

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Александрова Наталья Владимировна

кандидат технических наук, доцент, alexanava@rambler.ru

Взоров Николай Николаевич

старший преподаватель, NNVzorov@mephi.ru

Матрончик Алексей Юрьевич

кандидат физико-математических наук, доцент, matronchik2004@mail.ru

Хангулян Елена Владимировна

старший преподаватель, EVKhangulyan@mephi.ru

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

Аннотация

Рассматривается целесообразность использования пространства Минковского и четырех-векторов в рамках изучения специальной теории относительности в курсе общей физики. Анализируется эффективность исследования эффекта Доплера с использованием инвариантности произведения четырех-вектора в псевдоевклидовом пространстве.

Ключевые слова

Специальная теория относительности, фотон, электромагнитные волны, эффект Доплера.

SOME PHYSICAL AND MATHEMATICAL ASPECTS IN THE SPECIAL THEORY OF RELATIVITY

Alexandrova Natalia V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, alexanava@rambler.ru

Vzorov Nikolay N.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, uran-O2@yandex.ru

Matronchik Alexey Yu.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, matronchik2004@mail.ru

Khangulyan Elena V.

senior lecturer, EVKhangulyan@mephi.ru

National Research Nuclear University MEPhI 31, Kashirskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 115409

Abstract

The expediency of using Minkowski space and four-vectors in the context of studying special relativity in a course of general physics is considered. The effectiveness of studying the Doppler effect using the invariance of the product of a four-vector in pseudo-Euclidean space is analyzed.

Keywords

Special theory of relativity, photon, electromagnetic waves, Doppler effect.

По сравнению с ньютоновской механикой, релятивистская механика достаточно молодая теория и некоторые моменты в специальной теории относительности до сих пор вызывают споры. Один из этих моментов – инвариантность относительно преобразований Лоренца массы. Во многих научных публикациях и учебных изданиях [1,2,3] указывалось на недопустимость использования переменной массы, однако, математическая эквивалентность выражений определяющих релятивистский импульс и энергию через переменную и инвариантную массу порождает желание использовать для массы движущегося тела известное всем:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

Действительно, записывая релятивистский импульс с использованием ньютоновского определения импульса и (1), мы получим верное выражение

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (2)$$

почему же тогда столь существенна инвариантность массы. Аналогичная ситуация складывается и с выражениями для энергии. Л. Б. Окунь в своей работе «Понятие массы» [1] предлагает читателям следующую «викторину».

«Перед Вами четыре формулы:

$$E_0 = mc^2 \quad (1.1)$$

$$E = mc^2 \quad (1.2)$$

$$E_0 = m_0c^2 \quad (1.3)$$

$$E = m_0c^2 \quad (1.4)$$

здесь c – скорость света, E – полная энергия тела, m – его масса, E_0 – энергия покоя, m_0 масса покоя того же тела. Выпишите, пожалуйста, номера этих формул в том порядке, в котором Вы считаете их более «правильным»

И, несмотря на десятилетия, прошедшие с момента выхода статьи, все формулы (1.2) и (1.3) встречаются в школьных и вузовских учебниках и научно-популярной литературе и прочно закрепляются в умах школьников.

Для объяснения необходимости использовать в релятивистской механике понятия инвариантной массы обратимся к математическим основам специальной теории относительности. В СТО событие, происходящее с некоторой материальной частицей, определяется тремя координатами этой частицы (x, y, z) и моментом времени (t), когда происходит событие. Как заметил Г. Минковский ct и $\vec{r}$ становятся компонентами одного четырехмерного радиус-вектора. Его компоненты обозначаются X^i , где i пробегает значения 0,1,2,3, причём $X^0 = ct$, $X^1 = x$, $X^2 = y$, $X^3 = z$. Разность квадратов временной и пространственной части радиус-вектора называют квадратом интервала: $s^2 = c^2t^2 - \vec{r}^2$. Квадрат интервала, являющегося псевдовектором, инвариантен относительно преобразований Лоренца:

$$\begin{aligned} \vec{r}' &= \gamma(\vec{r} + \vec{v}t), \\ t' &= \gamma(t + \vec{r}\vec{v}/c^2), \end{aligned}$$

$$\text{где } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Квадрат интервала можно представлять и суммой квадратов временной и пространственной частей в случае, если вместо временной координаты t рассматривать it . Но в эволюции описания основ специальной теории относительности в курсе

«Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Теоретическая физика, том II, Теория поля» наблюдается тенденция избавления от мнимой единицы в выражениях с $\tau = ct$ и т.п. Можно сравнить, например, издания 1960 и 1988 гг. При этом для удобства записи вводятся два «сорта» компонент четырехмерного радиус-вектора: контравариантные – $X^i = (ct, \vec{r})$ и ковариантные – $X_i = (ct, -\vec{r})$. Таким образом, рассматривая произведение контравариантного и ковариантных компонент четырехмерного вектора, мы получаем $X^i X_i = c^2 t^2 - \vec{r}^2$.

Для описания движения релятивистских частиц требуется новый взгляд на такие понятия как скорость, импульс, энергия и т.д. Удобнее всего говорить об этих величинах на языке четырехмерных векторов. Введем понятие четырехмерного вектора скорости: рассмотрим бесконечно малое приращение компонент четырехмерного вектора координат вдоль пространственно-временной траектории (cdt, dx, dy, dz) . Построим четырехмерный вектор скорости аналогично ньютоновскому определению скорости, но в качестве промежутка времени будем рассматривать инвариантное относительно преобразований Лоренца приращение собственного времени

$$d\tau = ds/c = dt \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

так как деление четырехмерного вектора на инвариант сохраняет свойства преобразований четырехмерного вектора.

Таким образом, для четырехмерного вектора скорости получаем

$$V^i = \frac{dX^i}{d\tau} = \gamma \frac{(cdt, d\vec{r})}{dt} = \gamma(c, \vec{v}).$$

Часто, определяя четырехмерный вектор скорости, используют приращение интервала, в этом случае четырехмерный вектор скорости оказывается безразмерной величиной $V^i = \gamma(1, \vec{v}/c)$, а произведение контравариантных и ковариантных компонент четырехмерного вектора скорости равно 1.

Используя обобщение ньютоновского определение импульса, для полученного четырехмерного вектора скорости можем записать четырехмерный вектор импульса

$$P^i = mV^i = \gamma(mc, m\vec{v}) = (\frac{E}{c}, \vec{p}).$$

Нулевая компонента которого определяет энергию релятивистской частицы $E = cP^0 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, а остальные импульс релятивистской частицы $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$.

Полученное выражение для четырехмерного вектора скорости уже включает в себя Лоренц-фактор $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ и перенос этого множителя в массу является необоснованным. Таким образом, математически строгое описание релятивистской механики требует инвариантности массы, которая определяет квадрат четырехмерного вектора импульса

$$P^i P_i = \gamma^2(m^2 c^2 - m^2 \vec{v}^2) = mc^2.$$

Инвариантность квадрата четырехмерного вектора импульса и скорости света требует инвариантности массы относительно преобразований Лоренца. Следовательно, термин «масса покоя» становится избыточным, масса частицы – это параметр, который связан с ней и характеризует саму частицу, а не её движение.

В заключение, хотелось бы обратить внимание на удобство использование понятия четырехмерных векторов при обосновании эффекта Доплера для электромагнитных волн. Фаза электромагнитной волны $(\omega t - \vec{k}\vec{r})$ представляет собой произведение двух четырехмерных векторов $X^i = (ct, \vec{r})$ и $K_i = (\omega/c, \vec{k})$, и инвариантна относительно преобразований Лоренца. Рассмотрим две системы отсчета K , связанную с приемником, и K' , в которой покоится источник, испускающий волны на частоте ω_0 . Таким образом,

$$\omega_0/c = \gamma \left(\omega/c - \vec{v} \vec{k}/c \right) = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \left(\omega/c - v \omega/c^2 \vec{e}_v \vec{e}_k \right).$$

$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - \vec{e}_k \vec{v}/c}.$$

Список литературы

1. Окунь Л. Б. Понятие массы (масса, энергия, относительность) // Успехи физических наук. — 1989. — Т. 158, № 3. — С. 511–530.
2. Окунь Л. Б. Азы физики. — Москва: МЦНМО, 2012. — 280 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — Москва: Физматгиз, 1960. — 548 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — 6-е изд. — Москва: Наука, 1988. — 544 с.
5. Сасскинд Л., Фридман А. Теоретический минимум. Специальная теория относительности и классическая теория поля. — Санкт-Петербург: Питер, 2021. — 320 с.

References

1. Okun' L. B. Ponyatie massy (massa, energiya, otnositel'nost') // Uspekhi fizicheskikh nauk. — 1989. — Т. 158, № 3. — S. 511–530.
2. Okun' L. B. Azy fiziki. — Moskva: MCNMO, 2012. — 280 s.
3. Landau L. D., Lifshic E. M. Teoriya polya. — Moskva: Fizmatgiz, 1960. — 548 s.
4. Landau L. D., Lifshic E. M. Teoriya polya. — 6-e izd. — Moskva: Nauka, 1988. — 544 s.
5. Sasskind L., Fridman A. Teoreticheskij minimum. Special'naya teoriya otnositel'nosti i klassicheskaya teoriya polya. — Sankt-Peterburg: Piter, 2021. — 320 s.

ОПЫТ ДВУХЭТАПНОГО ПРОВЕДЕНИЯ ВСЕРОССИЙСКОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ ОЛИМПИАДЫ ПО ФИЗИКЕ В 2021-2025 ГОДАХ

Александрова Наталья Владимировна¹

кандидат технических наук, доцент, alexanava@rambler.ru

Иванова Наталья Анатольевна¹

кандидат физико-математических наук, доцент, uran-O2@yandex.ru

Игнатов Владимир Николаевич¹

старший преподаватель, VNIgnatov@mephi.ru

Калашников Николай Павлович¹

доктор физико-математических наук, профессор, kalash@mephi.ru

Матрончик Алексей Юрьевич¹

кандидат физико-математических наук, доцент, matronchik2004@mail.ru

Ольчак Андрей Станиславович¹

кандидат физико-математических наук, профессор, asolchak@mephi.ru

Самарченко Дмитрий Александрович¹

кандидат физико-математических наук, доцент, DASamarchenko@mephi.ru

Тюлюсов Антон Николаевич^{1,2}

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель,
tyulyusov@yandex.ru,

Хангулян Елена Владимировна¹

старший преподаватель, EVKhangulyan@mephi.ru

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

² Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1

Аннотация

Анализируются результаты четырех Всероссийских студенческих олимпиад по физике, заключительные туры которых были организованы НИЯУ МИФИ в 2021-2024 годах в смешанном формате в два этапа. Описывается процедура проведения первого дистанционного этапа. Приводятся условия пяти задач второго очного этапа ВСО-2024. Выявляются преимущества двухэтапного смешанного способа проведения заключительного тура студенческой олимпиады.

Ключевые слова

Всероссийская студенческая олимпиада, ВСО-2021, 2022, 2023, 2024, физика, условия задач, критерии оценивания, образование, дистанционный и очный этапы.

EXPERIENCE OF TWO-STAGE CONDUCTING THE ALL-RUSSIAN STUDENT PHYSICS OLYMPIAD IN 2021-2025

Alexandrova Natalia V.¹

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, alexanava@rambler.ru

Ivanova Natalia A.¹

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
uran-O2@yandex.ru

Ignatov Vladimir N.¹
senior lecturer, VNIgnatov@mephi.ru

Kalashnikov Nikolay P.¹
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, kalash@mephi.ru

Matronchik Alexey Yu.¹
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
matronchik2004@mail.ru

Olchak Andrey S.¹
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, asolchak@mephi.ru

Samarchenko Dmitry A.¹
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
DASamarchenko@mephi.ru

Tyulyusov Anton N.^{1,2}
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer, tyulyusov@yandex.ru

Khangulyan Elena V.¹
senior lecturer, EVKhangulyan@mephi.ru

¹ National Research Nuclear University MEPHI 31, Kashirskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 115409

² National Research Center "Kurchatov Institute" 123182, Russian Federation, Moscow, Academician Kurchatov square 1

Abstract

The article analyzes the results of four All-Russian Student Physics Olympiads, the final rounds of which were organized by NRNU MEPHI in 2021-2024 in a mixed format in two stages. The procedure for holding the first remote stage is described. The conditions of five problems of the second in-person stage of the VSO-2024 are given. The advantages of the two-stage mixed method of holding the final round of the student Olympiad are revealed.

Keywords

All-Russian Student Olympiad, VSO-2021, 2022, 2023, 2024, physics, problem conditions, assessment criteria, education, distance and face-to-face stages.

Начиная с весны 2021 года в НИЯУ МИФИ заключительные туры Всероссийской студенческой олимпиады (ВСО) проводятся в двухэтапном дистанционно-очном формате [1,2]. С тех пор ВСО по физике проводятся в 2 этапа: в феврале-марте – дистанционный отборочный этап с использованием базы тестовых заданий, размещенных на сайте online.mephi.ru «Образовательный портал НИЯУ МИФИ», а в апреле-мае – очный заключительный этап. На первом отборочном дистанционном этапе студентам предлагается решить 20 задач по всем разделам общей физики с использованием системы автоматизированных тестов. При составлении заданий отборочного этапа были отобраны задачи открытого типа с повышенной сложностью. Это было возможно, поскольку, в отличие от проверочных мероприятий, в соревновательных (к которым относится, очевидно, и ВСО) играет роль исключительно относительная оценка. На выполнение заданий отводится 60 минут. Оценивание конкурсных заданий происходит автоматически, максимальная оценка – 20 баллов. Апелляция по результатам отборочного тура не предусматривается.

На втором заключительном этапе всем участникам предлагался один вариант, состоящий из 5 задач (рис. 1). За 180 минут необходимо было записать развернутое

решение задач. Письменные работы заключительного тура оцениваются членами жюри по 100-балльной шкале в соответствии с критериями (за одну задачу выставялось максимально 20 баллов). Апелляция была предусмотрена только по результатам заключительного тура.



(регистрационный номер)

(не заполнять)

ФИО участника (печатные буквы) _____

Курс _____ Группа _____

Личная подпись _____

Направление подготовки _____
(бакалавриат, специалитет, магистратура)

«Утверждаю»
Зам. председателя оргкомитета ВСО по физике

Калашников Н.П.

Калашников Н.П.

Одиннадцатая Всероссийская студенческая олимпиада по физике ВСО-2024

1. Кот идет по карусели

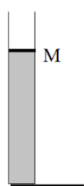


Карусель, имеющая форму диска массой M , может вращаться без трения вокруг вертикальной оси, расположенной на географической широте φ . Из центра неподвижной карусели начинает с постоянной скоростью двигаться небольшой кот (массой m) строго в западном направлении к расположенной на земле кормушке. На какой угол повернется карусель за время t движения кота к краю карусели.

2. Тепловая машина

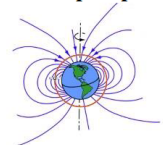
Незнайка придумал тепловую машину, холодильник которой содержит лед массой $1,0$ кг с температурой 0°C , а нагреватель содержит водяной пар массой 10 кг с температурой 100°C . Машина теплоизолирована и работает при нормальном давлении 10^5 Па. Найти максимальную работу такой тепловой машины, которую можно получить до начала изменения температур одного из ее резервуаров. Ответ обосновать. Удельная теплота плавления льда $3,33 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплота парообразования $2,25 \cdot 10^6$ Дж/кг.

3. Колебания поршня



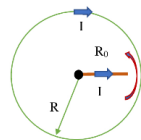
Длинный вертикальный цилиндр, заполненный идеальным газом с молярной массой μ , находится на неподвижной подставке. Цилиндр сообщается с атмосферой только сверху, а газ накрыт подвижным поршнем массой M и площадью сечения S . Атмосферное давление над поршнем p_a , а температура газа постоянна и равна T . Разность давлений газа на поршень и на дно цилиндра равна Δp . Затем подставку быстро убирают и цилиндр падает вертикально вниз с ускорением свободного падения g . Найти частоту ω малых изотермических колебаний поршня. Ответ обосновать. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

4. Генератор на спутнике



В качестве источника электрической энергии на спутнике было предложено использовать генерацию ЭДС индукции в круговой обмотке медной проволоки в магнитном поле Земли. Диаметр круга $d = 1,0$ м, удельное сопротивление проволоки $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м, площадь ее сечения $s_1 = 1,0$ мм², число витков $N = 100$. Магнитный дипольный момент Земли равен $p_m = 7,72 \cdot 10^{22}$ А·м², ее радиус $R = 6400$ км, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Спутник движется по низкой околоземной орбите в плоскости магнитного меридиана, нормаль круга ориентирована на центр Земли. Найти максимальную мощность такого генератора и соответствующее положение спутника на орбите. Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

5. Опыт Ампера



По тонкому горизонтальному кольцевому проводу радиуса R течет постоянный ток I . В плоскости кольца находится тонкий стержень длины $R_0 < R$, один конец которого закреплен в центре кольца на оси. Если одновременно такой же ток I пропускать через скользящие контакты по стержню, то он будет вращаться в плоскости кольца на оси с постоянной угловой скоростью. Найти момент сил трения, действующих на стержень. Индукцию магнитного поля можно выразить через векторный потенциал $\vec{A}$: $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$, связь которого с током аналогична связи скалярного потенциала с зарядом.

Рисунок 1 — Вариант ВСО-2024

Критерии оценивания разрабатывались индивидуально для каждой задачи, учитывая ее особенности, но сохраняя при этом единый подход к оцениванию. За грубые ошибки (приравнивание векторных и скалярных величин, несоблюдение правил размерностей, неправильная запись основных физических законов и выражений, неправильное дифференцирование и интегрирование элементарных функций,

численный ответ, более чем в три раза отличающийся от правильного ответа и т.д.) оценка за каждую задачу могла быть понижена на 10 баллов. В то же время оценка за неточное или неполное решение задачи могла быть повышена (вплоть до максимальной), если студент продемонстрировал ясное понимание физической сущности задачи, использовал оптимальные и оригинальные способы решения, четко и ярко изложил свое решение задачи.

