

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Кафедра высшей математики и физики

ФИЗИКА

ТЕРМОДИНАМИКА И ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

*Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов, обучающихся по инженерным
и биологическим специальностям*

Горки
БГСХА
2018

УДК 536:539.1(072)

*Рекомендовано методической комиссией
факультета механизации сельского хозяйства.
Протокол № 6 от 22 февраля 2017 г.*

Авторы:

кандидат технических наук, доцент *С. И. Козлов*;
кандидат педагогических наук, доцент *О. М. Астахова*;
старший преподаватель *В. Н. Грузинский*;
старший преподаватель *А. В. Цвыр*;
старший преподаватель *Т. М. Чубукова*

Рецензент:

кандидат технических наук, доцент *В. Г. Костенич*

Физика. Термодинамика и основы молекулярной физики : методические указания по выполнению лабораторных работ / С. И. Козлов [и др.]. – Горки : БГСХА, 2018. – 30 с.

Приведены указания по изучению теоретического материала, описание лабораторных установок, порядок выполнения работ, методика обработки опытных данных и список рекомендуемой литературы.

Для студентов, обучающихся по инженерным и биологическим специальностям.

© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2018

ВВЕДЕНИЕ

Предметом изучения термодинамики и молекулярной физики являются строение и свойства вещества. Достижения этой области физики широко реализованы в технике и в первую очередь в тепловых двигателях – устройствах, превращающих внутреннюю энергию вещества в механическую.

Лабораторные работы по термодинамике и молекулярной физике позволяют проверить научно-теоретические положения отдельных явлений, законов, способствуют более глубокому пониманию их, развивают наблюдательность, внимание, память, прививают навыки в проведении измерений, учат пользоваться измерительными приборами, знакомят с оборудованием, аппаратурой, с техникой физического эксперимента.

В ряде случаев выполнение лабораторных работ опережает прохождение лекционного материала. Это вызывает необходимость предварительной подготовки к выполнению их. В целях повышения эффективности предварительной самостоятельной работы студентов перед описанием опытной части лабораторных работ даются краткая теория и рекомендации по изучению теоретического материала.

По каждой лабораторной работе студент пишет отчет. При составлении отчета рекомендуется на титульном листе отчета указывать название кафедры, номер и наименование работы, фамилию и инициалы исполнителя, факультет, курс, группу, дату выполнения работы. На том же листе ниже пишется «К работе допущен», «Работу проверил», «Работа зачтена». В первой строчке преподаватель, ведущий занятия, ставит свою подпись после проверки теории выполняемой работы.

Внимание! Студент, не подготовленный к занятиям, к выполнению работы не допускается.

Вторая и последующая страницы отчета должны содержать:

- 1) цель выполняемой работы;
- 2) краткую теорию, в которой приводятся схематический чертеж или рисунок, электрическая или оптическая схема, а также необходимые определения;
- 3) рабочие формулы, их выводы;
- 4) таблицы результатов измерений и вычислений величин с указанием их единиц;
- 5) графики (при необходимости);

б) ответы на контрольные вопросы.

Произведя все необходимые вычисления и оформив отчет, студент отчитывается по лабораторной работе.

Для получения зачета по лабораторной работе необходимо знать цель работы, порядок ее выполнения, понимать физические процессы и явления, которые изучаются в данной работе, знать принципиальную схему эксперимента и принцип действия приборов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. / И. В. Савельев. – 3-е изд., испр. – Москва: Наука, 1987. – Т. 1: Механика. Молекулярная физика. – 350 с.
2. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф [и др.]. – 4-е изд., перераб. – Москва: Высш. шк., 1973. – 384 с.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики: в 3 т. / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Москва: Наука, 1967. – Т. 1. – 336 с.
4. Грабовский, Р. И. Курс физики (для с.-х. ин-тов): учеб. пособие / Р. И. Грабовский. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1980. – 607 с.

Лабораторная работа 1. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Цель работы: убедиться в пропорциональной зависимости произведения давления газа на его объем от абсолютной температуры.

Приборы и принадлежности: стеклянная колба, водяной манометр, стеклянный стакан, термометр, барометр-анероид.

При подготовке важно уделить внимание отличию газообразного состояния вещества от твердого или жидкого.

Газ – вещество, находящееся в таком агрегатном состоянии, при котором его частицы слабо связаны друг с другом, движутся свободно, сталкиваясь, разлетаются в разные стороны и стремятся заполнить весь объем. Между двумя последовательными столкновениями молекулы движутся прямолинейно и, сталкиваясь со стенками сосуда, производят на них давление.

Необходимо также обратить внимание на понятие *идеального газа*, т. е. имеют в виду такой воображаемый газ, у которого энергия взаимодействия между молекулами настолько мала, что ею можно пренебречь. Силы взаимодействия проявляются только в момент удара. Молекулы газа можно принять за упругие материальные точки.

Следует также уяснить, что реальный газ при достаточно высокой температуре и достаточно малой плотности по своим свойствам близок

к идеальному. При этих условиях среднее расстояние между молекулами значительно больше их размеров, а силы взаимодействия, быстро убывающие с увеличением расстояния между молекулами, практически равны нулю.

Параметры состояния газа (объем V , давление p , термодинамическая температура T) связаны между собой соотношением

$$\frac{pV}{T} = \text{const},$$

называемым *уравнением Клапейрона*.

Следует уяснить, что значение постоянной в этом уравнении неодинаково для различных газов. Этого недостатка лишено уравнение Клапейрона – Менделеева, которое для одного моля газа имеет следующий вид:

$$\frac{pV_m}{T} = R, \text{ или } pV_m = RT; \quad (1.1)$$

для любой массы газа m –

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (1.2)$$

Здесь молярный объем V_m и объем V всей массы газа m связаны с массой моля газа M выражением

$$V_m = \frac{M}{m} V.$$

Величина R одинакова для всех газов и называется поэтому *универсальной газовой постоянной*.

