



---

---

**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
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
В. А. Саранин	д.ф.-м.н., профессор, Глазов
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург

**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

**Перечень ВАК:** Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

**Адрес редакции, издателя и типографии:** 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, Пединститут. Телефон: (341 41) 5-32-29.  
*E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropa@bk.ru*

---

---

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет 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.

**Подписной индекс:** 79876.

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

Сдано в набор 01.11.23. Подписано в печать 20.12.23.

Дата выхода в свет: 22.12.23.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 160. Тираж 200 экз. Цена свободная.

**Первая страница обложки:** Экспериментальная установка для градуировки электрометра по напряжению.

*Научная статья*

ББК 74.262.23

УДК 372.853

В. В. Майер, Е. И. Вараксина  
СКОРОСТЬ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ  
И ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Предлагается дидактический ресурс для учебных занятий по экспериментальной физике, обеспечивающий теоретическое и экспериментальное изучение импульсного метода измерения скорости звука в воздухе и установление зависимости ее от температуры.

*Ключевые слова:* воздух, звук, скорость, температурная зависимость, учебная теория, учебный эксперимент.

V. V. Mayer, E. I. Varaksina  
THE SPEED OF SOUND IN THE AIR  
AND ITS DEPENDENCE ON TEMPERATURE

A didactic resource of educational sessions in experimental physics is proposed. This resource provides a theoretical and experimental study of the pulse method of measuring the speed of sound in air and establishing its dependence on temperature.

*Keywords:* air, sound, speed, temperature dependence, educational theory, educational experiment.

## ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой составляющей экспериментальной компетенции учителя физики являются базовые инженерные умения. Это означает, что учитель должен уметь, как минимум, из имеющегося в его распоряжении оборудования собирать и налаживать экспериментальные установки, обеспечивающие эффективное изучение на уроках конкретных физических явлений.

В Глазовском государственном инженерно–педагогическом университете курс общей физики заканчивается разделом «Экспериментальная физика». Основная задача этого раздела состоит в формировании экспериментальной компетенции будущих учителей физики. Для решения этой задачи используется метод исследования учебного физического эксперимента в совместной научной деятельности преподавателя и студентов. Планируемым результатом этой деятельности является совершенствование известного или создание нового учебного эксперимента, обеспечивающего эффективное изучение физических явлений на всех уровнях обучения.

Каждый год для раздела «Экспериментальная физика» разрабатывается новое содержание, которое оформляется в качестве *дидактического ресурса*, включающего учебную физическую теорию, известный учебный эксперимент и научную проблему, нуждающуюся в решении. В настоящей работе представлен дидактический ресурс, посвященный теоретическому и экспериментальному изучению импульсного метода измерения скорости звука в воздухе. Для создания этого ресурса использованы выполненные и опубликованные ранее сотрудниками кафедры физики и дидактики физики исследования. В первую очередь к ним относятся учебное руководство «Измерение скорости звука импульсным методом» [1] и кандидатская диссертация Р. В. Майера [2]. Актуальность и практическая значимость обозначенного направления научного исследования подтверждается недавно опубликованной статьей С. М. Кокина, С. Г. Стоюхина и С. В. Мухина, в которой предложена лабораторная работа по определению молярной массы воздуха методом измерения скорости звука [3].

## УЧЕБНАЯ ТЕОРИЯ

Учебная теория, разработанная для дидактического ресурса «Скорость звука в воздухе и ее зависимость от температуры», частично опубликована в журнале «Потенциал», предназначенном для старшеклассников и учителей физики [4, 5].

### 1. Ошибка Исаака Ньютона

Представим, что в газе находится цилиндрическая труба, открытая с обоих концов. Пусть в одно из отверстий трубы введен легкоподвижный поршень, который приведен в колебательное движение. Тогда возле поршня будет периодически изменяться давление газа и от него по трубе побежит упругая волна. Если частота упругой волны лежит в пределах слышимости, то есть примерно от 20 Гц до 20 кГц, то такая волна называется звуком.

Чтобы найти выражение для скорости звука в газе, допустим, что поршень за время  $\Delta t$  вдвигается внутрь трубы сечением  $S$  на

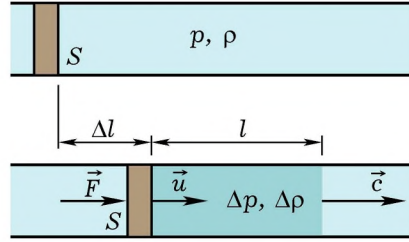


Рис. 1. К вычислению скорости распространения звукового импульса

небольшое расстояние  $\Delta l$  (рис. 1). При этом возле поршня возникнет область сжатия, в которой давление газа увеличивается на  $\Delta p$ , и его плотность возрастает на  $\Delta \rho$ . Поршень, сжимающий газ, действует на него с силой  $F = S\Delta p$ , и передает области сжатия газа импульс  $F\Delta t = S\Delta p\Delta t$ .