Весной 2022 года в НИЯУ МИФИ был проведен в девятый раз заключительный тур Всероссийской студенческой олимпиады по физике. В отборочном дистанционном этапе 23.04.22 приняло участие 185 студентов из 16 вузов. По результатам отборочного этапа к следующему этапу были допущены не более 5 студентов из каждого вуза. В заключительном очном этапе в НИЯУ МИФИ приняли участие 37 студентов из 12 вузов.

В командном зачете победила команда Национального исследовательского ядерного университета МИФИ.

Дистанционный этап имеет ряд преимуществ и недостатков. Наиболее существенным достоинством такого формата является его несомненно больший охват как участников, так территорий, что позволяет сравнить степень участия студентов различных вузов всей страны. К серьезным недостаткам следует отнести прежде всего сложность контроля и проблемы с валидностью результатов, за что этот формат и подвергается справедливой критике, например, по итогам отборочного этапа одним из лидеров, наряду с НИЯУ МИФИ, НИУ МФТИ, стал ГУЗ, вуз не показывающих высоких результатов по итогам очного тура. Этот недостаток нивелируется тем, что каждый вуз определяет ограниченное число участников для очного этапа ВСО. С учетом баланса всех рисков и получаемых преимуществ было решено использовать третий раз двухэтапный формат весной 2023 года, когда в НИЯУ МИФИ проводилась десятая юбилейная Всероссийская студенческая олимпиада по физике. В отборочном дистанционном этапе 26 апреля 2023 г. приняло участие 184 студента из 13 вузов. По результатам отборочного этапа к следующему этапу были допущены не более 5 студентов из каждого вуза. В заключительном очном этапе в НИЯУ МИФИ приняли участие 39 студентов из 10 вузов. В командном зачете ВСО-2023 по сумме трех лучших результатов первыми оказались студенты НИУ ИТМО.

В дистанционном отборочном туре Всероссийского этапа ВСО-2024 приняли участие 241 студент из 24 вузов. По его итогам вузы сформировали команды для участия в очном заключительном туре Всероссийского этапа ВСО-2024, который был проведен 21 апреля на базе НИЯУ МИФИ. В нем приняли участие 61 студент из 17 вузов. В командном зачете второй год подряд победила опытная команда Национального исследовательского университета ИТМО.

Двухэтапный способ (дистанционный и очный) проведения заключительного тура ВСО по физике, испробованный в 2022, 2023 и 2024 годах, обладает рядом несомненных преимуществ:

1. Число участников очного этапа удалось сократить в несколько раз.
2. На очный этап удастся отобрать лучших студентов вузов.
3. Студенты на очном этапе стали решать больше задач. Увеличился средний балл олимпиадных работ.
4. Улучшилось качество и уменьшилось время проверки студенческих работ.

Экспертная группа ВСО по физике предполагает и в дальнейшем (в частности, весной 2025 года) использовать двухэтапный способ проведения заключительного тура ВСО по физике.

Список литературы

6. Иванова Н. А., Игнатов В. Н., Калашников Н. П., Матрончик А. Ю., Ольчак А. С., Самарченко Д. А., Тюлюсов А. Н., Хангулян Е. В. ВСО-2021: ВСЕРОССИЙСКАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ ОЛИМПИАДА ПО ФИЗИКЕ ВО ВРЕМЯ ПАНДЕМИИ (COVID - 19) // Физическое образование в вузах. 2022. т.28, № 2, с. 52-64.
7. Иванова Н. А., Игнатов В. Н., Калашников Н. П., Матрончик А. Ю., Ольчак А. С., Самарченко Д. А., Тюлюсов А. Н., Хангулян Е. В. Двухэтапный способ проведения всероссийской студенческой олимпиады по физике в 2022 и 2023 годах // Физическое образование в вузах. 2024. т.30, № 2, с. 53-67.

References

1. Ivanova N. A., Ignatov V. I., Kalashnikov N. P., Matronchik A. Ju., Olchak A. S., Samarchenko D. A., Tyulyusov A. N., Khangulian E. V. ALL-RUSSIAN NATIONAL STUDENT OLYMPIAD IN PHYSICS 2021 DURING A PANDEMIC (COVID-19). Physics in Higher Education. 2022. v. 28, № 2, p.p. 52-64.
2. Ivanova N. A., Ignatov V. N., Kalashnikov N. P., Matronchik A. Yu., Olchak A. S., Samarchenko D. A., Tyulusov A. N., Hangulyan E. V. A two-stage method for holding the All-Russian Student Olympiad in Physics in 2022 and 2023 // Physical education in universities. 2024. v. 30, no. 2, p. 53-67.

РОЛЬ И МЕСТО КУРСА ИСТОРИИ ФИЗИКИ В ПОДГОТОВКЕ БАКАЛАВРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ 16.03.01 – «ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

Еркович Ольга Станиславовна

кандидат физико-математических наук, доцент, erkovitch@mail.ru

Морозов Андрей Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор, amor@bmstu.ru

Поздышев Михаил Леонидович

кандидат технических наук, доцент, pte59@mail.ru

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005,
Российская Федерация, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

Аннотация

Обсуждаются вопросы, связанные с преподаванием курса истории физики в техническом университете для студентов направления подготовки 16.03.01 - «Техническая физика». Показано, что эффективность освоения курса истории физики может быть повышена, если при обучении студентов учитываются их индивидуальные образовательные потребности и научные интересы. Показано, что изучение истории физики позволяет успешно формировать совокупность универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, предусмотренных как действующими ФГОС ВО, так и самостоятельно утверждаемыми образовательными стандартами университета по направлению подготовки «Техническая физика». Освоение курса истории физики может рассматриваться в контексте междисциплинарных связей, позволяющих более глубоко осмыслить ранее освоенные дисциплины учебного плана, так и рассмотреть факторы, влияющие на развитие актуальных научных направлений применительно к тематике выпускных квалификационных работ бакалавров. Эффективно организованный курс истории физики представляет собой инструмент формирования универсальных компетенций, связанных со способностью прогнозирования развития научных направлений, организации перспективных исследований и самостоятельного сбора и критического анализа научной информации. Заинтересованность студентов в таком подходе подтверждается активным использованием материалов и методов курса в их научно-исследовательской работе. Освоение курса истории физики, рассматриваемое как исследование эффективных и неэффективных стратегий развития физики как фактора развития общества в различных культурах и различных условиях, оказывается чрезвычайно полезным инструментом формирования современного физика, ориентированного на решение как фундаментальных, так и прикладных задач.

Ключевые слова

Инновационное развитие, компетенции, высшее образование, образовательные стандарты, бакалавриат, история физики, выпускная квалификационная работа.

THE ROLE AND PLACE OF THE HISTORY OF PHYSICS COURSE IN THE BACHELOR'S DEGREE PROGRAM 16.03.01 – "TECHNICAL PHYSICS"

Erkovich Olga S.

Ph.D. physical and mathematical sciences, associate professor, erkovitch@mail.com

Morozov Andrey N.

Dr.hab. physical and mathematical sciences, professor, amor@bmstu.ru

Pozdyshev Mikhail L.

Ph.D. Engineering, associate professor, pte59@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Russian Federation, Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5

Abstract

The issues related to the teaching of the history of physics course at the Technical University for students of the 16.03.01 - "Technical Physics" course are discussed. It is shown that the effectiveness of mastering a course in the history of physics can be improved if students' individual educational needs and scientific interests are taken into account when teaching. It is shown that the study of the history of physics makes it possible to successfully form a set of universal, general professional and professional competencies provided for both by the current Federal State Educational Standard for Higher Education and independently approved educational standards of the university in the field of Technical Physics. Mastering the course of the history of physics can be considered in the context of interdisciplinary connections that allow for a deeper understanding of previously mastered disciplines of the curriculum, as well as to consider the factors influencing the development of relevant scientific areas in relation to the subject of bachelor's final qualifying papers. An effectively organized course in the history of physics is a tool for the formation of universal competencies related to the ability to predict the development of scientific fields, organize promising research, and independently collect and critically analyze scientific information. Students' interest in this approach is confirmed by the active use of course materials and methods in their research work. Mastering a course in the history of physics, considered as a study of effective and ineffective strategies for the development of physics as a factor in the development of society in different cultures and different conditions, turns out to be an extremely useful tool for the formation of a modern physicist focused on solving both fundamental and applied problems.

Keywords

Innovative development, competencies, higher education, educational standards, bachelor's degree, history of physics, graduation thesis.

Основной задачей, стоящей в настоящее время перед техническими университетами российской Федерации, является создание инженерного корпуса, готового решать задачи создания и развития современной инновационной экономики. Эта задача была сформулирована в Стратегии инновационного развития России до 2020 г. [8], но сохранила свою значимость, и в настоящее время ее успешное решение может оказаться вопросом жизненно важным для обеспечения экономической и политической безопасности нашего государства. Характерной особенностью современного инженера является способность в кратчайшие сроки внедрять в производство решения, учитывающие последние достижения современной науки, в том числе – фундаментальной. Это требует, с одной стороны, введения в учебный процесс спецкурсов, посвященных наиболее актуальным и практически значимым достижениям техники и технологий, с другой стороны – возрастает роль фундаментальной компоненты образования, обеспечивающей возможность быстрого освоения новейших научных разработок. При подготовке специалистов по направлению «Техническая физика» необходимо учитывать, что одной из целей их обучения является подготовка универсальных профессионалов, способных как принимать участие в фундаментальных научных исследованиях, так и использовать результаты этих исследований в разработке современной техники, основанной на новейших физических принципах. Для решения этой задачи выпускник технического университета, обучающийся по инженерно-

физическим направлениям подготовки, должен, в том числе, представлять роль и место физики в современном обществе, ее связь с инженерными дисциплинами и государственными задачами, уметь оценивать перспективы развития научных направлений и факторы, влияющие на это развитие. Таким образом, формирование основной образовательной программы подготовки бакалавров по направлению подготовки 16.03.01 – «Техническая физика» должно осуществляться в соответствии со стратегическими задачами, стоящими перед российской экономикой в целом и сформулированными в Концепции технологического развития на период до 2030 года [3].

Действующие в настоящее время образовательные стандарты должны обеспечить решение стоящих перед страной задач. Формирование учебных планов должно обеспечивать, с одной стороны, фундаментальность образования, получаемого инженерами, с другой – достаточно широкий кругозор, а самое главное – развитые исследовательские компетенции, обеспечивающие в будущем успешный поиск инновационных решений в их практической деятельности.

История физики, входящая в учебный план подготовки бакалавров по направлению 16.03.01 - «Техническая физика», реализуемый в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана, представляет собой уникальную учебную дисциплину, в которой сочетаются естественнонаучные и гуманитарные компоненты фундаментального физико-математического образования. С одной стороны, она изучает процессы формирования и развития фундаментальных фактов, теорий и методов физической науки, а также их трансформацию под воздействием внутренних и внешних факторов [1, 6, 7]. С другой стороны, предмет истории физики может быть определен как история возникновения и развития физической науки как социокультурного явления. Понимание исторических тенденций и закономерностей эволюции физики является неотъемлемой частью физического образования.

При построении курса истории физики в техническом университете, безусловно, может и должен быть использован опыт преподавания этой дисциплины в классических университетах и вузах естественнонаучного профиля. В соответствии с этим опытом этот курс должен обеспечивать студентам

- знакомство с эволюцией физических представлений, теорий и методов с древнейших времен до наших дней;
- знание истории фундаментальных физических открытий в связи с историей развития общества, в том числе связь между развитием физики и технических изобретений;
- знакомство с биографиями ученых, внесших фундаментальный вклад в развитие физики («роль личности в истории физики»), и влияние господствующих философских и методологических воззрений на деятельность физиков-исследователей.

При изучении этих аспектов истории физики можно с успехом опираться на учебные курсы, разработанные как отечественными, так и зарубежными авторами [1, 4- 6].

В то же самое время курс истории физики, ориентированный на студентов технического университета, должен строиться с учетом области профессиональной деятельности и сферы профессиональной деятельности, определенных соответствующим ФГОС ВО [9].

Курс истории физики позволяет обеспечить формирование универсальных компетенций УК-1 («Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач») и УК-5 («Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах») [9], создавая возможность

провести самостоятельное исследование в соответствии с индивидуальной образовательной траекторией каждого студента.

Таким образом, представляется необходимым внести в курс дополнительный материал, посвященный взаимному влиянию физики, техники, технологий, экономических и политических процессов друг на друга. Особенно важно обсуждение вопросов, связанных с развитием современной физики, начиная от последнего десятилетия XIX века до последнего времени. Этот период отличается революционными сдвигами как в теоретических, прикладных и социокультурных основаниях физической науки, так и в ее воздействии на развитие техники, технологий и, в итоге, на все аспекты жизни общества в целом. При изучении этого материала целесообразно максимально индивидуализировать самостоятельную работу студентов, которые, в соответствии с действующим в МГТУ им. Н. Э. Баумана учебным планом, при прохождении курса истории физики уже прошли ряд учебных практик и приступили к работе над выпускной квалификационной работой.

В соответствии с разработанным на кафедре физики МГТУ им. Н. Э. Баумана учебным планом, эта дисциплина изучается в 8 семестре, после освоения большей части дисциплин профессионального цикла, предшествуя этапу подготовки и защиты выпускной квалификационной работы (ВКР). Такая организация учебного процесса позволяет актуализировать сформированные при освоении учебного плана знания, умения и навыки, установив более глубокие связи между дисциплинами. В ходе изучения дисциплины изучается не только ход развития отдельных направлений физической науки, но и анализируются факторы, обеспечивающие эффективность этого развития или, напротив, приводящие к стагнации.

В качестве самостоятельной работы над этим разделом курса студентам предлагается подготовка рефератов по тематике, связанной с тематикой их научных исследований, что позволяет более глубоко ознакомиться с историей развития соответствующей области физики, рассматривая развитие теорий и методов и анализируя работы основоположников. При создании выпускной квалификационной работы (ВКР) особое внимание уделяется новизне и актуальности получаемых результатов, поэтому основной акцент при работе с научной литературой делается на наиболее современные работы, в первую очередь – работы последнего десятилетия. В то же самое время значительный интерес могут представлять исследования, созданные основоположниками соответствующих направлений, где подробно обсуждаются базовые принципы, ограничения, накладываемые на используемые методы, противоречия в используемых подходах и т.д. Изучение истории направления позволяет изучить его более глубоко, получая дополнительный опыт, связанный с изучением научного планирования.

В ходе этой работы студенты развивают такие личностные качества, как способность к саморазвитию, самоорганизации, самообразованию, навыки работы с информацией, получаемой из различных источников, умение анализировать и сравнивать полученные данные с различных точек зрения, используя методы, характерные как для естественных, так и для гуманитарных наук, что способствует развитию более широкого кругозора и приобретению богатства методов исследования. Кроме того, подготовка и защита реферата, осуществляемая в виде доклада на мини-конференции, эффективно формирует у студентов навыки профессиональной коммуникации.

Как показывает опыт, полученный при преподавании курса истории физики в МГТУ им. Н. Э. Баумана, результаты исследовательской деятельности студентов, связанной с подготовкой рефератов по истории физики, в 75-85 % случаев используются при подготовке ВКР, а в некоторых случаях – в исследовательской работе студентов

магистратуры по направлению 16.04.01 – «Техническая физика» (в тех случаях, когда студент продолжает исследования в рамках прежней тематики).

Кроме того, курс истории физики дает уникальные возможности для формирования не только общепрофессиональных, но и общекультурных компетенций, связанных с формированием личности студента. Он позволяет познакомить студентов с ролью российских и советских ученых в развитии общетеоретических и прикладных вопросов физики. Почти двухсотлетняя история кафедры физики МГТУ им. Н. Э. Баумана тесно связана с именами выдающихся российских и советских физиков, а действующие на кафедре научные школы проводят исследования на самых современных направлениях физической науки. Устанавливая связи между выдающимися исследователями различных эпох и современной научной деятельностью кафедры, эта дисциплина позволяет пробудить живой интерес к развитию физики и, что самое важное, дает студенту возможность почувствовать себя частью действующего сообщества российских физиков.

Большой интерес студентов вызывает также обсуждение связей физики с другими науками, как естественными, так и гуманитарными, а также взаимное влияние геополитических, культурных, экономических, межнациональных, межконфессиональных связей и науки как значимого фактора развития общества с древнейших времен до наших дней.

Изучение истории физики в рамках подготовки бакалавров по направлению «Техническая физика» позволяет успешно формировать общекультурные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции, необходимые для подготовки высококвалифицированных, разносторонних, высокомотивированных специалистов. Современный курс истории физики для студентов направления 16.03.01 – «Техническая физика» представляет собой инструмент формирования универсальных компетенций, связанных со способностью прогнозирования развития научных направлений, организации перспективных исследований, самостоятельного сбора и критического анализа научной информации. Заинтересованность студентов в таком подходе подтверждается активным использованием материалов и методов курса в их научно-исследовательской работе. Освоение курса истории физики, рассматриваемое как исследование эффективных и неэффективных стратегий развития физики как фактора развития общества в различных культурах и различных условиях, оказывается чрезвычайно полезным инструментом формирования современного физика, ориентированного на решение как фундаментальных, так и прикладных задач.

Список литературы

1. Ильин В. А., Кудрявцев В. В. История и методология физики: учебник для магистров. М.: Юрайт, 2017. 579 с.
2. Ильин В. А., Кудрявцев В. В. Курс истории физики в педагогическом вузе: традиции и инновации // Физика в системе современного образования: матер. XIII Междунар. конф. Том 1. Санкт-Петербург, 2015. С. 93 – 96.
3. Концепция технологического развития на период до 2030 г.: утв. распоряжением Правительства РФ от 20.05.2023 г. № 1315-р // Информационно-правовой портал Гарант.ру: сайт. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406831204> (дата обращения 01.02.2025)
4. Лауэ М. История физики. М.: ГИЗ технико-теоретической литературы. 1956г. 231 с.
5. Льюис М. История физики. М.: Мир, 1970. 464 с.
6. Спасский Б. И. История физики: учеб.пособие. Ч. I. М.: "Высшая школа", 1977. – 320 с.
7. Спасский Б. И. История физики: учеб.пособие. Ч. II. М.: "Высшая школа", 1977. – 309 с.
8. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 8 декабря 2011 г. N 2227-р) // Правительство России: официальный сайт. – Москва, 2011. [Электронный ресурс] - URL <http://static.government.ru/media/files/4qRZEpm161xctpb156a3ibUMjILtn9oA.pdf> (дата обращения 01.02.2025).