Из уравнения (1.2), представляющего собой наиболее общую форму записи уравнения состояния идеального газа, получите, как частные случаи, законы Бойля – Мариотта, Гей-Люссака, Шарля.

Хорошо усвойте физический смысл универсальной газовой постоянной R . Для этого вообразите себе, что газ в количестве одного моля, находящийся в цилиндре с поршнем, подвергнут нагреванию на один кельвин при постоянном давлении (рис. 1.1). Расширяясь, газ передвинет поршень площадью S на расстояние Δh .

Вычислите работу, совершенную газом, зная, что сила, приложенная к поршню, $F = pS$. Изменение объема $\Delta V = S\Delta h$ выразите, пользуясь уравнением (1.1).

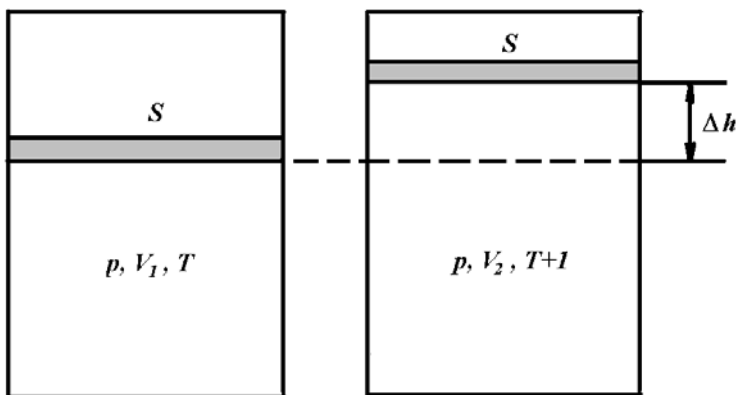


Рис. 1.1. Изобарное нагревание газа в цилиндре

В результате получите

$$A = R,$$

т. е. универсальная газовая постоянная измеряется работой, которую совершает один моль идеального газа при изобарическом нагревании его на один кельвин.

Описание лабораторной установки

Установка для выполнения лабораторной работы состоит из небольшой колбы 1, соединенной резиновой трубкой 2 с манометром 3, в коленах которого находится вода (рис. 1.2). Колба погружается в стакан 4 с водой, температура воды измеряется термометром 5.

Эксперимент производят с массой воздуха, находящегося в колбе, резиновой трубке и колене манометра до уровня воды в нем (на рис. 1.2 этот объем отмечен точками). Если изменять температуру воздуха в колбе, то объем его и давление будут тоже изменяться, о чем можно судить по перемещению уровней воды в манометре. Когда температура воздуха в колбе станет равной температуре воды в стакане, куда погружена колба, то уровни воды в манометре установятся в определенном положении.

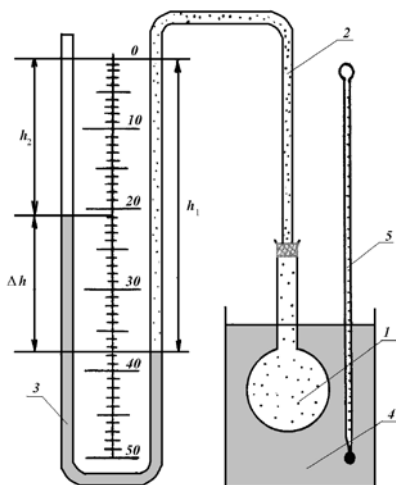


Рис. 1.2. Схема лабораторной установки:
 1 – колба с воздухом; 2 – резиновая трубка; 3 – манометр;
 4 – сосуд с водой; 5 – термометр

Для удобства определения объема, занимаемого воздухом при установившемся показании манометра, объем колбы и резиновой трубки до отметки с цифрой 0 на шкале манометра заранее измерен и равен V_0 . Числовое значение V_0 приведено на панели лабораторной установки. В процессе опыта необходимо лишь измерить объем воздушного столба в колене манометра, соединенном с колбой от отметки с цифрой 0 до уровня воды в нем. Этот объем воздуха равен $h_1 V_{\text{дел}}$, где h_1 – длина воздушного столба в колене манометра, мм; $V_{\text{дел}}$ – объем столба воздуха высотой в одно деление шкалы, м^3 .

Числовое значение $V_{\text{дел}}$ приведено на панели лабораторной установки.

Таким образом, измеряемый объем воздуха при данной температуре

$$V = V_0 + h_1 V_{\text{дел}}. \quad (1.3)$$

Давление p воздуха в колбе легко найти, зная атмосферное давление $p_{\text{атм}}$ по барометру и разность уровней в коленах манометра Δh (см. рис. 1.2). Δh может быть со знаком плюс и со знаком минус:

$$p = p_{\text{атм}} + \Delta h. \quad (1.4)$$

Так как атмосферное давление выражено в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.), разность уровней в манометре – в миллиметрах водного столба (мм вод. ст.), то для нахождения p следует выразить $p_{\text{атм}}$ и Δh в одинаковых единицах – паскалях:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па}; 1 \text{ мм вод. ст.} = 9,8 \text{ Па}.$$

Порядок выполнения работы

1. Определить атмосферное давление по барометру, записать значение давления в табл. 1.1. Перевести давление из миллиметров ртутного столба в паскали и занести полученное значение в эту же таблицу.

2. В стакан с холодной водой полностью погрузить колбу вместе с горлышком. Дождаться, пока уровни воды в манометре перестанут перемещаться, что свидетельствует об установлении постоянной температуры и давления в колбе.

