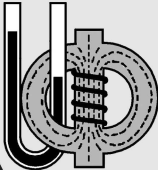


ISSN 2307-5457

*Primum  
inter pares*

Материалы XXX Всероссийской  
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:  
Актуальные проблемы. Современные  
решения“



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ  
  
**УЧЕБНАЯ  
ФИЗИКА**  
  
Январь - март 2025 №1  
  
Издается с января 1997 года

## СОДЕРЖАНИЕ

### Хроника

|                                                                                                                                          |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| XXX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКАЯ<br>КОНФЕРЕНЦИЯ «УЧЕБНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ:<br>АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ. СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ» ..... | 3 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

### Основная школа

|                  |                                        |    |
|------------------|----------------------------------------|----|
| В. В. Майер      | ПРЕПАРАТЫ ИЗ ЛИКОПОДИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО |    |
| Е. И. Вараксина  | НАБЛЮДЕНИЯ И ДЕМОНСТРАЦИИ ДИФРАКЦИИ    |    |
| И. А. Васильев   | СВЕТА В ОСНОВНОЙ ШКОЛЕ .....           | 15 |
| Е. А. Широбокова |                                        |    |

### Старшая школа

|                |                                |    |
|----------------|--------------------------------|----|
| С. И. Официн   | МЕТОДИКА ПОСТАНОВКИ ОПЫТОВ     |    |
| О. В. Кирьяков | С КАТУШКОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ..... | 28 |

|                |                                          |    |
|----------------|------------------------------------------|----|
| И. Ю. Зворыкин | УЧЕБНЫЙ ПРОЕКТ ПО СОЗДАНИЮ               |    |
| М. Р. Каткова  | ВЫСОКООМНОЙ ПРИСТАВКИ К ВОЛЬТМЕТРУ ..... | 34 |

### Высшая школа

|                 |                                               |    |
|-----------------|-----------------------------------------------|----|
| Е. И. Вараксина | УЧЕБНЫЕ ОПЫТЫ ПО ДИФфуЗИИ НА УРОЧНЫХ          |    |
| В. В. Майер     | И ВНЕУРОЧНЫХ ЗАНЯТИЯХ ПО ХИМИИ И ФИЗИКЕ ..... | 39 |
| Л. В. Шиляева   |                                               |    |

|                |                                               |    |
|----------------|-----------------------------------------------|----|
| И. В. Гребенев | ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ РЕШЕНИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ.... | 56 |
| П. В. Казарин  |                                               |    |
| Е. В. Чупрунов |                                               |    |

### Исследования

|                |                                         |    |
|----------------|-----------------------------------------|----|
| А. П. Усольцев | РАЗВИТИЕ МЫШЛЕНИЯ ШКОЛЬНИКОВ СРЕДСТВАМИ |    |
| Т. Н. Шамало   | УЧЕБНОГО ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ..... | 66 |
| Б. М. Игошев   |                                         |    |

### От редакции

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| АКТИВНЫЙ ДЕЯТЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ<br>(в память о Геннадии Григорьевиче Никифорове) ..... | 74 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                      |    |
|----------------------|----|
| АВТОРЫ ЖУРНАЛА ..... | 76 |
|----------------------|----|

---

---

**Редакция журнала:**

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

**Редакционный совет:**

|                  |                                          |
|------------------|------------------------------------------|
| С. В. Барышников | д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск       |
| 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          |
| Ю. А. Сауров     | д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров |
| А. П. Усольцев   | д.п.н., профессор, Екатеринбург          |
| А. А. Шаповалов  | д.п.н., профессор, Барнаул               |

**Оргкомитет конференции:**

|                          |                                         |
|--------------------------|-----------------------------------------|
| Н. Я. Молотков           | д.п.н., профессор, Тамбов               |
| Г. Г. Никифоров          | к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва        |
| Ф. А. Сидоренко          | д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург      |
| Я. А. Чиговская-Назарова | к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, 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, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.  
E-mail: [uch-fiz@mail.ru](mailto:uch-fiz@mail.ru), [kropa@bk.ru](mailto: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 03.03.25. Подписано в печать 27.03.25.

Дата выхода в свет: 31.03.25.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,75.

Заказ 169. Тираж 200 экз. Цена свободная.

**Первая страница обложки:** Демонстрация натурной модели сердца доцентом А. В. Долженко на XXX Всероссийской научно-практической конференции «Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения».

*Научная статья*

ББК 74.262.23

УДК 372.853+372.854

Е. И. Вараксина, В. В. Майер, Л. В. Шиляева  
УЧЕБНЫЕ ОПЫТЫ ПО ДИФФУЗИИ  
НА УРОЧНЫХ И ВНЕУРОЧНЫХ ЗАНЯТИЯХ  
ПО ХИМИИ И ФИЗИКЕ

Представлены результаты дидактического исследования учебного эксперимента по диффузии в газах и жидкостях на урочных и внеурочных занятиях по химии и физике. Объектом исследования явились опыты по диффузии аммиака в воздухе и в водном растворе фенолфталеина, предназначенные для уроков и внеурочной проектной деятельности при изучении физики и химии в школе. Определены оптимальные условия экспериментов, описаны учебные приборы, рассмотрены элементы физической теории диффузии и химической теории индикаторов, приведены количественные результаты опытов.

*Ключевые слова:* диффузия, аммиак, воздух, водный раствор фенолфталеина, демонстрационная установка, качественные и количественные опыты.

E. I. Varaksina, V. V. Mayer, L. V. Shilyaeva  
EDUCATIONAL EXPERIMENTS ON DIFFUSION  
FOR CLASSROOM AND OPTIONAL TRAINING  
SESSIONS IN CHEMISTRY AND PHYSICS

The results of a didactic study of an educational experiment on diffusion in gases and liquids for classroom and optional training sessions in chemistry and physics are presented. The object of the research are experiments on the diffusion of ammonia in air and in an aqueous solution of phenolphthalein, intended for lessons and optional project activities in the study of physics and chemistry at school. Optimal experimental conditions are determined, educational devices are described, elements of the physical theory of diffusion and the chemical theory of indicators are considered, and quantitative experimental results are presented.

*Keywords:* diffusion, ammonia, air, aqueous solution of phenolphthalein, demonstration unit, qualitative and quantitative experiments.

