Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по дисциплине
«ФИЗИКА»

для студентов направления подготовки
Профессиональное обучение (по отраслям), профили:
«Экономика и управление», «Информационные технологии и системы», «Электроснабжение», «Безопасность технологических процессов и производств», «Горное дело. Подземная разработка пластовых месторождений», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд», «Горное дело. Технологическая безопасность и горноспасательное дело», «Профессиональная психология», «Управление персоналом», в 9-и частях. Часть 3. Термодинамика

С о с т а в и т е л и:
Валентин Иванович Сафонов

Печатается в авторской редакции.
Компьютерная верстка и оригинал-макет автора.

Подписано в печать ______________
Формат 60x84 $^{1}/_{16}$. Бумага типограф. Гарнитура Times
Печать офсетная. Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _______
Тираж 100 экз. Изд. №______. Заказ №______. Цена договорная.

Издательство Луганского государственного
университета имени Владимира Даля

Свидетельство о государственной регистрации издательства
МИ-СРГ ИД 000003 от 20 ноября 2015 г.

Адрес издательства: 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а
Телефон: 8 (0642) 41-34-12, **факс:** 8 (0642) 41-31-60
E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com **http:** //izdat.dahluniver.ru/

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»
Стахановский инженерно-педагогический институт менеджмента
Кафедра общеинженерных дисциплин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по дисциплине
«ФИЗИКА»

для студентов направления подготовки
Профессиональное обучение (по отраслям), профили:
«Экономика и управление», «Информационные технологии и системы», «Электроснабжение», «Безопасность технологических процессов и производств», «Горное дело. Подземная разработка пластовых месторождений», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд», «Горное дело. Технологическая безопасность и горноспасательное дело», «Профессиональная психология», «Управление персоналом», в 9-и частях.
Часть 3. Термодинамика

Луганск 2022

УДК 530

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом
ГОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»
(протокол № ___ от _______ 20 г.)

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине **«Физика»** для студентов направления подготовки **Профессиональное обучение (по отраслям)**, профили: «Экономика и управление», «Информационные технологии и системы», «Электроснабжение», «Безопасность технологических процессов и производств», «Горное дело. Подземная разработка пластовых месторождений», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд», «Горное дело. Технологическая безопасность и горноспасательное дело», «Профессиональная психология», «Управление персоналом», в 9-и частях. Часть 3. Термодинамика. /Сост.: В.И. Сафонов. − **Стаханов**: изд-во ЛГУ им. В.Даля, 2022. – 43 с.

В методических указаниях приведен минимальный объём теоретических сведений, необходимых для подготовки к практическим занятиям по разделу «Термодинамика» общего курса физики, примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения.

Предназначены для студентов профиля «Экономика и управление», «Информационные технологии и системы», «Электроснабжение», «Безопасность технологических процессов и производств», «Горное дело. Подземная разработка пластовых месторождений», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд», «Горное дело. Технологическая безопасность и горноспасательное дело», «Профессиональная психология», «Управление персоналом».

Составитель: доц. Сафонов В.И.

Ответственный за выпуск: доц. Сафонов В.И.

Рецензент: доц. Петров А.Г.

Рекомендованная литература

1. Старостина И.А., Краткий курс физики для бакалавров: учебное пособие / И.А. Старостина, Е.В. Бурдова, Р.С. Сальманов - Казань: Издательство КНИТУ, 2016. - 364 с. - ISBN 978-5-7882-2035-2 - Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. - URL: http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788220352.html
2. Полянская Е.Е., Зайковский О.И. Курс физики. 2-е изд., испр. и доп. − Оренбург: Изд-во ОГПУ, 2016. − 148 с. − ISBN 978-5-85859-643-1. Режим доступа: https://www.twirpx.com/file/2170493/
3. Варава А.Н., Общая физика: учебное пособие для вузов / Варава А.Н. - М.: Издательский дом МЭИ, 2017. - ISBN 978-5-383-01085-3 - Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. - URL: http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383010853.html
4. Варава А.Н., Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие / Варава А.Н., Губкин М.К. - М.: Издательский дом МЭИ, 2017. - ISBN 978-5-383-01108-9 - Текст : электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. - URL: http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383011089.html
5. Цаплев В.М. Курс физики для дистанционного обучения. Физические основы механики. Молекулярная физика и термодинамика. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2015. − 144 с. Режим доступа: https://www.twirpx.com/file/1713586/
6. Трофимова Т.И., Фирсов А.В. Курс физики с примерами решения задач. В 2 томах. Том 1. М.: КноРус, 2015. − 568 с. − ISBN 978-5-406-04253-3. Режим доступа: https://www.twirpx.com/file/1991197/
7. Повзнер А.А., Андреева А.Г., Шумихина К.А. Физика. Базовый курс. Часть 1. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. − 168 с. − ISBN 978-5-7996-1701-1. Режим доступа: https://www.twirpx.com/file/2061058/
8. Повзнер А.А., Андреева А.Г., Шумихина К.А. Физика. Базовый курс. Часть 2. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. − 144 с. − ISBN 978-5-7996-1948-0. Режим доступа: https://www.twirpx.com/file/2242224/

$l = 8$ м (рис. 3.8). Пренебрегая сопротивлением воздуха движению воды, найти избыточное давление p воды в рукаве, если площадь S_2, поперечного сечения рукава равна 50 см^2?

12.54. Бак высотой $H = 2$ м до краев заполнен жидкостью. На какой высоте h должно быть проделано отверстие в стенке бака, чтобы место падения струи, вытекающей из отверстия, было на максимальном от бака расстоянии?

12.55. Вода течет по круглой гладкой трубе диаметром $d = 5$ см со средней по сечению скоростью $\langle v \rangle = 10$ см/с. Определить число Рейнольдса Re для потока жидкости в трубе и указать характер течения жидкости.

12.56. По трубе течет машинное масло. Максимальная скорость v_{max}, при которой движение масла в этой трубе остается еще ламинарным, равна 3,2 см/с. При какой скорости v движение глицерина в той же трубе переходит из ламинарного в турбулентное?

12.57. В трубе с внутренним диаметром $d = 3$ см течет вода. Определить максимальный массовый расход $Q_{m\,max}$ воды при ламинарном течении.

12.58. Медный шарик диаметром $d = 1$ см падает с постоянной скоростью в касторовом масле. Является ли движение масла, вызванное падением в нем шарика, ламинарным? Критическое значение числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_{КР} = 0{,}5$.

12.59. Латунный шарик диаметром $d = 0{,}6$ мм падает в глицерине. Определить: 1) скорость v установившегося движения шарика; 2) является ли при этой скорости обтекание шарика ламинарным?

12.60. При движении шарика радиусом $r_1 = 2{,}4$ мм в касторовом масле ламинарное обтекание наблюдается при скорости v_1 шарика, не превышающей 10 см/с. При какой минимальной скорости v_2 шарика радиусом $r_2 = 1$ мм в глицерине обтекание станет турбулентным?

Содержание

РАЗДЕЛ 3
ТЕРМОДИНАМИКА

3.1. Физические основы термодинамики

Основные формулы

• Связь между молярной (C_m) и удельной (c) теплоемкостями газа

$C_m = cM$,

где M – молярная масса газа.

• Молярные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно равны

$C_V = iR/2$;

$C_p = (i + 2)R/2$,

где i – число степеней свободы;

R – молярная газовая постоянная.

Здесь и далее в целях упрощения записи в индексах обозначений молярной теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме букву «m» будем опускать.

• Удельные теплоемкости при постоянных объеме и давлении соответственно равны

$$c_V = \frac{i}{2}\frac{R}{M};$$

$$c_P = \frac{i+2}{2}\frac{R}{M}.$$

• Уравнение Майера

$C_P - C_V = R$.

• Показатель адиабаты

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{2}.$$

• Внутренняя энергия идеального газа

$U = N\langle\varepsilon\rangle = \nu C_V T$,

где $\langle\varepsilon\rangle$ – средняя кинетическая энергия молекулы;

N – число молекул газа;

ν – количество вещества.

• Работа, связанная с изменением объема газа, в общем случае вычисляется по формуле

20 см/с. Определить скорость v_2 в узкой части трубы, диаметр d_2 которой в 1,5 раза меньше диаметра d_1 широкой части.

12.46. В широкой части горизонтально расположенной трубы нефть течет со скоростью $v_1 = 2$ м/с. Определить скорость v_2 нефти в узкой части трубы, если разность Δp давлений в широкой и узкой частях ее равна 6,65 кПа.

12.47. В горизонтально расположенной трубе с площадью S_1 поперечного сечения, равной 20 см^2, течет жидкость. В одном месте труба имеет сужение, в котором площадь S_2 сечения равна 12 см^2. Разность Δh уровней в двух манометрических трубках, установленных в широкой и узкой частях трубы, равна 8 см. Определить объемный расход Q_V жидкости.

12.48. Горизонтальный цилиндр насоса имеет диаметр $d_1 = 20$ см. В нем движется со скоростью $v_1 = 1$ м/с поршень, выталкивая воду через отверстие диаметром $d_2 = 2$ см. С какой скоростью v_2 будет вытекать вода из отверстия? Каково будет избыточное давление p воды в цилиндре?

12.49. К поршню спринцовки, расположенной горизонтально, приложена сила $F = 15$ Н. Определить скорость v истечения воды из наконечника спринцовки, если площадь S поршня равна 12 см^2.

12.50. Давление p ветра на стену равно 200 Па. Определить скорость v ветра, если он дует перпендикулярно стене. Плотность ρ воздуха равна 1,29 кг/м^3.

12.51. Струя воды диаметром $d = 2$ см, движущаяся со скоростью $v = 10$ м/с, ударяется о неподвижную плоскую поверхность, поставленную перпендикулярно струе. Найти силу F давления струи на поверхность, считая, что после удара о поверхность скорость частиц воды равна нулю.