9. Федеральный государственный образовательный стандарт по направлению подготовки 16.03.01 Техническая физика: утв. приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 01.06.2020 г. № 696// ФГОС:сайт/ Национальная ассоциация развития образования и науки [Электронный ресурс]. - URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-16-03-01-tehnicheskaya-fizika-696/> (дата обращения 01.02.2025)

References

1. Il'in V. A., Kudryavcev V. V. Istoriya i metodologiya fiziki: uchebnik dlya magistrov. M.: Yurajt, 2017. 579 s.
2. Il'in V. A., Kudryavcev V. V. Kurs istorii fiziki v pedagogicheskom vuze: tradicii i innovacii // Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya: mater. XIII Mezhdunar. konf. Tom 1. Sankt-Peterburg, 2015. S. 93 – 96.
3. Konceptiya texnologicheskogo razvitiya na period do 2030 g.: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 20.05.2023 g. № 1315-r //Informacionno-pravovoj portal Garant.ru: sajt. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406831204> (data obrashheniya 01.02.2025)
4. L'oczci M. Istoriya fiziki. M.: Mir, 1970. 464 s.
5. Laue` M. Istoriya fiziki. M.: GIZ texniko-teoreticheskoy literatury`. 1956g. 231 s.
6. Spasskij B. I. Istoriya fiziki: ucheb.posobie. Ch. I. M.: "Vy`sshaya shkola", 1977. – 320 s.
7. Spasskij B. I. Istoriya fiziki: ucheb.posobie. Ch. II. M.: "Vy`sshaya shkola", 1977. – 309 s.
8. Strategiya innovacionnogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2020 goda (utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 8 dekabrya 2011 g. N 2227-r) // Pravitel'stvo Rossii: oficial'ny`j sajt. – Moskva, 2011. [E`lektronny`j resurs] - URL <http://static.government.ru/media/files/4qRZEpm161xctpb156a3ibUMjILtn9oA.pdf> (data obrashheniya 01.02.2025).
9. Federal'ny`j gosudarstvenny`j obrazovatel'ny`j standart po napravleniyu podgotovki 16.03.01 Texnicheskaya fizika: utv. prikazom Ministerstva nauki i vy`sshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii ot 01.06.2020 g. № 696// FGOS:sajt/ Nacional'naya associaciya razvitiya obrazovaniya i nauki [E`lektronny`j resurs]. - URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-16-03-01-tehnicheskaya-fizika-696/> (data obrashheniya 01.02.2025).

РОЛЬ КОНДЕНСАЦИИ БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНА В ВОЗНИКНОВЕНИИ НЕЗАТУХАЮЩИХ ТОКОВ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Зеликман Марк Аронович

д.ф.-м.н., профессор кафедры физики, marzelik@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия,
Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29

Аннотация

Предлагается изменение подхода к изложению в курсе физики причин существования незатухающих токов в сверхпроводниках. Показано, что общепринятое объяснение на базе идеи Ландау не соответствует современному состоянию физики сверхпроводников. Предлагается принять за основу объяснения конденсацию Бозе-Эйнштейна в системе куперовских пар. Показано, что в сверхпроводниках могут реализоваться различные соотношения температур, при которых а) начинается образование куперовских пар и б) возникает незатухающий ток. В обычных сверхпроводниках энергетическая щель возникает при такой температуре, при которой сразу же формируется конденсат куперовских пар, что обеспечивает возможность протекания незатухающего тока. Оценки показывают, что в ВТСП может реализоваться ситуация, когда при уже существующей щели конденсат не может образоваться, т.е. сверхпроводимость еще не существует. Этой ситуации соответствует случай наблюдаемой на опыте псевдощели. Таким образом, сама по себе теория БКШ, объясняющая возникновение пар, не объясняет факт сверхпроводимости. Поэтому предлагается при изложении темы «Сверхпроводимость» подчеркивать роль конденсата Бозе-Эйнштейна в формировании незатухающих токов.

Ключевые слова

Сверхпроводники, незатухающие токи, куперовские пары, псевдощель, конденсация Бозе-Эйнштейна.

THE ROLE OF BOSE-EINSTEIN CONDENSATION IN THE FORMATION OF PSEUDO-SLOTS IN THE HTSP

Zelikman Mark Aronovich

Ph.D., Professor of the Department of Physics, marzelik@mail.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, Saint Petersburg, Russia,
Politechnicheskaya str. 29

Abstract

A change in the approach to the presentation in the physics course of the causes of the existence of undamped currents in superconductors is proposed. It is shown that the generally accepted explanation based on Landau's idea does not correspond to the current state of superconductor physics. It is proposed to take the Bose-Einstein condensation in the Cooper pair system as the basis of the explanation. It is shown that various temperature ratios can be realized in superconductors, at which the formation of an energy gap begins and superconductivity occurs. In conventional superconductors, the appearance of an energy gap occurs at a temperature at which a condensate of Cooper pairs is immediately formed, which makes it possible for an undamped current to flow. Estimates show that a situation may occur in the HTS when condensate cannot form with an already existing gap, i.e. superconductivity does not yet exist. This situation corresponds to the case of the

pseudo-gap observed in the experiment. This leads to the conclusion that the theory of BCS does not directly explain the fact of superconductivity. It is proposed to emphasize the role of Bose-Einstein condensate in the formation of undamped currents when presenting the topic "Superconductivity".

Keywords

Superconductors, undamped currents, Cooper pairs, pseudo-gap, Bose-Einstein condensation.

Введение

В последние годы внимание физиков, занимающихся исследованием высокотемпературных сверхпроводников, привлекает существование в них так называемой псевдощели. Оказалось, что щель в энергетическом спектре некоторых керамических сверхпроводников образуется при температуре T^* , превышающей критическую. Окончательного понимания причины возникновения псевдощели на данный момент нет. Структура ВТСП очень сложная, происходящие процессы поняты не до конца, поэтому предлагаются различные варианты объяснений существования псевдощели [1]. Это и влияние отрицательных U-центров [2], и поляроны, и биполяроны [3], и электронно-дырочные димеры [4], и магноны, и флуктуации антиферромагнитного ближнего порядка и т.д. Достаточно твердо установлен факт существования именно пар, но эти куперовские пары могут состоять не просто из электронов или дырок, а из более сложных частиц, что ведет к еще большим трудностям.

В настоящей работе предлагается возможное объяснение существования псевдощели в ВТСП-купратах, не требующее введения новых физических предположений.

1. Энергетическая щель и незатухающий ток

Микроскопическая теория сверхпроводимости (БКШ) была построена в 1957 году. Бардин, Купер и Шриффер показали, что при температурах ниже критической электроны проводимости связываются в пары, и объяснили природу этого связывания. При наличии заполненной сферы Ферми при любом, сколь угодно малом, притяжении пары электронов образуют связанное состояние, которое имеет меньшую энергию и отделено от основного состояния нормального металла энергетической щелью. Оказалось, что наименьшей энергией (т.е. максимальной щелью) связанная пара обладает в том случае, когда составляющие ее электроны имеют антипараллельные спины и равные, но противоположно направленные импульсы.

Согласно теории БКШ, полуширина энергетической щели при нулевой температуре определяется выражением

$$\Delta(0) = 2\hbar\omega_D \exp\left(-\frac{1}{U \cdot N(\varepsilon_F)}\right) \quad (1)$$

где $U > 0$ - потенциал электрон-решеточного взаимодействия, для создания в сверхпроводнике двух несвязанных электронов, т.е. двух возбужденных состояний надо разорвать пару, т.е. затратить минимальную энергию 2Δ . Это значит, что минимальная энергия одного возбуждения (квазичастицы) равна Δ . Детальный расчет позволяет получить для энергии квазичастицы с импульсом p выражение

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{p^2}{2m} - \varepsilon_F\right)^2 + \Delta^2} \quad (2)$$

где ε_F - энергия Ферми, $N(\varepsilon_F)$ - плотность электронных состояний на уровне Ферми, ω_D - дебаевская частота кристалла. Зависимость (2) изображена на рис.1.

Всё сказанное справедливо также в случае, когда носителями заряда являются дырки (как в большинстве ВТСП-купратов).

Существование незатухающих токов в теории БКШ объясняют на базе идеи Л. Д. Ландау [5]. Рассмотрим кристаллическую решетку с общей массой M . Сверхпроводящий ток можно рассматривать как коллективное движение электронного газа относительно решетки. Можно сказать, что решетка движется со скоростью $\vec{v}$ относительно электронного газа. "Трение" будет уменьшать эту скорость, только если в газе будут возникать возбуждения и кинетическая энергия решетки будет переходить в их энергию. Пусть возникло одно возбуждение с энергией E_k и импульсом $\hbar\vec{k}$. При этом из законов сохранения энергии и импульса имеем

$$\frac{1}{2}Mv^2 = \frac{1}{2}Mv'^2 + E_k, \quad M\vec{v} = M\vec{v}' + \hbar\vec{k}$$

Из этих двух соотношений получим

$$0 = -\hbar\vec{k} \cdot \vec{v} + \frac{\hbar^2 k^2}{2M} + E_k \quad (3)$$

Считая массу кристалла M бесконечно большой, приходим к выводу, что существует минимальное значение скорости, при которой может быть выполнено условие (3)

$$v_c = \min \left(\frac{E_k}{\hbar k} \right) \quad (4)$$

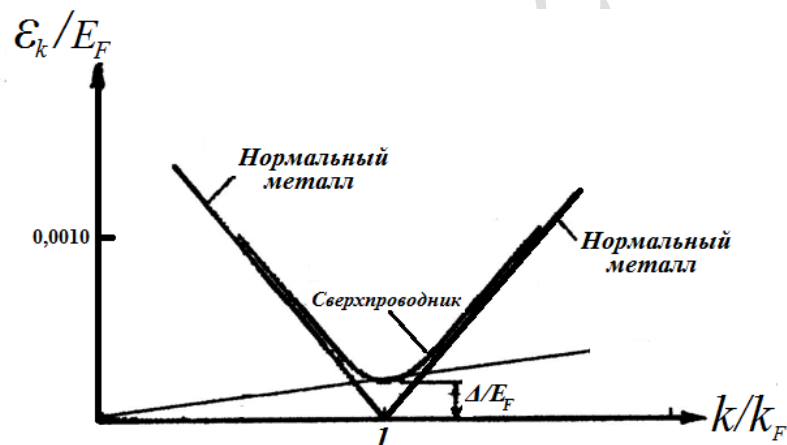


Рисунок 1 — Энергия возбуждения в нормальном и сверхпроводящем состояниях как функция волнового вектора.

При наличии щели в спектре возбуждений $E_k > 0$, и, следовательно, $v_c > 0$. Наклонная прямая на рис.1 имеет угловой коэффициент, равный $\hbar k_F v_c / \varepsilon_F$. Таким образом, в сверхпроводнике токи со скоростями меньше v_c протекают без потерь энергии, т.е. без затухания. Зная величину v_c , можно рассчитать критическую плотность тока. Она может оказаться весьма значительной.

Однако к такому объяснению можно предъявить ряд претензий.

1) Существование псевдощели, т.е. отсутствие сверхпроводимости при ненулевой щели, показывает, что из теории БКШ не следует автоматически возможность существования незатухающих токов.

2) Механизм возникновения незатухающих токов, предложенный Л. Д. Ландау, подразумевает существование потока частиц, находящихся в одном состоянии и

движущихся с одной скоростью. В теории БКШ молчаливо предполагается, что все пары, находящиеся в основном состоянии, и являются этим «конденсатом». Однако эта теория построена для нулевой температуры, поэтому все пары имеют минимально возможную энергию, т.е. находятся в одном состоянии. Если же температура отлична от нуля, то пары распределены по энергии, так что их состояние не одинаково, и нет оснований говорить о «конденсате».

3) Согласно теории БКШ, величина щели уменьшается с ростом температуры и обращается в ноль при $T = T_c$. Кроме того, существует и так называемая бесщелевая сверхпроводимость. В этих случаях приведенное выше объяснение неприменимо.

2. Роль конденсации Бозе-Эйнштейна в создании незатухающего тока

Более глубоким является другое объяснение. Главную роль в возникновении незатухающих токов играет интересное явление, получившее название «конденсация Бозе-Эйнштейна». Именно этим эффектом объясняется существование сверхтекучести. Поскольку часто говорят, что сверхпроводимость – это сверхтекучесть заряженной жидкости, то логично использовать это явление при анализе процессов в сверхпроводниках.

В отличие от электронов, являющихся фермионами, т.е. имеющих полуцелый спин, куперовская пара – это новая частица, имеющая спин, равный нулю. Частицы с целым спином являются бозонами. Пары имеют разную энергию. Наименьшей энергией обладает пара, в которой электроны имеют равные по модулю и противоположно направленные импульсы, равные p_F . Пары, не соответствующие этому условию, также существуют, но имеют большую энергию. Бозоны подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна: среднее число бозонов с энергией E_i равно

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{e^{(E_i - \mu)/kT} - 1} \quad (5)$$

Величина μ называется химическим потенциалом и определяется из условия $\sum_i \langle n_i \rangle = N$. Значение μ не может быть больше нуля, так как тогда при $E_i < \mu$ получили бы $\langle n_i \rangle < 0$. Значит, $\mu \leq 0$.

Если при фиксированной концентрации бозонов n понижать температуру бозонного газа T , то химический потенциал μ , определяемый из условия $\sum_i \langle n_i \rangle = N$, будет увеличиваться, т.е., будучи отрицательным, уменьшаться по абсолютной величине. Он достигнет значения $\mu = 0$ при температуре $T_0 = \frac{3.31}{(2S+1)^{2/3}} \frac{\hbar^2}{mk} n^{2/3}$, где S – спин частицы. Но больше нуля μ быть не может! Поэтому, казалось бы, при $T < T_0$ условие $\sum_i \langle n_i \rangle = N$ не может быть выполнено.

На самом деле ситуация такова. Расчет показывает, что полное число частиц с энергиями $E_i > 0$ (при всех i) равно $N_{E>0} = N \cdot (T/T_0)^{3/2}$. Остальные $N_{E=0} = N \cdot [1 - (T/T_0)^{3/2}]$ частиц находятся в самом низшем состоянии, т.е. имеют энергию, равную нулю. При абсолютном нуле температуры все частицы системы (в нашем случае куперовские пары) находятся в этом состоянии, которое называют конденсатом. При повышении температуры некоторые пары покидают конденсат и начинают участвовать в тепловом движении.

Отметим: речь идет не о квазичастицах, пары не распадаются на электроны, они продолжают существовать в виде пар, но их импульсы не равны нулю, как у пар

конденсата. Таким образом, не все пары находятся в конденсате! Неверно говорить, что существует только конденсат и неспаренные электроны.

При $T > T_0$ бозе-эйнштейновский конденсат исчезает: в нем не остается частиц. Термин «конденсация» возник по аналогии с понятием конденсации газа в жидкость, хотя эти явления совершенно различны, так как конденсация Бозе-Эйнштейна происходит в пространстве импульсов, а распределение частиц в координатном пространстве не меняется. Никакого перехода из «газа» в «жидкость» не будет!

Мы пока не говорили о квазичастицах, т.е. неспаренных электронах. Распад пар на электроны – отдельный процесс. После распада возникшие квазичастицы не являются бозонами, поэтому об их конденсации говорить нет смысла. В сверхпроводнике существуют неспаренные электроны, «несконденсировавшиеся» пары и конденсат из некоторой части пар.

Все куперовские пары, составляющие «конденсат», имеют одинаковые параметры. В частности, у всех пар одинаковый импульс. Если конденсат покоится, т.е. импульс каждой пары равен нулю, то тока нет. Если же конденсат движется, то импульс всех конденсатных пар одинаков. Это значит, что ни одна конденсатная пара не может покинуть конденсат и передать энергию решетке, т.е. перенос заряда по решетке происходит без сопротивления.

Это и есть незатухающий ток. Для его существования необходимо выполнение двух условий:

- 1) температура ниже температуры начала образования щели ($T < T^*$), чтобы какая-то часть электронов сгруппировалась в куперовские пары (т.е. чтобы были бозоны),
- 2) температура $T < T_0$, чтобы происходила конденсация части пар.

3. Количественные оценки

Значение температуры T_0 для атомов и молекул (они тоже бозоны) очень мало, например, для жидкого гелия-4 формула дает примерно 2.7 К, а для более тяжелых элементов еще меньше. При этих температурах все вещества, кроме гелия-4, находятся в твердом состоянии, так что об идеальном газе бозонов речь не идет.

Если же масса частиц имеет порядок массы электронов (сами электроны не подходят, они – фермионы, а нужны бозоны), то при типичном значении концентрации электронов в металлах $n = 5 \cdot 10^{22}$ см⁻³ (а концентрации пар $n_p = 2.5 \cdot 10^{22}$ см⁻³) получим $T_0 \approx 3 \cdot 10^4$ К. Поэтому в сверхпроводниках на основе металлов и сплавов условие $T^* < T_0$ кажется всегда выполненным, и существование сверхпроводимости определяется только условием $T < T^*$. В этом случае именно T^* является критической температурой T_c . Точнее говоря, ситуация в сверхпроводниках такова. При снижении температуры до T^* в сверхпроводнике образуются первые куперовские пары. Их концентрация близка к нулю, поэтому $T_0 = 0$, конденсата нет, сверхпроводимость отсутствует. При дальнейшем снижении T концентрация пар растет, т.е. растет и величина T_0 . При какой-то температуре T и T_0 сравниваются, конденсат начинает образовываться, возникает сверхпроводимость. Эту температуру и называют T_c .