DOI: 10.62957/2307-5457-2025-1-39-55

## 1. Введение

В 1908 году А. Эйнштейн опубликовал статью «Элементарная теория броуновского движения», которая начинается так: «Профессор Г. Лоренц во время одной из бесед со мной заметил, что многим химикам было бы полезно элементарное изложение теории броуновского движения. Следуя его совету, я даю в настоящей работе простую теорию этого явления» [1, с. 155–163].

Вслед за великими физиками мы предполагаем, что учебное исследование явления диффузии, тесно связанного с броуновским движением, окажется полезным будущим учителям физики и химии, обучающимся в современном педагогическом университете, так как оно способствует развитию естественнонаучного мышления не только будущих учителей, но и их будущих учеников.

Проблема нашего дидактического исследования состоит в поиске ответа на вопрос: какая серия простых опытов в курсе общей и экспериментальной физики обеспечит учебные исследования явления диффузии и практического применения этого явления в школьных курсах физики и химии? Для решения этой проблемы в первую очередь нужно выбрать базовый эксперимент, который позволит в течение сравнительно небольшого учебного времени наблюдать и измерить ярко выраженный диффузионный процесс.

## 2. Известная демонстрация явления диффузии

В статье [2] для урока физики в 7 классе рекомендован простой, эффектный и, что самое главное, *доказательный* демонстрационный опыт по диффузии газов и жидкостей (рис. 1). Прибор для этого опыта состоит из двух одинаковых прозрачных цилиндрических сосудов объемом 100 мл из пластика с герметически закручивающимися крышками. Сосуды герметично соединены патрубком диаметром 16 мм и длиной не более 25 мм из силиконовой трубки. Для этого в стенках сосудов на расстоянии 50 мм от их дна ступенчатым сверлом сделаны круглые отверстия диаметром 14 мм.

Согласно работе [2] опыт проводят следующим образом. В один из сосудов наливают водный раствор фенолфталеина так, чтобы поверхность жидкости оказалась ниже соединяющего сосуда патрубка примерно на 10 мм. На дно второго сосуда наливают немного водного 10% раствора аммиака, и сосуды быстро закрывают крышками (рис. 1.1).

«Примерно через 1 минуту поверхность водного раствора фенолфталеина приобретает розовый оттенок. Постепенно окраска становится все более насыщенной (рис. 1.2). Явление объясняется тем, что молекулы аммиака диффундируют в воздухе первого сосуда, через патрубок проникают во второй сосуд, достигают поверхности раствора фенолфталеина, и в результате химической реакции тонкий верхний слой раствора окрашивается. Так получают *экспериментальное доказательство* существования диффузии в газах. <...> Через

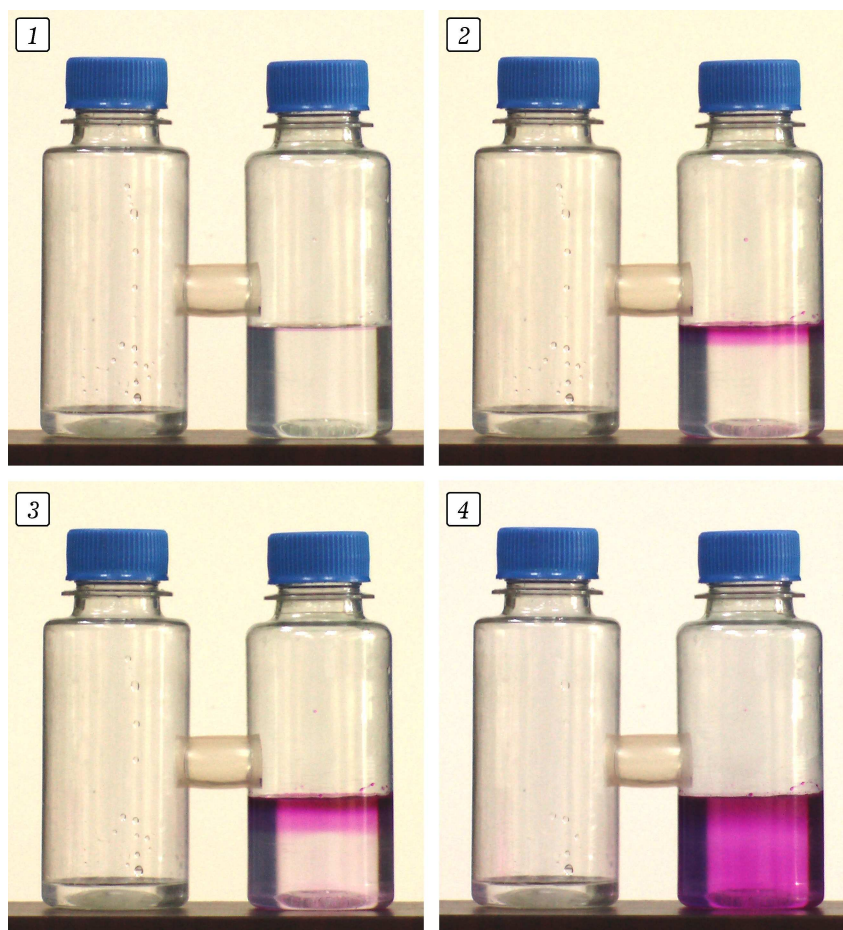


Рис. 1. Фотография из пособия [3, с. 24]

примерно 5 минут после начала опыта окрашенный слой раствора фенолфталеина заметно увеличивается по толщине (рис. 1.3). Видно, что верхняя часть слоя окрашена гораздо ярче, чем нижняя. Это свидетельствует о том, что происходит диффузия аммиака внутрь водного раствора фенолфталеина. Понятно, что окрашенная часть жидкости диффундирует в неокрашенную, с гораздо меньшей скоростью. Через полчаса толщина окрашенного слоя водного раствора фенолфталеина может достигнуть двух и более сантиметров (рис. 1.4)» [2].

Таким образом, известны простые демонстрационные опыты, которые методами химического анализа убедительно показывают существование физического явления диффузии в газах и жидкостях. Однако сколь ни просты эти опыты, но они все же требуют изготовления специального прибора (рис. 1). В пособии [3, с. 22–24]

показано, что этот прибор может составить основу проектной деятельности школьников по экспериментальному исследованию явления диффузии, которое изучается в курсе физики и используется в химических реакциях.