Фронт области сжатия распространяется со скоростью звука  $c$ , поэтому за время движения поршня  $\Delta t$  объем сжатой части газа возрастает до величины  $V = Sl = Sc\Delta t$ . Масса газа в этом объеме увеличивается на  $\Delta m = \Delta\rho V = \Delta\rho Sc\Delta t$ . При этом она приобретает импульс  $\Delta m \cdot c = \Delta\rho Sc^2\Delta t$ . Так как приобретенный массой газа  $m$  импульс равен импульсу действующей на газ в течение времени  $\Delta t$  силы  $F$ :  $\Delta m \cdot c = F\Delta t = S\Delta p\Delta t$ , то из предыдущих формул получаем равенство  $S\Delta p\Delta t = \Delta\rho Sc^2\Delta t$ , откуда скорость звука в газе

$$c = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}}.$$

Дальше вместо приращений физических величин будем использовать дифференциалы, то есть те же приращения, но бесконечно малые по величине. Это значительно облегчит дело, так как появится возможность дифференцировать и интегрировать. Поэтому предыдущую формулу перепишем в виде:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}. \quad (1)$$

Но плотность газа  $\rho$  зависит от давления  $p$ . Для *изотермического* процесса  $T = \text{const}$  и  $pV = \text{const}$ . Дифференцируя это выражение, получаем  $p dV + V dp = 0$ , отсюда  $dV/V = -dp/p$ . Так как  $\rho = m/V$ , то после дифференцирования  $\rho$  по  $V$  с учетом предыдущей формулы имеем:

$$d\rho = -\frac{m}{V^2}dV = \rho \frac{dp}{p}.$$

Подставляя это значение в формулу (1), вслед за Ньютоном получаем:

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho}}. \quad (2)$$

**Задание 1. Первые измерения скорости звука в воздухе.** Измерения скорости звука обычно осуществлялись ночью: один экспериментатор производил выстрел из пистолета, а второй включал хронометр в момент наблюдения вспышки света и выключал, когда слышал звук от выстрела. Оба экспериментатора находились в пределах прямой видимости на таком расстоянии  $l$ , чтобы время  $t$  распространения звука между ними было как можно больше. Скорость звука определялась вычислением отношения  $c = l/t$ .

Найдите достоверную информацию и подготовьте небольшой рассказ о первых измерениях скорости звука в воздухе и полученных при этом результатах. Выясните, когда и кем было найдено значение скорости звука в воздухе, близкое к современному.

**Задание 2. Проверка формулы Ньютона.** Найдите табличные значения атмосферного давления и плотности воздуха при температуре  $0^\circ\text{C}$  на поверхности Земли. По формуле Ньютона (2) вычислите скорость звука в этих условиях и сравните получившееся значение с табличным. Сделайте выводы.

## 2. Изменение давления в звуковой волне

В звуковой волне фазы сжатия газа сменяются фазами разрежения. Но успевает ли газ, давление которого изменяется, обмениваться теплом с окружающей средой так, чтобы процесс можно было считать изотермическим? Чтобы ответить на этот вопрос, достаточно выполнить простой опыт.

**Задание 3. Туман в бутылке.** Приготовьте эффектный и максимально доступный для воспроизведения учебный опыт по образованию тумана в бутылке, продемонстрируйте его на лекционном занятии и объясните наблюдаемые явления.

### Условия

Подготовьте чистый *стеклянный* сосуд объемом примерно 0,5 л, резиновую пробку, металлическую или пластмассовую трубку диаметром примерно 6 мм, отрезок резинового шланга, микронасос от *тонометра* (это прибор для измерения артериального давления), пьезоэлектрическую зажигалку и немного воды. В пробке сделайте отверстие и вставьте в него трубку так, чтобы соединение получилось герметичным. Трубку шлангом соедините с микронасосом.

Опыт проведите следующим образом. Ополосните сосуд изнутри водой, опустите внутрь сосуда конец пьезоэлектрической зажигалки и, нажимая на ее рычаг, произведите несколько разрядов.