3. После этого измерить температуру $T = t + 273$ и высоту уровней h_1 и h_2 соответственно в закрытом и открытом коленах манометра. Разность уровней Δh в коленах манометра выразить в миллиметрах водного столба.

4. Аналогичным образом опыт повторить 4–5 раз, каждый раз изменяя температуру воды в стакане на 3–5 °С. Для этого следует доливать в стакан небольшое количество горячей воды. При этом необходимо следить, чтобы максимальная температура воды в стакане (и, следовательно, газа в колбе) не превышала 40 °С.

5. Вычислить значения $\Delta h = h_1 - h_2$, перевести полученные данные из миллиметров водного столба в паскали и записать результаты в таблицу.

6. Рассчитать давление в колбе p (см. формулу (1.4)), объем воздуха V (см. формулу (1.3)), произведение pV и отношение $\frac{pV}{T}$. Результаты занести в табл. 1.1.

7. По данным опытов построить график зависимости pV от T , откладывая по оси абсцисс температуру T , а по оси ординат – произведе-

ние pV , выбрав за начало отсчета по оси ординат минимальное значение pV .

Таблица 1.1. Результаты измерений и вычислений

№ п/п	$p_{\text{атм}}$		$T, \text{ К}$	$h_1, \text{ мм}$	$h_2, \text{ мм}$	Δh		$p, \text{ Па}$	$V, \text{ м}^3$	pV	$\frac{pV}{T}$
	мм рт. ст.	Па				мм вод. ст.	Па				
1											
2											
3											
4											

Контрольные вопросы

1. Какой газ называется идеальным? При каких условиях реальные газы близки к идеальному?
2. Запишите уравнение Клапейрона.
3. Запишите уравнение Клапейрона – Менделеева для моля газа, для любой массы газа.
4. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?
5. Назовите основные единицы измерения давления, объема, температуры.

Лабораторная работа 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА C_p / C_V МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА

Цель работы: проверить опытным путем теоретическое значение $\gamma = C_p / C_V$ для воздуха.

Приборы и принадлежности: стеклянный сосуд с кранами, манометр, насос с соединительными шлангами.

При изучении теории следует хорошо уяснить, что теплоемкость газа $C = \frac{dQ}{dT}$ – это физическая величина, численно равная количеству

теплоты, необходимой для нагревания этого газа на один кельвин. Различают удельную теплоемкость c (теплоемкость единицы массы газа) и молярную теплоемкость C (теплоемкость одного моля газа). Теплоемкость газа существенно зависит от вида процесса в газе.

Так, газ, получающий теплоту в ходе изотермического процесса ($T = \text{const}$ и $dT = 0$), имеет теплоемкость

$$C_T = \frac{dQ}{dT} = \infty.$$

Газ, изменяющий свою температуру, не получая и не отдавая тепло в ходе адиабатического процесса ($dQ = 0$), имеет теплоемкость

$$C_Q = \frac{dQ}{dT} = 0.$$

Для теплотехники существенно знание теплоемкостей газа при изобарическом ($p = \text{const}$) и изохорическом ($V = \text{const}$) процессах. Эти теплоемкости тоже различны.

Необходимо четко уяснить, что газ, нагреваясь при постоянном объеме ($V = \text{const}$), не совершает работу против внешних сил ($dA = pdV = 0$) и все полученное им тепло идет только на увеличение его внутренней энергии.

Если же газ нагревается изобарически ($p = \text{const}$), то только часть теплоты идет на увеличение внутренней энергии газа, другая – на совершение газом работы $dA = pdV$.

Следовательно, теплоемкость газа при постоянном давлении C_p больше теплоемкости при постоянном объеме C_V . Молярные теплоемкости газа связаны уравнением Майера:

$$C_p = C_V + R,$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Убедитесь, что теплоемкости газов зависят от числа степеней свободы молекул, составляющих газ. *Числом степеней свободы молекулы* называется минимальное количество независимых координат, однозначно определяющих положение и ориентацию молекулы в пространстве.

Для этого проделайте следующее.

1. Запишите первое начало термодинамики в дифференциальной форме:

$$dQ = dA + dU, \quad (2.1)$$

количество теплоты, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии системы и на совершаемую системой работу.

2. Элементарную работу газа dA и изменение внутренней энергии dU выразите следующими формулами:

$$dA = pdV; \quad (2.2)$$

$$dU = \frac{i}{2} R dT, \quad (2.3)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа.

3. Для изохорического процесса $dA = 0$. При изобарическом нагревании работа моля газа $dA = pdV$. Найдите значение pdV , продифференцировав уравнение Клапейрона – Менделеева для моля газа $pV = RT$ при $p = \text{const}$.

4. Подставьте соответствующее значение dQ в формулу

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

В результате должны получить:

$$C_V = \frac{i}{2} R; \quad C_p = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R.$$

5. Из двух последних выражений найдите: $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$. Эта величина называется *адиабатической постоянной* или *показателем адиабаты*.

Адиабатическим называют процесс, происходящий при отсутствии теплообмена между системой и окружающей средой.

Уравнение адиабатического процесса выглядит следующим образом: $pV^\gamma = \text{const}$.

Постоянная γ для идеального газа определяется только числом степеней свободы молекулы газа. Одноатомная молекула обладает тремя степенями свободы ($i = 3$). Для одноатомного газа $\gamma = 5/3 = 1,66$. Двухатомная молекула имеет пять степеней свободы ($i = 5$; $\gamma = 7/5 = 1,4$). Трехатомная и многоатомная молекулы имеют шесть степеней свободы ($i = 6$; $\gamma = 8/6 = 1,33$).