### 3. Как химия объясняет окраску фенолфталеина

В изученной нами учебной и методической литературе объяснение изменения окраски кислотно-основных индикаторов дается в трех химических теориях: ионной, хромофорной и ионно-хромофорной, причем примерно одними и теми же словами. Поэтому здесь мы вынуждены широко использовать точное цитирование источников информации [4, с. 310–313; 5, с. 315–319; 6, с. 367–373], которое сделано, в основном, для преподавателей физики.

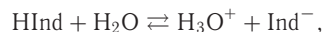
**3.1. Кислотно-основные химические индикаторы** — это вещества, способные изменять свою окраску в зависимости от кислотности среды, в которой они находятся [7, с. 92]. Напомним, что в качестве показателя кислотности среды, определяющего концентрацию ионов водорода в растворе, используют *водородный показатель* pH. Его вычисляют по формуле:  $\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$ , где  $[\text{H}^+]$  — концентрация ионов водорода  $\text{H}^+$  в моль/л. Например, если  $[\text{H}^+] = 0,01$  моль/л, то  $\text{pH} = -\lg 0,01 = \lg 100 = 2$ . Показатель кислотности pH принимает значения от 0 до 14; в нейтральной среде  $\text{pH} = 7$ , в кислой  $\text{pH} < 7$ , в щелочной  $\text{pH} > 7$  [4, с. 310–313; 5, с. 72; 8, с. 50].

К индикаторам предъявляют ряд требований: «окраска индикатора должна быть хорошо заметной, цвет индикатора должен резко изменяться в небольшом интервале pH, изменение окраски должно быть обратимым» [5, с. 315].

**3.2. Индикаторы в школьной лаборатории.** В школьных химических опытах в качестве индикаторов обычно используют метиловый оранжевый, лакмус (лакмоид) и фенолфталеин [9]. Часто применяют также универсальный индикатор, доступный и для бытового использования [10, с. 187], который изменяет окраску в широком интервале значений pH [6, с. 373]. При изменении характера среды от нейтрального к щелочному, которое имеет место в обсуждаемых опытах по изучению диффузии, наблюдается четкое контрастное изменение цвета этого индикатора от бледно-зеленого к фиолетовому [11].

Опыты показывают, что для учебного исследования диффузии наиболее пригоден *фенолфталеин*, так как этот индикатор в щелочной среде придает раствору насыщенный малиновый цвет.

**3.3. Ионная теория.** Индикаторы в ионной теории «рассматриваются как органические кислоты или основания, у которых цвет недиссоциированных молекул и ионов имеет различную окраску» [5, с. 316]. Например, диссоциация лакмуса в воде выражается схемой [6, с. 368]:



где HInd — недиссоциированные молекулы лакмуса красной окраски;  $\text{Ind}^-$  — анионы (отрицательные ионы) синей окраски. Поэтому лакмус и подобные ему индикаторы называются двухцветными: «При увеличении концентрации ионов водорода (понижении pH раствора) равновесие диссоциации индикатора смещается влево — в сторону молекулярной формы. Концентрация этой формы

растет и при определенном значении pH становится преобладающей, придавая раствору красный цвет. Уменьшение концентрации ионов водорода (рост pH) при добавлении щелочи к раствору, смещает равновесие реакции диссоциации индикатора вправо — в сторону его ионизированной формы  $\text{Ind}^-$ » [6, с. 368].

Фенолфталеин — одноцветный индикатор, так как его молекулы HInd бесцветны, а анионы  $\text{Ind}^-$  имеют малиновый цвет [6, с. 368; 7, с. 92]:



«При добавлении к раствору, содержащему фенолфталеин, небольшого количества щелочи введенные ионы  $\text{OH}^-$  станут связывать протоны с образованием малодиссоциирующих молекул воды. При этом равновесие диссоциации индикатора сместится вправо и накопление анионов  $\text{Ind}^-$  вызовет окрашивание раствора в малиновый цвет» [6, с. 369].

**3.4. Хромофорная теория** объясняет окраску индикаторов «присутствием в их молекулах *хромофорных групп* (хромофоров), <...> то есть особых групп атомов с сопряженными двойными связями и неподеленными парами электронов» [6, с. 369]. «Молекула фенолфталеина имеет три бензольных ядра, и одно из них может претерпевать *хиноидную* перегруппировку, которое и становится *хромофором*» [5, с. 317] (рис. 2).

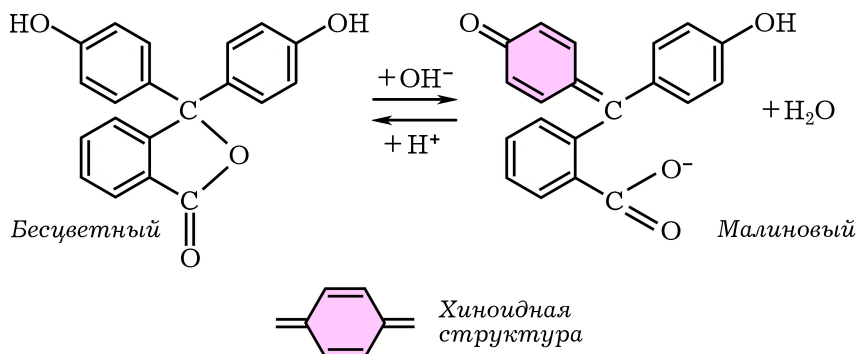


Рис. 2. Образование хромофорной группы, отвечающей за малиновую окраску фенолфталеина [4, с. 405; 6, с. 369; 9]

«Типичный одноцветный индикатор — *фенолфталеин*. При  $\text{pH} < 8$  его молекулы не содержат хиноидной группировки и поэтому бесцветны. Однако при действии щелочи на фенолфталеин ( $\text{pH} 8-10$ ) образуется анион, который включает хиноидную группировку и обеспечивает малиновую окраску. Дальнейшее увеличение pH (до 13–14) вызывает новую перегруппировку, в результате чего получается соль, лишенная хиноидной группировки и поэтому бесцветная» [6, с. 369]. Следовательно, фенолфталеин обесцвечивается не только в кислой, но и в сильно щелочной среде.