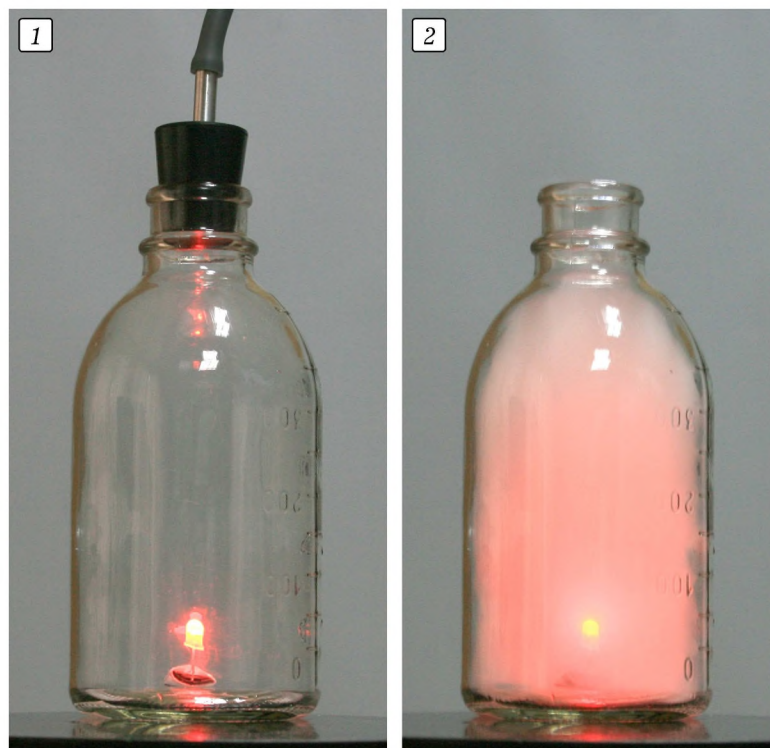


Рис. 2. Демонстрация образования тумана в стеклянной бутылке при резком расширении насыщенного пара

Уберите пьезозажигалку, плотно закройте отверстие сосуда пробкой и микронасосом накачивайте в сосуд воздух до тех пор, пока из него не вылетит пробка.

#### Результат

Вы услышите довольно громкий хлопок и увидите, что сосуд заполнился густым туманом. Чтобы туман был виден лучше, внутрь сосуда можно поместить сверхяркий светодиод красного света с питающей его батарейкой на 3 В (рис. 2).

#### Анализ

Услышанный хлопок означает, что от бутылки до ушей наблюдателя дошел звук. Понятно, что он возникает за счет резкого расширения газа, первоначально заполняющего бутылку. Следовательно, источником звука в воздухе является изменение давления в некоторой его части.

Но давление связано с объемом и температурой газа знаменитым уравнением Клапейрона–Менделеева, которое для одного моля идеального газа объемом  $V$  выглядит так:

$$pV = RT, \quad (3)$$

где  $R = N_A k = 8,31$  Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная,  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$  — число Авогадро,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Образовавшийся в бутылке туман — ничто иное как водяной пар, сконденсировавшийся в капли на возникших при электрических разрядах ионах. Такая конденсация оказывается возможной, если пар становится пересыщенным. Вначале в бутылке был насыщенный при комнатной температуре пар, он может стать пересыщенным только из-за уменьшения температуры. Таким образом, при быстром расширении воздуха его температура уменьшается, следовательно, процесс не является изотермическим.

### 3. Уравнение Пуассона

Найдем связь между давлением газа и его объемом для адиабатического процесса. Согласно первому началу термодинамики количество теплоты  $dQ$ , полученное данной массой газа, идет на увеличение внутренней энергии газа  $dU$  и совершение им работы  $A = pdV$ :

$$dQ = dU + A = dU + pdV. \quad (4)$$

Если при этом температура моля газа увеличилась на  $dT$ , то его молярная теплоемкость равна

$$C = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT}. \quad (5)$$

Если объем газа остается постоянным  $V = \text{const}$ , то  $dV = 0$  и молярная теплоемкость газа при постоянном объеме

$$C_V = \frac{dU}{dT}. \quad (6)$$

Если не меняется давление газа  $p = \text{const}$ , то из (3)  $pdV = RdT$ , в таком случае из (5) и (6) молярная теплоемкость при постоянном давлении:

$$C_p = C_V + R. \quad (7)$$

При адиабатическом процессе теплообмен с окружающей средой отсутствует  $dQ = 0$ , поэтому из (5) и (6):

$$C_V + p \frac{dV}{dT} = 0. \quad (8)$$



Подставляя сюда вместо  $p$  его выражение  $p = RT/V$ , из (3) получаем:

$$C_V + \frac{RT}{V} \frac{dV}{dT} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} = 0. \quad (9)$$

Но из (7) коэффициент перед вторым слагаемым равен:

$$\frac{R}{C_V} = \frac{C_p}{C_V} - 1.$$

Отношение теплоемкостей при постоянном давлении  $p$  и объеме  $V$  обычно обозначают  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}. \quad (10)$$

Тогда формулу (9) можно записать в виде:

$$\frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0.$$

Интегрируя это дифференциальное уравнение, получаем

$$\ln T + (\gamma - 1) \ln V = \text{const} \quad \text{или} \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}. \quad (11)$$

Это и есть *уравнение Пуассона*. Чтобы в нем перейти от температуры  $T$  к давлению  $p$ , используем уравнение Клапейрона–Менделеева (3). Из него  $T = pV/R$ , и из (11) получаем:

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (12)$$

Таким образом, если для изотермического процесса произведение давления на объем идеального газа остается постоянным (3), то для адиабатического процесса постоянно произведение давления на объем в степени  $\gamma$  (12).

**Задание 4. Вывод уравнения Пуассона.** Научитесь выводить уравнение Пуассона (12) и воспроизводить этот вывод с необходимыми пояснениями на аудиторной доске [6].

