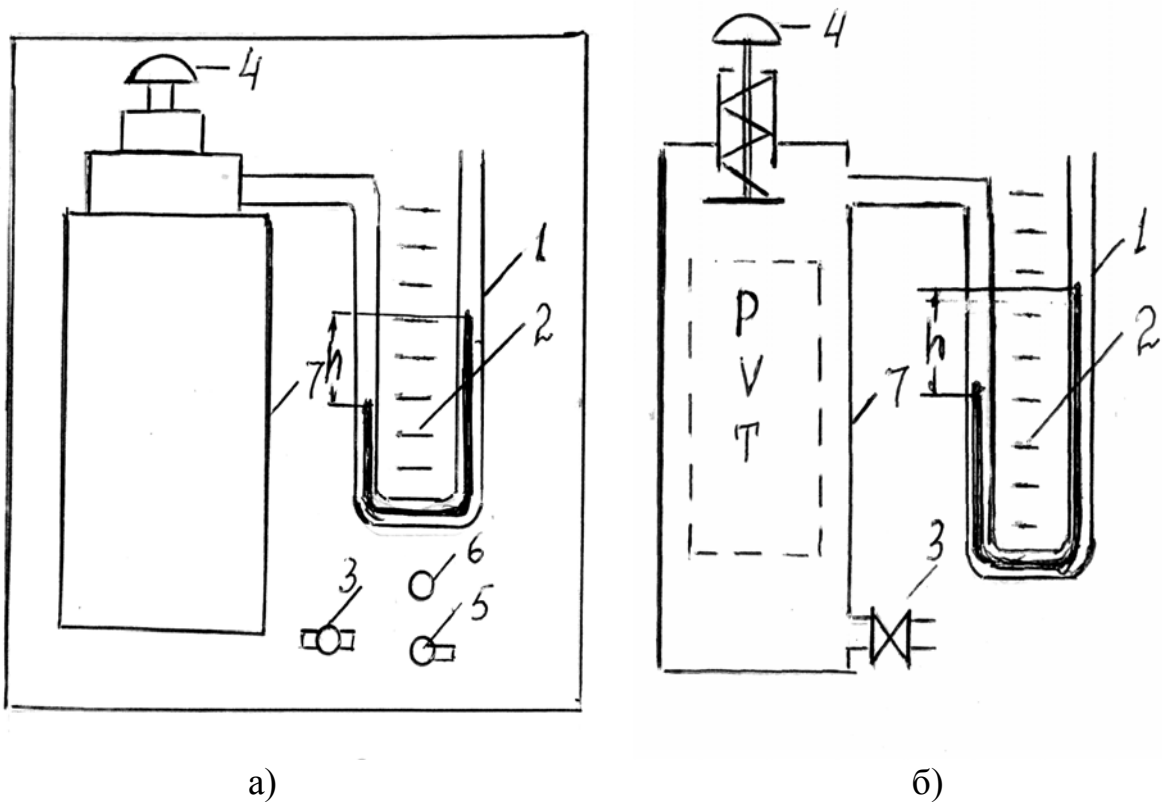


Рис.2. Схема лабораторной установки

Метод измерения.

В баллон при помощи компрессора накачивается некоторое количество воздуха, чтобы давление в нем стало выше атмосферного. При накачивании воздух в баллоне сжимается и его температура повышается. Вследствие теплообмена с окружающей средой через некоторое время температура воздуха в баллоне сравнивается с температурой окружающей среды. Это состояние для некоторого объема газа в баллоне отмечено на диаграмме $P - V$ точкой 1 (рис.3) и характеризуется параметрами P_1, V_1, T_1 . Причем

$$P_1 = P_0 + \rho gh_1,$$

где P_0 - атмосферное давление, ρgh_1 - добавочное давление, измеряемое разностью уровней в манометре.