12.52. Бак высотой $h = 1,5$ мм наполнен до краев водой. На расстоянии $d = 1$ м от верхнего края бака образовалось отверстие малого диаметра. На каком расстоянии l от бака падает на пол струя, вытекающая из отверстия?

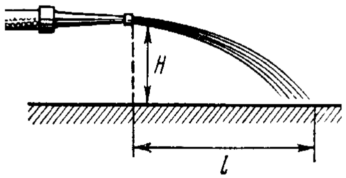


Рис. 3.8

12.53. Струя воды с площадью S_1 поперечного сечения, равной 4 см^2, вытекает в горизонтальном направлении из брандспойта, расположенного на высоте $H = 2$ м над поверхностью Земли, и падает на эту поверхность на расстоянии стям стеклышек, надо растягивать их, чтобы разъединить? Считать, что вода полностью смачивает стекло и поэтому меньший радиус r кривизны боковой поверхности водяного слоя равен половине расстояния d между стеклышками.

12.37. Глицерин поднялся в капиллярной трубке на высоту h = 20 мм. Определить поверхностное натяжение σ глицерина, если диаметр d канала трубки равен 1 мм.

12.38. Диаметр d канала стеклянной трубки чашечного ртутного барометра равен 5 мм. Какую поправку Δp нужно вводить в отсчеты по этому барометру, чтобы получить верное значение атмосферного давления?

12.39. Разность Δh уровней жидкости в коленах U-образной трубки равна 23 мм. Диаметры d_1 и d_2 каналов в коленах трубки равны соответственно 2 и 0,4 мм. Плотность ρ жидкости равна 0,8 г/см^3. Определить поверхностное натяжение α жидкости.

12.40. В жидкость нижними концами опущены две вертикальные капиллярные трубки с внутренними диаметрами d_1 = 0,05 см и d_2 = 0,1 см. Разность Δh уровней жидкости в трубках равна 11,6 мм. Плотность ρ жидкости равна 0,8 г/см^3. Найти поверхностное натяжение σ жидкости.

12.41. В воду опущена на очень малую глубину стеклянная трубка с диаметром d внутреннего канала, равным 1 мм. Найти массу m вошедшей в трубку воды.

12.42. Капиллярная трубка диаметром d = 0,5 мм наполнена водой. На нижнем конце трубки вода повисла в виде капли. Эту каплю можно принять за часть сферы радиуса r = 3 мм. Найти высоту h столбика воды в трубке.

12.43. Широкое колено U-образного ртутного манометра имеет диаметр d_1 = 4 см, узкое d_2 = 0,25 см. разность Δh уровней ртути в обоих коленах равна 200 мм. Найти давление p, которое показывает манометр, приняв во внимание поправку на капиллярность,

12.44. На какую высоту h поднимается вода между двумя параллельными друг другу стеклянными пластинками, если расстояние d между ними равно 0,2 мм?

Гидродинамика

12.45. Вода течет в горизонтально расположенной трубе переменного сечения. Скорость v_1 воды в широкой части трубы равна

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

где V_1 – начальный объем газа;

V_2 – конечный объем газа.

Работа газа:

а) при изобарном процессе (p = const)

$A = p(V_2 - V_1)$;

б) при изотермическом процессе (T = const)

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_1}{V_1};$$

в) при адиабатном процессе

$$A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right],$$

где T_1 – начальная температура газа;

T_2 – конечная температура газа.

• Уравнение Пуассона (уравнение газового состояния при адиабатном процессе)

pV^{γ} = const.

• Связь между начальным и конечным значениями параметров состояний газа при адиабатном процессе:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}.$$

• Первое начало термодинамики в общем случае записывается в виде

$Q = \Delta U + A$,

где Q – количество теплоты, сообщённое газу;

ΔU – изменение его внутренней энергии;

A – работа, совершаемая газом против внешних сил.

Первое начало термодинамики:

а) при изобарном процессе

$$Q = \Delta U + A = \frac{m}{M} C_V \Delta T + \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{m}{M} C_p T;$$

б) при изохорном процессе ($A = 0$)

$$Q = \Delta U = \frac{m}{M} C_V \Delta T;$$

в) при изотермическом процессе ($\Delta U = 0$)

$$Q = A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1};$$

г) при адиабатном процессе ($Q = 0$)

$$A = -\Delta U = -\frac{m}{M} C_V \Delta T.$$

• Термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла (Карно) в общем случае

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом (газом) от нагревателя;

Q_2 – количество теплоты, переданное рабочим телом охладителю.

КПД цикла Карно

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 – температура нагревателя;

T_2 – температура охладителя.

• Изменение энтропии

$$\Delta S = \int_A^B \frac{dQ}{T},$$

где A и B – пределы интегрирования, соответствующие начальному и конечному состояниям системы. Так как процесс равновесный, то интегрирование проводится по любому пути.

• Формула Больцмана

$S = k \ln(W)$,

где S – энтропия системы;

W – термодинамическая вероятность ее состояния;

k – постоянная Больцмана.

3.1.1. Примеры решения задач

Пример 1. Вычислить удельные теплоемкости неона и водоро-

ствия молекул при этом расширении газа.

12.27. В сосуде вместимостью $V_1 = 1$ л содержится $m = 10$ г азота. Определить изменение ΔT температуры азота, если он расширяется в пустоту до объема $V_2 = 10$ л.

12.28. Газообразный хлор массой $m = 7{,}1$ г находится в сосуде вместимостью $V_1 = 0{,}1$ л. Какое количество теплоты Q необходимо подвести к хлору, чтобы при расширении его в пустоту до объема $V_2 = 1$ л температура газа осталась неизменной?

Поверхностное натяжение. Капиллярные явления

12.29. Масса m 100 капель спирта, вытекающего из капилляра, равна 0,71 г. Определить поверхностное натяжение σ спирта, если диаметр d шейки капли в момент отрыва равен 1 мм.

12.30. Трубка имеет диаметр $d_1 = 0{,}2$ см. На нижнем конце трубки повисла капля воды, имеющая в момент отрыва вид шарика. Найти диаметр d_2 этой капли.

12.31. Какую работу A нужно совершить, чтобы, выдувая мыльный пузырь, увеличить его диаметр от $d_1 = 1$ см до $d_2 = 11$ см? Считать процесс изотермическим.

12.32. Две капли ртути радиусом $r = 1$ мм каждая слились в одну большую каплю. Какая энергия E выделится при этом слиянии? Считать процесс изотермическим.

12.33. Воздушный пузырек диаметром $d = 2$ мкм находится в воде у самой ее поверхности. Определить плотность ρ воздуха в пузырьке, если воздух над поверхностью воды находится при нормальных условиях.

12.34. На сколько давление p воздуха внутри мыльного пузыря больше атмосферного давления p_0, если диаметр пузыря $d = 5$ см?

12.35. Определить силу F, прижимающую друг к другу две стеклянные пластинки размерами 10×10 см, расположенные параллельно друг другу, если расстояние l между пластинками равно 22 мкм, а пространство между ними заполнено водой. Считать мениск вогнутым с диаметром d, равным расстоянию между пластинками.

12.36. Покровное стеклышко для микроскопа имеет вид круга диаметром $d = 16$ мм. На него нанесли воду массой $m = 0{,}1$ г и наложили другое такое же стеклышко. в результате чего оба стеклышка слиплись. С какой силой F, перпендикулярной поверхномассой m = 0,5 г; 2) воды массой m = 1 г.

12.17. Газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при критической температуре и занимает объем V, в $n = 3$ раза превышающий критический объем $V_{КР}$. Во сколько раз давление p газа в этом состоянии меньше критического давления $p_{КР}$?

12.18. При какой температуре T находится оксид азота, если ее объем V и давление p в $k = 3$ раза превышают соответствующие критические значения $V_{КР}$ и $p_{КР}$? Критическая температура $T_{КР}$ оксида азота равна 180°K.

12.19. Газ находится в критическом состоянии. Как и во сколько раз его давление p будет отличаться от критического $p_{КР}$ одновременном увеличении температуры T и объема V газа в $k = 2$ раза?

12.20. Газ находится в критическом состоянии. Во сколько раз возрастет давление p газа, если его температуру T изохорно увеличить в $k = 2$ раза?

Внутренняя энергия

12.21. Определить внутреннюю энергию U азота, содержащего количество вещества $\nu = 1$ моль, при критической температуре $T_{КР} = 126$°K. Вычисления выполнить для четырех значений объемов V: 1) 20 л; 2) 2 л; 3) 0,2 л; 4) $V_{КР}$.

12.22. Кислород, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при температуре $T = 350$°K. Найти относительную погрешность ε в вычислении внутренней энергии газа, если газ рассматривать как идеальный. Расчеты выполнить для двух значений объема V: 1) 2 л; 2) 0,2 л.

12.23. Найти внутреннюю энергию U углекислого газа массой m = 132 г при нормальном давлении p_0 и температуре $T = 300$°K в двух случаях, когда газ рассматривают: 1) как идеальный; 2) как реальный.

12.24. Кислород массой m = 8 г занимает объем V = 20 см при температуре $T = 300$°K. Определить внутреннюю энергию U кислорода.

12.25. Определить изменение ΔU внутренней энергии неона, содержащего количество вещества $\nu = 1$ моль, при изотермическом расширении его объема от V_1 = 1 л до V_2 = 2 л.

12.26. Объем углекислого газа массой m = 0,1 кг увеличился от $V_1 = 10^3$ л до $V_2 = 10^4$ л. Найти работу A внутренних сил взаимодей-

да при постоянных объеме (c_V) и давлении (c_p), принимая эти газы за идеальные.

Решение. Удельные теплоемкости идеальных газов выражаются формулами

$$c_V = \frac{i}{2}\frac{R}{M}; \tag{1}$$

$$c_p = \frac{i+2}{2}\frac{R}{M}. \tag{2}$$

Для неона (одноатомный газ) $i_1 = 3$, $M_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Подставив в формулы (1) и (2) значения i_1, M_1 и R и, произведя вычисления, найдем:

c_{V1} = 624 Дж/(кг·K);

c_{p1} = 1,04 кДж/(кг·K).