Описание лабораторной установки и вывод расчетных формул

Воздух, состоящий преимущественно из азота N_2 и кислорода O_2 , относят к двухатомному газу, поэтому теория предсказывает, что для него

$$\gamma = 7/5 = 1,4.$$

Практическая проверка данного утверждения была предложена Клеманом и Дезормом и осуществляется в лабораторных условиях на установке, изображенной на рис. 2.1.

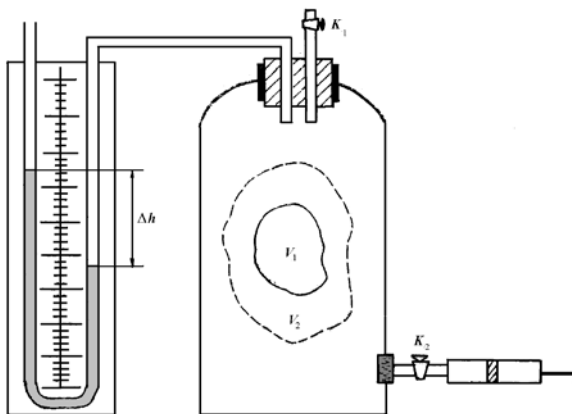


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки

Метод основан на том, что в заключенном в сосуде воздухе происходят последовательно адиабатические и изохорические процессы.

Для лучшего уяснения метода обратите внимание на то, что при адиабатическом процессе газ может как нагреваться, так и охлаждаться. Это видно из выражения (2.1) для первого начала термодинамики. Действительно, при протекании адиабатического процесса отсутствует теплообмен с окружающей средой ($dQ = 0$), поэтому формула (2.1) примет вид $dA = -dU$ или с учетом равенства (2.3) будет записана следующим образом:

$$dA = -\frac{i}{2} R dT. \quad (2.4)$$

При расширении работа газа $dA > 0$, поэтому из выражения (2.4) следует, что $dT < 0$, т. е. газ охлаждается.

При сжатии работа газа $dA < 0$, следовательно, $dT > 0$, и газ при адиабатическом сжатии нагревается.

Если в сосуд при закрытом кране K_1 быстро накачать некоторое количество воздуха, то температура в сосуде поднимется выше температуры окружающей среды, так как процесс, происходящий при накачивании воздуха, близок к адиабатическому сжатию.

Давление воздуха в сосуде обозначим p_1 , температуру – T_1 . Мысленно выделим из всей массы воздуха элементарную его часть, занимающую объем V_1 , как показано на рис. 2.1. Это состояние газа мы принимаем за исходное и фиксируем на графике (рис. 2.2) точкой 1.

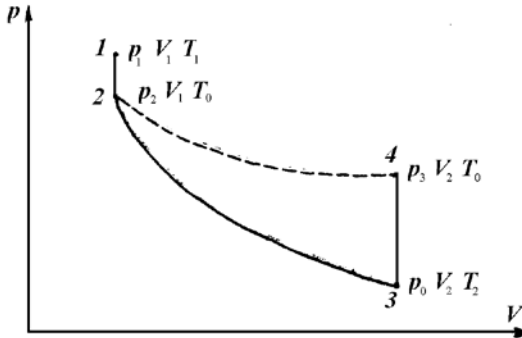


Рис. 2.2. График зависимости давления от объема

После накачивания воздуха закрываем кран K_2 и ожидаем, пока температура газа в сосуде и температура окружающей среды в результате теплообмена не выровняются. Это температура T_0 . Теплообмен происходит при изохорическом изменении состояния газа, и параметры выделенной элементарной массы газа оказываются p_2, V_1, T_0 . Причем $p_2 < p_1$, но оно по-прежнему выше атмосферного p_0 , т. е. $p_2 = p_0 + \Delta h_1$, где Δh_1 – дополнительное давление, измеренное манометром.

Это состояние определяется на графике точкой 2.

Состояния газа 1 и 2 связаны уравнением

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_0},$$

описывающим изохорический процесс.

Соединим теперь воздух в сосуде на короткое время с атмосферой. Кратковременность процесса не позволяет газу в сосуде обменяться теплом с окружающей средой, поэтому расширение газа можно считать близким к адиабатическому. Давление в сосуде падает до атмосферного p_0 , температура убывает до T_2 , которая меньше температуры окружающей среды. Объем выделенной элементарной части V_1 увеличивается до V_2 .

Таким образом, новое состояние газа характеризуется параметрами p_0 , T_2 , V_2 . На графике оно фиксируется точкой 3. Адиабатический процесс между точками 2 и 3 описывается уравнением Пуассона:

$$p_2 V_1^\gamma = p_0 V_2^\gamma. \quad (2.5)$$

После закрытия крана K_1 газ в ходе теплообмена с окружающей средой начнет нагреваться до температуры этой среды T_0 . Давление газа возрастает на дополнительную величину Δh_2 , измеряемую манометром, и принимает значение

$$p_3 = p_0 + \Delta h_2.$$

Объем выделенной части газа останется прежним – V_2 .

Таким образом, новое состояние газа будет характеризоваться параметрами p_2 , V_2 , T_0 . На графике оно фиксируется точкой 4.