#### 4. Показатель адиабаты

Чтобы найти величину  $\gamma$ , придется вспомнить молекулярно-кинетическую теорию. В ней молекулы идеального газа моделируются материальными точками, которые могут совершать только поступательные движения в пространстве трех измерений. Говорят, что такие молекулы обладают тремя степенями свободы. На каждую из них приходится в среднем одинаковая энергия, равная  $kT/2$ .

Воздух состоит в основном из двухатомных молекул, каждую из которых нужно моделировать двумя связанными между собой материальными точками. Такие молекулы не только перемещаются в пространстве, но и поворачиваются как целое, а их атомы колеблются. Если начало декартовой системы координат  $O$  совместить с центром масс двухатомной молекулы, а ось  $Ox$  направить через атомы, то наглядно возможные

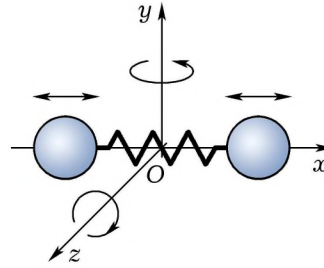


Рис. 3. Модель двухатомной молекулы для определения числа ее степеней свободы

движения молекулы можно представить как показано на рис. 3. Центр масс, а значит, и вся молекула может двигаться вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Кроме того, молекула может вращаться вокруг осей  $y$ ,  $z$ , а ее атомы — и колебаться в направлении оси  $x$ . Вращением молекулы вокруг оси  $x$  нужно пренебречь, так как атомы считаются материальными точками. Таким образом, двухатомная молекула обладает шестью степенями свободы.

Поступательное и вращательное движения характеризуются кинетической энергией, а колебательное — кинетической и потенциальной. Среднее значение каждого вида энергии движения молекулы равно  $kT/2$ . Поэтому хотя на каждую поступательную и вращательную степень свободы в среднем приходится энергия  $kT/2$ , то колебательная степень свободы обладает в два раза большей энергией  $kT$ . Следовательно, средняя энергия молекулы равна  $ikT/2$ , где

$$i = i_{\text{п}} + i_{\text{в}} + 2i_{\text{к}} \quad (13)$$

сумма числа поступательных  $i_{\text{п}}$ , вращательных  $i_{\text{в}}$  и удвоенного числа колебательных  $i_{\text{к}}$  степеней свободы молекулы.

Количество молекул, составляющих один моль газа, равно числу Авогадро  $N_A$ . Поэтому внутренняя энергия одного моля газа

$$U = N_A i \frac{kT}{2} = \frac{i}{2} RT. \quad (14)$$

Согласно (6) и (7) отсюда молярные теплоемкости газа  $C_V = dU/dT = iR/2$  и  $C_p = C_V + R = (i/2 + 1)R$ , а их отношение

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i + 2}{i}.$$

Таким образом, поскольку для одноатомного и двухатомного газов

$i = 3$  и  $i = 7$  соответственно, то для них

$$\gamma_1 = \frac{5}{3} \quad \text{и} \quad \gamma_2 = \frac{9}{7}. \quad (15)$$

**Задание 5. Степени свободы молекул газа и показатель адиабаты.** Научитесь давать простые и понятные объяснения физической сущности степеней свободы одноатомной и двухатомной молекул. Сформулируйте и поясните закон равнораспределения энергии по степеням свободы молекулы [6]. Научитесь теоретически находить показатель адиабаты для воздуха (15).

### 5. Скорость звука в газе

Формула (1) в рамках элементарной теории выведена безупречно, значит, нужно найти выражения для  $dp$  и  $d\rho$ . Так как объем газа обратно пропорционален его плотности  $V \sim 1/\rho$ , то уравнению Пуассона в форме (12) можно придать вид:

$$p\rho^{-\gamma} = \text{const.}$$

Дифференцируя это уравнение, имеем

$$\rho^{-\gamma} dp - \gamma p \rho^{-\gamma-1} d\rho = 0.$$

Отсюда после небольших преобразований получаем

$$\frac{dp}{d\rho} = \gamma \frac{p}{\rho}. \quad (16)$$

Подставляя найденное значение в формулу (1) для скорости звука в газе получаем *формулу Лапласа*:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}. \quad (17)$$

Она отличается от формулы Ньютона (2) только коэффициентом  $\sqrt{\gamma}$  и дает, как вы можете убедиться сами, правильное значение скорости звука в воздухе.

Плотность газа зависит от давления, а в формуле для скорости звука желательно иметь лишь независимые величины. Так как плотность моля газа равна его массе  $M$ , деленной на объем  $V$ , то из уравнения Клапейрона–Менделеева (3) имеем:  $\rho = M/V = Mp/RT$ . Подставляя это значение в (17), окончательно получаем:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{R}{M}} \sqrt{T}. \quad (18)$$

Таким образом, скорость звука в данном газе зависит только от его абсолютной температуры! Этот результат нуждается в экспериментальной проверке.

**Задание 6. Научный метод познания при изучении скорости звука в воздухе.** Подготовьте фрагмент лекционного занятия, на котором теоретически выводится зависимость скорости звука в газе от его температуры (18). При изложении этого фрагмента используйте известную формулу научного познания: *факты* → *модель* → *следствия* → *эксперимент*, наполнив конкретным содержанием все ее компоненты.

### УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Дидактические исследования импульсного метода измерения скорости звука в различных средах проведены, например, в работах [1, 2], результаты которых здесь использованы.

#### 6. Функциональная схема измерителя скорости звука

Функциональная схема экспериментальной установки для измерения скорости звука в воздухе импульсным методом приведена на рис. 4. Динамик *ВА1*, соединенный с возбудителем *1* испускает кратковременный звуковой импульс.

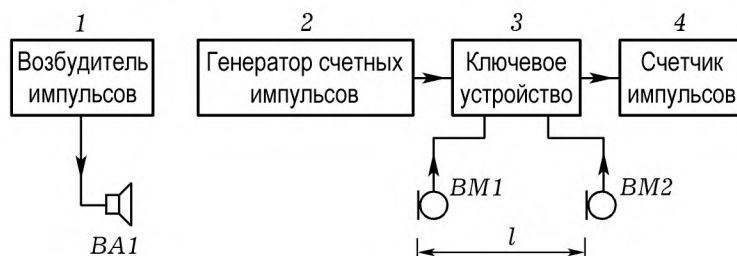


Рис. 4. Функциональная схема экспериментальной установки для определения скорости распространения звукового импульса методом двух микрофонов

Достигнув микрофона *ВМ1*, звуковой импульс преобразуется в электрический сигнал, который вызывает открывание ключевого устройства *3*. При этом электрические импульсы стабильной частоты, формируемые генератором счетных импульсов *2*, поступают на счетчик *4*. Счет этих импульсов продолжается до тех пор, пока звуковая волна, пройдя расстояние *l*, не достигнет микрофона *ВМ2*, расположенного на одной прямой с динамиком *ВА1* и микрофоном *ВМ1*. Это приводит к закрыванию ключевого устройства и прекращению счета импульсов.

Таким образом, по частоте следования и числу сосчитанных импульсов можно определить время, в течение которого ключевое устройство было открыто. Это время с достаточно высокой точностью равно времени распространения звуковой волны от первого микрофона до второго. Дело в том, что хотя ключевое устройство и срабатывает с некоторой задержкой после прихода звуковой волны к микрофону, но такие задержки для первого и второго микрофонов практически одинаковы.

**Задание 7. Аналогия с историческим экспериментом.** Разработайте фрагмент школьного урока, в котором ставится и решается проблема измерения скорости звука в воздухе на лабораторном столе методом, которым она впервые была определена исторически. Изучите устройство и принцип действия электретного микрофона.

### 7. Возбудитель звукового импульса

Источником кратковременного звукового импульса может служить динамик. Для этого достаточно от батареи гальванических элементов через резистор зарядить конденсатор и, нажав на кнопку, разрядить его через катушку динамика.

Однако этот способ пригоден только в предварительных опытах. Недостаток его состоит в том, что при нажатии на кнопку неизбежно возникает дребезг контактов. В результате следующие один за другим импульсы тока разрядки конденсатора не одинаковы. Разные по форме звуковые импульсы вызывают сбои в работе счетного устройства.

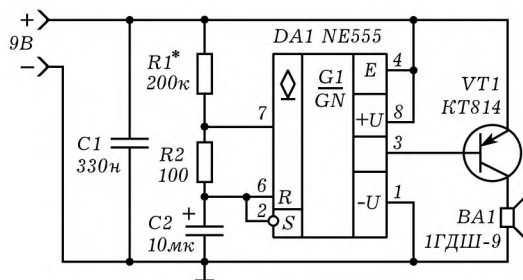


Рис. 5. Принципиальная схема возбудителя звуковых импульсов

Необходим возбудитель, обеспечивающий получение последовательности практически одинаковых звуковых импульсов (рис. 5). Задающий генератор этого прибора собран на таймере *DA1* типа *NE555*, электрический сигнал с выхода которого усиливается транзистором *VT1* и поступает на динамик *BA1*. Полярность включения динамика подобрана так, что в первый момент прихода крат-

ковременного импульса напряжения на его катушку диффузор *начинает двигаться в направлении распространения звука*. Тогда динамик станет вырабатывать звуковые импульсы, начинающиеся с фазы сжатия.

**Задание 8. Параметры звуковых импульсов.** Пользуясь статьей [7] и принципиальной схемой возбудителя импульсов, вычислите период следования импульсов напряжения, вырабатываемых генератором (рис. 5), длительность рабочих импульсов и продолжительность паузы между ними. Объясните, почему полученные в расчетах значения обеспечивают быстрое и удобное измерение времени распространения звука в воздухе.

**Задание 9. Изготовление возбудителя звуковых импульсов.** Соберите возбудитель импульсов на беспаячной плате, проверьте прибор в работе и с помощью осциллографа измерьте параметры получающегося электрического сигнала. Подберите по сопротивлению резистор  $R1^*$  так, чтобы период следования импульсов звука был достаточен для ручного сброса счетчика.

