



СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

В. В. Майер Е. И. Вараксина	СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ 3
--------------------------------	---

Старшая школа

И. Д. Бородин А. В. Попова Ф. А. Сидоренко	ШАРИК НА МАГНИТОСТРИКЦИОННОМ ВИБРАТОРЕ 11
В. В. Майер Е. И. Вараксина И. А. Васильев Ю. А. Корнев	РЕМОНТ ШКОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОФОРНОЙ МАШИНЫ КАК СРЕДСТВО РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ 14

Высшая школа

С. М. Кокин С. Г. Стоюхин С. В. Мухин	ПОСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ МАССЫ ВОЗДУХА» ... 38
---	---

А. Р. Аржаник С. Г. Катаев А. В. Штак	ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЧЕБНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ УСТАНОВКИ В ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ КУРСАХ .. 45
---	---

Науковедение

Ю. А. Сауров М. П. Уварова	О СТРУКТУРНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ ФИЗИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ В ОБУЧЕНИИ..... 55
-------------------------------	---

АВТОРЫ ЖУРНАЛА	63
----------------------	----

ABSTRACTS	64
-----------------	----

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

Редакционный совет:

И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Г. Г. Никифоров	к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
А. Ю. Пентин	к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская-Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГГПИ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, Пединститут, Телефон: (341 41) 5-32-29.

E-mail: kropa@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный педагогический институт имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77-69506.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 19.06.23. Подписано в печать 26.06.23. Дата выхода в свет: 27.06.23. Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,0.

Заказ 158. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Кольца Ньютона в красном и зеленом свете.

УДК 372.853

С. М. Кокин, С. Г. Стоюхин, С. В. Мухин

ПОСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ МАССЫ ВОЗДУХА»

Описана работа для студенческого лабораторного практикума по физике «Определение молярной массы воздуха». Установка оригинальной конструкции создана на кафедре «Физика» РУТ (МИИТ).

Ключевые слова: лабораторная работа, молярная масса воздуха, идеальный газ, фигуры Лиссажу, скорость звука в воздухе.

При формировании плана выполнения лабораторных работ учитывается соответствие их тематики лекционному курсу. Особую ценность имеют работы, теоретическая часть которых перекрывает несколько разделов и семестров, поскольку в этом случае пройденный ранее материал «закрепляется» с большей вероятностью.

В данном сообщении обсуждается именно такая лабораторная работа. При выводе расчетных соотношений студентам необходимо вспомнить и использовать элементы молекулярной физики и теории колебаний. Математическая сторона теоретической части кроме школьной алгебры включает элементы высшей математики, в частности, дифференцирование. Выполнение работы позволяет приобрести навыки использования измерительной техники, получить новые знания и умения, закрепить в памяти уже имеющиеся.

При выводе расчетных формул, описывающих особенности распространения звуковой волны в воздухе, используются подходы И. Ньютона и П. Лапласа. Корректный вывод соответствующих формул для скорости звука в воздухе, однако, достаточно сложен для студентов обычных технических вузов (в силу ограниченности времени, отводимого на изучение физики существующими учебными планами), поэтому мы предлагаем получить соответствующие формулы, используя метод размерности.

Для этого следует обратить внимание студентов на то, что воздух в обычных условиях удобно считать идеальным газом, свойства которого определяются параметрами его состояния: давлением P (единица измерения $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ или $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \text{с}^{-2}$), объемом V (м^3), массой m (кг), молярной массой μ ($\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$) и температурой T (К). Именно от этих параметров и должны зависеть все характеристики газа, и, в частности, скорость v ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) движения, как отдельных молекул, так и их коллективов, возмущений. К числу подобных возмущений относится и звуковая волна, являющаяся процессом распространения в пространстве областей упорядоченного колебательного движения молекул в виде сжатий и разрежений.

Нетрудно сделать вывод о том, что размерность скорости получается, если скомпоновать перечисленные параметры состояния в виде следующих соотношений:

$$v \sim \sqrt{\frac{PV}{m}} \quad \text{или} \quad v \sim \sqrt{\frac{P}{\rho}}, \quad (1)$$

$\rho = m/V$ — плотность газа (одно получается из другого с использованием уравнения Клапейрона–Менделеева). Такая же комбинация параметров состояния соответствует и выражению для среднеквадратичной скорости молекул газа с той лишь разницей, что в формулу должна входить масса не всего газа в целом, а лишь одной молекулы.