В состояниях 2 и 4 температура воздуха одинакова. Поэтому эти состояния связаны уравнением Бойля – Мариотта:

$$p_2 V_1 = p_3 V_2. \quad (2.6)$$

Решая совместно равенства (2.5) и (2.6), получим

$$\frac{p_2}{p_0} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^\gamma. \quad (2.7)$$

Логарифмируя равенство (2.7), находим

$$\gamma = \frac{\lg p_2 - \lg p_0}{\lg p_2 - \lg p_3}.$$

Данное выражение можно упростить. Так как давления p_0 , p_2 , p_3 мало отличаются друг от друга, то разность логарифмов можно считать пропорциональной разностям самих давлений:

$$\gamma = \frac{p_2 - p_0}{p_2 - p_3}.$$

С учетом того, что $p_2 = p_0 + \Delta h_1$, а $p_3 = p_0 + \Delta h_2$, получим

$$\gamma = \frac{(p_0 + \Delta h_1) - p_0}{(p_0 + \Delta h_1) - (p_0 + \Delta h_2)} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2}.$$

Таким образом, измеряя дополнительные давления Δh_1 и Δh_2 , можно определить:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2}. \quad (2.8)$$

Порядок выполнения работы

1. Закрыть кран K_1 и, открыв кран K_2 , быстро накачать в сосуд насосом воздух до тех пор, пока разность уровней воды в манометре Δh не достигнет **200–240 мм** (см. рис. 2.1).

2. Закрыть кран K_2 , подождать 1–2 мин, пока уровни воды в манометре перестанут перемещаться. Измерить по шкале манометра разность уровней Δh_1 .

3. Установить в сосуде атмосферное давление. Для этого открыть кран K_1 на короткое время (пока хорошо слышно шипение воздуха, выходящего из сосуда) и сразу же закрыть его.

4. Дождаться, пока уровни в манометре перестанут перемещаться. Измерить по шкале манометра разность уровней Δh_2 .

5. По формуле (2.8) вычислить отношение теплоемкостей газа γ .

6. Опыт повторить 5–6 раз, результаты измерений занести в табл. 2.1.

7. Найти среднее значение отношения теплоемкостей по формуле

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i}{N}, \text{ где } N - \text{число опытов; отклонения от среднего значения в}$$

каждом опыте $\Delta\gamma_i = |\gamma_i - \gamma_{\text{ср}}|$ и среднее значение отклонений

$$\Delta\gamma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N |\Delta\gamma_i|}{N}.$$

Т а б л и ц а 2.1. Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Δh_1	Δh_2	γ	$\gamma_{\text{ср}}$	$\Delta\gamma$	$\Delta\gamma_{\text{ср}}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первое начало термодинамики.
2. Дайте определение теплоемкости газа, удельной теплоемкости, молярной теплоемкости.
3. Поясните, почему $C_p > C_v$. Напишите уравнение Майера.
4. Что называется числом степеней свободы молекулы?
5. Получите формулы для молярных теплоемкостей газа C_p и C_v .
6. Как зависит отношение теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме от числа степеней свободы молекулы?
7. Какой процесс называется адиабатическим?

Лабораторная работа 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цель работы: определить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха и эффективный диаметр их.

Приборы и принадлежности: установка для определения длины свободного пробега, секундомер, мерный стакан.

Понятие средней длины свободного пробега молекул газа является ключевым для объяснения явлений переноса, к которым относятся диффузия, вязкость (внутреннее трение) и теплопроводность.

При изучении материала обратите внимание на то, что молекулы газа, имея конечные размеры, при тепловом движении непрерывно соударяются друг с другом, вследствие чего траектория молекулы представляет собой не прямую линию, а сложную запутанную ломаную. Между двумя последовательными соударениями молекула, двигаясь прямолинейно, проходит некоторое расстояние, называемое *длиной свободного пробега* λ . При неизменных условиях (род газа, давление и температура) эти расстояния могут сильно отличаться друг от друга.

Вместе с тем следует четко уяснить, что в силу хаотического движения молекул среднее значение длины свободного пробега молекул для данного состояния газа будет величиной постоянной. Поэтому рассматривают некоторую среднюю статистическую величину – среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$. Согласно молекулярно-кинетической теории, эта величина определяется по формуле

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n_0}, \quad (3.1)$$

где σ – эффективный диаметр молекулы, равный минимальному расстоянию, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул;

n_0 – число молекул, находящихся в единице объема (концентрация).

Описание лабораторной установки и вывод расчетных формул

Выражение (3.1) не позволяет определить среднюю длину свободного пробега молекул $\langle \lambda \rangle$, так как неизвестен эффективный диаметр молекул σ . Поэтому для нахождения $\langle \lambda \rangle$ воспользуемся выражением, в которое кроме длины свободного пробега входят другие величины, определяемые без особых трудностей.

Таким выражением является формула, связывающая коэффициент внутреннего трения в газах (динамическая вязкость) η с плотностью газа ρ и средней скоростью движения молекул газа $\langle u \rangle$:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle \rho. \quad (3.2)$$

Из уравнения Клапейрона – Менделеева $pV = \frac{m}{M} RT$ плотность газа

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}, \quad (3.3)$$

где M – масса моля газа (для воздуха $M = 2,9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль);

p – давление газа, Па;

T – термодинамическая температура газа, К;

R – универсальная газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Средняя арифметическая скорость движения молекул выражается формулой

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.2) видно, что для определения $\langle \lambda \rangle$ необходимо знать кроме $\langle u \rangle$ и ρ коэффициент внутреннего трения. Для нахождения этого коэффициента воспользуемся формулой Пуазейля, определяющей объем газа, протекающего по трубе за некоторое время, применяя следующую установку (рис. 3.1). Установка состоит из стеклянного баллона 1, водяного манометра 2, капилляра 3, воронки 4 с зажимом 6 для залива воды в баллон, соединенных между собой.

Баллон заполняется водой. Если зажимом 6 пережать шланг и открыть кран 5, то вода начнет вытекать из баллона. При этом над водой создается разрежение, в результате чего на концах капилляра 3 появится разность давлений Δp .