**3.5. Ионно-хромофорная теория.** В настоящее время наиболее обоснованной считается ионно-хромофорная теория индикаторов, объединяющая ионную и хромофорную теории [6, с. 371]. По этой теории изменение окраски индикаторов вызывается присоединением к молекуле ионов  $\text{H}^+$  или ионов  $\text{OH}^-$ , что приводит к изменению структуры молекулы индикаторов [5, с. 319].

Таким образом, изучение учебной и методической литературы [4–10, 12–13] показывает, что дидактика химии дает только качественное объяснение появления яркой малиновой окраски фенолфталеина в сравнительно узком диапазоне изменения рН.

#### 4. Как окраску фенолфталеина объясняет физика

К сожалению, в дидактике физики, как и в дидактике химии, возможен только качественный уровень объяснения факта окрашивания фенолфталеина в щелочной среде.

Начнем с того, что молекулы окрашенного фенолфталеина, как и других веществ, состоят из атомов. Чтобы судить об окраске тела, на него нужно направить белый свет, сплошной спектр которого простирается от фиолетовой до красной границ, то есть занимает диапазон длин волн  $\lambda$  примерно от 400 до 800 нм. Если освещенное белым светом тело поглощает некоторый участок этого диапазона, то цвет этого тела определяется рассеянным или проходящим светом непоглощенных длин волн. Так как окрашенный раствор фенолфталеина выглядит малиновым, то есть рассеивает и пропускает смесь фиолетового и красного света, то центральная (сине-зеленая) часть видимого спектра этим раствором поглощается.

За излучение и поглощение видимого света ответственны наиболее удаленные от ядра атома электроны, которые обеспечивают также связь атомов в молекулы. Поэтому такие электроны в зависимости от решаемой задачи называют оптическими, химическими или валентными. Белый свет представляет собой поток фотонов, энергия  $\varepsilon$  которых пропорциональна частоте  $\nu$  фотона:  $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$ , где  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света в вакууме. Атом поглощает только те фотоны, энергия которых равна разности энергий одного из разрешенных и основного уровней электрона.

Молекула фенолфталеина  $C_{20}H_{14}O_4$  содержит 38 атомов, каждый из которых совершает колебания, а молекула в целом еще и вращается. Поэтому уровни энергии оптических электронов в атомах молекулы расщепляются на тесно расположенные подуровни, образующие сплошные полосы. В результате энергия белого света поглощается молекулами фенолфталеина не отдельными спектральными линиями, а целой полосой видимого спектра. Очевидно, поглощенная фенолфталеином энергия света превращается в энергию теплового движения молекул этого вещества.

Убедиться, что это именно так, можно в простом опыте. На белом экране получают резкое изображение прямой спирали лампы накаливания, находящейся в корпусе школьного осветителя для теневого проецирования. Рядом с объективом осветителя помещают

призму прямого зрения так, чтобы она развернула белое изображение спирали в горизонтальный спектр. Перекрывают пучок белого света между осветителем и призмой плоскопараллельной кюветой с раствором окрашенного фенолфталеина и наблюдают на экране темную полосу поглощения в середине видимого спектра.

### 5. Скорость движения фронта диффузии

Этот раздел статьи написан под сильным влиянием уникальной книги Р. В. Поля «Механика, акустика и учение о теплоте» [14], в которой учебная физическая теория тесно связана с учебным физическим экспериментом, представленным в форме лекционных демонстраций. Элементарная теория диффузии рассматривается на с. 416–422 этой книги.

**5.1. Первый закон Фика.** В 1855 году немецкий физиолог А. Фик, обобщив результаты эксперимента, сформулировал первый закон для стационарной диффузии:

$$\frac{dn}{dt} = -DS \frac{dc}{dx}, \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии. Физический смысл закона Фика прост: поток молекул в единицу времени  $dn/dt$  через нормальную к его направлению поверхность площадью  $S$  прямо пропорционален градиенту концентрации  $dc/dx$  диффундирующих молекул. Теоретически закон Фика выводится из основных положений молекулярно-кинетической теории. При этом коэффициент диффузии приобретает физический смысл:

$$D = \frac{1}{3} u \lambda, \quad (2)$$

где  $u$  и  $\lambda$  — *средние по времени* скорость и длина свободного пробега молекул (не путать с длиной волны  $\lambda$  в п. 4). Мы не останавливаемся здесь на выводе формул (1) и (2), так как его можно найти в доступных учебниках молекулярной физики [15, 16].

**5.2. Зависимость перемещения фронта диффузии от времени.** Будем считать, что в цилиндрическом стакане, площадь поперечного сечения которого  $S$ , до половины его высоты налит водный раствор фенолфталеина. Пусть поверх жидкости в воздухе находится газообразный аммиак  $\text{NH}_3$ , концентрация которого поддерживается постоянной, и концентрация фенолфталеина в нижней части стакана тоже не меняется. Тогда процесс диффузии аммиака в жидкость приближенно можно считать близким к стационарному (квазистационарным).

Из химии известно, что аммиак хорошо растворяется в воде и, вступая в реакцию с водой, образует основание, которое вызывает яркую окраску фенолфталеина [17, с. 295]:



С точки зрения физики этот процесс является диффузией газообразного аммиака в жидкость, сопровождающейся химическими превращениями. По условиям задачи концентрация молекул аммиака, вызвавших окраску фенолфталеина в жидкости вблизи ее поверхности, постоянна; обозначим ее  $c_0$ .

Найдем скорость, с которой фронт диффузии аммиака перемещается в жидкости (рис. 3). Для этого введем декартову систему координат, начало  $O$  которой находится на уровне поверхности жидкости, ось  $x$  ориентирована по направлению диффузии, то есть вертикально вниз, а ось концентрации  $c$  молекул аммиака горизонтальна. Обозначим концентрацию фенолфталеина в жидкости  $c^*$ .