Более строгие расчеты (см., например, [1, 2]) говорят о том, что, в отличие от среднеквадратичной скорости, для вычисления которой под знак корня нужно вставить множитель 3, в формулу для скорости звуковой волны в газе добавочный численный коэффициент не входит, то есть

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{P}{\rho}}. \quad (2)$$

Размерность скорости, однако, получается и в следующем случае:

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}. \quad (3)$$

Согласно уравнению Клапейрона–Менделеева

$$P = \frac{\rho RT}{\mu},$$

поэтому если процесс распространения возмущения в газе (звуковой волны) считать изотермическим, то

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{RT}{\mu} = \frac{P}{\rho}, \quad (4)$$

то есть формулы (2) и (3) оказываются идентичны.

Приближение изотермического изменения давления газа в распространяющейся звуковой волне впервые рассмотрел И. Ньютон, им же получена формула (2), которая может быть переписана в виде, включающем универсальную газовую постоянную $R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$:

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{RT}{\mu}}. \quad (5)$$

В 1816 году П. Лаплас впервые указал (и дальнейшие исследования подтвердили это) на то, что различные области газа в звуковой волне имеют неодинаковую температуру. Дело в том, что процесс сжатия–разрежения в волне идет достаточно быстро, и температура не успевает выравняться. Но поскольку теплопроводность воздуха в обычных условиях достаточно мала, теплообменом с газом окружающей среды можно пренебречь. Это означает, что процесс сжатия–разрежения надо считать не изотермическим, а адиабатным, и поэтому формулы для расчета $v_{\text{зв}}$ приобретают несколько иной вид.

Действительно, согласно уравнению Пуассона для адиабатного процесса $PV^\gamma = \text{const}$, где γ — постоянная адиабаты, и

$$\gamma PV^{\gamma-1} dV + V^\gamma dP = 0,$$

$$\frac{dV}{V} = -\frac{dP}{\gamma P}.$$

С учетом того, что $\rho = m/V$, для неизменной массы газа получаем:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{\gamma P} \quad \text{или} \quad \frac{dP}{d\rho} = \frac{\gamma P}{\rho},$$

поэтому в рамках модели Лапласа

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}. \quad (6)$$

Именно эта формула и используется далее для нахождения молярной массы μ воздуха, который с хорошей точностью можно считать двухатомным идеальным газом (в этом случае показатель степени в уравнении Пуассона легко рассчитывается теоретически: $\gamma = 1,4$). Для этого студентам необходимо определить, чему равна скорость $v_{зв}$ распространения звуковых волн в воздухе (и измерить его температуру T).

Используемый в данной работе метод определения скорости звука основан на анализе изменения фазы бегущей волны. Известно, что уравнение плоской продольной волны сжатия–разрежения, распространяющейся вдоль некоторой оси x , может быть записано в виде:

$$P(x, t) = P_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (7)$$

где $P(x, t)$ — давление воздуха в зависимости от координаты и времени, ω — циклическая частота, x — расстояние от источника до приемника звука, P_0 — амплитудное значение давления в волне, $k = 2\pi/\lambda_{зв}$ — волновое число, φ_0 — начальная фаза. Звуковая волна заданной частоты ν создается генератором; студентам предлагается определить длину этой волны $\lambda_{зв}$, фиксируя с помощью осциллографа изменение ее фазы по мере удаления от источника, а затем вычислить скорость волны $v_{зв} = \lambda_{зв}\nu$.

Микрофон, поставленный на пути звуковой волны, позволяет преобразовать давление воздуха P в электрическое напряжение U . Поскольку создаваемые значения давления небольшие, то возможными нелинейными эффектами пренебрегаем и считаем, что U пропорционально P . Это означает, что зависимость $U(x, t)$ будет выражаться формулой, аналогичной соотношению (7):

$$U(x, t) = U_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_{зв}} + \varphi_0\right), \quad (8)$$

где U_0 — амплитуда напряжения на микрофоне, $\lambda_{зв}$ — длина звуковой волны.