В баллон начнет поступать воздух через капилляр. Объем воздуха, прошедшего через капилляр длиной l за время τ , равен объему жидкости, вытекшей за это время из баллона, и определяется по формуле Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8 l \eta}. \quad (3.5)$$

Отсюда

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8 l V}. \quad (3.6)$$

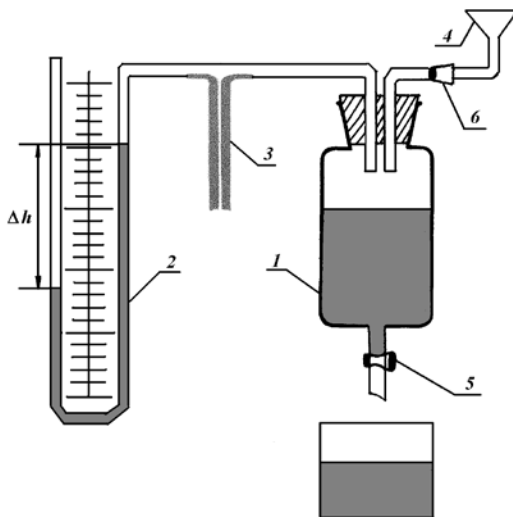


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки:
 1 – стеклянный баллон; 2 – водяной манометр; 3 – капилляр;
 4 – воронка; 5 – кран; 6 – зажим

Подставив значения ρ , $\langle u \rangle$ и η из выражений соответственно (3.3), (3.4), (3.6) в формулу (3.2), учитывая, что $V = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, $l = 0,3 \text{ м}$, $r = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и решая выражение относительно $\langle \lambda \rangle$, получим

$$\langle \lambda \rangle = 0,2 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta p \sqrt{T}}{\rho} \tau. \quad (3.7)$$

Зная длину свободного пробега молекул, можно определить эффективный диаметр их из соотношения (3.1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2\pi} \langle \lambda \rangle n_0}}. \quad (3.8)$$

Учитывая, что $n_0 = \frac{p}{kT}$, получим

$$\sigma = \beta \sqrt{\frac{T}{p \langle \lambda \rangle}}, \quad (3.9)$$

где $\beta = \sqrt{\frac{k}{\sqrt{2\pi}}} = 1,76 \cdot 10^{-12} \frac{\text{М}}{\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \sqrt{\text{К}}}$.

Отсюда выражение (3.9) будет иметь следующий вид:

$$\sigma = 1,76 \cdot 10^{-12} \sqrt{\frac{T}{p \langle \lambda \rangle}}. \quad (3.10)$$

Порядок выполнения работы

1. Определить по барометру атмосферное давление, перевести его из миллиметров ртутного столба в паскали (1 мм рт. ст. = 133 Па). Результаты записать в табл. 3.1.

2. Определить с помощью термометра температуру воздуха в лаборатории, найти термодинамическую температуру ($T = t + 273$). Результаты занести в табл. 3.1.

3. С помощью воронки 4 заполнить баллон водой так, чтобы уровень ее был на отметке 250 мл. После этого с помощью зажима 6 пережать трубку, чтобы при дальнейшем выполнении работы в баллон не поступал воздух (см. рис. 3.1).

4. Открыть кран 5 и одновременно включить секундомер. Определить время τ вытекания 50 мл воды, находящейся в баллоне. **Во время вытекания воды** по манометру 2 измерить разность уровней Δh (мм) и вычислить разность давлений Δp на концах капиллярной трубки (1 мм вод. ст. = 9,8 Па), т. е.

$$\Delta p = 9,8 \Delta h.$$

5. Объем воздуха, прошедшего через капилляр, соответствует объему воды, вытекающей из баллона. Поскольку

$$1 \text{ мл} = 1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ (см. приложение),}$$

то

$$V = 50 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

6. Значения τ , Δp и V записать в табл. 3.2.

7. Повторить опыт (пп. 4–7) не менее пяти раз.

8. Для каждого опыта по формуле (3.7) вычислить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха и по формуле (3.10) эффективный диаметр молекул. Результаты занести в табл. 3.2.

9. Найти средние значения длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул по следующим формулам:

$\langle \lambda \rangle_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N \langle \lambda \rangle_i}{N}$ и $\sigma_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N}$, где N – количество опытов. Результаты записать в табл. 3.2.

Таблица 3.1. Результаты измерений и вычислений

Атмосферное давление p		Температура		l , м	r , м
мм рт. ст.	Па	t , °C	T , К		
				0,3	0,007

Таблица 3.2. Результаты измерений и вычислений

№ п/п	τ , с	Δp , Па	V , м ³	$\langle \lambda \rangle$, м	$\langle \lambda \rangle_{\text{cp}}$, м	σ , м	σ_{cp} , м
1							
2							
3							
4							
5							

Контрольные вопросы

1. Дайте определение длины свободного пробега молекулы. Запишите формулу для определения средней длины свободного пробега.
2. Дайте определение эффективного диаметра молекул.
3. Поясните, почему на концах капилляра возникает разность давлений.

4. Что определяет формула Пуазейля?
5. Запишите расчетную формулу для определения средней длины свободного пробега молекул газа.

Лабораторная работа 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: изучить внутреннее трение в жидкостях; ознакомиться с одним из методов определения коэффициента вязкости жидкости.

Приборы и принадлежности: стеклянный сосуд с исследуемой жидкостью, секундомер, шарики, микроскоп с окулярной шкалой.

При изучении теоретического материала необходимо четко уяснить, что механизм вязкости, или внутреннего трения, присущ как газам, так и жидкостям. Он состоит в появлении сопротивления их течению под действием внешних сил.

В газах внутреннее трение возникает вследствие обмена импульсами слоев в результате перескока молекул из слоя в слой при их тепловом движении. В жидкостях внутреннее трение возникает в основном из-за наличия сил сцепления между молекулами, так как молекулы большую часть времени пребывают около положений равновесия.