### 8. Генератор счетных импульсов

На рис. 6 приведена типовая схема генератора прямоугольных импульсов напряжения, выполненного на элементах  $DD1.1-DD1.3$  микросхемы К155ЛА3. Частота генератора 1 МГц стабилизирована кварцевым резонатором  $ZQ1$ . Подстроечный конденсатор  $C1$  обеспечивает коррекцию частоты и в принципе может быть исключен из схемы. При правильной сборке из исправных деталей генератор начинает работать сразу и в наладке не нуждается.

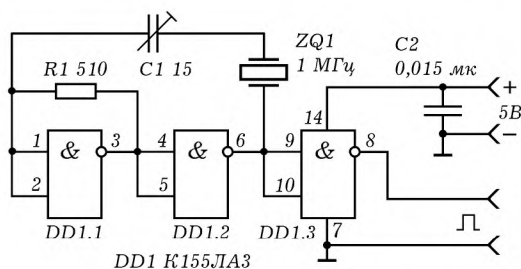


Рис. 6. Принципиальная схема генератора счетных импульсов

Проверку генератора можно произвести посредством наблюдения осциллограммы вырабатываемого им напряжения на аналоговом или цифровом осциллографе.

**Задание 10. Генератор счетных импульсов.** Найдите надежные источники информации и изучите принцип действия генератора



При поступлении импульсов напряжения на вход *14* счетчика *DD3* на его выходах *12, 9, 8, 11* получается такая комбинация логических нулей и единиц, которая выражает число этих импульсов в двоичном коде, если их общее число не превышает девяти. Нули и единицы с выходов счетчика *DD3* поступают на соответствующие входы дешифратора *DD6*, выполненного на микросхеме КР514ИД2, который преобразует двоично-десятичный код в код семисегментного индикатора. Иными словами, в зависимости от сигнала, поступающего на вход дешифратора *DD6*, на его семи выходах получается определенная комбинация напряжений высокого и низкого уровней, вызывающая высвечивание светодиодным индикатором соответствующей цифры.

Один рассмотренный блок на микросхемах *DD3, DD6* позволяет считать импульсы в пределах десятка. Чтобы получить второй и третий разряды, следует собрать еще два таких же блока на микросхемах *DD2, DD5* и *DD1, DD4*.

Вход *14* счетчика *DD2* соединяют с выходом *11 DD3*, аналогично поступают со счетчиком *DD1*. Логическая *1*, имеющаяся на выходе *11* счетчика *DD3* после восьмого и девятого импульсов, обращается в логический *0* с приходом десятого импульса [1]. По спаду сигнала на выходе *11 DD3* срабатывает счетчик *DD2*. Это означает, что на его выходе *12* появляется логическая *1*, в то время как на остальных выходах логический *0*, и индикатор *HG2* высвечивает цифру «1». После того, как счетчик *DD3* второй раз сосчитает импульсы от нуля до девяти и установится в нуль, счетчик *DD2* зафиксирует второй импульс, на индикаторе *HG2* высветится цифра «2» и процесс счета повторится вновь. Точно так же работает третий разряд, состоящий из микросхем *DD1, DD4* и индикатора *HG1*.

Для работы счетчика на выводы *6, 7* и *2, 3* микросхем *DD1, DD2* и *DD3* должны быть поданы логические нули. Сброс производится размыканием кнопки *SB1*: в этом случае на выводах *2* и *3* указанных микросхем появляются логические единицы, и счетчик «устанавливается в нуль». Резисторы *R1–R21* ограничивают токи через соответствующие сегменты индикатора.

**Задание 11. Счетчик электрических импульсов.** Используя учебную и справочную литературу, изучите принцип действия двоично-десятичного счетчика, дешифратора и светодиодного индикатора [8–10]. Разберитесь в работе трехразрядного счетчика импульсов (рис. 7). Соберите одноразрядный счетчик на безопасной плате и проверьте его в работе. На той же плате к первому добавьте и протестируйте второй и третий разряды счетчика.



## 10. Ключевое устройство

Принципиальная схема ключевого устройства изображена на рис. 8. Прибор состоит из двух одинаковых каскадов, собранных на операционных усилителях (ОУ)  $DA1.1$  и  $DA1.2$  (микросхема  $LM358P$ ), инверторов  $DD1.1$  и  $DD1.2$  ( $K155JA4$ ), одновибраторов  $DD2.1$  и  $DD2.2$  ( $K155AG3$ ), а также собственно ключевого элемента, выполненного на инверторе  $DD1.3$  ( $K155JA4$ ).

Объяснение работы схемы удобно начать с ключевого элемента  $DD1.3$ , который может находиться в двух состояниях: открытом и закрытом.