Если же $T_0 < T < T^*$, то куперовские пары и щель в спектре уже существуют, но «конденсации» пар нет, и употребление термина «конденсат» не имеет смысла. Собственно, сверхпроводимость, т.е. отсутствие сопротивления и эффект Мейсснера, не имеет места. В этом случае можно говорить о двух фазовых переходах второго рода: 1)

при T^* группирование электронов в пары, 2) при $T_0 < T^*$ - Бозе-Эйнштейновская конденсация пар.

Этот эффект может быть обнаружен в ситуации, когда $T_0 < T_C$. Для выполнения этого условия в обычных сверхпроводниках величина T_0 должна равняться единицам или десяткам кельвинов. При этом концентрация пар должна иметь порядок $n_p = 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$, т.е. быть меньше реальной концентрации электронов в $10^4 - 10^5$ раз. Такое значение достигается при очень малом снижении температуры ниже T^* , т.е. $T_C \approx T^*$. Для оценки величины снижения запишем уравнение Гинзбурга-Ландау: $\alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi = 0$. Его решение имеет вид $n_p = |\psi|^2 = -\alpha/\beta$. Учтя, что $\alpha = -\kappa(T^* - T)$, получим $\frac{n_p(T)}{n_p(0)} = \frac{T^* - T}{T^*} \approx 10^{-4}$. Это значит, что в обычных сверхпроводниках $T_0 < T^*$ в очень малом диапазоне в несколько тысячных долей процента от T^* . В этом узком интервале исследования затруднены.

Сверхпроводимостью также обладают некоторые сильно легированные полупроводники, например, легированные бором алмаз [6] и кремний [7]. При концентрации бора в несколько процентов кремний становится сверхпроводящим с критической температурой 0.35 К. Для того чтобы $T_0 < T_C$, концентрация дырок должна быть меньше 10^{17} см^{-3} . Но концентрация атомов бора при степени допирования в единицы процентов имеет порядок 10^{20} см^{-3} , из чего следует, что T_0 не может быть меньше T_C . В алмазе сверхпроводимость с $T_C \approx 4 \text{ К}$ возникает при допировании бором 3%. В этом случае при концентрации дырок 10^{20} см^{-3} T_0 имеет порядок 10^2 К , т.е. условие $T_0 < T_C$ также не выполняется.

В высокотемпературных сверхпроводниках ситуация более выгодная, поскольку T_C намного выше, а T_0 ниже, поскольку ниже концентрация дырок ($\approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$ при допировании 0.15), но и в них условие $T_0 < T_C$, казалось бы, не выполняется ($T_C \approx 10^2 \text{ К}$, $T_0 \approx 10^3 \text{ К}$). Однако в некоторых работах утверждается, что концентрация куперовских пар в высокотемпературных сверхпроводниках много меньше общего числа носителей тока [2,3]. В работе [2] говорится, что в модели U-минус центров концентрация дырок в YBCO в зависимости от температуры имеет порядок $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Как показано выше, при таких концентрациях температура T_0 имеет порядок единиц или десятков кельвинов. При этом температура возникновения сверхпроводимости T_C достигает 100 К. Таким образом, в данной ситуации выполняются условия $T_0 < T < T^*$. Это объясняет существование псевдощели в ВТСП, когда при понижении температуры сначала при T^* происходит фазовый переход в состояние со щелью в энергетическом спектре, а после дальнейшего снижения температуры при $T_0 < T^*$ происходит второй фазовый переход в состояние, содержащее конденсат куперовских пар, после чего возникает сверхпроводящее состояние.

Заключение

Существование псевдощели подтверждает важный вывод о том, что теория БКШ, объясняя факт образования куперовских пар и возникновение энергетической щели, не объясняет факт сверхпроводимости. Более строгое объяснение базируется на конденсации Бозе-Эйнштейна. Это следует учитывать преподавателям при изложении темы «Сверхпроводимость».

Предложен механизм, объясняющий возникновение при определенных условиях псевдощели в ВТСП. Переход некоторых ВТСП в сверхпроводящее состояние при понижении температуры происходит в два этапа: сначала, при T^* , имеет место первый фазовый переход, после которого в спектре возникает щель, увеличивающаяся при охлаждении, а при $T_0 < T^*$ происходит второй фазовый переход в состояние, содержащее конденсат куперовских пар, после чего возникает сверхпроводящее состояние.

Список литературы

1. Веденеев С. И. Проблема псевдощели в высокотемпературных сверхпроводниках// УФН. 2021. Т. 191, № 9. С. 937–972. DOI: 10.3367/UFNr.2020.12.038896.
2. Tséndin K. D., Denisov D. V. & Popov, B.P. Unified model of pseudogap features of conductivity in HTSCs. *Jetp Lett.* 80, 246–252 (2004). <https://doi.org/10.1134/1.1813680>
3. Лахно В. Д. Математические основы трансляционноинвариантной биполярной теории сверхпроводимости. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2021. 292 с. DOI: 10.20948/mono-2021-lakhno
4. Москвин А. С., Панов Ю. Д. Природа псевдощелевой фазы ВТСП купратов // Физика твердого тела. 2020. Т. 62, № 9. С. 1390–1397. DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49759.06H.Ч.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
6. Ekimov E. A., Sidorov V. A., Bauer E. D. et al. Superconductivity in diamond // *Nature*. 2004. Vol. 428. P. 542–545. DOI: 10.1038/nature02449
7. Bustarret E., Marcenat C., Achatz P. et al. Superconductivity in doped cubic silicon // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 465–468. DOI: 10.1038/nature05340
8. Ramshaw B. J., Shekhter A., McDonald R. D. et al. Quantum criticality in a metallic spin liquid // *Science*. 2015. Vol. 348. P. 317–320. DOI: 10.1126/science.aaa4990

References

1. Vedeneev S. I. Problema psevdoshcheli v vysokotemperaturnyh sverhprovodnikah// UFN. 2021. T. 191, № 9. S. 937–972. DOI: 10.3367/UFNr.2020.12.038896.
2. Tséndin K. D., Denisov D. V. & Popov B. P. Unified model of pseudogap features of conductivity in HTSCs. *Jetp Lett.* 80, 246–252 (2004). <https://doi.org/10.1134/1.1813680>
3. Lahno V. D. Matematicheskie osnovy translyacionnoinvariantnoj bipolyaronnoj teorii sverhprovodimosti. M.: IPM im. M. V. Keldysha, 2021. 292 s. DOI: 10.20948/mono-2021-lakhno
4. Moskvina A. S., Panov YU. D. Priroda psevdoshchelevoj fazy VTSP kupratov // *Fizika tverdogo tela*. 2020. T. 62, № 9. S. 1390–1397. DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49759.06H.CH.
5. Kittel' CH. Vvedenie v fiziku tverdogo tela. M.: Nauka, 1978. 792 s.
6. Ekimov E. A., Sidorov V. A., Bauer E. D. et al. Superconductivity in diamond // *Nature*. 2004. Vol. 428. P. 542–545. DOI: 10.1038/nature02449
7. Bustarret E., Marcenat C., Achatz P. et al. Superconductivity in doped cubic silicon // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 465–468. DOI: 10.1038/nature05340
8. Ramshaw B. J., Shekhter A., McDonald R. D. et al. Quantum criticality in a metallic spin liquid // *Science*. 2015. Vol. 348. P. 317–320. DOI: 10.1126/science.aaa4990

ЛЕГИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ ЙОДИДА СЕРЕБРА КАК МОДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ ИЗУЧЕНИЯ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИК - СУПЕРИОННИК

Ильинский Александр Валентинович¹

доктор физико-математических наук, профессор, ilinskiy@mail.ioffe.ru

Кастро Арата Рене Алехандро²

доктор физико-математических наук, профессор, recastro@mail.ru

Кононов Алексей Андреевич²

кандидат физико-математических наук, доцент, kononovaa@herzen.spb.ru

Тимофеева Ирина Олеговна²

кандидат физико-математических наук, доцент, timof-ira@yandex.ru

Шадрин Евгений Борисович¹

доктор физико-математических наук, профессор, jenjasha@yandex.ru

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

² Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург, набережная реки. Мойки, д. 48

Аннотация

В работе показана возможность использования диэлектрического спектрометра «Novocontrol Concept 81» для организации учебной исследовательской деятельности студентов педагогических вузов при изучении материалов с фазовым переходом полупроводник-суперионник.

Ключевые слова

Суперионный фазовый переход, йодид серебра, импедансметрия.

DOPED SILVER IODIDE FILMS AS A MODEL OBJECT FOR STUDYING THE SEMICONDUCTOR-SUPERIONIC PHASE TRANSFORMATION

Ilinskiy Alexander V.¹

Dr.hab. physical and mathematical sciences, professor, ilinskiy@mail.ioffe.ru

Castro Rene A.²

Dr.hab. physical and mathematical sciences, professor, recastro@mail.ru

Kononov Alexey A.²

Pb.D. physical and mathematical sciences, docent, kononovaa@herzen.spb.ru

Timofeeva Irina O.²

Pb.D. physical and mathematical sciences, docent, timof-ira@yandex.ru

Shadrin Evgeniy B.²

Dr. hab. physical and mathematical sciences, professor, jenjasha@yandex.ru

¹ Ioffe Institute of Physics and Technology, 194021, Russian Federation, Saint-Petersburg, Politechnicheskaya str., 26

² Herzen State Pedagogical University of Russia, 191186, Russian Federation, Saint-Petersburg, River Moika emb., 48

Abstract

The paper shows the possibility of using the Novocontrol Concept 81 dielectric spectrometer for organizing educational research activities of students of pedagogical universities in the study of materials with a semiconductor-superionic phase transition. should reflect the main content of the article and the results of the research.

Keywords

Superionic phase transition, silver iodide, impedance measurement.

Организация учебно-исследовательской деятельности студентов-физиков с учетом требований ГОС и современных технологий требует грамотного подхода для формирования у обучающихся культуры физического эксперимента, которая необходима для их дальнейшей профессиональной деятельности. Отметим, что исследуемые материалы при этом **должны быть модельными, а технологии** востребованными при проведении современных научных исследований и технических разработок. **Этому критерию отвечает изучение электрических и оптических свойств материалов с фазовым переходом (ФП) полупроводник-суперионник, которое в настоящее время переживает** второе рождение в связи с интересом к суперионикам со стороны как фундаментальной, так и прикладной науки. В связи с этим поликристаллические пленки йодида серебра, легированные медью, оказываются удобными модельными объектами для исследования студентами механизма ФП, изменения электрических и оптических характеристик указанного материала при ФП, а также влияния на данные характеристики легирования. При этом студенты участвуют в моделировании всех основных этапов исследования от постановки эксперимента до интерпретации полученных результатов.

Йодид серебра (AgI) может существовать в трех различных кристаллических модификациях, между которыми могут совершаться термические фазовые переходы. Обучающимся предлагается изучать особенности ФП на примере β - α -перехода, при котором при $T_c = 14^\circ\text{C}$ β -фаза превращается в стабильную α -фазу. Это означает, что при $T > T_c$ α -фаза приобретает, наряду с электронной, также и ионную проводимость. Для анализа важно, что β -фаза имеет кристаллическую решетку гексагональной симметрии, тогда как α -фаза обладает объемноцентрированной кубической решеткой [2-3].

Пленки AgI были синтезированы двухстадийным методом, на слюдяной подложке, для исключения протекания сквозного тока через образец в процессе исследований. На первой стадии синтеза происходило нанесение на высококачественную (оптическую) слюду толщиной $40\text{ }\mu\text{m}$ методом испарения в вакууме тонкого (80 nm) слоя серебра с небольшим добавлением меди (около 4 объемных %). На второй стадии синтеза нагретая до 170°C слюда с металлическим слоем помещалась на 60 min в атмосферу паров йода, создаваемых возгонкой при температуре 110°C кристаллического йода. При взаимодействии йода с серебром на слюде образовывалась практически монослойная поликристаллическая пленка AgI:Cu (рис. 1), с характерным размером кристаллитов около $1\text{ }\mu\text{m}$ ($800\text{ nm} \ll 1\text{ }\mu\text{m}$).

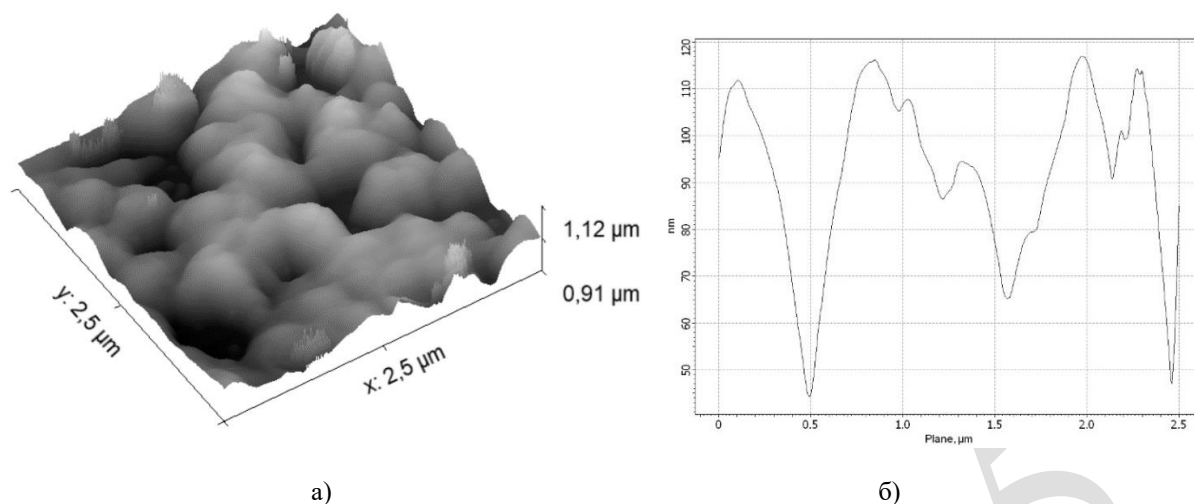


Рисунок 1 — Топография поверхности легированных пленок йодида серебра (а);
профиль размеров кристаллитов пленки AgI:Cu (б)

Диэлектрические измерения были выполнены на спектрометре фирмы Novocontrol Technologies. Диэлектрические спектры (ДС) измерялись в частотном диапазоне 10^{-2} Hz – 10^7 Hz. Температура T образца монотонно изменялась в интервале 70 – 180 °C, с шагом 5 °C [1].

На рис.2 представлены зависимости действительной $\epsilon'(F)$ и мнимой $\epsilon''(F)$ частей диэлектрической проницаемости пленки йодида серебра легированной медью от частоты F прикладываемого к образцу электрического поля. Частотная зависимость $\epsilon'(F)$ содержит ярко выраженную высокочастотную ступеньку и появляющуюся с ростом температуры низкочастотную ступеньку. Этим ступенькам соответствуют два максимума $\epsilon''(F)$. Высокочастотная ступенька функции $\epsilon'(F)$ своей точкой максимальной крутизны располагается при $T = 140$ °C на частоте $8 \cdot 10^2$ Hz, а ее амплитуда (размах) составляет величину $\Delta\epsilon'(F) = 4$. С ростом температуры ступенька монотонно смещается в сторону высоких частот, при этом ее размах $\Delta\epsilon'(F)$ увеличивается до 5. Однако в области температур 150 – 160 °C происходит резкое (скачкообразное) смещение по частоте, причем увеличение частоты составляет два порядка прежнего частотного положения ступеньки: частота смещенного положения максимума крутизны равна $8 \cdot 10^4$ Hz. Одновременно с этим в низкочастотной области (при $F = 1$ Hz) появляется вторая ступенька $\epsilon'(F)$, которая с повышением температуры до 170 °C монотонно смещается в сторону высоких частот (до 5 Hz). При $T > 170$ °C частотное смещение ступенек прекращается. На рис. 2 также представлено термическое смещение максимумов частотной зависимости мнимой части $\epsilon''(F)$ комплексной диэлектрической проницаемости. Частотные положения максимумов строго соответствуют положениям ступенек в измеряемом диапазоне температур. Диаграмма Коул-Коула $\epsilon''(\epsilon')$ демонстрирует деформированную высокочастотную полуокружность и появление при высоких температурах фрагмента второй низкочастотной полуокружности.

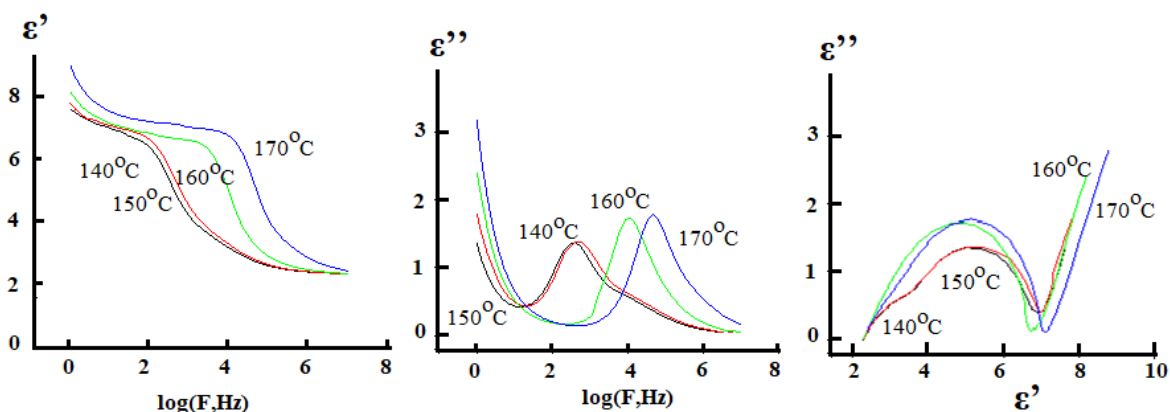


Рисунок 2 — ДС и диаграмма Коул-Коула тонкой пленки AgI:Cu легированной медью

На рис. 3 приведена петля термического гистерезиса частотного положения максимума ($F_{max}(T)$) функции частотной зависимости $\varepsilon''(F)$ для пленки AgI:Cu. Резкий подъем нагревной ветви приходится на температуру 160 °C, спуск охладительной ветви – на 145 °C.