Напряжение с микрофона подается на вход Y осциллографа. На вход X подается сигнал со звукового генератора, которым возбуждалась волна в источнике звука (динамике):

$$U^*(t) = U_0^* \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где U_0^* — амплитуда напряжения на выходе звукового генератора. При сложении взаимно перпендикулярных колебаний на

экране осциллографа возникает эллипс, угол наклона осей которого определяется разностью фаз складываемых колебаний $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi_1 = (\omega t + \varphi_0) - \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_{зв}} + \varphi_0 \right) = \frac{2\pi x}{\lambda_{зв}}.$$

Передвинем микрофон на расстояние Δx от прежнего положения: разность фаз изменится и составит

$$\Delta\varphi_2 = (\omega t + \varphi_0) - \left(\omega t - \frac{2\pi(x + \Delta x)}{\lambda_{зв}} + \varphi_0 \right) = \frac{2\pi(x + \Delta x)}{\lambda_{зв}}.$$

Сместим микрофон на такое расстояние Δx , которому соответствует изменение сдвига колебаний по фазе на π . При этом можно будет записать:

$$\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda_{зв}} = \pi. \quad (9)$$

Из последнего соотношения следует, что $\Delta x = \lambda_{зв}/2$.

Исходя из полученных данных, можно определить скорость звука в воздухе: $v_{зв} = \lambda_{зв}\nu = 2\Delta x \cdot \nu$, а затем, используя формулу (6), рассчитать молярную массу воздуха:

$$\mu = \frac{\gamma RT}{v_{зв}^2} = \frac{\gamma RT}{(2\Delta x)^2 \cdot \nu^2}. \quad (10)$$

Внешний вид стенда к лабораторной работе представлен на рис. 1. На источник звука 1 сигнал подается со звукового генератора 3. Частота генератора выбирается в пределах от 1 до 2 кГц (подобрана эмпирически для используемых в работе динамиков). С приемника 2 электрический сигнал подается на пластины Y осциллографа 5. (В качестве приемника и источника звука нами использованы трансляционные динамики). Одновременно со звукового генератора 3 на пластины X осциллографа 5 подается сигнал, повторяющий тот, который идет на источник звука 1. Расстояние от источника до приемника звука измеряется с помощью линейки 4.

В работе используются типовые приборы: осциллограф ОСУ-10В и звуковой генератор ГЗ-109, возможно применение приборов и других марок. При правильной настройке осциллографа на его экране возникает изображение в виде эллипса. Перемещая приемник звука, можно наблюдать, как меняется форма эллипса, как он поворачивается, меняя направление главных осей.



Рис. 1. Внешний вид стенда к лабораторной работе: 1 — динамик (источник звука); 2 — микрофон (приемник звука); 3 — звуковой генератор; 4 — линейка; 5 — осциллограф

При сдвиге фаз между складываемыми взаимно перпендикулярными колебаниями, равном нулю, эллипс вырождается в отрезок, лежащий в 1–3 четвертях декартовой системы координат. При сдвиге фаз, равном π , эллипс вырождается в отрезок, лежащий во 2–4 четвертях декартовой системы координат. Сказанное иллюстрируется рисунками 2.1 и 2.2.

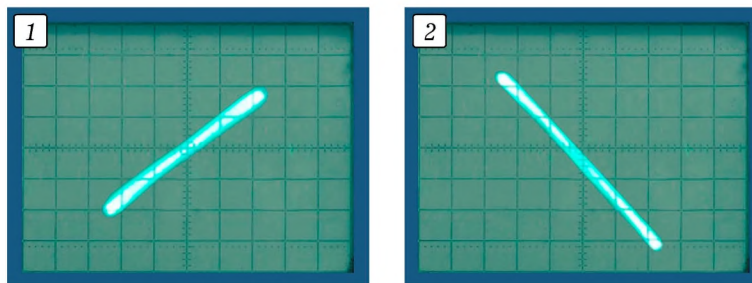


Рис. 2. Фигуры Лиссажу — результат сложения взаимно перпендикулярных колебаний: 1 — разность фаз равна нулю; 2 — разность фаз равна π

В процессе выполнения работы студенты проводят серию измерений расстояний Δx , на которых эллипс, вырожденный

в отрезок, меняет свою ориентацию (см. рис. 2). Обычно измерения проводятся на частоте 1 кГц, при не слишком высокой амплитуде сигнала (с тем, чтобы избежать излишнего шума в аудитории). По полученным данным вычисляется скорость звука в воздухе, а затем (после снятия показаний комнатного термометра) рассчитываются как сама молярная масса воздуха μ , так и ошибка ее измерения. Практика показывает, что получаемые результаты хорошо согласуются с известным значением молярной массы воздуха ($\mu = 28,8$ г/моль).