Для водорода (двухатомный газ) $i_2 = 5$, $M_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Вычисление по формулам (1) и (2) дает следующие значения удельных теплоемкостей водорода:

c_{V2} = 10,4 кДж/(кг·K);

c_{p2} = 14,6 кДж/(кг·K).

Пример 2. Вычислить удельные теплоемкости c_V и c_p смеси неона и водорода. Массовые доли газов соответственно равны $\omega_1 = 0{,}8$ и $\omega_2 = 0{,}2$. Значения удельных теплоемкостей газов взять из примера 1.

Решение. Удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме c_V найдем из следующих рассуждений. Теплоту, необходимую для нагревания смеси на ΔT, выразим двумя соотношениями (1) и (2):

$$Q = c_v(m_1 + m_2)\Delta T, \tag{1}$$

где c_V – удельная теплоемкость смеси;

m_1 – масса неона;

m_2 – масса водорода,

$$Q = (c_{V1}m_1 + c_{V2}m_2)\Delta T, \tag{2}$$

где c_{V1} и c_{V2} – удельные теплоемкости неона и водорода соответственно.

Приравняв правые части выражений (1) и (2) и разделив обе части полученного равенства на ΔT, найдем

$c_V(m_1 + m_2) = c_{V1}m_1 + c_{V2}m_2$,

откуда

$$c_V(m_1+m_2)=c_{V1}\frac{m_1}{m_1+m_2}+c_{V2}\frac{m_2}{m_2+m_1}.$$

Отношения $\omega_1 = m_1/(m_1+m_2)$ и $\omega_1 = m_2/(m_1+m_2)$ выражают массовые доли соответственно неона и водорода. С учетом этих обозначений последняя формула, примет вид

$c_V = c_{V1}\omega_1 + c_{V2}\omega_2$.

Подставив в эту формулу числовые значения величин, найдем

$c_V = 2{,}58$ кДж/(кг·K).

Рассуждая таким же образом, получим формулу для вычисления удельной теплоёмкости смеси при постоянном давлении:

$c_p = c_{p1}\omega_1 + c_{p2}\omega_2$.

Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$c_p = 3{,}73$ кДж/(кг·K).

Пример 3. Определить количество теплоты, поглощаемой водородом массой $m = 0{,}2$ кг при нагревании его от температуры $t_1 = 0$°C до температуры $t_2 = 100$°C при постоянном давлении. Найти также изменение внутренней энергии газа и совершаемую им работу.

Решение. Количество теплоты Q, поглощаемое газом при изобарном нагревании, определяется по формуле

$$Q = mc_p\Delta T, \quad (1)$$

где m – масса нагреваемого газа;

c_p – его удельная теплоемкость при постоянном давлении;

ΔT – изменение температуры газа.

Как известно, $c_p = \frac{i+2}{2}\frac{R}{M}$. Подставив это выражение c_p в формулу (1), получим

$$Q = m\frac{i+2}{2}\frac{R}{M}\Delta t.$$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$Q = 291$ кДж.

Внутренняя энергия выражается формулой $U = \frac{i}{2}R\Delta T$, следовательно, изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{m}R\Delta T.$$

двух значений объема: 1) $V = 2$ л; 2) $V = 0{,}2$ л.

12.5. Внутреннюю полость толстостенного стального баллона наполовину заполнили водой при комнатной температуре. После этого баллон герметически закупорили и нагрели до температуры $T = 650$°K. Определить давление p водяного пара в баллоне при этой температуре.

12.6. Давление p кислорода равно 7 МПа, его плотность $\rho = 100$ кг/м^3. Найти температуру T кислорода.

12.7. Определить давление p водяного пара массой $m = 1$ кг, взятого при температуре $T = 380$°K и объеме V: 1) 1000 л; 2) 10 л; 3) 2 л.

Критическое состояние

12.8. Вычислить постоянные a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса для азота, если известны критические температуры $T_{кр} = 126$°K и давление $p_{КР} = 3{,}39$ МПа.

12.9. Вычислить критические температуру $T_{КР}$ и давление $p_{КР}$: 1) кислорода; 2) воды.

12.10. Критическая температура $T_{КР}$ аргона равна 151°K и критическое давление $p_{КР} = 4{,}86$ МПа. Определить по этим данным критический молярный объем $V_{mКР}$ аргона.

12.11. Жидким пентаном C_5H_{12}, плотность ρ которого равна 626 кг/м^3, частично заполняют прочную кварцевую колбу и запаивают ее так, что над пентаном остаются только насыщающие пары. Определить, какую часть ε внутреннего объема колбы должен занимать пентан, чтобы можно было наблюдать при нагревании переход вещества через критическую точку. Постоянная b Ван-дер-Ваальса равна $14{,}5\cdot10^{-5}$ м^3/моль.

12.12. Определить наибольший объем $V_{\max}$, который может занимать вода, содержащая количество вещества $\nu = 1$ моль.

12.13. Определить плотность ρ водяных паров в критическом состоянии.

12.14. Определить наибольшее давление $p_{\max}$ насыщающих водяных паров.

12.15. Во сколько раз концентрация $n_{КР}$ молекул азота в критическом состоянии больше концентрации n_0 молекул при нормальных условиях?

12.16. Найти критический объем $V_{КР}$ веществ: 1) кислорода

$$\frac{1}{6\pi\rho_{CB}gd^3}=\frac{1}{6\pi\rho_{ГЛ}gd^3}+3\pi\eta dv\ ,$$

откуда

$$v=\frac{1}{6\pi\rho_{CB}gd^3}\ . \qquad (2)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2) относительно d, найдем

$$d=\sqrt[3]{\frac{18\eta^2\,\mathrm{Re}}{\rho_{ГЛ}(\rho_{CB}-\rho_{ГЛ})g}}\ .$$

Максимальное значение диаметра $d_{\max}$ при котором движение остается еще ламинарным, соответствует критическому значению числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_{КР}$. Поэтому

$$d_{\max}=\sqrt[3]{\frac{18\eta^2\,\mathrm{Re}_{КР}}{\rho_{ГЛ}(\rho_{CB}-\rho_{ГЛ})g}}\ .$$

Подставив сюда значения величин η, $\mathrm{Re}_{КР}$, ρ_{CB}, $\rho_{ГЛ}$ и, произведя вычисления, получим

$d_{\max}$ = 5,29 мм.

3.2.2. Задачи для самостоятельного решения

Уравнение Ван-дер-Ваальса

12.1. В сосуде вместимостью V = 10 л находится азот массой m = 0,25 кг. Определить: 1) внутреннее давление p' газа: 2) собственный объем V' молекул.

12.2. Определить давление p, которое будет производить кислород, содержащий количество вещества v = 1 моль, если он занимает объём V = 0,5 л при температуре T = 300°К. Сравнить полученный результат с давлением, вычисленным по уравнению Менделеева-Клапейрона.

12.3. В сосуде вместимостью V = 0,3 л находится углекислый газ, содержащий количество вещества v = 1 моль при температуре T = 300°К. Определить давление p газа: 1) по уравнению Менделеева-Клапейрона; 2) по уравнению Ван-дер-Ваальса.

12.4. Криптон, содержащий количество вещества v = 1 моль, находится при температуре T = 300°К. Определить относительную погрешность $\varepsilon = \Delta p/p$, которая будет допущена при вычислении давления, если вместо уравнения Ван-дер-Ваальса воспользоваться уравнением Менделеева-Клапейрона. Вычисления выполнить для

После подстановки в эту формулу числовых значений величин и вычислений получим ΔU = 208 кДж.

Работу расширения газа определим по формуле, выражающей первое начало термодинамики:

$Q = \Delta U + A$,

откуда

$A = Q - \Delta U$.

Подставив значения Q и ΔU, найдем

A = 83 кДж.

Пример 4. Кислород занимает объем V_1 = 1 м^3 и находится под давлением p_1 = 200 кПа. Газ нагрели сначала при постоянном давлении до объема V_2 = 3 м^2, *а* затем при постоянном объеме до давления p_2 = 500 кПа. Построить график процесса и найти: 1) изменение ΔU внутренней энергии газа; 2) совершенную им работу A; 3) количество теплоты Q, переданное газу.

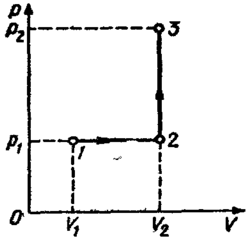


Рис. 3.1

Решение. Построим график процесса (рис. 3.1). На графике точками *1*, *2*, *3* обозначены состояния газа, характеризуемые параметрами (p_1, V_1, T_1), (p_1, V_2, T_2), (p_2, V_2, T_3).

1. Изменение внутренней энергии газа при переходе его из состояния *1* в состояние *3* выражается формулой

$\Delta U = c_V m\Delta T$,

где c_V – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме;

m – масса газа;

ΔT – разность температур, соответствующих конечному 3 и начальному 1 состояниям, т.е. $\Delta T = T_3 - T_1$.

Так как $c_V=\frac{i}{2}\frac{R}{M}$, где M – молярная масса газа, то

$$\Delta U=\frac{i}{2}\frac{m}{M}R(T_3-T_1)\ . \qquad (1)$$

Температуры T_1 и T_3 выразим из уравнения Менделеева-

Клапейрона ($pV = \frac{m}{M}RT$):

$$T_1 = \frac{Mp_1V_1}{mR};$$

$$T_2 = \frac{Mp_2V_2}{mR}.$$

С учетом этого равенство (1) перепишем в виде

$$\Delta U = \frac{i}{2}(p_2V_2 - p_1V_1).$$

Подставим сюда значения величин (учтем, что для кислорода, как двухатомного газа, $i = 5$) и произведем вычисления:

$\Delta U = 3{,}25$ МДж.