Отметим, что для легированной пленки AgI:Cu резонансная частота высокочастотной ступеньки оказывается на порядок ниже, а ее размах в 1.5 раза меньше, чем для нелегированной, что позволяет говорить о существенном влиянии атомов меди на диэлектрические характеристики пленок йодида серебра.

Полученные результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Для изучаемых пленок значения параметров ДС (частотное положение ступенек $\varepsilon'(F)$, максимумов $\varepsilon''(F)$, вид и положение полуокружностей на диаграммах КК) обусловлены конкретным типом релаксаторов. А именно, характеристики высокочастотных особенностей ДС обусловлены физическими свойствами массива свободных электронов, а низкочастотные – положительно заряженных свободных ионов серебра. Нами были произведены оценки времен максвелловской релаксации $\tau_M = \varepsilon\varepsilon_0 / \sigma$, где σ – удельная электропроводность нанокристаллитов пленки. Смещение с ростом T особенностей ДС в сторону высоких частот объясняется увеличением проводимости полупроводника вследствие увеличения темпа термической генерации свободных электронов, то есть уменьшением времени максвелловской релаксации.

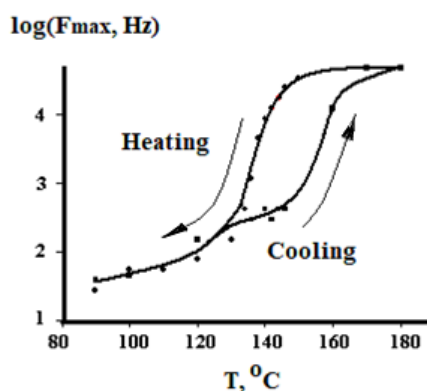


Рисунок 3 — Петля температурного гистерезиса частотного положения $\log(F_{max})$ максимума $\varepsilon''(F)$ пленки AgI:Cu

Поскольку медь является примесью акцепторного типа, то концентрация свободных электронов в легированных пленках AgI:Cu оказывается меньшей, чем в нелегированных. Это приводит к тому, что резонансная частота электронной компоненты при легировании медью понижается, а размах высокочастотных ступенек

вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости ($\Delta\epsilon' = 5$) оказываются меньшим разности $\epsilon_0 - \epsilon_\infty = 7$, необходимой для полного экранирования внешнего зондирующего электрического поля внутри нанокристаллита пленки и его вытеснения в диэлектрическую подложку. Неполное экранирование обеспечивает возможность отчетливого наблюдения как дрейфа свободных электронов, так и дрейфа массивных ионов серебра, освобождающихся при частичном расплавлении подрешетки серебра при температурах выше суперионного ФП. Это проявляется в продолжающемся термическом росте величины $\Delta\epsilon'$ в области температур выше T_c суперионного перехода [2-4].

Численные значения времен релаксации $\tau_M = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ($F_{max} = 1/(2\pi\tau_M) = 8 \cdot 10^4 \text{ Hz}$) и $\tau_M = 1.6 \cdot 10^{-1} \text{ s}$ ($F_{max} = 1 \text{ Hz}$) при $T = 170^\circ\text{C}$ показывают, что максвелловские времена релаксации для свободных электронов и свободных ионов серебра отличаются при одной и той же температуре на пять порядков. Это объясняется тем, что аналитическое выражение для удельной электропроводности вещества, обусловленной двумя типами свободных носителей тока, имеет вид: $\sigma = en_e\mu_e + qn_q\mu_q$, где e и q – заряды электрона и иона серебра, n_e , n_q и μ_e , μ_q – их концентрации и дрейфовые подвижности, соответственно. Оценки показывают, что если величины зарядов и концентрации положительных и отрицательных носителей заряда в области температур ФП примерно одинаковы при одной и той же температуре, то подвижности свободных ионов серебра и подвижности свободных электронов различаются на порядки.

В целом можно констатировать, что легирование пленок AgI медью приводит к смещению высокочастотных особенностей ДС в сторону низких частот. Это объясняется уменьшением электропроводности полупроводника (увеличением времени максвелловской релаксации) вследствие уменьшения концентрации свободных электронов из-за их частичного захвата на акцепторные уровни меди. При повышении температуры выше T_c , при которой совершается суперионный ФП появляется «жидкая» фракция ионов Ag^+ , а электропроводность, помимо электронного и дырочного, дополнительно приобретает ионный характер, метод ДС позволяет с беспрецедентной точностью раздельно исследовать все указанные особенности супериоников.

Из сказанного следует, что все детали и особенности диэлектрического поведения различных компонент массива свободных электронов и ионов супериоников с высокой степенью достоверности могут быть изучены методом диэлектрической спектроскопии. Помимо прочего, ДС позволяет получать информацию также и о параметрах переохлажденной ионной жидкости, что недоступно иным методам исследования.

Таким образом, диэлектрическая спектроскопия позволяет, таким образом не только прояснять макроскопические особенности электрического отклика поликристаллических пленок супериоников на воздействие переменного электрического поля, но и формирует базу для создания микроскопической модели процесса фазовых превращений в супериониках. Примененная в настоящей работе методика ДС и полученные на ее основе сведения могут быть использованы при изучении также других материалов с суперионным ФП, таких как AgI, AgSe, AgTe или Ag_2GeS_3 .

В заключение отметим, что в результате выполнения указанного исследования студенты, во-первых, изучают комплексный механизм совершения ФП, при котором имеют место три типа фазовых превращений:

- в предкритической температурной области совершается протяженный по температуре корреляционный электронный переход Мотта;
- в предкритической температурной области одновременно с этим совершается протяженный по температуре ионный ФП типа «порядок-беспорядок»;
- при достижении критической температуры совершается структурный суперионный ФП из α -фазы в β -фазу.

И во-вторых, студенты приобретают исследовательские навыки, необходимые для их дальнейшей профессиональной деятельности.

Список литературы

1. Диэлектрическая спектроскопия соединений сильнокоррелированных элементов: учеб. Пособие / Р. А. Кастро, А. В. Ильинский, М. Э. Пашкевич, И. О. Попова, Е. Б. Шадрин. – Санкт-Петербург: ООО "Фора-принт", 2021. – 55 с.
2. 2. Поведение низкочастотной проводимости нанокompозитного иодида серебра в области суперионного фазового перехода / Т. Ю. Вергентьев, Е. Ю. Королева, Д. А. Курдюков, А. А. Набережнов, А. В. Филимонов // ФТТ – 2013. – Вып. 55, № 1. – С. 157-162.
3. 3. Фазовый переход полупроводник – суперионник в пленках сульфида серебра / А. В. Ильинский, Р. А. Кастро, М. Э. Пашкевич, И. О. Попова, Е. Б. Шадрин // ФТТ – 2020. – Том 62, № 12. – С. 2138-2146.
4. 4. Features of the phase transition in thin films of AgI superionic semiconductor / A. A. Kononov, A. V. Ilinskiy, R. A. Castro, V. A. Klimov, M. E. Pashkevich, I. O. Popova, E. B. Shadrin // Semiconductors – 2023. Vol. 57, № 8. – P. 605-608.

References

1. Dielectric spectroscopy of compounds of strongly correlated elements: manual / R. A. Castro, A. V. Ilyinsky, M. E. Pashkevich, I. O. Popova, E. B. Shadrin. – St. Petersburg: Fora-print, 2021. – 55 p.
2. 2. Management of low-frequency conductivity of nanocomposite silver iodide in the field of superionic phase transition / T. Yu. Vergentyev, E. Yu. Koroleva, D. A. Kurdyukov, A. A. Naberezhnye, A. V. Filimonov // FTT – 2013. – Issue 55, № 1. – P. 157-162.
3. 3. The phase transition of a superionic semiconductor in silver sulfide films / A. V. Ilyinsky, R. A. Castro, M. E. Pashkevich, I. O. Popova, E. B. Shadrin // FTT – 2020. – Vol. 62, № 12. – P. 2138-2146.
4. 4. Features of the phase transition in thin films of AgI superionic semiconductor / A. A. Kononov, A. V. Ilinskiy, R. A. Castro, V. A. Klimov, M. E. Pashkevich, I. O. Popova, E. B. Shadrin // Semiconductors – 2023. Vol. 57, № 8. – P. 605 – 608.

**ПЯТЫЙ СЕМЕСТР КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ:
«КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ»**

Калашников Николай Павлович

доктор физико-математических наук, профессор, kalash@mephi.ru

Матрончик Алексей Юрьевич

кандидат физико-математических наук, доцент, matronchik2004@mail.ru

Самарченко Дмитрий Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент, dasamarchenko@mephi.ru

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409, Российская Федерация, Москва, Каширское шоссе, д. 31

Аннотация

Предлагается календарный план нового курса общей физики для 5 семестра, который уже реализуется на кафедре общей физики НИЯУ МИФИ. Рассматриваются темы 16 занятий по квантовой физике и основам современной физики, включающие квантовые компьютеры и квантовую криптографию, физику твердого тела, стандартную модель и астрофизику.

Ключевые слова

Квантовая физика, курс общей физики, 5 семестр, календарный план, современная физика, физическая специальность.

**FIFTH SEMESTER OF GENERAL PHYSICS:
"QUANTUM PHYSICS AND FUNDAMENTALS OF MODERN PHYSICS"**

Kalashnikov Nikolay P.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, kalash@mephi.ru

Matronchik Alexey Yu.

candidate of physical and mathematical sciences, associate professor,
matronchik2004@mail.ru

Samarchenko Dmitry A.

candidate of physical and mathematical sciences, associate professor,
dasamarchenko@mephi.ru

National Research nuclear university MEPHI, 115409, Russian Federation, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

Abstract

A calendar plan for a new general physics course for the 5th semester is proposed, which is already being implemented at the General Physics Department of NRNU MEPHI. Topics of 16 classes on quantum physics and the foundations of modern physics are considered, including quantum computers and quantum cryptography, solid state physics, the standard model, and astrophysics.

Keywords

Quantum physics, general physics course, 5th semester, calendar plan, modern physics, physics specialty.

Общая физика – это общий взгляд, общие подходы к решению физических задач. Первые четыре семестра студенты НИЯУ МИФИ изучают на кафедре общей физики механику и колебания, молекулярную физику и термодинамику, электричество и магнетизм, волны и оптику. Необходимость 5 семестра в курсе общей физики обусловлена следующими причинами:

1. Квантовая физика – это логическое завершение курса общей физики.
2. Создание общего цельного физического фундамента необходимо для узкоспециальной профессиональной подготовки студентов и аспирантов.
3. Студенты физических специальностей должны иметь представление о современной физике.
4. В 5 семестре студенты получают знания и умения, необходимые для использования в последующих спецкурсах.

Исходя из этих соображений и учитывая бурное развитие физических наук в последнее время был модернизирован устоявшийся десятилетиями курс 5 семестра «Атомная физика». Новый курс «Квантовая физика и основы современной физики» был прочитан дважды – осенью 2023 и 2024 годов для студентов физических специальностей НИЯУ МИФИ [1,2]. В таб. 1 представлен календарный план этого курса.

Таблица 1

Квантовая физика и основы современной физики. календарный план

Неделя	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Сем., час.	Лаб., час.
	<i>5 Семестр</i>	32	32	32
1	Ядерная модель атома Методы исследования внутреннего строения вещества. Сечение рассеяния. Опыты по рассеянию альфа-частиц. Формула Резерфорда. Ядерная модель атома. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
2	Экспериментальное обоснование квантовой механики Экспериментальные основания квантовой механики. Опыты Дэвиссона и Джермера. Дифракция электронов. Опыты Томпсона и Тарковского. Гипотеза де-Бройля. Неприменимость понятия траектории к микрочастицам. Прохождение электронного пучка через щели. Корпускулярно-волновой дуализм. Соотношение между волновой и корпускулярной картинами. Соотношение неопределенностей и принцип неопределенности Гейзенберга. Прохождение частицы через щель. Оценка размеров и минимальной энергии водородного атома. Виртуальные частицы. Радиус взаимодействия при обмене виртуальными частицами (фундаментальными бозонами). Волновая функция свободной частицы (волна де Бройля). Вероятностная интерпретация волновой функции, выдвинутая Борном. Понятие о скрытых параметрах (гипотеза Эйнштейна) и неравенствах Белла.	Всего аудиторных часов		
		2	2	

3	Элементы квантовой механики Измерения в квантовой механике. Уравнение Шредингера. Физический смысл и свойства пси-функции. Квантование энергии. Частица в одномерной бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме. Результаты квантовой механики для гармонического осциллятора.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
4	Квантование момент импульса. Собственный механический момент электрона Квантование числа орбитального момента импульса. Спин. Спин электрона. Сложение моментов импульса. Результаты квантовой механики для атома водорода Квантовые числа электрона в атоме. Вырождение состояний. Кратность вырождения. Символы состояний. Схема уровней. Правило отбора для радиационных переходов. Спектральные серии атома водорода. Спин-орбитальное взаимодействие. Тонкая структура спектральных линий. Схема уровней и переходов с учетом спин-орбитального взаимодействия.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
5	Распределение электронов по энергетическим уровням в атоме Сложение моментов импульса. Результирующий механический момент многоэлектронного атома. Связи LS и JJ. Символы термов. Оболочки и подоболочки. Электронная конфигурация атома. Тождественность частиц, симметрия волновой функции относительно перестановки частиц, бозоны и фермионы, принцип Паули. Обменное взаимодействие. Самосогласованное поле в сложных атомах, электронная конфигурация атома. Периодическая система элементов Менделеева. Спектры щелочных металлов Основные спектральные серии. Ридберговские поправки. Тонкая структура спектральных линий. Мультиплетность. Спин-орбитальное взаимодействие. Схема уровней и переходов в натрии.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
6	Фотоны Тормозное рентгеновское излучение. Коротковолновая граница тормозного рентгеновского спектра. Фотоэффект. Опыты Столетова. Формула Эйнштейна. Опыты Милликена. Красная граница фотоэффекта. Опыт Боте. Фотоны. Корпускулярно-волновой дуализм. Соотношение между волновой и корпускулярной картинами. Эффект Комптона. Комптоновская длина волны.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
7		Всего аудиторных часов		

	Характеристическое рентгеновское излучение Рентгеновские спектры. Закон Мозли. Двухатомная молекула. Схема энергетических уровней двухатомной молекулы в адиабатическом приближении. Молекулярные спектры излучения и поглощения.	2	2	
8	Магнитный момент атома Орбитальные и спиновые магнитные моменты. Магнетон Бора. Множитель Ланде. Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана. Электронный парамагнитный резонанс.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
9	Лазеры Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Ширина спектральных линий. Инверсная заселенность уровней. Положительная обратная связь. Коэффициент усиления. Лазер на рубине. Гелий-неоновый лазер	Всего аудиторных часов		
		2	2	
10	Физические основы квантовых вычислений и квантовых компьютеров Запутанные состояния. Квантовая нелокальность. Квантовые биты. Физическая реализация кубитов.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
11	Физические основы квантовой криптографии Классическая криптография. Квантовая криптография. Квантовый повторитель. Тепловое излучение Тепловое излучение. Испускательная и поглощательная способности тел. Закон Кирхгофа. Абсолютно черное тело. Закон Стефана-Больцмана. Закон Вина.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
12	Тепловое излучение Стоячие волны в пространстве трех измерений. Число нормальных состояний в интервале. Формула Релея-Джинса. Статистическое среднее энергии гармонического осциллятора (классическое и квантовое выражение). Формула Планка.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
13	Основы физики твердого тела Кристаллические структуры твёрдых тел, трансляционная симметрия кристаллов, решётка Бравэ, элементарная и примитивная ячейки (на примере ГЦК–решётки), базис. Рентгеновские и нейтронные методы исследования кристаллических структур, дифракция Вульфа–Брэгга, обратная решётка. Типы связей в кристаллах: кулоновская (атомные кристаллы),	Всего аудиторных часов		
		2	2	

	ковалентная (обменное взаимодействие), ван-дер-ваальсовская (молекулярные кристаллы), металлическая. Потенциал Леннарда-Джонса. Колебания монокристаллической цепочки, понятие о квазиимпульсе. Спектр колебаний кристаллической решетки. Теория Дебая. Фононы. Распределение Бозе-Эйнштейна. Теплоемкость кристаллов			
14	Энергетические зоны в кристаллах Квантовая теория свободных электронов в металле. Плотность энергетических состояний. Распределение Ферми-Дирака. Металлы, полупроводники. Собственные и примесные полупроводники. Электронная и дырочная проводимости. Сверхпроводимость. Работа выхода. Теплоэлектронная эмиссия. Контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
15	Элементы физики атомного ядра Состав атомного ядра. Атомный номер и массовое число. Открытие ядра атома (опыты Резерфорда, Гейгера и Марсдена) и его строения (опыты Блэккетта и Чедвика). Энергия связи ядра, экспериментальная зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа A . Свойства ядерных сил: радиус действия, глубина потенциала, насыщение ядерных сил, спиновая зависимость. Ядерные силы как проявление сильного взаимодействия. Модель Юкавы. Модель жидкой заряженной капли. Формула Вайцзеккера для энергии связи ядра. Оболочечная модель и магические числа в осцилляторном потенциале. Радиоактивность. Виды радиоактивных процессов. Закон радиоактивного распада, константа распада, период полураспада, среднее время жизни, вековое уравнение. Альфа-распад. Бета-распад, энергетический спектр бета-распада, гипотеза нейтрино и его опытное обнаружение. Гамма-излучение, изомерия ядер. Спонтанное деление ядер.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
16	Элементы физики элементарных частиц. Методы регистрации элементарных частиц. Стандартная модель. Законы сохранения и внутренние квантовые числа. Кварковая структура адронов — мезоны и барионы. Новое квантовое число «цвет», обобщенный принцип Паули. Магнитные моменты протона и нейтрона. Резонансы. Элементы квантовой хромодинамики: асимптотическая свобода, гипотеза конфайнмента кварков и глюонов, кварковый потенциал. Несохранение четности при слабом взаимодействии, опыт Ву. Проблема солнечных нейтрино, нейтринные осцилляции. Большой взрыв. Закон Хаббла. Модель горячей Вселенной. Реликтовое излучение. Темная материя и темная энергия.	Всего аудиторных часов		
		2	2	

Основные направления современной физики: физика твердого тела, стандартная модель, астрофизика и квантовые компьютеры нашли свое место в предлагаемой завершающей части курса общей физики.