Данная лабораторная работа поставлена силами сотрудников кафедры и успешно идет в лабораториях кафедры [3]. Она нравится преподавателям и студентам своей наглядностью и надежностью. Для ее постановки использованы принадлежности, которые имеются в арсенале многих лабораторий при кафедрах физики, и, при желании, она может быть легко поставлена самостоятельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: для вузов. В 5 т. Т. I. Механика. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 560 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: для вузов. В 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 544 с.
3. Никитенко В. А., Стоюхин С. Г. Создание лабораторной работы «Определение молярной массы воздуха» силами сотрудников кафедры «Физика» // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 33. — М.: ИСРО РАО, 2021. — С. 66-67.

Российский университет
транспорта (РУТ (МИИТ))

Поступила в редакцию 14.03.23.

ABSTRACTS

Mayer V. V., Varaksina E. I. Stroboscopic method of investigation of rectilinear motion. It is proposed to use the method of stroboscopic photographing for the educational study of rectilinear motion. The basis of the installation is a straight chute with magnetic rails and a trolley with a magnetic suspension taken from the well-known set of «Mechanics». A self-luminous strobe light is fixed on the trolley, the rectilinear movement of which students photograph with digital cameras of tablets or smartphones. *Keywords:* chute with magnetic rails, maglev trolley, self-luminous strobe light, digital camera.

Borodin I. D., Popova A. V., Sidorenko F. A. A ball on a magnetostrictive vibrator. An educational study of the behavior of a steel ball located at the end of a vertical ferrite rod carrying out magnetostrictive vibrations under the influence of a high-frequency field of the coil has been implemented. At the same time, it is possible to observe random bounces of the ball to heights up to tens of centimeters. These observations introduce students to the physics of the impact of the ball on the rod and the phenomenon of magnetostriction. *Keywords:* magnetostrictive vibrator, ferrite rod, frequency 14.75 kHz, steel ball.

Mayer V. V., Varaksina E. I., Vasiliev I. A., Kornev Yu. A. Repair of a school electrophoretic machine as a means of developing engineering competence. The technology of repair of a school electrophoretic machine aimed at the development of engineering competence in the study of physics in secondary and higher pedagogical schools is considered. *Keywords:* engineering competence, development, electrophoretic machine, repair.

Kokin S. M., Stouykhin S. G., Mukhin S. V. Setting up laboratory work «Determination of the molar mass of air». The paper describes the work for a student laboratory workshop on physics of «molar mass of air». The work can be attributed to the branches «Molecular physics» and «Vibrations and waves». The installation was created at the Department of «Physics» of RUT (MIIT). *Keywords:* laboratory work, molar mass of air, ideal gas, Lissajous figures.

Arzhanik A. R., Kataev S. G., Shtak A. V. Prospects for application of the training X-ray installation in physical workshop and interdisciplinary courses. The experience of using an educational X-ray installation in a physics workshop and for demonstrating the properties of X-ray radiation for students of pedagogical universities is presented. *Keywords:* X-ray radiation, physical workshop, demonstration experiment.

Saurov Yu. A., Uvarova M. P. On structural representations of physical thinking in learning. Physical thinking is a complex structural formation of intellectual processes. Depending on the specifics of the subject activity, its structure and content can be refined and technologically presented in the form of certain components. Therefore, for the practice of teaching physics, it is so important to identify the components of physical thinking, in fact, «learning outcomes», and on this basis to build methods for the formation (assignment) of thinking as a «kind of experience». *Keywords:* methodology of activity, physical thinking, theoretical generalizations, structures of thinking, orientations of educational activity.