2. Полная работа, совершаемая газом, равна

$A = A_1 + A_2$,

где A_1 – работа на участке 1–2;

A_2 – работа на участке 2–3.

На участке 1–2 давление постоянно ($p = \text{const}$). Работа в этом случае выражается формулой

$A_1 = p_1\Delta V = p_1(V_2 - V_1)$.

На участке *2–3* объем газа не изменяется и, следовательно, работа газа на этом участке равна нулю ($A_2 = 0$). Таким образом,

$A = A_1 = p_1(V_2 - V_1)$.

Подставив в эту формулу значения физических величин, произведем вычисления:

$A = 0{,}4$ МДж.

3. Согласно первому началу термодинамики, количество теплоты Q, переданное газу, равно сумме работы A, совершенной газом, и изменению ΔU внутренней энергии:

$Q = A + \Delta U$, или $Q = 3{,}65$ МДж.

Пример 5. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $v = 1$ моль, находится под давлением $p_1 = 250$ кПа и занимает объем $V_1 = 10$ л. Сначала газ изохорно нагревают до температуры $T_2 = 400$°K. Далее, изотермически расширяя, доводят его до первоначального давления. После этого путем изобарного сжатия возвращают газ в начальное состояние. Определить термический КПД η цикла.

лением воздуха.

Пример 7. В сосуде с глицерином падает свинцовый шарик. Определить максимальное значение диаметра шарика, при котором движение слоев глицерина, вызванное падением шарика, является еще ламинарным. Движение считать установившимся.

Решение. Если в вязкой жидкости движется тело, то вместе с ним, как одно целое, движется и прилипший к телу слой жидкости. Этот слой вследствие внутреннего трения увлекает за собой и соседние слои. Возникающее при этом движение жидкости является ламинарным или турбулентным в зависимости от размеров в формы тела и его скорости. Характер движения зависит также от свойств жидкости и определяется безразмерным числом Рейнольдса.

Если тело, движущееся в жидкости, имеет форму шара диаметром d, то число Рейнольдса определяется по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}, \qquad (1)$$

а критическое значение этого числа $\mathrm{Re}_{KP} = 0{,}5$.

Скорость v выразим, исходя из следующих соображений. На свинцовый шарик, падающий в глицерине, действуют три силы:

1: сила тяжести шарика

$$P = \rho g V = \frac{1}{6\pi\rho_{CB} g d^3},$$

где ρ_{CB} – плотность свинца;

V– объем шарика;

2: выталкивающая сила, определяемая по закону Архимеда.

$$F_{ВЫТ} = \rho_{ГЛ} V g = \frac{1}{6\pi\rho_{ГЛ} g d^3},$$

где $\rho_{ГЛ}$ – плотность глицерина;

3: сила внутреннего трения, определяемая по формуле Стокса,

$F_{TP} = 6\pi\eta r v = 3\pi\eta d v$.

При установившемся движении шарика в жидкости ($v = \text{const}$) сила тяжести шарика уравновешивается суммой выталкивающей силы и силы внутреннего трения, т.е.

S_2 сечения *II–II*, то высоту h_1 уровня воды в баке можно считать для малого промежутка времени постоянной, а поток установившимся. Для установившегося потока справедливо условие неразрывности струи:

$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad \Rightarrow \quad v_1 = v_2 S_2 / S_1 = v_2 (d/D)^2.$ (1)

Подставив в равенство (1) значения заданных величин и, произведя вычисления, найдем

$v_1 = 0{,}0012$ м/с.

С такой же скоростью будет понижаться уровень в баке. Как видно, эта скорость очень мала по сравнению со скоростью струи.

2. Давление p_1, под которым вода подается в фонтан, найдем по уравнению Бернулли. В случае горизонтальной трубки тока оно имеет вид

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}. \qquad (2)$$

Учтя, что $p_2 = 0$ (под давлением подразумевается избыточное над атмосферным давление), из уравнения (2) получим

$$p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2}. \qquad (3)$$

Так как $v_1 \ll v_2$, то из равенства (3) следует

$$p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2}.$$

После вычислений, произведенных по этой формуле, найдем

$p_1 = 72$ кПа.

3. Высоту h_1 уровня воды в баке найдем из соотношения $p_1 = \rho g h_1$, откуда

$h_1 = p_1 / (\rho g)$.

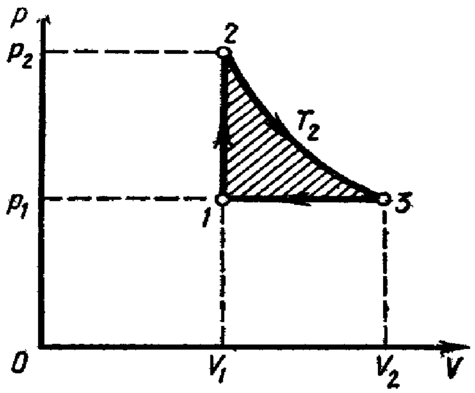
Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$h_1 = 7{,}35$ м.

Зная скорость v_2, с которой вода выбрасывается фонтаном, найдем высоту h_2, на которую она будет выброшена:

$$h_2 = \frac{v_2^2}{2g} = 7{,}35 \text{ м.}$$

Подчеркнем, что высота уровня воды в баке равна высоте, на которую поднимается фонтан воды (по правилу сообщающихся сосудов). Это замечание справедливо, если пренебречь сопротив-



Решение. Для наглядности построим сначала график цикла, который состоит из изохоры, изотермы и изобары. В координатах $p(V)$ этот цикл имеет вид, представленный на рис. 3.2. Характерные точки цикла обозначим *1*, *2*, *3*.

Рис. 3.2

Термический КПД любого цикла определяется выражением

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \qquad (1)$$

где Q_1 – количество теплоты, полученное газом за цикл от нагревателя;

Q_2 – количество теплоты, отданное газом за цикл охладителю.

Заметим, что разность количеств теплоты $Q_1 - Q_2$ равна работе A, совершаемой газом за цикл. Эта работа на графике в координатах $p(V)$ (рис. 2) изображается площадью цикла (площадь цикла заштрихована).

Рабочее вещество (газ) получает количество теплоты Q_1 на двух участках: $Q_{1\text{-}2}$ на участке 1–2 (изохорный процесс) и $Q_{2\text{-}3}$ на участке 2–3 (изотермический процесс). Таким образом,

$Q_1 = Q_{1\text{-}2} + Q_{2\text{-}3}.$

Количество теплоты, полученное газом при изохорном процессе, равно

$Q_{1\text{-}2} = C_V \nu (T_2 - T_1),$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме;

ν – количестве вещества.

Температуру T_1 начального состояния газа найдем, воспользовавшись уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{\nu R}.$$

Подставив числовые значения и, произведя вычисления, получим

$$T_1 = \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 8{,}31} = 300 \text{ K}.$$

Количество теплоты, полученное газом при изотермическом процессе, равно

$$Q_{2-3} = \nu R T_2 \ln \frac{V_2}{V_1},$$

где V_2 – объем, занимаемый газом при температуре T_2 и давлении p_1 (точка *3* на графике).

На участке 3–1 газ отдает количество теплоты Q_2, равное

$Q_2 = Q_{3\text{-}1} = C_p \nu (T_2 - T_1)$,

где C_p – молярная теплоемкость газа при изобарном процессе.

Подставим найденные значения Q_1 и Q_2 в формулу (1):

$$\eta = 1 - \frac{\nu C_p (T_2 - T_1)}{\nu C_v (T_2 - T_1) + \nu R T_2 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}.$$

В полученном выражении заменим отношение объемов V_2/V_1, согласно закону Гей-Люссака, отношением температур ($V_2/V_1 = T_2/T_1$) и выразим C_v и C_p через число степеней свободы молекулы [$C_v = iR/2$, $C_p = (i + 2)R/2$]. Тогда после сокращения на ν и $R/2$ получим

$$\eta = 1 - \frac{(i+2)(T_2 - T_1)}{i(T_2 - T_1) + 2T_2 \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}.$$

Подставив значения i, T_1, T_2 и R и, произведя вычисления, получим

$$\eta = 1 - \frac{(5+2)(400-300)}{5(400-300) + 2 \cdot 400 \ln \frac{400}{300}} = 0{,}041 = 4{,}1\ \%.$$

Пример 6. В цилиндре под поршнем находится водород массой $m = 0{,}02$ кг при температуре $T_1 = 300°$K. Водород начал расширяться адиабатно, увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в пять раз. Найти температуру T_2, в конце адиабатного расширения и работу A, совершенную газом. Изобразить процесс графически.

формуле (1) изменение свободной энергии

$$\Delta E = 2\sigma \Delta S, \qquad (2)$$

где ΔS – изменение поверхности пузыря (одной – внутренней или внешней).

Считая, что мыльный пузырь имеет форму сферы, найдем изменение площади поверхности:

$$\Delta S = 4\pi r_2^2 - 4\pi r_1^2, \qquad (3)$$

где r_1 и r_2 – радиусы сфер, соответствующие начальному V_1 и конечному V_2 объемам: $r_1 = (3V_1/4\pi)^{1/3}$, $r_2 = (2V_2/4\pi)^{1/3}$. Теперь формула (3) примет вид

$$\Delta S = 4\pi \left[\left(\frac{3V_2}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{3V_1}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \right].$$

Учитывая, что $V_2 = 2V_1$, получим после вынесения общего члена $(3V_1/4\pi)^{2/3}$ за скобку

$$\Delta S = 4\pi \left(\frac{3V_1}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \left(2^{\frac{2}{3}} - 1\right).$$

Подставим выражение ΔS в формулу (2):

$$\Delta E = 8\pi\sigma \left(\frac{3V_1}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \left(2^{\frac{2}{3}} - 1\right). \qquad (4)$$

После вычисления по формуле (4) получим

$\Delta E = 106$ мкДж.