Список литературы

1. Калашников Н. П., Смондырев М. А. Основы физики: в 3 т. Т. 2: Учебное пособие М.: Лаборатория знаний, 2021-606с.
2. Львовский А. Отличная квантовая механика. Ч.1 Учебное пособие. М.: Альпина нон-фикшн, 2021-422с.

References

1. Kalashnikov N. P., Smondyrev M. A. Fundamentals of Physics: in 3 volumes. V. 2: Laboratory of Knowledge, 2021- 606p.
2. Lvovsky A. Excellent quantum mechanics. Part 1. Textbook. Moscow: Alpina non-fiction, 2021-422p.

ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ ЗИМНИХ СТУДЕНЧЕСКИХ ОЛИМПИАД ПО ФИЗИКЕ В НИЯУ МИФИ

Калашников Николай Павлович

доктор физико-математических наук, профессор, kalash@mephi.ru

Матрончик Алексей Юрьевич

кандидат физико-математических наук, доцент, matronchik2004@mail.ru

Самарченко Дмитрий Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент, dasamarchenko@mephi.ru

Хангулян Елена Владимировна

старший преподаватель, evkhangulyan@mephi.ru

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409, Российская Федерация, Москва, Каширское шоссе, д. 31

Аннотация

Рассматриваются задания, которые предлагались студентам в восьмидесятые годы прошлого века и в последнее десятилетие на олимпиадах по физике, проводимых кафедрой общей физики НИЯУ МИФИ. В СССР это была Олимпиада «Студент и научно-технический прогресс», а в наше время — это олимпиада для студентов НИЯУ МИФИ. Приводятся условия задач трех олимпиад по физике и в одном варианте излагаются краткие решения задач. Делаются выводы о целесообразности проведения студенческих олимпиад по физике.

Ключевые слова

Олимпиада по физике, кафедра общей физики, задачи по физике, решения задач по физике, вузы, зимняя олимпиада.

SELECTED PROBLEMS OF THE WINTER STUDENT OLYMPIADS IN PHYSICS AT NRNU MEPhI

Kalashnikov Nikolay P.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, kalash@mephi.ru

Matronchik Alexey Yu.

candidate of physical and mathematical sciences, associate professor,
matronchik2004@mail.ru

Samarchenko Dmitry A.

candidate of physical and mathematical sciences, associate professor,
dasamarchenko@mephi.ru

Khangulyan Elena V.

senior lecturer, EVKhangulyan@mephi.ru

National Research nuclear university MEPhI, 115409, Russian Federation, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

Abstract

The tasks that were offered to students in the eighties of the last century and in the last decade at the physics olympiads held by the Department of General Physics of the National Research Nuclear University MEPhI are considered. In the USSR, this was the Olympiad "Student and Scientific and Technical Progress", and in our time, this is the Olympiad for students of the National Research Nuclear University MEPhI. The conditions of the

problems of three physics olympiads are given and, in one version, brief solutions to the problems are presented. Conclusions are made about the advisability of holding student physics olympiads.

Keywords

Physics Olympiad, General Physics Department, Physics Problems, Physics Problem Solutions, Universities, Winter Olympiad.

В 1970-1980 годах ежегодно организовывались вузовские, городские и всесоюзные туры Олимпиады «Студент и научно-технический прогресс» по различным областям знаний [1].

Кафедра общей физики МИФИ проводила в 1986-1989 годах 16-19 Московские городские Олимпиады «Студент и научно-технический прогресс» по секции физики. В Олимпиадах принимали участие студенческие команды из более чем 30 московских вузов. В тройку лучших команд по группе физических вузов попадали студенческие команды из МФТИ, МГУ и МИФИ, а по группе технических вузов команды из МИНГ, МИТХТ и МИСиС.

После долгого перерыва кафедра общей физики НИЯУ МИФИ стала проводить заключительные туры Всероссийской студенческой олимпиады по физике (ВСО). Олимпиады проводятся ежегодно, начиная с 2013 года [2].

А с декабря 2015 года проводятся зимние олимпиады по физике для студентов НИЯУ МИФИ. Число участников олимпиад в декабре каждого года составляет около 200 человек. По результатам определяются победители и призеры по младшим и старшим курсам, которые получают отличную оценку за семестровый экзамен по общей физике.

Ниже расположены задания (с краткими решениями) 9 зимней олимпиады по физике, которая была проведена 5 декабря 2025 года.

1. Велосипедист массой $M = 60$ кг действует на педали со средней силой F так, что педали описывают окружности радиусом $r = 18$ см и сила направлена по касательной к окружности. Радиусы колес равны $R = 34$ см, а передняя и задняя звездочки, на которых крепится цепь, имеют $n_1 = 42$ $n_2 = 27$ зубцов соответственно. Определить максимальный угол наклона горы, на которую велосипедист может въехать с постоянной скоростью. Масса велосипеда $m = 12$ кг, коэффициент трения скольжения $\mu = 0,2$. Трением качения пренебречь. Рассмотреть два случая: средняя сила равна $F = 0,60 Mg$ и $F = 0,90 Mg$.

Решение задачи.

Угол начала скольжения равен $\alpha_0 = \arctg \mu = 11,3^\circ$. Так как заднее колесо велосипеда вращается с постоянной угловой скоростью, то момент силы трения покоя должен быть равен моменту силы натяжения цепи. Отсюда находим максимальный угол

наклона горы: $\alpha = \arcsin \left[\frac{n_2 Fr}{n_1 (m + M) g R} \right]$. Для двух случаев определяем численные

значения углов $\alpha_1 = 9,8^\circ$ и $\alpha_2 = 14,8^\circ$. Учитывая начало скольжения, получаем ответ: для меньшего значения силы максимальный угол равен $\alpha_1 = 9,8^\circ$ и для большего значения силы максимальный угол равен $\alpha_0 = 11,3^\circ$.

2. Человек весом Mg прыгает из окна с высоты $H = 15$ м на жесткую сетку, используемую пожарными. В результате сетка максимально провисает на $h = 1,2$ м, а

после прекращения колебаний сетка с человеком провисает на $x_0 = 6$ см. Вертикальная сила реакции сетки равна $F = k\left(1 + x^2/(2h^2)\right)x$, где k - коэффициент, x - прогиб сетки. Найти отношение средней силы сопротивления воздуха к весу человека.

Решение задачи.

Потенциальная энергия растянутой сетки равна $U(x) = k\left(\frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{8h^2}\right)$. Из закона сохранения энергии $Mg(H+h)g = U(h) + F_{\text{comp}}(H+h)$ и условия равновесия человека $Mg = F(x_0)$ получаем ответ: $\frac{F_{\text{comp}}}{Mg} = 1 - \frac{5h^2}{8(H+h)x_0\left(1 + (x_0^2/2h^2)\right)} = 0,075$.

3. В схеме, изображенной на рисунке 1, известны ЭДС источника, сопротивления двух проволочек и емкость конденсатора. Источник включают в нулевой момент времени. Найти максимальный заряд конденсатора и время, через которое заряд конденсатора будет равен половине максимального заряда.

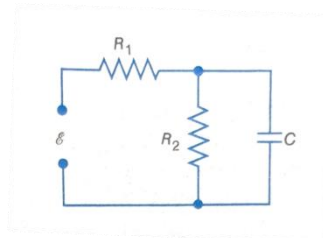
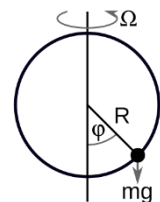


Рисунок 1

Решение задачи.

Используя правила Кирхгофа составляем систему дифференциальных уравнений для токов, протекающих через сопротивления, с начальными условиями. Из ее решения получаем максимальный заряд конденсатора $q_{\text{max}} = \varepsilon CR_2/(R_1 + R_2)$ и время, через которое заряд конденсатора будет равен половине максимального заряда, $T = CR_1R_2 \ln 2/(R_1 + R_2)$.

4. Найти частоту малых колебаний бусинки массы m на гладком вращающемся с угловой скоростью Ω кольце около возможных положений равновесия. Радиус кольца R , ускорение свободного падения g .



Решение задачи.

Потенциальная энергия бусинки равна $U = mgR(1 - \cos \varphi) - 0,5m\Omega^2 R^2 \sin^2 \varphi$. Существуют три положения равновесия: $\varphi = 0$ и $\varphi = \pm \arccos(g/(\Omega^2 R))$. При $\Omega^2 R < g$ частота малых колебаний бусинки равна $\omega_1 = \sqrt{(g/R)(1 - \Omega^2 R/g)}$ и при $\Omega^2 R > g$ частота малых колебаний бусинки равна $\omega_2 = \Omega \sqrt{1 - g^2/(\Omega^2 R)^2}$.

5. Гамма-квант с энергией ηmc^2 (коэффициент $\eta > 1$, а mc^2 - энергия покоя электрона) рассеялся под прямым углом на покоящемся электроне в магнитном поле.

Найти индукцию магнитного поля B , если электрон стал двигаться по окружности радиуса R .

Решение задачи.

Из релятивистских законов сохранения энергии и импульса находим импульс

электрона: $p = \frac{\eta mc}{\eta + 1} \sqrt{\eta^2 + 2\eta + 2}$. Из уравнения движения электрона в магнитном поле

$$p = eBR \quad B = \frac{\eta mc}{(\eta + 1)eR} \sqrt{\eta^2 + 2\eta + 2}.$$

определяем индукцию магнитного поля

Студенческие олимпиады по физике целесообразно проводить:

- А) Для выявления и поощрения одаренных студентов.
- Б) Для создания студенческой команды по физике.
- В) Для привлечения студентов старших курсов к организации и проведению олимпиады.
- Г) Для формирования положительного имиджа кафедры общей физики.

Список литературы

1. А. В. Сизов и М. Д. Бабельский. Олимпиада "Студент и научно-технический прогресс" в вузах Ленинграда: Опыт организации и проведения вузовского и городского тура олимпиады. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. - 58 с.
2. Иванова Н. А., Игнатов В. Н., Калашников Н. П., Матрончик А. Ю., Ольчак А. С., Самарченко Д. А., Тюлюсов А. Н., Хангулян Е. В. Двухэтапный способ проведения всероссийской студенческой олимпиады по физике в 2022 и 2023 годах // Физическое образование в вузах. 2024. т.30, № 2, с. 53-67.

References

1. A. V. Sizov and M. D. Babelsky. Olympiad "Student and Scientific and Technical Progress" in Leningrad Universities: Experience of Organizing and Conducting the University and City Tour of the Olympiad. Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1975. - 58 p.
2. Ivanova N. A., Ignatov V. N., Kalashnikov N. P., Matronchik A. Yu., Olchak A. S., Samarchenko D. A., Tyulusov A. N., Hangulyan E. V. A two-stage method for holding the All-Russian Student Olympiad in Physics in 2022 and 2023 // Physical education in universities. 2024. v. 30, no. 2, p. 53-67.

ОБЩИЙ ЯДЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ: РЕСУРСЫ РАЗВИТИЯ

Кузнецов Александр Александрович¹

кандидат физико-математических наук, kuznets@depni.sinp.msu.ru

Зверева Ирена Михайловна¹

ведущий программист, zim@srd.sinp.msu.ru

Янин Леонид Алексеевич¹

ведущий конструктор, leonid-2@rambler.ru

Конеев Александр Растямович²

студент, aleksandrkonneyev21@gmail.com

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобелъцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119234, Российская Федерация, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119234, Российская Федерация, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 2

Аннотация

Описаны изменения в техническом и методическом оснащении практикума в 2022-2024 гг. Разбираются способы использования в ядерном практикуме низкоактивных изотопов и взаимовыгодного привлечения творческой активности студентов к работе практикума.

Ключевые слова

Практикум по ядерной физике, радиоактивность, регистрация излучений, минимально значимая активность, свобода выбора.

GENERAL NUCLEAR PRACTICUM: DEVELOPMENT RESOURCES

Kuznetsov Alexandr A.¹

PhD in Physics and Mathematics, kuznets@depni.sinp.msu.ru

Zvereva Irena M.¹

lead programmer, zim@srd.sinp.msu.ru

Yanin Leonid A.¹

chief designer, leonid-2@rambler.ru

Koneev Aleksandr R.²

student, aleksandrkonneyev21@gmail.com

¹ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, 1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119234, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University, 1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119234, Russian Federation

Abstract

Changes in the technical and methodological equipment of the practicum in 2022-2024 are described. Methods of using isotopes with low-level activity and mutually beneficial involvement of students creative activity are being investigated.

Keywords

Practical works on nuclear physics, radioactivity, radiation registration, minimal significant activity, freedom of choice.

Увидеть в общем ядерном практикуме флеш-АЦП, германиевые детекторы, циклотрон можно в ночь перед Рождеством. Это закономерно. По мнению академика Ильи Михайловича Франка начала 60-ых годов: «Обычным недостатком физического практикума является некоторая его консервативность... Практикум не ставит своей специальной задачей изучение аппаратуры. Основное внимание обращается в нем на ознакомление с физикой самих явлений...» [3].

Сцинтилляционные спектрометры показали себя надежными (у нас 400 студентов за семестр) и методически глубокими при изучении взаимодействия гамма-квантов с веществом (очевидны явления фотоэффекта и Комптона). Поэтому в рамках программы МГУ «Модернизация общих практикумов» в 2022 году мы приобрели у отечественной фирмы «Радэк» тракты со сцинтилляционными спектрометрами с кристаллами NaI(Tl) 63x63 мм (вместо 40x40 мм на старых установках). Улучшились эффективность регистрации гамма-квантов высоких энергий, энергетическое разрешение в районе малых энергий (рис.1), сократилось время набора статистически значимого спектра. За счет сокращения времени мы смогли к измерению двух известных источников гамма-излучения и одного «неизвестного» добавить еще один «неизвестный» источник, энергию гамма-квантов которого студенту требуется определить.

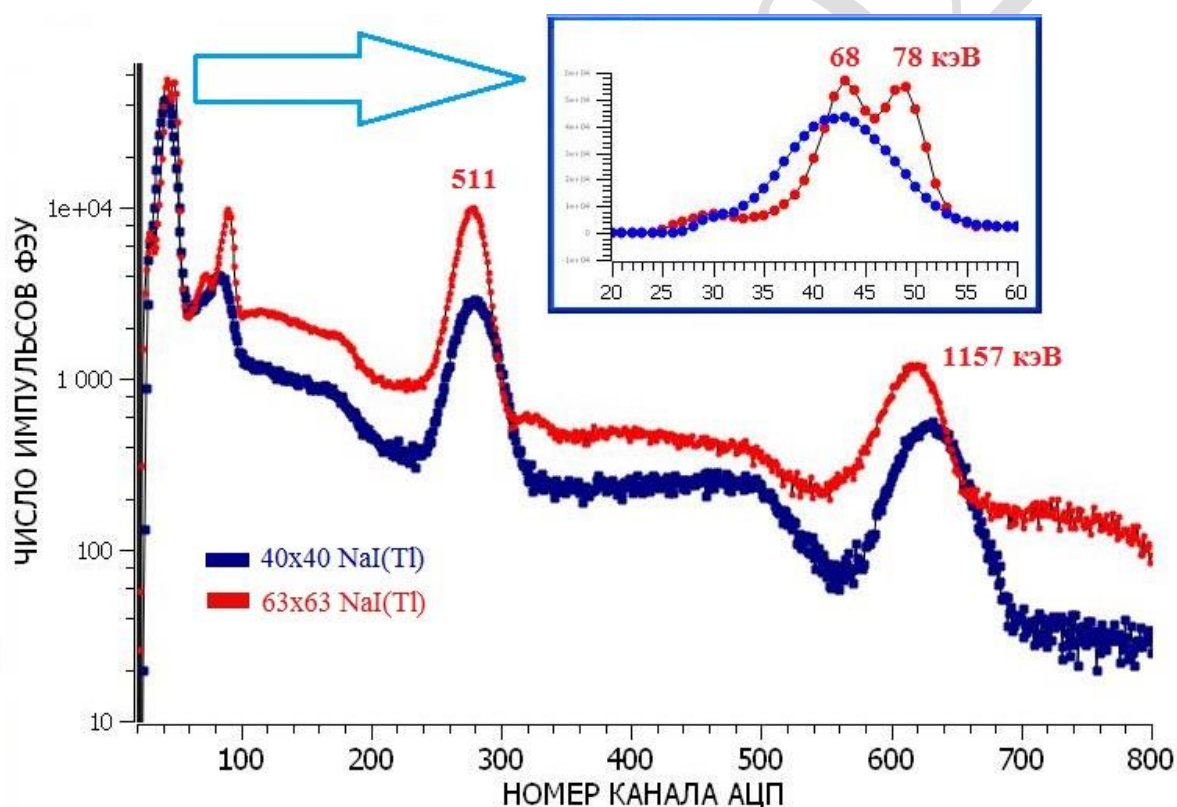


Рисунок 1 — Спектр гамма-излучения источника титан-44 (период полураспада 59 лет)+скандий-44 при использовании сцинтилляторов NaI(Tl) разных размеров за одинаковое время. График построен в программе SciDAVis.

Летом 2024 года мы установили один из новых спектрометров рядом с парафиновым блоком защиты нейтронного источника и в течение нескольких дней записали базу данных спектров мгновенных гамма-квантов от взаимодействия тепловых нейтронов с ядрами водорода (2,2 МэВ). На снятых спектрах наблюдается проявление еще одного механизма взаимодействия гамма-квантов высоких энергий с веществом — рождение пар электрон-позитрон и, как следствие, пики одиночного и двойного вылета. Набранные спектры использовались в дальнейшем для упражнения «Мгновенные гамма-кванты».