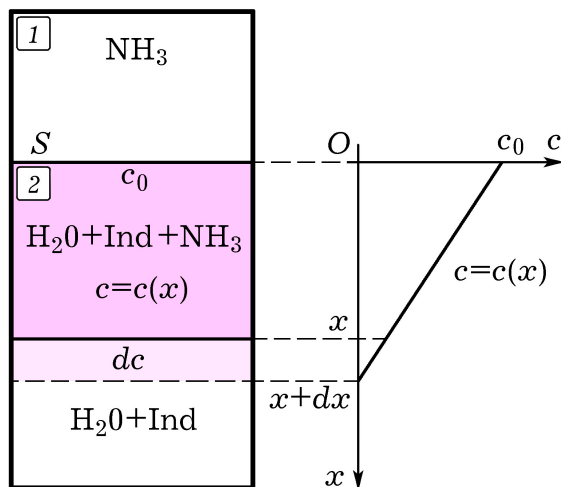


Рис. 3. К выводу формулы для скорости перемещения фронта диффузии

Спустя время  $t$  после начала диффузии, аммиак проникает в воду на глубину  $x$ , окрашивает фенолфталеин в этом слое и выбывает из дальнейшей диффузии. Приближенно можно считать, что концентрация аммиака  $c = c(x)$  в окрашенном слое жидкости уменьшается по линейному закону от  $c_0$  до 0.

Если за небольшое время  $dt$  фронт диффузии перемещается на  $dx$ , то в объем  $dV = Sdx$  жидкости диффундируют и окрашивают фенолфталеин  $dn = c^*dV = c^*Sdx$  молекул аммиака, которые

преодолели расстояние  $x$  от поверхности жидкости до фронта диффузии. Разделив это равенство на  $dt$ , получаем:

$$\frac{dn}{dt} = c^* S \frac{dx}{dt}. \quad (3)$$

Так как концентрация аммиака  $c$  линейно зависит от координаты, то:

$$\frac{dc}{dx} = -\frac{c_0}{x}. \quad (4)$$

Из формул (1), (3) и (4) получаем:

$$\frac{dn}{dt} = c^* S \frac{dx}{dt} = -DS \frac{dc}{dx} = DS \frac{c_0}{x}. \quad (5)$$

Приравнявая второй и четвертый члены этой цепочки равенств и сокращая  $S$ , имеем:

$$x dx = D \frac{c_0}{c^*} dt \quad \text{и} \quad \int_0^x x dx = D \frac{c_0}{c^*} \int_0^t dt.$$

После интегрирования окончательно получаем:

$$x^2 = 2D \frac{c_0}{c^*} \cdot t. \quad (6)$$

Таким образом, расстояние  $x$ , пройденное фронтом диффузии газа в жидкости, пропорционально корню квадратному из времени  $t$ , а скорость  $v$  этого движения равна:

$$v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{Dc_0}{2c^*}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (7)$$

**5.3. Диффузия и броуновское движение.** Беспорядочные удары молекул жидкости по броуновским частицам приводят к тому, что эти частицы совершают хаотическое движение. Но А. Эйнштейн показал, что если выбрать определенное направление, например, ось  $x$  на рис. 3, то *среднее значение квадрата проекции*  $\langle x^2 \rangle$  смещения частицы на эту ось оказывается пропорциональным времени наблюдения  $t$ :

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt. \quad (8)$$

Сравнение формул (6) и (8) показывает тесную связь явления диффузии и броуновского движения [1, с. 155–163].

## 6. Необходимые для опытов приборы и реактивы

Качественные опыты, доказывающие сам факт существования диффузии в газах и жидкостях, не требуют для своей постановки строгого соблюдения условий экспериментов. Другое дело количественные опыты, цель которых состоит в подтверждении следствий теории — в них необходимо получение четко обозначенного фронта диффузии. В этой части статьи даны рекомендации, позволяющие сократить время подготовки опытов.

**6.1. Оборудование.** Так как разрабатываемая серия опытов предназначена для демонстрации явления диффузии в условиях школы, то оптимальным является использование только такого оборудования, которое имеется в школьных кабинетах химии и физики.

В учебный комплект для школьных кабинетов химии и физики обычно входит сосуд Ландольта — прибор, который применяется на уроках химии для проведения реакций между двумя веществами в замкнутом объеме, например, для подтверждения закона сохранения массы. Он представляет собой двухколенную пробирку с пробкой, хомутами и дужками для подвешивания на штативе. Универсальными штативами с муфтами и лапками укомплектованы кабинеты и физики, и химии.

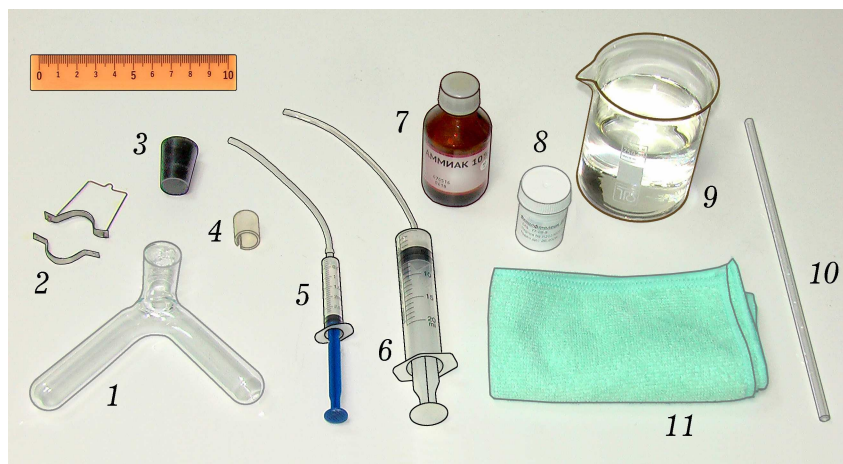


Рис. 4. Основное оборудование для количественных опытов по диффузии

На рис. 4 показано основное оборудование, необходимое для опытов: 1 — сосуд Ландольта; 2 — крепеж сосуда металлический; 3 — пробка резиновая; 4 — отрезок трубки силиконовой для зажима сосуда Ландольта в лапке штатива; 5 — шприц малый на 2,5 мл

с силиконовой трубкой для нашатырного спирта; 6 — шприц большой на 20 мл с силиконовой трубкой для раствора фенолфталеина; 7 — нашатырный спирт; 8 — фенолфталеин; 9 — вода дистиллированная; 10 — палочка стеклянная; 11 — салфетка матерчатая.

**6.2. Демонстрационный прибор.** В химических опытах, связанных с диффузией, сосуд Ландольта удобно не подвешивать за хомут, а закреплять через силиконовую прокладку в лапке штатива (рис. 5.1). В левое колено пробирки, с помощью большого шприца, снабженного отрезком силиконовой трубки, наливают приготовленный раствор фенолфталеина. В правое колено таким же способом, но посредством другого шприца вводят необходимое количество раствора аммиака (нашатырного спирта) и герметично закрывают сосуд резиновой пробкой (рис. 5.2).