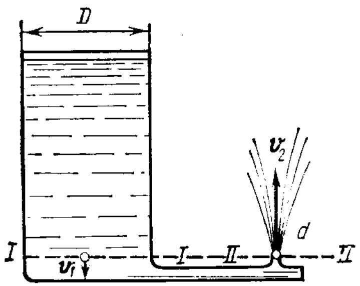


Рис. 3.7

Пример 6. Вода подается в фонтан из большого цилиндрического бака (рис. 3.7) и бьет из отверстия *II–II* со скоростью $v_2 = 12$ м/с. Диаметр D бака равен 2 м, диаметр d сечения *II–II* равен 2 см. Найти: 1) скорость v_1 понижения воды в баке; 2) давление p_1, под которым вода подается в фонтан; 3) высоту h_1 уровня воды в баке и высоту h_2 струи, выходящей из фонтана.

Решение. 1. Проведем сечение *I–I* в баке на уровне сечения *II–II* фонтана. Так как площадь S_1 сечения *I–I* много больше площади

Пример 4. Найти добавочное давление p внутри мыльного пузыря диаметром $d = 10$ см. Определить также работу A, которую нужно совершить, чтобы выдуть этот пузырь.

Решение. Пленка мыльного пузыря имеет две сферические поверхности – внешнюю и внутреннюю. Обе поверхности оказывают давление на воздух, заключенный внутри пузыря. Так как толщина пленки чрезвычайно мала, то диаметры обеих поверхностей практически одинаковы. Поэтому добавочное давление $p = 2{\cdot}2\sigma/r$, где r – радиус пузыря. Так как $r = d/2$, то

$p = 8\sigma/d$.

Подставив в эту формулу значения $\sigma = 40{\cdot}10^{-3}$ Н/м (см. табл. 15) и $d = 0{,}1$ м и, произведя вычисления, найдем

$p = 3{,}2$ Па.

Работа, которую нужно совершить, чтобы, растягивая пленку, увеличить ее поверхность на ΔS, выражается формулой

$A = \sigma\Delta S = \sigma(S - S_0)$.

В данном случае S – общая площадь двух сферических поверхностей пленки мыльного пузыря; S_0 – общая площадь двух поверхностей плоской пленки, затягивающей отверстие трубки до выдувания пузыря. Пренебрегая S_0, получим

$A \approx \sigma S = 2\pi d^2\sigma$.

Сделав подстановку значений величин, получим

$A = 2{,}5$ мДж.

Пример 5. Определять изменение свободной энергии ΔE поверхности мыльного пузыря при изотермическом увеличении его объема от $V_1 = 10$ см^3 до $V_2 = 2V_1$.

Решение. Свободная энергия E поверхности жидкости пропорциональна площади S этой поверхности: $E = \sigma S$, где σ – поверхностное натяжение.

У мыльного пузыря имеются две поверхности – внешняя и внутренняя, площади которых практически равны из-за малой толщины мыльной пленки. Поэтому свободная энергия поверхности (внешней и внутренней вместе) мыльного пузыря

$$E = 2\sigma S. \qquad (1)$$

Так как, по условию задачи, процесс изотермический, то поверхностное натяжение, являющееся для данной жидкости функцией только температуры, остается постоянным: Следовательно, по

Решение. Температуры и объемы газа, совершающего адиабатный процесс, связаны между собой соотношением

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1},$$

где γ – показатель адиабаты (для водорода как двухатомного газа $\gamma = 1{,}4$).

Отсюда получаем выражение для конечной температуры T_2:

$$T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}.$$

Подставляя числовые значения заданных величин, находим

$$T_2 = 300\left(\frac{1}{5}\right)^{1,4-1} = 300\left(\frac{1}{5}\right)^{0,4} \text{ °K}.$$

Прологарифмируем обе части полученного выражения:

$\lg(T_2) = \lg(300) + 0{,}4(\lg(l) - \lg(5)) = 2{,}477 + 0{,}4(-0{,}699) = 2{,}197$,

откуда $T_2 = 157$°K.

Работа A_1 газа при адиабатном расширении определяется по формуле

$$A_1 = \frac{m}{M}c_V(T_1 - T_2) = \frac{m}{M}\frac{i}{2}R(T_1 - T_2).$$

Подставив сюда числовые значения величин, получим

$$A_1 = \frac{0{,}02}{2\cdot 10^{-3}}\frac{5}{2}\cdot 8{,}31(300-157) = 29{,}8\cdot 10^3 \text{ Дж} = 29{,}8 \text{ кДж}.$$

Работа A_2 газа при изотермическом сжатии выражается формулой

$$A_2 = RT_2\frac{m}{M}\ln\frac{V_2}{V_1}.$$

Произведя вычисления по этой формуле, получим

$A_2 = -21$ кДж.

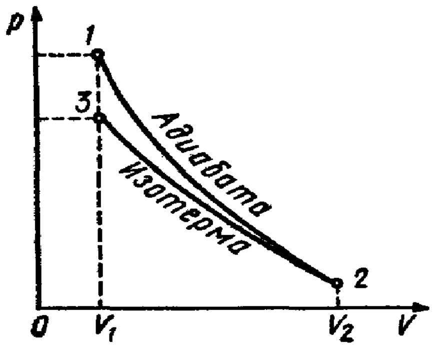


Рис. 3.3

Знак минус показывает, что при сжатии газа работа совершена внешними силами.

Общая работа, совершенная газом при рассмотренных процессах,

$A = A_1 + A_2 =$

$= 29{,}8 + (-21) = 8{,}8$ кДж.

График процесса приведен на рис. 3.3.

Пример 7. Нагреватель тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, имеет температуру $t_1 = 200°С$. Определить температуру T_2 охладителя, если при получении от нагревателя количества теплоты $Q_1 = 1$ Дж машина совершает работу $A = 0{,}4$ Дж? Потери на трение и теплоотдачу не учитывать.

Решение. Температуру охладителя определим, использовав выражение для термического КПД машины, работающей по циклу Карно,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \Rightarrow T_2 = T_1(1-\eta)\,. \qquad (1)$$

Термический КПД тепловой машины выражает отношение количества теплоты, которое превращено в механическую работу A, к количеству теплоты Q_1, которое получено рабочим телом тепловой машины из внешней среды (от нагревателя), т.е. $\eta = A/Q_1$. Подставив это выражение в формулу (1), найдем

$$T_2 = T_1\left(1 - \frac{A}{Q}\right). \qquad (2)$$

Учтя, что $T_1 = 473°K$, после вычисления по формуле (2), получим $T_2 = 284°K$.

Пример 8. Найти изменение ΔS энтропии при нагревании воды массой $m = 100$ г от температуры $t_1 = 0°С$ до температуры $t_2 = 100°С$ и последующем превращении воды в пар той же температуры.

Решение. Найдем отдельно изменение энтропии $\Delta S'$ при нагревании воды и изменение энтропии $\Delta S''$ при превращении ее в

уравнения (1) выразим приведенную температуру τ:

$$\tau = \frac{1}{8}\left(\pi + \frac{3}{\omega^2}\right)(3\omega - 1)\,.$$

Подставив сюда значения π и ω и, произведя вычисления, найдем,

$\tau = 35/32$.

Температура T, как отмечалось, связана с приведенной температурой τ и критической T_{KP} соотношением $T = \tau T_{KP}$. Произведя вычисления по этой формуле, получим

$T = 332°K$.

Пример 3. В цилиндре под поршнем находится хлор массой $m = 20$ г. Определить изменение ΔU внутренней энергии хлора при изотермическом расширении его от $V_1 = 200$ см^3 до $V_2 = 500$ см^3.

Решение. Внутренняя энергия U реального (ван-дер-ваальсового) газа определяется выражением

$$U = \nu\left(C_V T - \frac{a}{V_m}\right). \qquad (1)$$

Выразив в равенстве (1) молярный объем V_m через объем V и количество вещества ν, при этом $V_m = V/\nu$, и, учтя, что $\nu = m/M$, получим

$$U = \frac{m}{M}\left(C_V T - \frac{ma}{a\nu}\right). \qquad (2)$$

Изменение ΔU внутренней энергии в результате изотермического расширения найдем как разность двух значений внутренней энергии при объемах V_2 и V_1:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{m^2 a(V_2 - V_1)}{M^2 V_1 V_2}. \qquad (3)$$

Подставив значения величин в формулу (3) и, произведя вычисления, получим

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{(20\cdot 10^{-3})^2 \cdot 0{,}650\cdot(5-2)\cdot 10^{-4}}{(71\cdot 10^{-3})\cdot 2\cdot 10^{-4}\cdot 5\cdot 10^{-4}} = 154 \text{ Дж}.$$

Отметим, что для идеального газа такое изменение внутренней энергии соответствовало бы нагреванию на 26,3°K.

Решение. Для решения задачи удобно воспользоваться уравнением Ван-дер-Ваальса в приведенной форме, т.е. в такой форме, когда давление p, молярный объем V_m и температура T реального газа с соответствующими критическими параметрами представлены в виде следующих отношений:

$$\pi = \frac{p}{p_{KP}};$$

$$\omega = \frac{V_m}{V_{mKP}};$$

$$\tau = \frac{T}{T_{KP}}.$$

Из этих равенств получим:

$p = \pi p_{KP}$;

$V_m = \omega V_{mKP}$;

$T = \tau T_{KP}$.

Подставив сюда выражения p_{KP}, V_{mKP} и T_{KP} через постоянные Ван-дер-Ваальса a и b, найдем:

$$p = \frac{a}{27b^2}\pi;$$

$$V_m = 3b\omega;$$

$$T = \frac{8a}{27bR}\tau.$$

Полученные выражения p, V_m и T подставим в обычное уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left[\frac{a}{27b^2} + \frac{a}{(3b\omega)^2}\right]\left[3b\omega - b\right] = R\frac{8a}{27bR}\tau.$$

После сокращения на $a/(27b)$ и в правой части на R получим

$$\pi + \frac{3}{\omega^2}(3\omega - 1) = 8\tau. \qquad (1)$$

Это и есть уравнение Ван-дер-Ваальса в приведенной форме. Оно не содержит никаких параметров, характеризующих, индивидуальные свойства газа, и поэтому является универсальным.