Ключевой элемент  $DD1.3$  закрыт, то есть счетные импульсы с генератора (гнездо  $X1$ ), поступающие на его вход  $9$ , не достигают счетчика (гнездо  $X3$ ) тогда, когда *хотя бы на одном из входов*  $10$  или  $11$  элемента  $DD1.3$  логический  $0$ . В этом случае на выходе  $8$  элемента  $DD1.3$  независимо от состояния входа  $9$  логическая  $1$ . Если на входах  $10$  и  $11$  *одновременно* логическая  $1$ , то состояние выхода  $8$  элемента  $DD1.3$  определяется состоянием его входа  $9$ : когда на этом входе логический  $0$ , на выходе логическая  $1$  и наоборот. Это означает, что элемент  $DD1.3$  открыт и пропускает счетные импульсы с гнезда  $X1$  на гнездо  $X3$ , с которым соединен вход счетчика.

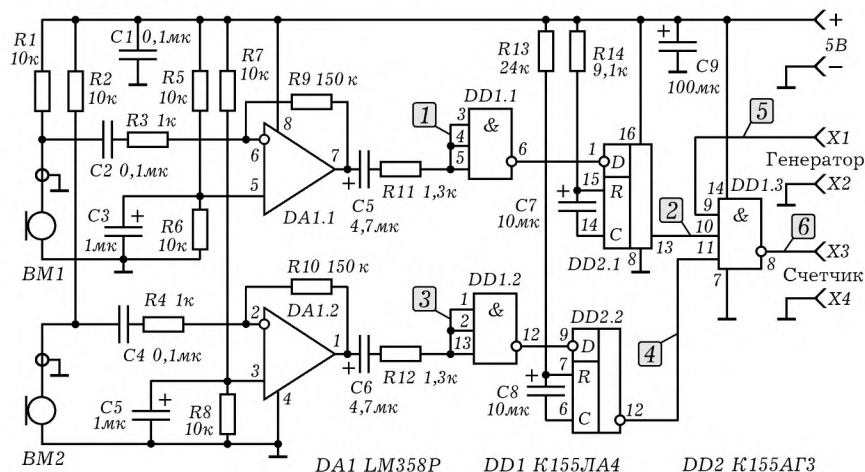


Рис. 8. Принципиальная схема ключевого устройства

Когда звуковая волна еще не достигла микрофона  $BM1$ , на выходах операционных усилителей  $DA1.1$  и  $DA1.2$  логический  $0$ , на выходе  $13$  одновибратора  $DD2.1$  тоже логический  $0$ , а на выходе  $12$  одновибратора  $DD2.2$  — логическая  $1$ . Поэтому ключевой элемент  $DD1.3$  закрыт, и на его выходе  $8$  логическая  $1$ .

В некоторый момент времени  $t'$  звуковой сигнал достигает сначала микрофона  $BM1$ , и на выходе 7 ОУ  $DA1.1$  появляется затухающий электрический сигнал, обусловленный собственным колебанием мембраны микрофона (рис. 9.1). Первая положительная полуволна этого сигнала на входе инвертора  $DD1.1$  вызывает появление на его выходе логического 0 и запуск одновибратора  $DD2.1$ . На его выходе 13 формируется прямоугольный импульс (рис. 9.2), длительность которого определяется параметрами времязадающей цепочки  $R14, C7$  и составляет  $\tau \approx 20$  мс, причем  $\tau \gg l/c$ , где  $c$  — скорость звука.

В этом случае на обоих входах 10 и 11  $DD1.3$  устанавливается логическая 1 (рис. 9.2 и 9.4), поэтому ключевое устройство открывается и счетные импульсы (рис. 9.5) начинают поступать на вход счетчика (рис. 9.6).

Так будет продолжаться до тех пор, пока в некоторый момент  $t'' = t' + l/c$  звуковая волна не достигнет микрофона  $BM2$ . Первый положительный импульс на выходе ОУ  $DA1.2$  (рис. 9.3) запустит одновибратор  $DD2.2$  и на его инвертирующем выходе 12 появится логический 0, длительность которого несколько больше  $\tau \approx 20$  мс (рис. 9.4). Появление логического 0 на входе 11  $DD1.3$  вызывает закрывание ключевого элемента  $DD1.3$  и прекращение подачи импульсов на вход счетчика (рис. 9.6).

Из приведенных здесь осциллограмм напряжений видно, что больше одновременно появления логической 1 на входах 9, 10 и 11 элемента  $DD1.3$  не может быть.

Таким образом, прибор, принципиальная схема которого представлена на рис. 8, пропускает счетные импульсы только в течение промежутка времени  $t = t'' - t' = l/c$ , пока звуковая волна идет от микрофона  $BM1$  к микрофону  $BM2$ . Существенно, что длительности формируемых одновибраторами импульсов заведомо превышают измеряемое время распространения звукового сигнала.