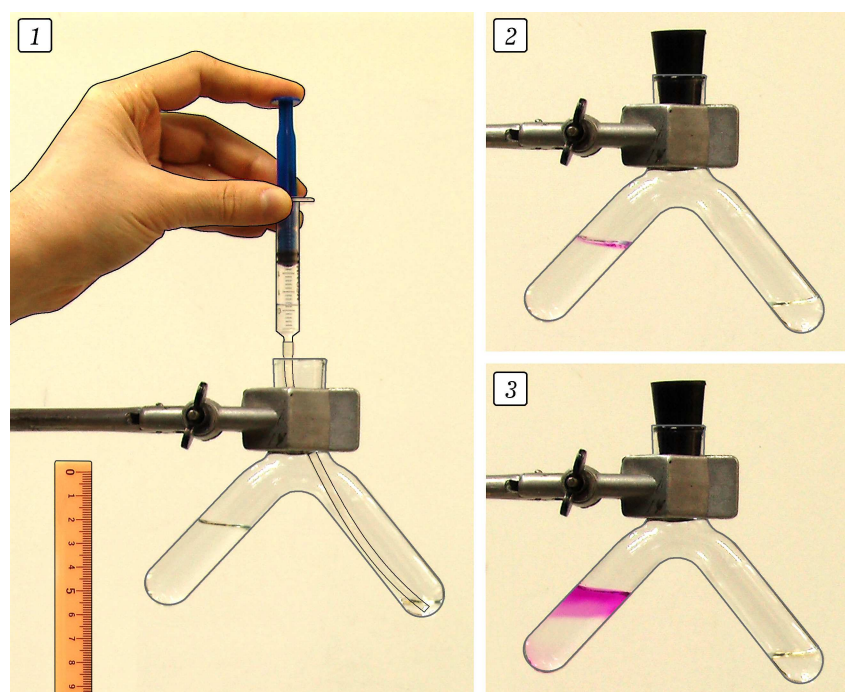


Рис. 5. Сосуд Ландольта в демонстрационных опытах по диффузии: 1 — использование шприца для введения жидкостей в колена сосуда; 2 — начало опыта по диффузии; 3 — окраска водного раствора фенолфталеина в результате диффузии аммиака

**6.3. Стандартная методика приготовления раствора фенолфталеина.** Фенолфталеин представляет собой бесцветные кристаллы,

плохо растворимые в воде, но хорошо — в спирте. Согласно ГОСТ [18] навеску нужно растворить сначала в спирте, а затем в полученный раствор добавить воду. Однако спиртовой раствор не подошел для опытов по диффузии. Если концентрация спирта в растворе велика, то продукты взаимодействия аммиака и раствора фенолфталеина тонут, образуя конвективные потоки. Если уменьшать концентрацию спирта, добавляя воду, то раствор мутнеет [19, с. 78], а фенолфталеин выпадает хлопьями в осадок. Поэтому для опытов по диффузии нужен водный раствор фенолфталеина.

**6.4. Растворение фенолфталеина в холодной воде.** В чистый сосуд, например, стакан или пластиковую бутылку с крышкой, наливают 200 мл дистиллированной воды при комнатной температуре, добавляют 0,1 г фенолфталеина и тщательно перемешивают. В растворе заметны нерастворенные крупинки фенолфталеина, они не мешают. Однако в процессе демонстрации окрашенный слой жидкости выглядит неоднородным. Возле поверхности, где плавают крупинки фенолфталеина, образуется слой толщиной 3–5 мм с более насыщенным цветом, а ниже располагается более бледный слой (рис. 5.3).

**6.5. Растворение фенолфталеина в горячей воде.** В чистый химический термоустойчивый стакан объемом 800 мл наливают 600 мл дистиллированной воды. Ставят стакан на лабораторную электроплитку с закрытой спиралью. Насыпают в воду 1 г порошка фенолфталеина. Помешивая стеклянной палочкой, доводят смесь до 70–80 °С. Охладившийся раствор пропускают через бумажный фильтр, чтобы удалить крупные нерастворенные частицы фенолфталеина. Затем переливают раствор в колбу и закрывают пробкой. Если раствор свежий, то при проведении опытов получается яркий и однородный окрашенный слой.

В приготовленных таким способом растворах через 20 минут после начала опыта толщина слоя малинового цвета составляет 6–9 мм, если во второе колено сосуда Ландольта налить 2,5 мл свежего 10% раствора аммиака. По мере развития диффузии уже примерно на 15-й минуте заметно размывание нижней границы слоя растворенного аммиака, появление неровностей и вихрей.

**6.6. Раствор фенолфталеина для количественных опытов.** В экспериментах по исследованию скорости диффузии в жидкости необходима резкая и горизонтальная граница между окрашенной и бесцветной жидкостью в цилиндрическом сосуде. Для достижения такого результата в водный раствор фенолфталеина добавляют немного лимонной кислоты. Например, в 70 мл раствора мы вводили 3 крупинки пищевой лимонной кислоты и тщательно перемешивали состав. Слабокислая среда способствует сглаживанию незначительных неоднородностей вдоль фронта диффузии аммиака

в раствор фенолфталеина, слегка повышая порог концентрации аммиака, необходимый для окрашивания раствора в малиновый цвет.

### 7. Зависимость перемещения фронта диффузии от времени

На рис. 6 дана фотография двух расположенных рядом приборов для количественных экспериментов по диффузии аммиака из воздуха в раствор фенолфталеина. В таких опытах лучше крепить сосуд Ландольта с помощью лапки и шаровой муфты так, чтобы колено с раствором фенолфталеина было расположено вертикально. Диффузионные процессы в приборах запущены одновременно и сфотографированы через 100 минут после начала опыта. Измерения показывают, что в сосуде Ландольта диффузия развивается в соответствии с теорией (п. 5), а в бутылочке увеличение толщины слоя на начальном этапе происходит медленнее, чем предсказывает теория (рис. 6).