На основе снятых из-за замены с эксплуатации гамма-спектрометров со сцинтилляторами NaI(Tl) 40x40 мм была разработана задача №20 «Нейтронно-активационный анализ»[2], и шесть новых экспериментальных установок этой задачи работали в осеннем семестре 2024 года. Для них были налажены спектрометрические тракты, подобраны и активированы образцы (Таблица 1), смонтированы держатели на длинных трубках из углеродного волокна, защитные экраны для сцинтилляционных детекторов. Образцы, в которых накапливаются изотопы с относительно большим периодом полураспада (тербий, тантал и сурьма) активировались в течение лета 2024 года. Образцы постоянно располагаются в нижней части «шахты» в парафиновом кубе («шахта» для облучения урановой мишени задачи «Деление ядер урана») на расстоянии 14 см от источника нейтронов.

Образцы пронумерованы, номер образца индия студентам выдаётся, остальные «неизвестны». Калибровка спектрометра проводится по γ -линиям изомера индия-116. Студентам в описании задачи приводится список возможных материалов в форме таблицы 1 (первые 5 колонок), где заполнена только одна колонка с названием материала. Во время домашней подготовки к задаче предлагается заполнить таблицу, пользуясь базой данных изотопов (как вариант база данных МАГАТЭ [6]).

Таблица 1

Сравнение максимальной активности активированных образцов (расчет при условии насыщения активации) с минимально значимой активностью (МЗА) радионуклидов в помещении или на рабочем месте согласно НРБ-99/09

образец	сечение захвата тепловых нейтронов барн	изотоп, образующийся при активации	период полураспада	значимые γ -линии кэВ	макс. активность Бк	МЗА Приложение 4 к НРБ-99/09 Бк
золото	98,65	Au-198	2,7 дня	412	180	1 Е+06
индий	81	In-116m1	54 мин	417; 819; 1097;1294; 2112	420	в списке нет
вольфрам	37,9	W-187	24 часа	480; 685	250	1 Е+06
скандий	25	Sc-46	84 дня	889; 1121	330	1 Е+06
тербий	23,4	Tb-160	72 дня	299; 879; 962+966*; 1178	90	1 Е+06
тантал	20,5	Ta-182	115 дней	222+229+264;1121+1189 +1221+1231 *	70	1 Е+04
марганец (манганит)	13,36	Mn-56	2,58 часа		290	1 Е+05
лантан (оксид)	8,93	La-140	1,68 дня	329; 487; 815; 1596	40	1 Е+05
сурьма	5,75	Sb-122	2,7 дня	564	40	1 Е+04
	3,8	Sb-124	60 дней	603; 1691	30	1 Е+06
ванадий	4,9	V-52	3,7 мин	1434	80	в списке нет

* знак «+» означает, что в наблюдаемом спектре линии будут перекрываться

Поскольку масса образцов небольшая, поток тепловых нейтронов в «шахте» около 600 нейтронов/(с*кв.см), нарабатываются источники активностью пренебрежимо малой, меньше минимально значимой активности (МЗА), но успешно регистрируемой за 10-20 минут сцинтилляционным спектрометром, помещенным в свинцовый «стакан». Согласно Основным правилам учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации (НП-067-16) от 21 декабря 2016 г. такие источники не подлежат учету и контролю.

При изучении *естественной* радиоактивности на сцинтилляционном спектрометре помимо широко используемых соединений калия мы применяем оксид лантана (0,5 кг) и оксид лютеция (40 г). Активность оксида лютеция (Lu-176; 2,6% в естественной смеси; период полураспада 38 млрд.лет) хорошо регистрируется и счетчиком Гейгера. Лантан и лютеций применяем в виде оксидов по рекомендации радиохимика Присёлковой А.Б. как менее опасный вариант в сравнении с их металлами.

Методическая часть. В практикуме, как правило, реализуется поисково-исполнительский уровень познавательной деятельности (инструкция, задания в описании, качественное оформление результатов, понимание изучаемого явления). В лаборатории расширяется число задач, где студент может выбирать важные элементы проведения эксперимента: облучаемый образец, упражнение, установку.

В задаче «Искусственная радиоактивность» он может выбрать активируемый металл, устанавливая таким образом сам себе уровень сложности задачи [1]. Количество предлагаемых образцов увеличилось. К серебру, родию и алюминию добавились индий и «кот в мешке» (ванадий).

В задаче «Альфа-спектрометр» разрешается выбрать источник, с которым студент будет проводить измерения при изучении прохождения альфа-частиц через воздух. В случае выбора радия-226 измерения проводятся дольше, т. к. надо определить средний пробег для нескольких альфа-линий. В случае выбора источника с одним пиком измерения занимают меньше времени, но требуется дополнительный расчёт толщины защитного слоя источника.

На сайте практикума [2] в задаче «Нейтронно-активационный анализ» отмечено: «У Вас будет возможность выбрать установку, если придете пораньше». Студент может выбрать установку, где излучение регистрирует фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) или установку, где активированные образцы одновременно измеряются и счетчиком Гейгера и ФЭУ.

Такой подход, безусловно, не поднимает уровень познавательной деятельности студентов на высший — творческий уровень, но дает возможность проявления самостоятельности — важной черты будущего исследователя. В настоящее время студенты волей-неволей проявляют индивидуальность при обработке результатов эксперимента. В осеннем семестре 2024 года студент Еремин И.Р., выводя графики на своем ноутбуке, показал сотрудникам практикума возможности SciDAVis — свободного программного обеспечения, аналога Origin. Программу установили на сервере лаборатории, написали инструкцию, и некоторые студенты использовали ее для обработки. Преподаватели оставили в электронном журнале практикума восхищенные отзывы о графиках Дунаева Д. А. Он проводил обработку на Python в своём коде и оставил нам исходные файлы для возможного использования [5].

В 2024 году в рамках спецкурса «Детекторы ядерных излучений» магистрам кафедры было поставлено задание повторить один из экспериментов практикума и предложить изменения в методике проведения работы и описании. Дополнение к описанию задачи «Бета-спектрометр» было выложено на сайт в начале ноября под заголовком «Пояснения от студентов 5-го курса (помощь для сдачи допуска и выполнения задачи)» [2]. Отметим особенности этого дополнения — большое количество рисунков, доверительный стиль изложения, обилие «оживляющих» ядерные

объекты эпитетов. Последнее напомнило воспоминание Я. И. Френкеля об изложении физики Эренфестом:

«Его устами неодушевленные предметы — молекулы, атомы, электроны — разговаривают друг с другом ... любят и ненавидят и вообще оживают, превращаясь в микроскопических обитателей одушевленной вселенной. ... у Эренфеста физика является не столько точной наукой, сколько художественной драмой или комедией из жизни атомов и электронов» [4].

Мы собирали отзывы студентов, которые выполняли задачу и читали дополнительное описание. Одно из самых частых мнений «Дополнение понятнее описания».

Студенты старших курсов выполняли работы общего ядерного практикума на высоком уровне сложности. К примеру, на задаче «Искусственная радиоактивность» они дополнительно определяли мертвое время счетчика Гейгера, используя измерения с двумя бета-источниками. На задаче «Аннигиляция» магистры предложили подложить в калибровочные источники к кобальту-60 европий-152, провели ряд измерений, составили инструкцию для установки.

Для задачи «Гамма-спектрометр» магистры подготовили 5 папок по 20 схем распадов изотопов в каждой папке для выбора студентами неизвестных изотопов по полученным гамма-спектрам. Навык работы с базой данных изотопов и схемами распада — важные ступеньки к освоению свойств ядер.

Выводы. Взаимовыгодное сотрудничество со студентами (прибавочные знания ↔ творческая активность), поиск методических продвижений, скрупулёзный подход к использованию «точечного» финансирования помогли общему ядерному практикуму за 2022-2024 гг. улучшить характеристики установок модернизируемых задач, увеличить число практических работ, усовершенствовать их методическое сопровождение.

Список литературы

1. Задача с выбором уровня сложности в общем ядерном практикуме МГУ / И. М. Зверева, С. Б. Морозов, Е. М. Сахаров, Е. В. Широков // Сборник научных трудов XV Международной конференции «Физика в системе современного образования», Санкт-Петербург, 3 - 6 июня 2019 г. — Т. 1. — Издательство РГПУ им. А. И. Герцена С.-П., 2019. — С. 63–67.
2. Общий ядерный практикум: описания и установки / ЛОСП URL:= <http://prac-gw.sinp.msu.ru/nup.php> (дата обращения 07.02.2025).
3. Франк И. М. Предисловие редактора. Практикум по ядерной физике. Выпуск 1. Радиоактивные излучения / И. В. Истулин, под ред. И. М. Франка М., Физматгиз, 1962., 260 с.
4. Френкель В. Я. Пауль Эренфест / В. Я. Френкель. - М.: Атомиздат, 1971. - 144 с.
5. Шефель Г. М., Морозов С. Б., Мелешко Д. // Двадцатая конференция «Свободное программное обеспечение в высшей школе» : материалы конференции / Переславль-Залесский, 07-09 февраля 2025 г. / отв. ред. Чёрный В.Л. - М.: МАКС Пресс, 2025. - с.29-32.
6. Live Chart of Nuclides: nuclear structure and decay data / IAEA URL:= <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (дата обращения 11.02.2025).

References

1. Zadacha s vyborom urovnya slozhnosti v obshchem yadernom praktikume MGU / I. M. Zvereva, S. B. Morozov, E. M. Saharov, E. V. Shirokov // Sbornik nauchnyh trudov XV Mezhdunarodnoj konferencii «Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya», Sankt-Peterburg, 3 - 6 iyunya 2019 g. — T. 1. — Izdatel'stvo RGPU im. A. I. Gercena S.-P., 2019. — S. 63–67.
2. Obshchij yadernyj praktikum: opisaniya i ustanovki / LOCP URL:= <http://prac-gw.sinp.msu.ru/nup.php> (data obrashcheniya 07.02.2025).
3. Frank I. M. Predislovie redaktora. Praktikum po yadernoj fizike. Vypusk 1. Radioaktivnye izlucheniya / I. V. Istulin, pod red. I. M. Franka M., Fizmatgiz, 1962., 260 s.
4. Frenkel' V. Ya. Paul' Erenfest / V. Ya. Frenkel'. - M.: Atomizdat, 1971. - 144 s.
5. Shefel' G. M., Morozov S. B., Meleshko D. // Dvadcataya konferenciya «Svobodnoe programnoe obespechenie v vysshej shkole» : materialy konferencii / Pereslavl'-Zalesskij, 07-09 fevralya 2025 g. / отв. red. Chyornyj V.L. - M.: MAKSS Press, 2025. - s.29-32.

6. Live Chart of Nuclides: nuclear structure and decay data / IAEA URL:= <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (data obrashcheniya 11.02.2025).

ФССО-2025

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ САХАРОВ В МЁДЕ МЕТОДАМИ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Лихтер Анатолий Михайлович

доктор технических наук, профессор, likhter@bk.ru

Тишкова Светлана Анатольевна

кандидат педагогических наук, доцент, svetatish70@mail.ru

Крячков Степан Геннадьевич

студент, s.k2000@list.ru

Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Аннотация

В статье поднимается проблема продовольственной безопасности, связанной с содержанием большого количества сахаров в различных продуктах, в том числе мёде и продукции из него. Отмечена проблема изучения методов спектрального анализа в средней общеобразовательной школе и вузах. Обосновано применение методов колебательной спектроскопии для изучения химического состава мёда и входящих в него сахаров. В качестве решения данной проблемы предлагается изучение теоретических основ прикладной инфракрасной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния в таких учебных дисциплинах, как «Физика молекулярных систем», «Оптические свойства молекул», где студенты помимо теоретических знаний имеют возможность получить экспериментальные спектры различных веществ. В статье приводятся ИК- и КР-спектры различных сортов мёда, а также сахарозы, глюкозы и фруктозы. Описывается построение структурно-динамических моделей указанных сахаров. Построение осуществлялось с применением графического редактора ПО «GaussView 6». А также рассчитаны теоретические спектры данных полисахаридов. В качестве примера указываются ИК- и КР-спектры сахарозы. После чего проводится сравнительный анализ теоретических и экспериментальных спектров.

Ключевые слова

Инфракрасная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, мёд, полисахариды, сахароза, глюкоза, фруктоза, структурно-динамические модели.

STUDY OF SUGAR CONTENT IN HONEY BY VIBRATIONAL SPECTROSCOPY

Likhter Anatoly M.

Doctor of Technical Sciences, Professor, likhter@bk.ru

Tishkova Svetlana A.¹

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, svetatish70@mail.ru

Kryachkov Stepan G.²

student, s.k2000@list.ru

Astrakhan State University named after V.N. Tatishcheva, 414056, Russian Federation, Astrakhan, st. Tatishcheva, 20a

Abstract

The article raises the problem of food security associated with the content of large amounts of sugars in various products, including honey and honey products. The problem of studying spectral analysis methods in secondary schools and universities is noted. The use

of vibrational spectroscopy methods to study the chemical composition of honey and its sugars is substantiated. As a solution to this problem, it is proposed to study the theoretical foundations of applied infrared spectroscopy and Raman spectroscopy in such academic disciplines as "Physics of Molecular Systems" and "Optical Properties of Molecules", where students, in addition to theoretical knowledge, have the opportunity to obtain experimental spectra of various substances. The article provides IR and Raman spectra of various types of honey, as well as sucrose, glucose and fructose. The construction of structural and dynamic models of these sugars is described. The construction was carried out using the graphical editor of the GaussView 6 software. The theoretical spectra of these polysaccharides are also calculated. As an example, IR and Raman spectra of sucrose are given. After that, a comparative analysis of theoretical and experimental spectra is carried out.

Keywords

Infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, honey, polysaccharides, sucrose, glucose, fructose, structural-dynamic models.

В настоящее время в нашей стране уделяется большое внимание решению проблемы продовольственной безопасности [3]. При этом важное значение имеют не только количественные показатели выпуска продуктов питания, но и их качество.

Большой объем среди выпускаемой продукции составляют продукты, содержащие сахар: кондитерские изделия, соки и т.д. Среди них особое место занимает мёд и продукция из него, так как он является веществом, в состав которого входят биологически активные элементы. Важность производства мёда и его качество также диктуются тем фактором, что в мире растёт число людей, больных диабетом. В связи с этим количественный и качественный анализ содержания в мёде таких веществ, как сахароза, глюкоза и фруктоза имеет огромное значение.

Большинство технических систем, служащих для определения состава мёда, основаны на использовании оптической активности полисахаридов [1,5], тогда как спектральным характеристикам указанных веществ не уделяется достаточное внимание. Эта проблема существует и в программах по физике в средних общеобразовательных учреждениях и вузах при изучении тем, связанных со спектральным анализом.

Для устранения указанного недостатка на кафедре физики АГУ им. В. Н. Татищева в программах бакалавриата по направлениям подготовки 03.03.02 Физика, 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки) и магистратуры 03.04.02 Физика, 44.04.05 Педагогическое образование разработаны и ведутся такие учебные дисциплины, как «Физика молекулярных систем», «Оптические свойства молекул» и др. Кроме того, ежегодно защищаются курсовые проекты, выпускные квалификационные работы по данной тематике.

При изучении указанных дисциплин студенты изучают теоретические основы прикладной инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопия) и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР-спектроскопии). Получают экспериментальные спектры различных веществ, в частности, мёда и входящих в его состав сахаров.

На базе научно-образовательного центра АГУ им. В. Н. Татищева «Рациональное использование природных ресурсов», в котором имеется ИК-Фурье спектрометр «Perkin Elmer FIR», были сняты ИК-спектры 4 сортов мёда: акациевого, гречишного, каштанового, майского, а также сахарозы, глюкозы и фруктозы. На рисунках 1 в качестве примера приведён экспериментальный ИК-спектр гречишного мёда и на рисунках 2-4 – ИК-спектры сахарозы, глюкозы и фруктозы. Перед снятием ИК-спектра выполнялось измерение пустой кюветы спектрометра для вычета фона.