Теперь ответим на вопрос задачи. Так как давление остается постоянным ($p = p_{кр}$), то $\pi = 1$; молярный объем газа согласно условию увеличился в два раза, т.е. $V_m = 2V_{mKP}$ следовательно, $\omega = 2$. Из

пар. Полное изменение энтропии выразится суммой $\Delta S'$ и $\Delta S''$.

Как известно, изменение энтропии выражается общей формулой

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_0^2 \frac{dQ}{T}. \qquad (1)$$

При бесконечно малом изменении dT температуры нагреваемого тела затрачивается количество теплоты $dQ = mcdT$, где m – масса тела; c – его удельная теплоемкость. Подставив выражение dQ в равенство (1), найдем формулу для вычисления изменения энтропии при нагревании воды:

$$\Delta S' = \int_{T_1}^{T_2} \frac{mcdT}{T}.$$

Вынесем за знак интеграла постоянные величины и произведем интегрирование, тогда получим

$$\Delta S' = mc\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right).$$

После вычислений получим $\Delta S' = 132$ Дж/K.

При вычислении по формуле (1) изменения энтропии во время превращения воды в пар той же температуры постоянная температура T' выносится за знак интеграла. Вычислив интеграл, получим

$$\Delta S'' = \frac{1}{T}\int_1^2 dQ = \frac{Q}{T}, \qquad (2)$$

где Q – количество теплоты, переданное при превращении нагретой воды в пар той же температуры.

Подставив в равенство (2) выражение количества теплоты $Q = \lambda m$, где λ – удельная теплота парообразования, получим

$$\Delta S'' = \frac{\lambda m}{T}. \qquad (3)$$

Произведя вычисления по формуле (3), получим

$\Delta S'' = 605$ Дж/K.

Полное изменение энтропии при нагревании воды и последующем превращении ее в пар $\Delta S = \Delta S' + \Delta S'' = 737$ Дж/K.

Пример 9. Определить изменение ΔS энтропии при изотермическом расширении кислорода массой $m = 10$ г от объема $V_1 = 25$ л до объема $V_2 = 100$ л.

Решение. Так как процесс изотермический, то в общем выражении энтропии $\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$ температуру выносят за знак интеграла. Выполнив это, получим

$$\Delta S = \frac{1}{T}\int_1^2 dQ = \frac{Q}{T}. \qquad (1)$$

Количество теплоты Q, полученное газом, найдем по первому началу термодинамики: $Q = \Delta U + A$. Для изотермического процесса $\Delta U = 0$, следовательно,

$$Q = A, \qquad (2)$$

а работа A для этого процесса определяется по формуле

$$A = \frac{m}{M} RT \ln\frac{V_2}{V_1}. \qquad (3)$$

С учетом (2) и (3) равенство (1) примет вид

$$\Delta S = \frac{m}{M} R \ln\frac{V_2}{V_1}. \qquad (4)$$

Подставив в (4) числовые значения и, произведя вычисления, получим

$$\Delta S = \frac{10\cdot 10^{-3}}{32\cdot 10^{-3}}\cdot 8{,}31\cdot \ln\frac{100\cdot 10^{-3}}{25\cdot 10^{-3}} = 3{,}6 \text{ Дж/К}.$$

3.1.2. Задачи для самостоятельного решения

Теплоемкость идеального газа

11.1. Вычислить удельные теплоемкости c_v и c_p газов: 1) гелия; 2) водорода; 3) углекислого газа.

11.2. Разность удельных теплоемкостей $c_p - c_v$ некоторого двухатомного газа равна 260 Дж/(кг·К). Найти молярную массу M газа, его удельные теплоемкости c_v и c_p.

11.3. Каковы удельные теплоемкости c_v и c_p смеси газов, содержащей кислород массой $m_1 = 10$ г и азот массой $m = 20$ г?

11.4. Определить удельную теплоемкость c_v смеси газов, содержащей $V_1 = 5$ л водорода и $V_2 = 3$ л гелия. Газы находятся при одинаковых условиях.

11.5. Определить удельную теплоемкость c_p смеси кислорода и азота, если количество вещества ν_1 первого компонента равно 2

Подставив полученное значение V' в выражение (1), найдем

$$k = \frac{mb}{4MV}.$$

После вычисления по этой формуле получим

$k = 0{,}91$ %.

Следовательно, собственный объем молекул составляет 0,91 % от объема сосуда.

Для ответа на второй вопрос задачи надо найти отношение

$$k_1 = \frac{p'}{p}. \qquad (3)$$

Как следует из уравнения (2),

$$p' = \frac{\nu^2 a}{V^2} = \left(\frac{m}{M}\right)^2 \frac{a}{V^2}, \qquad (4)$$

где a – постоянная Ван-дер-Ваальса для одного моля газа.

После вычисления по формуле (4) найдем

$p' = 179$ кПа.

Давление p, производимое газом на стенки сосуда, найдем из уравнения (2):

$$p = \frac{\nu RT}{V - \nu b} - \nu^2 \frac{a}{V^2}.$$

После вычисления по этой формуле получим

$$p = \left[\frac{\frac{0{,}3}{32\cdot 10^{-3}}\cdot 8{,}31\cdot 300}{8\cdot 10^{-3} - \frac{0{,}3}{32\cdot 10^{3}}\cdot 3{,}17\cdot 10^{-5}} - \left(\frac{0{,}3}{32\cdot 10^{-3}}\right)^2 \frac{136\cdot 10^{-3}}{(8\cdot 10^{-3})^2}\right] = 2{,}84\cdot 10^6 \text{ Па}$$

Подставив в выражение (3) значения p' и p и, произведя вычисления, получим

$k_1 = 6{,}3$ %.

Следовательно, давление газа, обусловленное силами притяжения молекул, составляет 6,3 % давления газа на стенки сосуда.

Пример 2. Углекислый газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль находится в критическом состоянии. При изобарном нагревании газа его объем V увеличился в $k = 2$ раза. Определить изменение ΔT температуры газа, если его критическая температура $T_{кр} = 304$°К.

нарным. При значениях Re>>$Re_{КР}$ движение жидкости переходит в турбулентное.

Критическое число Рейнольдса для движения шарика в жидкости $Re_{КР} = 0{,}5$; для потока жидкости в длинных трубках $Re_{КР} = 2300$.

• Формула Стокса. Сила сопротивления F, действующая со стороны потока жидкости на медленно движущийся в ней шарик,

$$F = 6\pi\eta rv,$$

где r и v – радиус и скорость шарика.

Формула справедлива для скоростей, при которых число Рейнольдса много меньше единицы (Re<<1).

3.2.1. Примеры решения задач

Пример 1. В баллоне вместимостью $V = 8$ л находится кислород массой $m = 0{,}3$ кг при температуре $T = 300$°K. Найти, какую часть вместимости сосуда составляет собственный объем молекул газа. Определить отношение внутреннего давления p' к давлению p газа на стенки сосуда.

Решение. Для получения ответа на первый вопрос задачи необходимо найти отношение

$$k = \frac{V'}{V}, \qquad (1)$$

где V' – собственный объем молекул.

Собственный объем молекул найдем, воспользовавшись постоянной b Ван-дер-Ваальса, равной учетверенному объему молекул, содержащихся в одном моле реального газа. В уравнении Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{v^2 a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT\,. \qquad (2)$$

Поправка vb означает учетверенный объем молекул всего газа, т.е. $vb = 4V'$. Отсюда

$$V' = \frac{vb}{4} = \frac{mb}{4M},$$

где $v = \dfrac{m}{M}$ – количество вещества;

M – молярная масса.

моль, а количество вещества v_2 второго равно 4 моль.

11.6. В баллоне находятся аргон и азот. Определить удельную теплоемкость c_v смеси этих газов, если массовые доли аргона (ω_1) и азота (ω_2) одинаковы и равны $\omega = 0{,}5$.

11.7. Смесь газов состоит из хлора и криптона, взятых при одинаковых условиях и в равных объемах. Определить удельную теплоемкость c_p смеси.

11.8. Определить удельную теплоемкость c_V смеси ксенона и кислорода, если количества вещества газов в смеси одинаковы и равны v.

11.9. Найти показатель адиабаты γ для смеси газов, содержащей гелий массой $m_1 = 10$ г и водород массой $m_2 = 4$ г.

11.10. Смесь газов состоит из аргона и азота, взятых при одинаковых условиях и в одинаковых объемах. Определить показатель адиабаты γ такой смеси.

11.11. Найти показатель адиабаты γ смеси водорода и неона, если массовые доли обоих газов в смеси одинаковы и равны $\omega = 0{,}5$.

11.12. Найти показатель адиабаты γ смеси газов, содержащей кислород и аргон, если количества вещества того и другого газа в смеси одинаковы и равны v.

11.13. Степень диссоциации α газообразного водорода равна 0,6. Найти удельную теплоемкость c_V такого частично диссоциировавшего водорода.

11.14. Определить показатель адиабаты γ частично диссоциировавшего газообразного азота, степень диссоциации α которого равна 0,4.

11.15. Определить степень диссоциации α газообразного хлора, если показатель адиабаты у такого частично диссоциировавшего газа равен 1,55.

11.16. На нагревание кислорода массой $m = 160$ г на $\Delta T = 12$°K было затрачено количество теплоты $Q = 1{,}76$ кДж. Как протекал процесс: при постоянном объеме или постоянном давлении?

11.17. При адиабатном сжатии газа его объем уменьшился в $n = 10$ раз, а давление увеличилось в $k = 21{,}4$ раза. Определить отношение C_p/C_V теплоемкостей газов.

Работа расширения газа

11.18. Водород массой $m = 4$ г был нагрет на $\Delta T = 10°K$ при постоянном давлении. Определить работу A расширения газа.