Обратите внимание, что различный механизм вязкости в жидкостях и газах сказывается на зависимости внутреннего трения от температуры: вязкость газов с повышением температуры возрастает, а вязкость жидкостей падает. С повышением температуры увеличивается подвижность молекул жидкости и уменьшается молекулярное взаимодействие, что и приводит к снижению вязкости жидкости.

Важно также уяснить, что сила внутреннего трения действует только между слоями жидкости (газа), движущимися с различными скоростями, т. е. при наличии градиента скорости. Эта сила определяется по формуле Ньютона:

$$F = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S . \quad (4.1)$$

Понятие градиента скорости $\frac{dv}{dz}$ уясните на примере слоистого (ламинарного) течения жидкости, изображенного на рис. 4.1. Величина

$\frac{dv}{dz}$ характеризует изменение скорости слоев жидкости в направлении

нормали к поверхности трущихся слоев.

Следовательно, сила, определяемая по соотношению (4.1), действует между любыми соприкасающимися слоями.

Так, на слой жидкости, площадь поверхности которого равна ΔS (рис. 4.1), со стороны слоя, расположенного ниже, действует ускоряющая, а со стороны слоя, расположенного выше, – замедляющая сила, но такая же по величине.

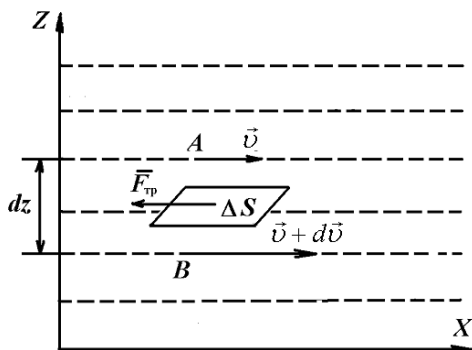


Рис. 4.1. Ламинарное течение жидкости

Уясните физический смысл коэффициента пропорциональности в формуле (4.1). Эта величина, зависящая от рода и состояния вещества, называется *коэффициентом вязкости (внутреннего трения)*. Для этого, пользуясь формулой (4.1), рассчитайте величину силы вязкости, приходящейся на единицу площади соприкосновения трущихся слоев при единичном градиенте скорости. Тогда получите $\eta = F$. Единицей вязкости в СИ является паскаль-секунда (Па · с).

Обратите внимание на использование вязкости жидкостей в технике. Например, смазка маслами трущихся поверхностей в машинах позволяет заменить внешнее (сухое) трение значительно меньшим – внутренним (вязким) трением. В этом случае слой жидкости, непосредственно прилегающий к твердой поверхности трущихся тел, в результате прилипания остается неподвижным относительно нее. Таким образом, трение происходит между слоями смазки.

Описание лабораторной установки и вывод расчетной формулы

Коэффициент вязкости определяется различными методами. В настоящей работе коэффициент вязкости определяется по методу Стокса.

Метод Стокса основан на появлении силы сопротивления при небольших скоростях движения тел в вязкой жидкости или газе. При соприкосновении движущегося твердого тела с жидкостью к поверхности тела тотчас же прилипают молекулы жидкости, образуя мономолекулярный слой, обволакивающий тело. Прилегающий мономолекулярный слой жидкости движется вместе с телом с той же скоростью, что и само тело. Он увлекает в движение соседние частицы жидкости. Эти частицы, приходя в плавное безвихревое движение, увлекают более удаленные от тела частицы, которые движутся медленнее, чем более близкие к нему. В этих условиях между частицами, двигающимися с различными скоростями, действуют силы внутреннего трения.

Силы внутреннего трения, действующие со стороны удаленных частиц на прилегающие к телу частицы, тормозят движение тела, являясь силами сопротивления. Они направлены в сторону, противоположную направлению перемещения тела.

Опыты показывают, что сила сопротивления движению тела зависит от скорости его движения, геометрической формы, линейных размеров, состояния поверхности тела и вязкости жидкости. Сила F наиболее просто может быть определена для тела сферической формы (шарика), движущегося в покоящейся жидкости.

Теоретические расчеты, выполненные Стоксом, показывают, что при малых скоростях движения шарика сила сопротивления вычисляется по формуле

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (4.2)$$

где η – коэффициент вязкости жидкости, Па · с;

r – радиус шарика, м;

v – скорость движения шарика, м/с.

Пусть шарик массой m и радиусом r падает со скоростью v в жидкость с вязкостью η (рис. 4.2). Кроме силы сопротивления (силы Стокса), зависящей от скорости движения, на шарик со стороны жидкости действуют постоянные по величине сила тяжести и выталкивающая архимедова сила. При некоторой скорости движения шарика все действующие на него силы уравниваются, и шарик падает по инер-

ции равномерно. При этом условии сила тяжести равняется сумме силы внутреннего трения и архимедовой силы:

$$P = F + F_A. \quad (4.3)$$

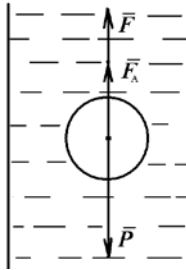


Рис. 4.2. Графическое представление сил

Действующую на шарик силу тяжести выразим зависимостью

$$P = mg = V\rho_{\text{ш}}g = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{ш}}g, \quad (4.4)$$

где $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ – объем шарика, м^3 ;

$\rho_{\text{ш}}$ – плотность вещества шарика, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$.