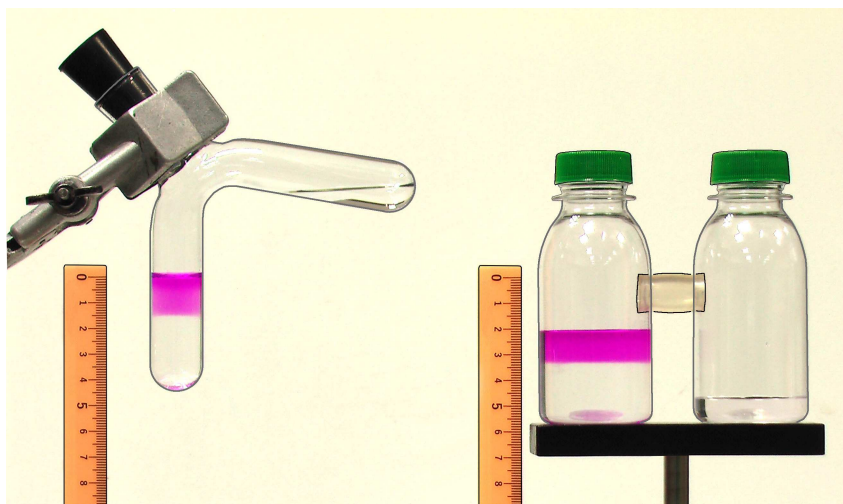


Рис. 6. Два варианта проведения опыта по диффузии аммиака в водный раствор фенолфталеина: фотография сделана через 100 минут после начала опыта

Объяснить это можно тем, что объемы бутылочек сравнительно велики, а диаметр соединяющего их патрубка мал, поэтому стационарный процесс с неизменной концентрацией аммиака над поверхностью жидкости устанавливается не сразу, а спустя некоторое время.

Зависимость толщины слоя фенолфталеина, окрашенного аммиаком, от времени показана в серии фотографий, приведенных на

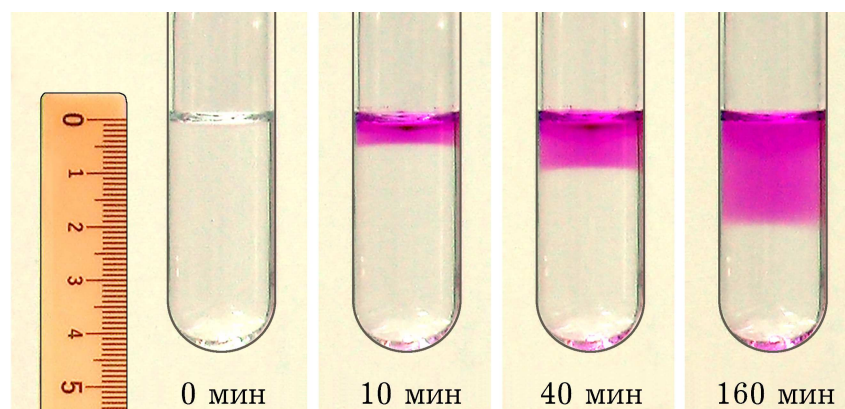


Рис. 7. Зависимость толщины слоя окрашенного аммиаком водного раствора фенолфталеина от времени. Применение сосуда Ландольта позволяет получить хорошее согласие теории (п. 5) и эксперимента

рис. 7. Сосуд Ландольта, колено с раствором фенолфталеина которого расположено вертикально, позволяет убедиться, что увеличение времени наблюдения в 4 раза ведет к росту толщины окрашенного аммиаком раствора фенолфталеина в 2 раза.

Для получения графика зависимости перемещения фронта диффузии от времени использован сосуд Ландольта, в вертикальное колено которого налито 10 мл водного раствора фенолфталеина, а в наклонное — 2,5 мл 10% раствора аммиака. Раствор фенолфталеина приготовлен за 4 дня до опыта по рецепту, приведенному в пп. 6.5 и 6.6.

Фотографирование сосуда Ландольта с расположенной рядом с ним масштабной линейкой проводилось в течение четырех часов. Резкий фронт диффузии наблюдался в течение двух первых часов, полученные в этот период фотографии использовались для построения графиков. С этой целью они загружались в компьютер и по ним, пользуясь масштабом, измерялись перемещения  $x$  диффузионного фронта, соответствующие тем моментам времени  $t$ , для которых получены фотографии. Построение графиков зависимостей  $x = x(t)$  и  $x^2 = x^2(t)$  (рис. 8) проводилось в программе *Excel*.

## 8. Заключение

В настоящей работе для решения сформулированной выше проблемы исследования сделано следующее.

Изучены описанные в учебной и методической литературе простые и интересные опыты по диффузии, предназначенные для