11.19. Газ, занимавший объем $V_1 = 12$ л под давлением $p = 100$ кПа, был изобарно нагрет от температуры $T_1 = 300°K$ до $T_2 = 400°K$. Определить работу A расширения газа.

11.20. Какая работа A совершается при изотермическом расширении водорода массой $m = 5$ г, взятого при температуре $T = 290°K$, если объем газа увеличивается в три раза?

11.21. При адиабатном сжатии кислорода массой $m = 1$ кг совершена работа $A = 100$ кДж. Определить конечную температуру T_2 газа, если до сжатия кислород находился при температуре $T_1 = 300°K$.

11.22. Определить работу A адиабатного расширения водорода массой $m = 4$ г, если температура газа понизилась на $\Delta T = 10°K$.

11.23. Азот массой $m = 2$ г, имевший температуру $T_1 = 300°K$, был адиабатно сжат так, что его объем уменьшился в $n = 10$ раз. Определить конечную температуру T_2 газа и работу A сжатия.

11.24. Кислород, занимавший объем $V_1 = 1$ л под давлением $p_1 = 1{,}2$ МПа, адиабатно расширился до объема $V_2 = 10$ л. Определить работу A расширения газа.

Первое начало термодинамики

11.25. Азот массой $m = 5$ кг, нагретый на $\Delta T = 150°K$, сохранил неизменный объем V. Найти: 1) количество теплоты Q, сообщенное газу; 2) изменение ΔU внутренней энергии; 3) совершенную газом работу A.

11.26. Водород занимает объем $V_1 = 10$ м^3 при давлении $p_1 = 100$ кПа. Газ нагрели при постоянном объеме до давления $p_2 = 300$ кПа. Определить: 1) изменение ΔU внутренней энергии газа; 2) работу A, совершенную газом; 3) количество теплоты Q, сообщенное газу.

11.27. При изохорном нагревании кислорода объемом $V = 50$ л давление газа изменилось на $\Delta p = 0{,}5$ МПа. Найти количество теплоты Q, сообщенное газу.

11.28. Баллон вместимостью $V = 20$ л содержит водород при температуре $T = 300°K$ под давлением $p = 0{,}4$ МПа. Каковы будут температура T_1 и давление p_1, если газу сообщить количество теп-

чениях;

h_1 и h_2 – высоты их над некоторым уровнем (см. рис. 1);

$\rho g h_1$ и $\rho g h_2$ – гидростатические давления.

Уравнение Бернулли в случае, когда оба сечения находятся на одной высоте ($h_1 = h_2$)

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}.$$

• Скорость течения жидкости из малого отверстия в открытом широком сосуде

$$v = \sqrt{2gh},$$

где h – глубина, на которой находится отверстие относительно уровня жидкости в сосуде.

• Формула Пуазейля. Объем жидкости (газа), протекающей за время t через длинную трубку,

$$V = \frac{\pi r^4 t \Delta p}{8 l \eta},$$

где r – радиус трубки;

l – длина трубки;

Δp – разность давлений на концах трубки;

η – динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения) жидкости.

• Число Рейнольдса для потока жидкости в длинных трубках

$$\mathrm{Re} = \rho < v > \frac{d}{\eta},$$

где $<v>$ – средняя по сечению скорость течения жидкости;

d – диаметр трубки.

Число Рейнольдса для движения шарика d жидкости

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v d}{\eta},$$

где v и d – скорость и диаметр шарика.

Число Рейнольдса Re есть функция скорости v тела, линейной величины l, определяющей размеры тела, плотности ρ и динамической вязкости η жидкости, т.е.

$\mathrm{Re} = f(\rho, \eta, l, v)$.

При малых значениях чисел Рейнольдса, меньших некоторого критического значения Re_{KP}, движение жидкости является лами-

$$p = \frac{2\sigma}{R}.$$

• Высота подъема жидкости в капиллярной трубке

$$h = \frac{2\sigma\cos(\theta)}{\rho g R},$$

где σ – краевой угол;

R – радиус канала трубки;

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения.

• Высота подъема жидкости между двумя близкими и параллельными плоскостями

$$h = \frac{2\sigma\cos(\theta)}{\rho g d},$$

где d – расстояние между плоскостями.

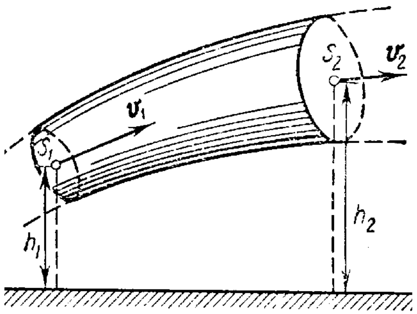


Рис. 3.6

• Расход жидкости в трубке тока (рис. 3.6):

а) объемный расход $Q_V = vS$;

б) массовый расход $Q_m = pvS$,

где S – площадь поперечного сечения трубки тока;

v – скорость жидкости;

p – ее плотность.

• Уравнение неразрывности струи

$$v_1 S_1 = v_2 S_2,$$

где S_1 и S_2 – площади поперечного сечения трубки тока в двух местах;

v_1 и v_2 – соответствующие скорости течений.

• Уравнение Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости в общем случае

,

где p_1 и p_2 – статические давления жидкости в двух сечениях трубки тока;

v_1 и v_2 – скорости жидкости в этих сечениях;

$\frac{\rho v_1^2}{2}$ и $\frac{\rho v_2^2}{2}$ – динамические давления жидкости в этих же се-

лоты $Q = 6$ кДж?

11.29. Кислород при неизменном давлении $p = 80$ кПа нагревается. Его объем увеличивается от $V_1 = 1$ м^3 до $V_2 = 3$ м^3. Определить: 1) изменение ΔU внутренней энергии кислорода; 2) работу A, совершенную им при расширении; 3) количество теплоты Q, сообщенное газу.

11.30. Азот нагревался при постоянном давлении, причем ему было сообщено количество теплоты $Q = 21$ кДж. Определить работу A, которую совершил при этом газ, и изменение ΔU его внутренней энергии.

11.31. Кислород массой $m = 2$ кг занимает объем $V_1 = 1$ м^3 и находится под давлением $p_1 = 0{,}2$ МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 3$ м^3, а затем при постоянном объеме до давления $p_2 = 0{,}5$ МПа. Найти: 1) изменение внутренней энергии ΔU газа; 2) совершенную им работу A; 3) количество теплоты Q, переданное газу. Построить график процесса.

11.32. Гелий массой $m = 1$ г был нагрет на $\Delta T = 100$°K при постоянном давлении p. Определить: 1) количество теплоты Q, переданное газу; 2) работу A расширения; 3) приращение ΔU внутренней энергии газа.

11.33. Какая доля ω_1 количества теплоты Q_1, подводимого к идеальному газу при изобарном процессе, расходуется на увеличение ΔU внутренней энергии газа и какая доля ω_2 – на работу A расширения? Рассмотреть три случая, если газ: 1) одноатомный; 2) двухатомный; 3) трехатомный.

11.34. Водяной пар расширяется при постоянном давлении. Определить работу A расширения, если пару передано количество теплоты $Q = 4$ кДж.

11.35. Азот массой $m = 200$ г расширяется изотермически при температуре $T = 280$°K, причем объем газа увеличивается в два раза. Найти: 1) изменение ΔU внутренней энергии газа; 2) совершенную при расширении газа работу A; 3) количество теплоты Q, полученное газом.

11.36. В цилиндре под поршнем находится азот массой $m = 0{,}6$ кг, занимающий объем $V_1 = 1{,}2$ м^3 при температуре $T = 560$°K. В результате подвода теплоты газ расширился и занял объем $V_2 = 4{,}2$ м^3, причем температура осталась неизменной. Найти: 1) изменение ΔU внутренней энергии газа; 2) совершенную им работу A; 3) количество теплоты Q, сообщенное газу.

11.37. Водород массой $m = 10$ г нагрели на $\Delta T = 200$°K, причем газу было передано количество теплоты $Q = 40$ кДж. Найти изменение ΔU внутренней энергии газа и совершенную им работу A.

11.38. При изотермическом расширении водорода массой $m = 1$ г, имевшего температуру $T = 280$°K, объем газа увеличился в три раза. Определить работу A расширения газа и полученное газом количество теплоты Q.

11.39. Азот, занимавший объем $V_1 = 10$ л под давлением $p_1 = 0{,}2$ МПа, изотермически расширился до объема $V_2 = 28$ л. Определить работу A расширения газа и количество теплоты Q, полученное газом.

11.40. При изотермическом расширении кислорода, содержавшего количество вещества $\nu = 1$ моль и имевшего температуру $T = 300$°K, газу было передано количество теплоты $Q = 2$ кДж. Во сколько раз увеличился объем газа?

11.41. Какое количество теплоты Q выделится, если азот массой $m = 1$ г, взятый при температуре $T = 280$°K под давлением $p_1 = 0{,}1$ МПа, изотермически сжать до давления $p_2 = 1$ МПа?

11.42. Расширяясь, водород совершил работу $A = 6$ кДж, Определить количество теплоты Q, подведенное к газу, если процесс протекал: 1) изобарно; 2) изотермически.

11.43. Автомобильная шина накачена до давления $p_1 = 220$ кПа при температуре $T_1 = 290$°K. Во время движения она нагрелась до температуры $T_2 = 330$°K и лопнула. Считая процесс, происходящий после повреждения шины, адиабатным, определить изменение температуры ΔT вышедшего из нее воздуха. Внешнее давление p_0 воздуха равно 100 кПа.

11.44. При адиабатном расширении кислорода с начальной температурой $T_1 = 320$°K внутренняя энергия уменьшилась на $\Delta U = 8{,}4$ кДж, а его объем увеличился в $n = 10$ раз. Определить массу m кислорода.

11.45. Водород при нормальных условиях имел объем $V_1 = 100$ м^3. Найти изменение ΔU внутренней энергии газа при его адиабатном расширении до объема $V_2 = 150$ м^3.