Архимедова сила F_A равна силе тяжести жидкости, взятой в объеме тела:

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{ж}}g, \quad (4.5)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность испытуемой жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значения F , P и F_A из зависимостей (4.2), (4.4) и (4.5) подставим в равенство (4.3). В результате будем иметь:

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{ш}}g = 6\pi\eta r v + \frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{ж}}g.$$

Преобразовав выражение и заменив g значением $9,8 \text{ м}/\text{с}^2$, получим зависимость

$$\eta = 2,18 \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{v} r^2, \quad (4.6)$$

которая является расчетной формулой для определения коэффициента вязкости жидкости.

Порядок выполнения работы

1. С помощью микроскопа с окулярной шкалой измерить диаметр шарика.

Для этого шарик на стеклянной пластинке поместить под объектив на столик микроскопа и, рассматривая через окуляр, медленно переместить столик микроскопа до появления изображения шарика.

2. После этого перемещать пластинку с шариком до тех пор, пока диаметр шарика не будет расположен вдоль средней линии окулярной шкалы.

3. Установить микроскоп на резкую видимость шарика и произвести отсчеты a и b по концам диаметра шарика (рис. 4.3).

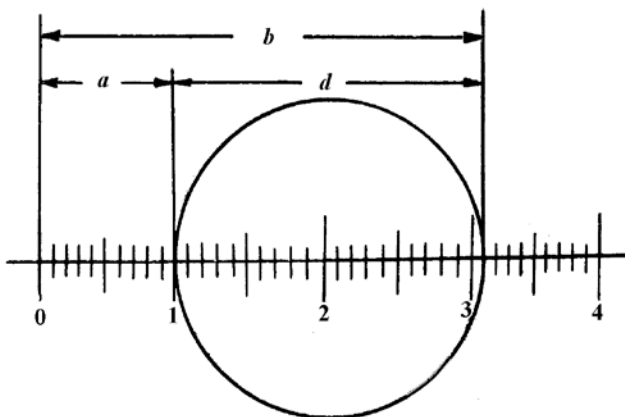


Рис. 4.3. Вид шарика в окуляре микроскопа

Разность полученных расчетов $(b - a)$ даст величину диаметра шарика, выраженную в делениях шкалы микроскопа. Так, на рис. 4.3 $a = 10$ малых делений, $b = 31$ деление. Поэтому $d = b - a = 21$. Для выражения диаметра в миллиметрах полученное значение диаметра в делениях шкалы микроскопа необходимо умножить на цену одного деления шкалы c , выраженную в миллиметрах. Цена малого деления c указана на микроскопе. Таким образом, $D = (b - a)c$.

4. Значения a , b , d , c и D записать в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1. Результаты измерений и вычислений

№ п/п	a , дел.	b , дел.	d , дел.	c , мм/дел.	D , мм
1					
2					
3					
4					
5					

5. Измерив диаметр шарика, опустить его в трубку с жидкостью. Для уменьшения тормозящего влияния стенок трубки на движущийся шарик его необходимо пускать по осевой части трубки с жидкостью.

6. Время движения шарика определить секундомером, который нужно включить в момент, когда шарик проходит верхнюю метку, и остановить при прохождении нижней метки на трубке. **Верхняя метка должна быть расположена на такой высоте, чтобы к моменту ее достижения шариком, он двигался равномерно.**

7. Измерить путь S , проходимый шариком равномерно в жидкости. Он равен расстоянию между верхней и нижней метками на трубке с испытуемой жидкостью. Найти скорость равномерного движения шарика по зависимости $v = S/t$.

8. Опыты произвести не менее пяти раз с шариками приблизительно одинакового радиуса.

9. По формуле (4.6) рассчитать динамический коэффициент η вязкости испытуемой жидкости. Значения плотностей жидкости и шарика следующие: $\rho_{ж} = 1250 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{ш} = 9650 \text{ кг/м}^3$.

10. Полученные данные занести в табл. 4.2.

11. Вычислить среднее значение коэффициента вязкости по формуле $\eta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i}{N}$, где N – количество опытов. Результаты записать в табл. 4.2.

Т а б л и ц а 4.2. Результаты измерений и вычислений

№ п/п	$r = D/2$, м	t , с	S , м	v , м/с	η , Па · с	$\eta_{\text{ср}}$, Па · с
1						
2						
3						
4						
5						

Контрольные вопросы

1. Запишите формулу Ньютона для силы внутреннего трения. Поясните понятие градиента скорости.
2. Что такое вязкость? Объясните причины возникновения вязкости в жидкостях и газах.
3. Поясните физический смысл коэффициента вязкости.
4. В чем заключается определение коэффициента вязкости по методу Стокса?
5. Запишите рабочую формулу (4.6).

ПРИЛОЖЕНИЕ

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

Приставка		Множитель	Приставка		Множитель
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение	
экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
пэта	П	10^{15}	санτι	с	10^{-2}
тера	Т	10^{12}	милли	м	10^{-3}
гига	Г	10^9	микро	мк	10^{-6}
мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
кило	к	10^3	пико	п	10^{-12}
гекто	г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Список рекомендуемой литературы.....	4
Лабораторная работа 1. Изучение законов идеальных газов	4
Лабораторная работа 2. Определение отношения теплоемкостей газа C_p/C_v методом Клемана – Дезорма	9
Лабораторная работа 3. Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха.....	16
Лабораторная работа 4. Определение коэффициента вязкости по методу Стокса..	22
Приложение.....	29

У ч е б н о е и з д а н и е

Козлов Степан Иванович
Астахова Ольга Максимовна
Грузинский Валерий Николаевич и др.

ФИЗИКА

ТЕРМОДИНАМИКА И ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Редактор *Е. В. Ширалиева*
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*
Корректор *А. С. Зайцева*

Подписано в печать 19.12.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Ризография. Гарнитура «Гаймс». Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,15.
Тираж 75 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Свидетельство о ГРИИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.