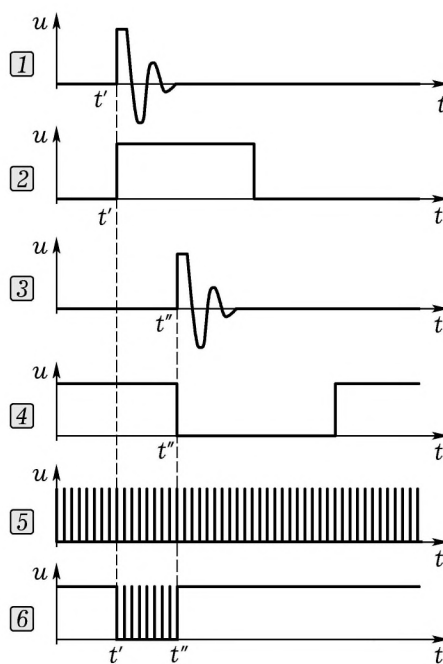


Рис. 9. Осциллограммы электрических сигналов в ключевом устройстве

Подчеркнем еще раз: для нормальной работы устройства необходимо, чтобы *первые полуволны сигналов на выходах усилителей DA1.1 и DA1.2 имели положительную полярность*.

**Задание 12. Ключевое устройство.** Научитесь по принципиальной схеме последовательно и ясно объяснять работу ключевого устройства. Соберите ключевое устройство на безопасной плате и убедитесь в его работоспособности.

**Задание 13. Зависимость скорости звука от температуры воздуха.** Подготовьте электроплитку с закрытой спиралью, дюралевый швеллер размером примерно  $25 \times 50 \times 150$  мм, два небольших электретных микрофона, деревянную рейку сечением  $5 \times 5$  мм и длиной 250 мм, термопару и мультиметр. На демонстрационном столе расположите четыре готовых и налаженных блока: возбудитель звуковых импульсов, генератор счетных импульсов, ключевое устройство с двумя одинаковыми микрофонами и счетчик импульсов. Используя перечисленное оборудование, соберите экспериментальную установку для исследования зависимости скорости звука в воздухе от его температуры. Выполнив эксперимент, постройте график найденной зависимости и сделайте выводы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено возможное решение актуальной проблемы развития экспериментальной компетенции будущего учителя физики при изучении заключительного раздела дисциплины «Общая и экспериментальная физика». Показано, что указанный раздел «Экспериментальная физика» этой дисциплины может иметь ярко выраженную инженерную направленность, если учебная деятельность будет включать совершенствование известного и создание нового учебного физического эксперимента. Для эффективной организации такой деятельности необходимы соответствующие дидактические ресурсы. Они должны разрабатываться до начала изучения раздела «Экспериментальная физика» и выкладываться на сайты, доступные для свободного доступа преподавателей и студентов.

*Научная новизна* работы заключается в создании технологии изучения импульсного метода измерения скорости звука в воздухе с целью развития элементов инженерно-физической компетенции студентов педагогических вузов.

*Практическая значимость* определяется содержанием дидактического ресурса, регламентирующего учебно-исследовательскую деятельность преподавателя и обучающихся.

*Исследование выполнено на базе Федеральной инновационной площадки «Школа учебного физического эксперимента» по проек-*

*ту «Методика проведения новых физических опытов в школе как средство формирования инженерных компетенций обучающихся», который реализуется при финансовой поддержке Министерства просвещения Российской Федерации в рамках государственного задания (дополнительное соглашение Министерства просвещения Российской Федерации и ФГБОУ ВО «Глазовский государственный педагогический институт имени В.Г.Короленко» № 073-03-2023-026/2 от 20.06.2023 к соглашению № 073-03-2023-026 от 27.01.2023, регистрационный № НИОКТР 1022080500004-8-5.3.1).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Майер В. В., Майер Р. В. Измерение скорости звука импульсным методом: Учебное руководство. — Глазов, 1991. — 53 с.
2. Майер Р. В. Методика учебного фундаментального эксперимента по волновой физике: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02 / Майер Роберт Валерьевич. — М., 1995. — 258 с.
3. Кокин С. М., Стоюхин С. Г., Мухин С. В. Постановка лабораторной работы «Определение молярной массы воздуха» // Учебная физика. — 2023. — № 2. — С. 38–44.
4. Майер В. В., Вараксина Е. И. Импульсный метод измерения скорости звука // Потенциал. — 2014. — № 11. — С. 65–74.
5. Майер В. В., Вараксина Е. И. Скорость звука в газах // Потенциал. — 2015. — № 7. — С. 62–70.
6. Савельев И. В. Курс общей физики: учебник для вузов: в 3-х томах. Том 1: Механика. Молекулярная физика. — СПб.: Лань, 2023. — 436 с.
7. Майер В. В., Вараксина Е. И. Электронные стробоскопы для учебных опытов // Потенциал. — 2010. — № 11. — С. 68–76.
8. Кошечев В. В., Фоминых В. А. Интегральная схемотехника. Применение микросхем средней степени интеграции серии К155 в устройствах автоматики. Учебное пособие. — Горький, изд. ГГУ, 1982. — 82 с.
9. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 2006. — 799 с.
10. Тарабрин Б. В., Лунин Л. Ф., Смирнов Ю. Н. и др. Интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. Б. В. Тарабрина. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 528 с.

Глазовский государственный  
инженерно-педагогический  
университет имени В. Г. Короленко

Поступила в редакцию 03.10.23.