11.46. В цилиндре под поршнем находится водород массой $m = 0{,}02$ кг при температуре $T_1 = 300$°K. Водород сначала расширился адиабатно, увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат

моль газа);

V – объем, занимаемый газом;

V_m – молярный объем;

p – давление газа на стенки сосуда.

Внутреннее давление, обусловленное силами взаимодействия молекул,

$$p' = \frac{a}{V_m^2} = \nu^2 \frac{a}{V^2}.$$

• Связь критических параметров – объема, давления и температуры газа – с постоянными a и b Ван-дер-Ваальса:

$V_{m\,кр} = 3b$;

$$p_{КР} = \frac{a}{27b^2};$$

$$T_{КР} = \frac{8a}{27Rb}.$$

• Внутренняя энергия реального газа

$$U = \nu\left(C_V T - \frac{a}{V_m}\right),$$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

• Поверхностное натяжение

$$\sigma = \frac{F}{l} = \frac{\Delta E}{\Delta S},$$

где F – сила поверхностного натяжения, действующая на контур l, ограничивающий поверхность жидкости;

ΔE – изменение свободной энергии поверхностной пленки жидкости, связанное с изменением площади ΔS поверхности этой пленки.

• Формула Лапласа в общем случае записывается в виде

$$p = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right),$$

где p – давление, создаваемое изогнутой поверхностью жидкости;

σ – поверхностное натяжение;

R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости, а в случае сферической поверхности

Энтропия

11.69. Смешали воду массой $m_1 = 5$ кг при температуре $T_1 = 280$°K с водой массой $m_2 = 8$ кг при температуре $T_2 = 350$°K. Найти: 1) температуру T смеси; 2) изменение ΔS энтропии, происходящее при смешивании.

11.70. В результате изохорного нагревания водорода массой $m = 1$ г давление p газа увеличилось в два раза. Определить изменение ΔS энтропии газа.

11.71. Найти изменение ΔS энтропии при изобарном расширении азота массой $m = 4$ г от объема $V_1 = 5$ л до объема $V_2 = 9$ л.

11.72. Кусок льда массой $m = 200$ г, взятый при температуре $t_1 = -10$°C, был нагрет до температуры $t_2 = 0$°C и расплавлен, после чего образовавшаяся вода была нагрета до температуры $t = 10$°C. Определить изменение ΔS энтропии в ходе указанных процессов.

11.73. Лед массой $m_1 = 2$ кг при температуре $t_1 = 0$°C был превращен в воду той же температуры с помощью пара, имеющего температуру $t_2 = 100$°C. Определить массу m_2 израсходованного пара. Каково изменение ΔS энтропии системы лед-пар?

11.74. Кислород массой $m = 2$ кг увеличил свой объем в $n = 5$ раз один раз изотермически, другой – адиабатно. Найти изменения энтропии в каждом из указанных процессов.

11.75. Водород массой $m = 100$ г был изобарно нагрет так, что объем его увеличился в $n = 3$ раза, затем водород был изохорно охлаждён так, что давление его уменьшилось в $n = 3$ раза. Найти изменение ΔS энтропии в ходе указанных процессов.

3.2. Реальные газы. Жидкости

Основные формулы

• Уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля газа

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT,$$

для произвольного количества вещества ν газа

$$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)(V - \nu b) = \nu RT,$$

где a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса (рассчитанные на один

изотермически, причем объем газа уменьшился в пять раз. Найти температуру T_2 в конце адиабатного расширения и полную работу A, совершенную газом. Изобразить процесс графически.

11.47. При адиабатном сжатии кислорода массой $m = 20$ г его внутренняя энергия увеличилась на $\Delta U = 8$ кДж и температура повысилась до $T_2 = 900$°K. Найти: 1) повышение температуры ΔT; 2) конечное давление газа p_2, если начальное давление $p_1 = 200$ кПа.

11.48. Воздух, занимавший объем $V_1 = 10$ л при давлении $p_1 = 100$ кПа, был адиабатно сжат до объема $V_2 = 1$ л. Под каким давлением p_2 находится воздух после сжатия?

11.49. Горючая смесь в двигателе дизеля воспламеняется при температуре $T_2 = 1100$°K. Начальная температура смеси $T_1 = 350$°K. Во сколько раз нужно уменьшить объем смеси при сжатии, чтобы она воспламенилась? Сжатие считать адиабатным. Показатель адиабаты γ для смеси принять равным 1,4.

11.50. Углекислый газ CO_2 массой $m = 400$ г был нагрет на $\Delta T = 50$°K при постоянном давлении. Определить изменение ΔU внутренней энергии газа, количество теплоты Q, полученное газом, и совершенную им работу A.

11.51. Кислород массой $m = 800$ г, охлажденный от температуры $t_1 = 100$°C до температуры $t_2 = 20$°C, сохранил неизменным объем V. Определить: 1) количество теплоты Q, полученное газом; 2) изменение ΔU внутренней энергии и 3) совершенную газом работу A.

11.52. Давление азота объемом $V = 3$ л при нагревании увеличилось на $\Delta p = 1$ МПа. Определить количество теплоты Q, полученное газом, если объем газа остался неизменным.

Круговые процессы. Термический КПД. Цикл Карно

11.53. В результате кругового процесса газ совершил работу $A = 1$ Дж и передал охладителю количество теплоты $Q_2 = 4{,}2$ Дж. Определить термический КПД η цикла.

11.54. Совершая замкнутый процесс, газ получил от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 4$ кДж. Определить работу A газа при протекании цикла, если его термический КПД $\eta = 0{,}1$.

11.55. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. Наименьший объем $V_{min} = l = 0$ л, наибольший $V_{max} = 20$ л, наименьшее давление $p_{min} = 246$ кПа, наибольшее $p_{max} = 410$ кПа. Построить график цикла. Определить температуру T газа для характерных точек цикла и его термический КПД η.

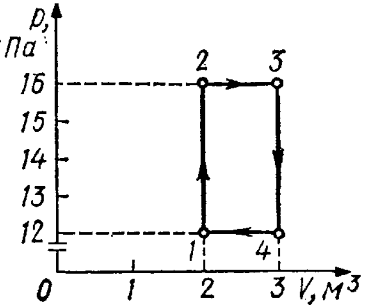


Рис. 3.4

11.56. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ кмоль, совершает замкнутый цикл, график которого изображен на рис. 3.4. Определить: 1) количество теплоты Q_1, полученное от нагревателя; 2) количество теплоты Q_2, переданное охладителю; 3) работу A, совершаемую газом за цикл; 4) термический КПД η цикла.

11.57. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль и находящийся под давлением $p_1 = 0{,}1$ МПа при температуре $T_1 = 300$°K, нагревают при постоянном объеме до давления $p_2 = 0{,}2$ МПа. После этого газ изотермически расширился до начального давления и затем изобарно был сжат до начального объема V_1. Построить график цикла. Определить температуру T газа для характерных точек цикла и его термический КПД η.

11.58. Одноатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 0{,}1$ кмоль, под давлением $p_1 = 100$ кПа занимал объем $V_1 = 5$ м^3. Газ сжимался изобарно до объема $V_2 = 1$ м^3, затем сжимался адиабатно и расширялся при постоянной температуре до начальных объема и давления. Построить график процесса. Найти: 1) температуры T_1, T_2, объемы V_1, V_2 и давление p_3, соответствующее характерным точкам цикла; 2) количество теплоты Q_1, полученное газом от нагревателя; 3) количество теплоты Q_2, переданное газом охладителю; 4) работу A, совершенную газом за весь цикл; 5) термический КПД η цикла.

11.59. Идеальный многоатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар, причем наибольшее давление газа в два раза больше наименьшего, а наибольший объем в четыре раза больше наименьшего. Определить термический КПД η цикла.

11.60. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, 2/3 количества теплоты Q_1, полученного от нагревателя, отдает охладителю. Температура T_2 охладителя равна 280°K. Определить температуру T_1 нагревателя.

11.61. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_2 охладителя равна 290°K. Во сколько раз увеличится КПД цикла. если температура нагревателя повысится от $T'_1 = 400$°K до $T''_2 = 600$°K?

11.62. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в три раза выше температуры T_2 охладителя. Нагреватель передал газу количество теплоты $Q_1 = 42$ кДж. Какую работу A совершил газ?

11.63. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя равна 470°K, температура T_2 охладителя равна 280°K. При изотермическом расширении газ совершает работу $A = 100$ Дж. Определить термический КПД η цикла, а также количество теплоты Q_2, которое газ отдает охладителю при изотермическом сжатии.

11.64. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в четыре раза выше температуры T_2 охладителя. Какую долю ω количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает охладителю?

11.65. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, получив от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 4{,}2$ кДж, совершил работу $A = 590$ Дж. Найти термический КПД η этого цикла. Во сколько раз температура T_1 нагревателя больше температуры T_2 охладителя?

11.66. Идеальный газ совершает цикл Карно. Работа A_1 изотермического расширения газа равна 5 Дж. Определить работу A_2 изотермического сжатия, если термический КПД η цикла равен 0,2.

11.67. Наименьший объем V_1 газа, совершающего цикл Карно, равен 153 л. Определить наибольший объем V_3, если объем V_2 в конце изотермического расширения и объем V_4 в конце изотермического сжатия равны соответственно 600 и 189 л.

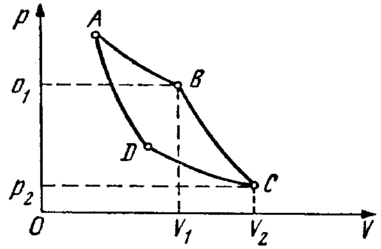


Рис. 3.5

11.68. Идеальный двухатомный газ совершает цикл Карно, график которого изображен на рис. 3.5. Объемы газа в состояниях B и C соответственно $V_1 = 12$ л и $V_2 = 16$ л. Найти термический КПД η цикла.