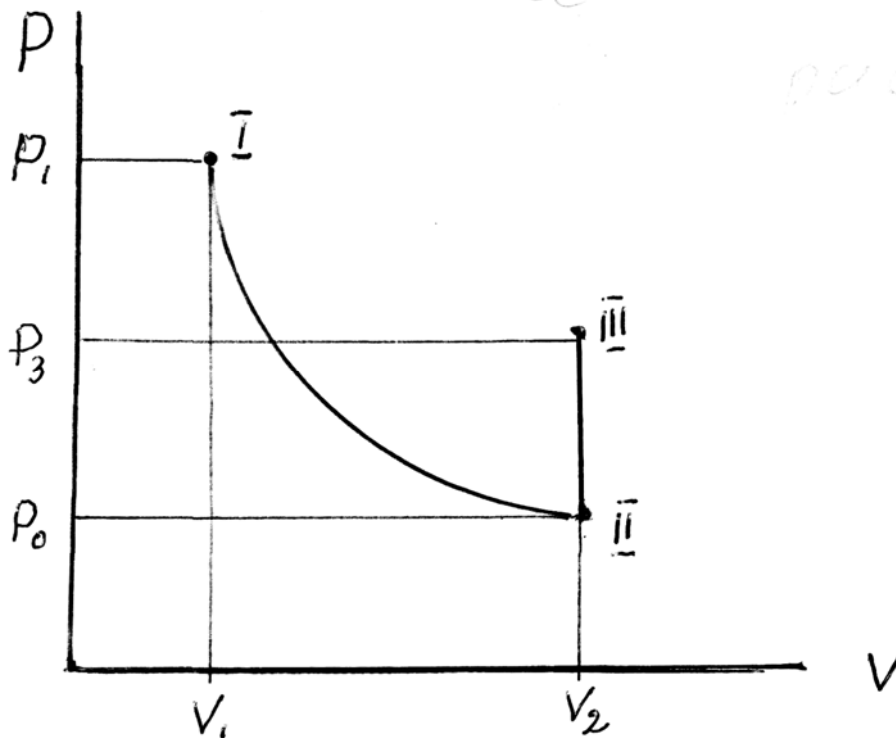


Рис.3. Диаграмма процессов в координатах PV

Открытием крана К2 давление в баллоне сравнивается с атмосферным. Быстрое изменение давления в баллоне происходит практически без теплообмена с окружающей средой. Поэтому процесс при открытии клапана К2 можно считать адиабатным. Это состояние на рис.3 изображено точкой II. Оно характеризуется параметрами $P_2 = P_0, V_2, T_2$. Вследствие адиабатического расширения газа температура его понижается ($T_2 < T_1$). После закрытия клапана К2 в результате теплообмена с окружающей средой газ изохорически ($V = \text{const}$) нагревается до температуры окружающей среды.

На диаграмме $P - V$ этому состоянию соответствует точка III с параметрами $P_3 V_2 T_1$. $P_3 = P_0 + \rho g h_2$, где h_2 - новая разность уровней.

Состояние газа при адиабатном процессе описывается уравнением Пуассона $\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma}$.

При изохорическом процессе $II \rightarrow III$ согласно закону Гей-Люссака давление газа пропорционально его температуре $\left(\frac{P_3}{P_2}\right) = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)$.

Решая совместно два уравнения, получим:

$$\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_3}{P_0}\right)^{\gamma}$$

После логарифмирования и преобразований получим

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_0}{\lg P_1 - \lg P_3}.$$

Так как P_1, P_2, P_0 мало отличаются, то можно заменить логарифмы чисел числами.

$$\gamma = \frac{P_0 + \rho gh_1 - P_0}{P_0 + \rho gh_1 - (P_0 + \rho gh_2)} = \frac{\rho gh_1}{\rho gh_1 - \rho gh_2} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (21)$$

9. Порядок выполнения работы

1. Включить электропитание компрессора.
2. Открыть кран К1 и накачать в баллон воздух так, чтобы разность уровней в манометре стала около 200 мм. (При выключенном компрессоре горит индикаторная лампа).
3. Закрыть кран К1, выключить компрессор и выждать 2-3 минуты, пока разность уровней в манометре не перестанет меняться. Отсчитать по шкале манометра разность уровней h_1 мм.
4. Резким нажатием на клапан К2 соединить на короткое время баллон с атмосферой (уровни жидкости в манометре сравняются). Через 3-4 минуты (после так уровни жидкости в манометре стабилизируются) отсчитать значение h_2 мм. Результаты заносит таблицу. Опыт повторить не менее 5 раз.
5. Рассчитать по формуле (21) $\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$ - показатель адиабаты для каждого

опыта.

№	h_1 мм.	h_2 мм	γ
1			
2			
3			
4			
5			

6. Найти среднее значение $\langle \gamma \rangle$ и сравнить с теоретическим, вычисленным по формуле

$$\gamma_{\text{теор}} = \frac{i + 2}{i} \quad (\text{воздух считать двухатомным газом}).$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими параметрами характеризуется состояние термодинамической системы? Сформулируйте и запишите уравнение состояния идеального газа.
2. Какова физическая природа давления газа? Запишите основное уравнение МКТ идеального газа.

3. Объяснить, как получено выражение для средней энергии поступательного движения молекул идеального газа. Чему равно число степеней свободы молекул идеального газа? Какова средняя энергия теплового движения молекул идеального газа?
4. Как рассчитывается внутренняя энергия идеального газа? Как изменяется внутренняя энергия газа в различных процессах?
5. Как рассчитывается работа расширения идеального газа? Каков физический смысл молярной газовой постоянной?
6. Сформулируйте и запишите I начало термодинамики. Рассмотрите применение первого начала термодинамики к изопроцессам в газах.
7. Вывести формулу для расчета теплоемкостей газов C_V и C_P . Какова связь между ними?
8. Каким уравнением описывается адиабатный процесс? Как меняется температура при адиабатном сжатии и адиабатном расширении газа?
9. Объясните сущность метода определения $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$, использованного в данной работе. Изобразите графически происходящие процессы и выведите расчетную формулу.

Клабуков Афанасий Григорьевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА C_p/C_v
МЕТОДОМ АДИАБАТНОГО РАСШИРЕНИЯ**

Методические указания
к выполнению лабораторной работы по физике №6а
для студентов направлений (специальностей) 150200(150202),
280000(280100), 140000(140211), 190600(190601, 190603),
220300(220301), 200000(200503), 190200(190201, 190202),
151000(151001, 151002), 190600(190601), 050501,
260600(260601), 080000(080502), 190700(190702),
220000(220200)

Редактор Н.М. Устюгова

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л. 1,0	Уч.-изд. л. 1,0
Заказ	Тираж 200	Цена свободная

РИЦ Курганского государственного университета.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.