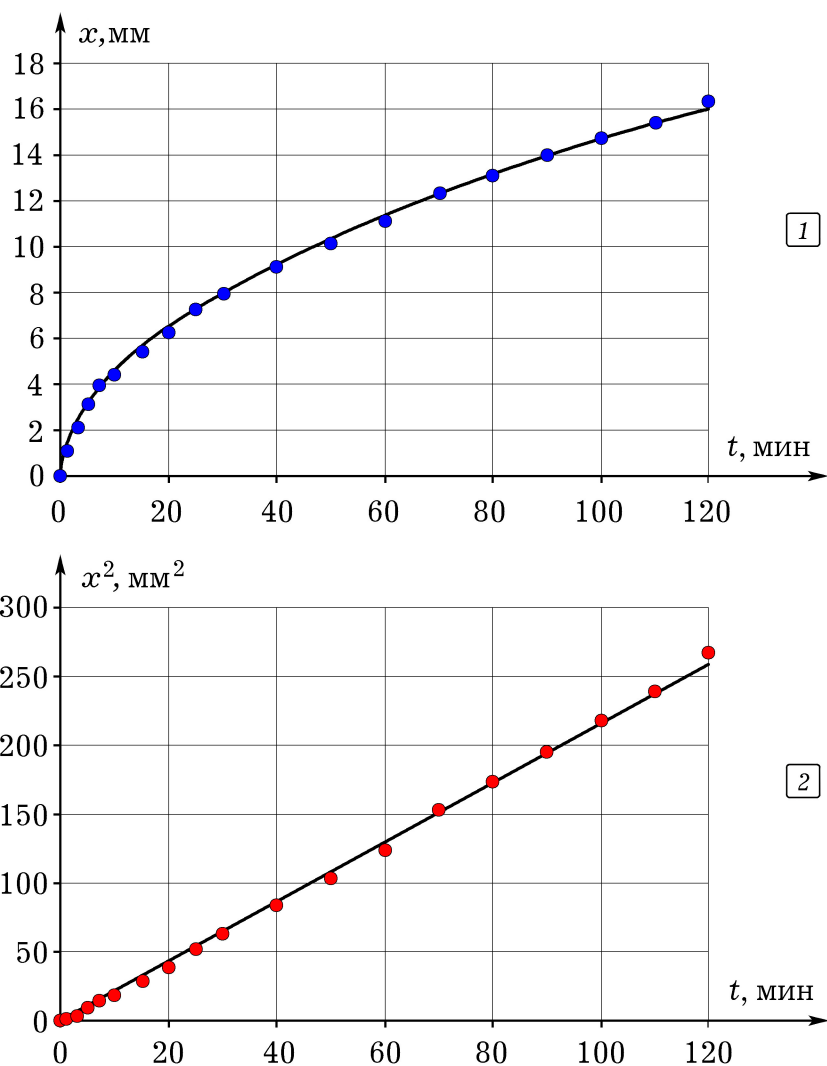


Рис. 8. Графические результаты эксперимента: 1 — зависимость перемещения  $x$  диффузионного фронта от времени  $t$ ; 2 — линейаризация графика  $x = x(t)$  для обоснования зависимости  $x \sim \sqrt{t}$

ознакомления школьников с этим явлением и показывающие его значимость для людей.

Выбрана *ключевая демонстрация* [20], которая в наглядном, ярком и запоминающемся опыте убедительно доказывает сам факт существования диффузии.

Рассмотрены теоретические объяснения явления диффузии аммиака из воздуха в раствор фенолфталеина, соответствующие уровням школьных курсов физики и химии.

Изложена элементарная теория скорости перемещения диффузионного фронта в веществе и обозначена связь диффузии с броуновским движением.

Детально разработаны условия и описан порядок проведения количественного эксперимента, обеспечивающего верификацию учебной теории в курсе общей и экспериментальной физики, например, в процессе двухчасовой лабораторной работы.

Показана целесообразность и возможность использования разработанного учебного эксперимента для организации проектной деятельности обучающихся при изучении физики и(или) химии в школе.

Таким образом, предлагаемый учебный эксперимент в целом соответствует обоснованным в работе [21] критериям, которые позволяют новую серию опытов отнести к средствам развития мышления школьников.

*Исследование выполнено на базе ФИП «Школа учебного физического эксперимента» по проекту «Методология создания и внедрения современных учебных физических приборов и опытов для урочной и внеурочной деятельности по физике в средней школе и в педагогическом вузе» (XUJA-2024-0030) при финансовой поддержке Министерства просвещения РФ (соглашение № 073-03-2025-043 от 15.01.2025) в рамках госзадания, № НИОКТР 1023040600021-1-5.3.1.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики 1901–1955. — М.: Наука, 1966. — 632 с.
2. Майер В. В., Мамаева Е. С. Несколько новых опытов для седьмого класса // Учебная физика. — 2007. — № 1. — С. 14–21.
3. Вараксина Е. И., Майер В. В. Учебные проекты по школьному физическому эксперименту: 7 класс. Дидактические ресурсы проектной деятельности. — М.: Флинта, 2019. — 172 с.
4. Еремин В. В. Химия: Углубленный уровень: 11 класс: учебник / В. В. Еремин, Н. Е. Кузьменко, А. А. Дроздов, В. В. Лунин; под ред. В. В. Лунина. — М.: Просвещение, 2021. — 478 с.
5. Логинов Н. Я., Воскресенский А. Г., Солодкин И. С. Аналитическая химия. Учеб. пособие для студентов химико-биол. и биолого-хим. специальностей пед. ин-тов. — М.: Просвещение, 1975. — 478 с.
6. Александрова Э. А. Химические методы анализа: учебник и практикум для вузов / Э. А. Александрова, Н. Г. Гайдукова. — М.: Юрайт, 2025. — 533 с.
7. Индикаторы / Редактор Э. Бишоп. Т. 1. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
8. Габриелян О. С. Химия: 9-й класс: базовый уровень: учебник / О. С. Габриелян, И. Г. Остроумов, С. А. Сладков. — М.: Просвещение, 2023. — 223 с.

9. Жилин Д. М. Индикаторы в современной химии // Химия в школе. — 1997. — № 5. — С. 9–15.
10. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. — М.: Химия, 1971. — 456 с.
11. Шиляева Л. В., Вараксина Е. И., Майер В. В. Химические индикаторы в опытах по диффузии в газах и жидкостях // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 42. — М.: ИСПО РАО, 2025. — С. 86–88.
12. Беспалов П. И. Новое в методике химического эксперимента. — URL: <https://him.1sept.ru/article.php?ID=200302601> (дата обращения: 24.12.2024).
13. Аналитическая химия: учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования / [Ю. М. Глубоков, В. А. Головачева, Ю. А. Ефимова и др.]; под ред. А. А. Ищенко. — М.: Академия, 2012. — 320 с.
14. Поль Р. В. Механика, акустика и учение о теплоте. — М.: Наука, 1971. — 480 с.
15. Гершензон Е. М., Малов Н. Н., Мансуров А. Н. Молекулярная физика: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений. — М.: Издательский центр «Академия», 2000. — 272 с.
16. Кикоин А. К., Кикоин И. К. Молекулярная физика. — М.: Наука, 1976. — 478 с.
17. Габриелян О. С. Химия. Углубленный уровень. 11 кл.: учебник / О. С. Габриелян, Г. Г. Лысова. — М.: Дрофа, 2015. — 397 с.
18. ГОСТ 4919.1-2016 Реактивы и особо чистые вещества. Методы приготовления растворов индикаторов. — URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/63158> (дата обращения: 01.03.2025).
19. Леенсон И. А. Занимательная химия. 8–11 кл.: В 2 ч. Ч. 1. — М.: Дрофа, 1996. — 176 с.
20. Никифоров Г. Г. Обновление механизмов преодоления ключевых проблем системы учебного физического эксперимента // Учебная физика. — 2017. — № 2. — С. 50–61.
21. Усольцев А. П., Шамало Т. Н., Игошев Б. М. Развитие мышления школьников средствами учебного физического эксперимента // Учебная физика. — 2025. — № 1. — С. 66–73.

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

Поступила в редакцию 13.01.25.