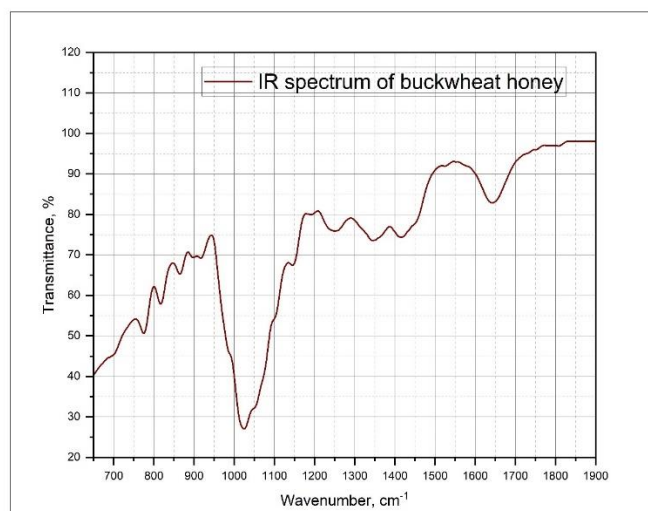


Рисунок 1 — Экспериментальный ИК-спектр «Гречишного» мёда

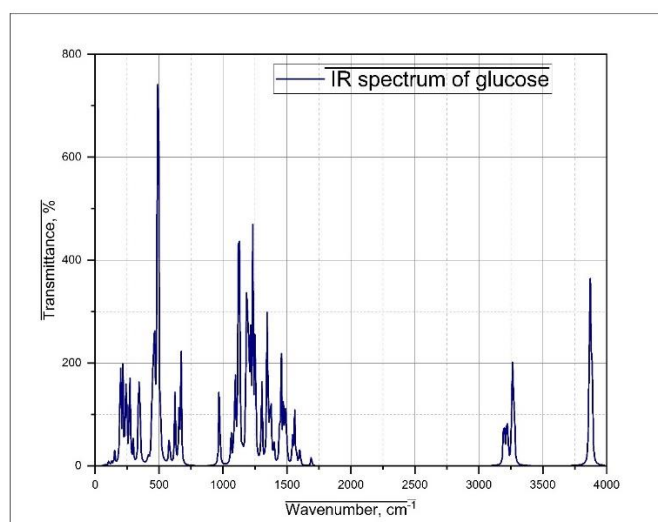


Рисунок 2 — Экспериментальный ИК-спектр глюкозы

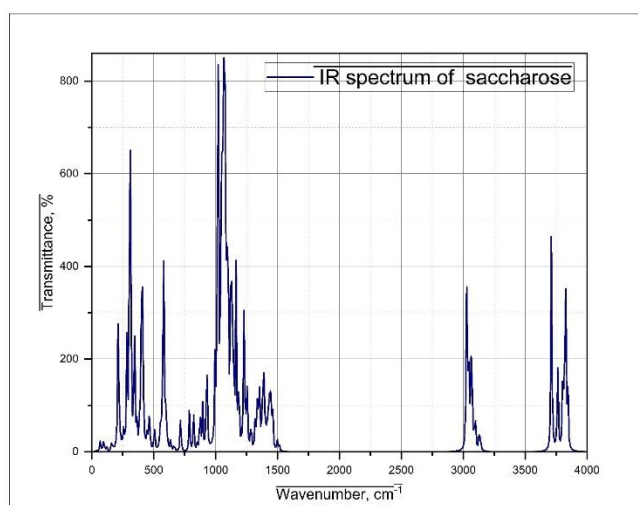


Рисунок 3 — Экспериментальный ИК-спектр сахарозы

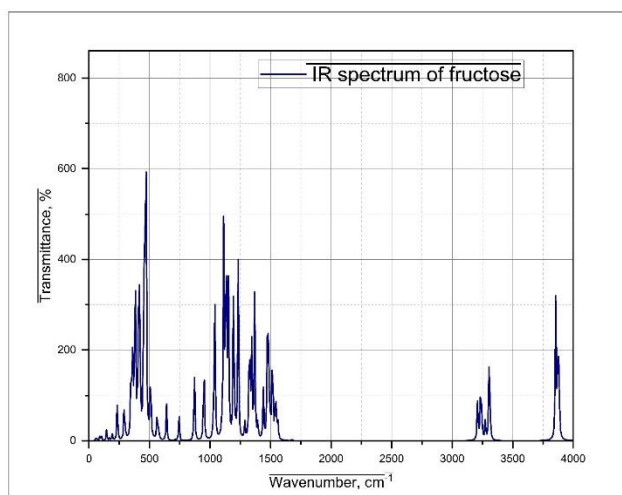


Рисунок 4 — Экспериментальный ИК-спектр фруктозы

Студентам предлагалось выполнить построение структурно-динамических моделей указанных сахаров. Построение осуществлялось с применением графического редактора ПО «GaussView 6». В данном ПО конфигурация молекулы задаётся в виде Z-матрицы, содержащей координаты ядра каждого атома в декартовой системе, а также данные о наличии той или иной химической связи между атомами. Интерфейс ПО позволяет конструировать молекулу по отдельным функциональным группам с дальнейшим редактированием длины и типа химической связи, плоских и торсионных углов между атомами, а также их плоскостями. На рисунке 5 изображена модель молекулы сахарозы.

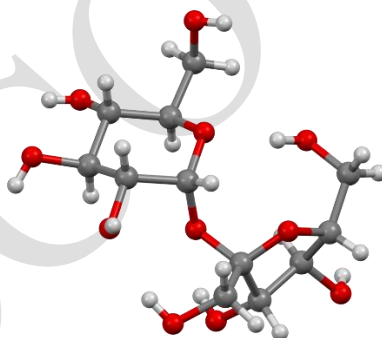


Рисунок 5 — Шаростержневая модель сахарозы

Сахароза является основным транспортным сахаром в растениях. Она синтезируется в процессе фотосинтеза и транспортируется по флоэме к различным частям растения, где используется как источник энергии или преобразуется в другие углеводы.

Молекула глюкозы является моносахаридом с химической формулой $C_6H_{12}O_6$. Она принадлежит к классу гексоз (шестиуглеродных сахаров) и является одним из наиболее важных углеводов в биологии. Глюкоза может существовать в нескольких формах, включая линейную и циклические формы. Наиболее распространенные циклические формы — это α -D-глюкоза и β -D-глюкоза. На рисунках 6 и 7 приводится пример модели глюкозы.

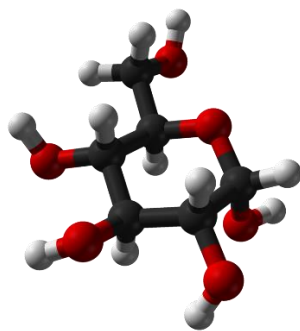


Рисунок 6 — Шаростержневая модель α -D-глюкозы

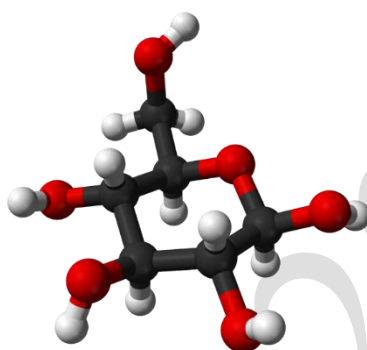


Рисунок 7 — Шаростержневая модель β -D-глюкозы

Фруктоза отличается от глюкозы своей структурой и некоторыми химическими свойствами. Фруктоза может существовать в нескольких формах, включая линейную и циклические формы. Наиболее распространенные циклические формы — это α -D-фруктоза и β -D-фруктоза (рисунок 8).

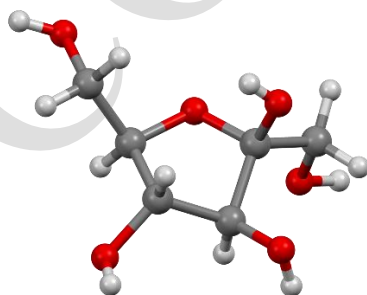


Рисунок 8 — Шаростержневая модель β -D-фруктозы

Далее рассчитывались фундаментальные частоты колебаний элементов функциональных групп структурно-динамических моделей молекул сахарозы, фруктозы, глюкозы. По рассчитанным частотам получены теоретические ИК-спектры соответствующих соединений. Полученные теоретические спектры могут служить в качестве эталона при экспериментальном исследовании сложного органического соединения на содержание сахаров методами колебательной спектроскопии. В качестве примера приведем теоретический спектр сахарозы (рис. 9).

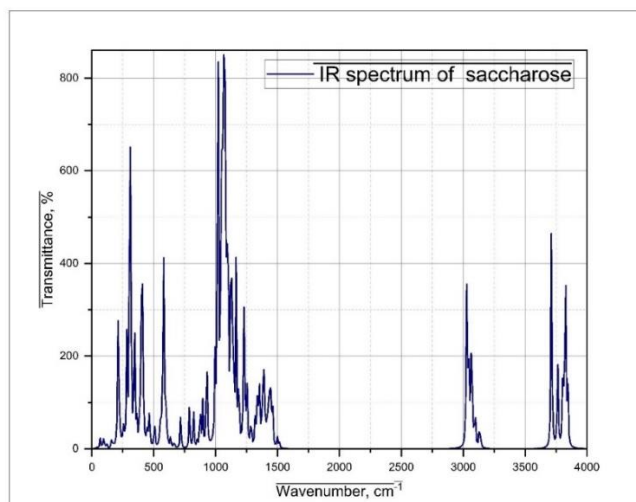


Рисунок 9 — Теоретический ИК-спектр сахарозы

В период прохождения производственной научно-исследовательской практики на кафедре оптики и биофотоники ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского» студентами исследовались те же сорта мёда и входящих в его состав сахаров методом Рамановской спектроскопии. Экспериментальные КР-спектры были сняты на КР-спектрометре «Qerro-Raman» фирмы «Ocean Optics». Детектор рассеянного излучения располагался строго под прямым углом к образцу, длина волны используемого лазера — 785 нм. Диапазон измерений — $600 \dots 1900 \text{ см}^{-1}$, т.е. в области антистоксового рассеяния, разрешающая способность прибора — 10 см^{-1} . В качестве примера на рисунках 10-13 приведены КР-спектры гречишного мёда, сахарозы, глюкозы и фруктозы.

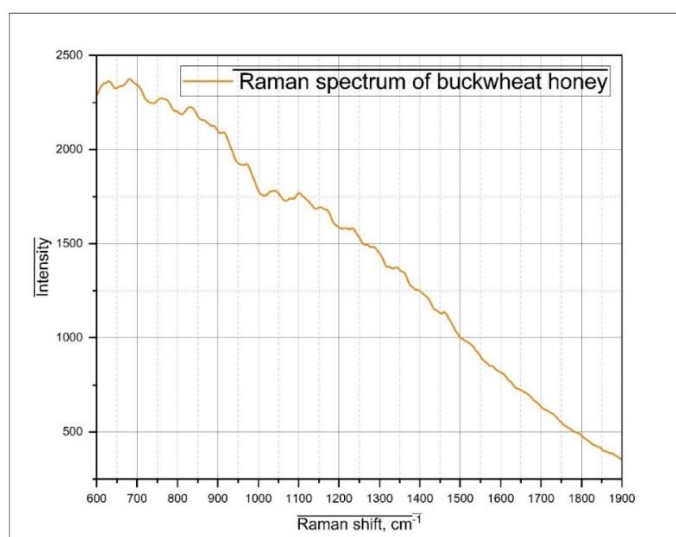


Рисунок 10 — Экспериментальный КР-спектр «Гречишного» мёда

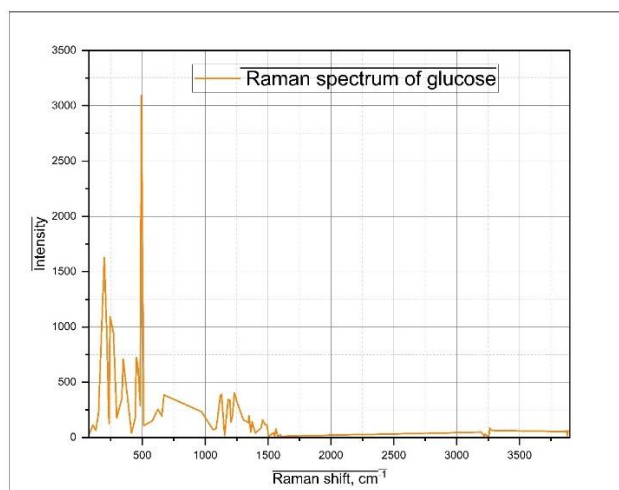


Рисунок 11 — Экспериментальный КР-спектр глюкозы

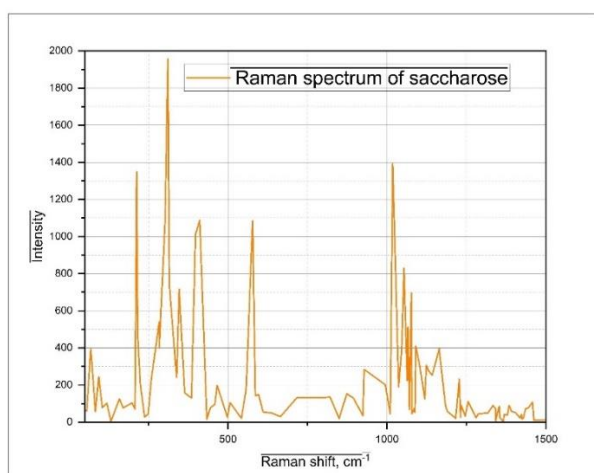


Рисунок 12 — Экспериментальный КР-спектр сахарозы

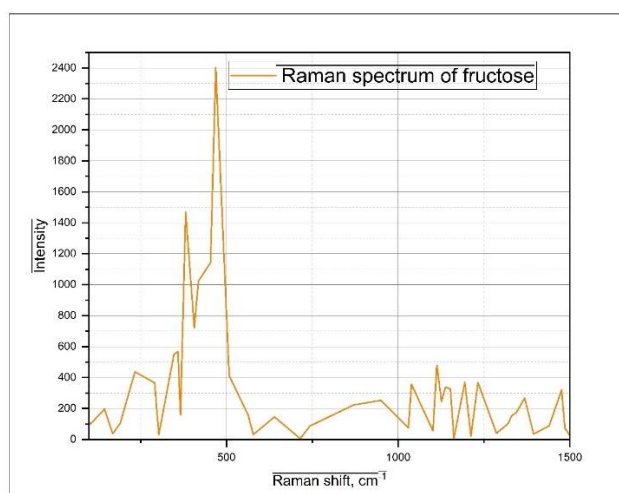


Рисунок 13 — Экспериментальный КР-спектр фруктозы

Затем рассчитывались теоретические КР-спектры сахарозы, глюкозы, фруктозы. Для примера приведем КР-спектр сахарозы (рис. 14).

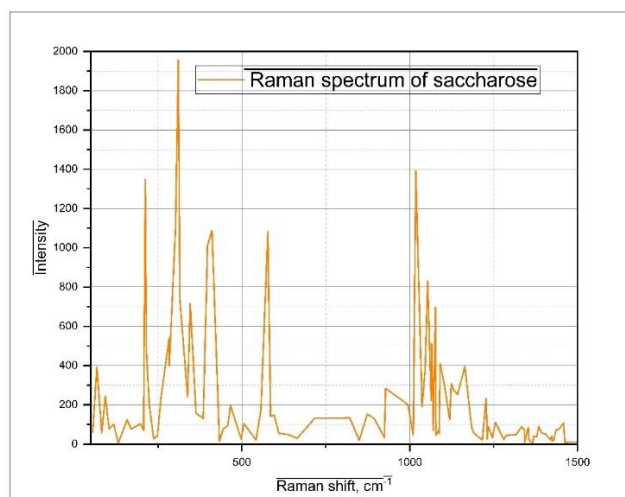


Рисунок 14 — Теоретический КР-спектр сахарозы

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований и на основании изученного материала студентами проводился анализ результатов и делались выводы о применимости методов колебательной спектроскопии для исследования качественного и количественного состава сложных биологических соединений (таких как мёд и продукты из него) и проектирования технических систем для решения указанной задачи.

Список литературы

1. Гордеев С. Р., Крячков С. Г., Лихтер А. М. Программный модуль для вычисления качественного состава веществ, содержащих сахара. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611143 от 17.01.2023 года
2. Горобец С. Н., Зубченко Н. С. Глюкоза и её химические свойства // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации. – 2023. – С. 453-455
3. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 года № 20.
4. Свердлов Л. М., Ковнер М. А., Крайнев Е. П. Колебательные спектры многоатомных молекул. (Серия «Физика и техника спектрального анализа».) Изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1970
5. Likhter A. M., Klassen N. V., Kafarov G. Zh. Development of a Method and Device for Determining the Excess of Sucrose Content in Honey. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 15, No. 2, 309–312 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1027451021020154>

References

1. Gordeyev S. R., Kryachkov S. G., Likhter A. M. Programmnyy modul' dlya vychisleniya kachestvennogo sostava veshchestv, soderzhashchikh sakhara. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2023611143 ot 17.01.2023 goda
2. Gorobets S. N., Zubchenko N. S. Glyukoza i yeyo khimicheskiye svoystva // Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii. – 2023. – S. 453-455
3. Doktrina prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii. Utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 21 yanvarya 2020 goda № 20
4. Sverdlov L. M., Kovner M. A., Kraynev Ye. P. Kolebatel'nyye spektry mnogoatomnykh molekul. (Seriya «Fizika i tekhnika spektral'nogo analiza».) Izd-vo «Nauka», Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, M., 1970
5. Likhter A. M., Klassen N. V., Kafarov G. Zh. Development of a Method and Device for Determining the Excess of Sucrose Content in Honey. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 15, No. 2, 309–312 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1027451021020154>

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА СТУДЕНТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ

Маркова Светлана Николаевна
научный сотрудник, snm2003@bk.ru

Московский Государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991,
Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, физический факультет

Аннотация

Педагогическая практика в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) является обязательным разделом основной профессиональной образовательной программы магистратуры, входит в раздел «Б2 Практики».

На физическом факультете МГУ педагогическая практика ранее (до 2025 года) проводилась со студентами-магистрами второго года обучения, но после перехода к обучению по программам специалитета практика проводится со студентами пятого курса, а роль учеников для них выполняют студенты младших курсов либо физического факультета, либо естественных факультетов университета.

На кафедре оптики, спектроскопии и физики наносистем магистры (до 2025 года) и специалисты (после 2025 года) проходят педагогическую практику в спецпрактикуме кафедры. Нашей задачей было обучить практикантов умению общаться по темам задач практикума со студентами младших курсов кафедры, умению правильно и понятно ставить вопросы на этапе допуска к задаче (теоретическая часть работы), отслеживать ход работы и вовремя поправлять в случае ошибок. За годы практикума студенты-практиканты существенно модифицировали задачи: создали набор вопросов по допуску к задачам, создали программу по тестированию на допуск к выполнению задачи.

Педагогическая практика должна быть не только формальным этапом образования, но и опытом, который оставляет значимый след в профессиональной подготовке студента, в выборе им сфер деятельности после окончания высшего учебного заведения.

Ключевые слова

Педагогическая практика, магистры, специалисты, университеты, технические вузы.

PEDAGOGICAL PRACTICE OF STUDENTS OF THE FACULTY OF PHYSICS OF LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY

Markova Svetlana N.
scientific researcher, snm2003@bk.ru

Lomonosov Moscow State University, 119991, Russian Federation, Moscow, MSU,
Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-2 Leninskiye Gory, Faculty of Physics

Abstract

Pedagogical practice is a mandatory section of the main professional educational program of the master's degree according to the requirements of the Federal State educational standard of higher professional education, it is included in the "B2 Practice" section. At the Faculty of Physics of Moscow State University, pedagogical practice was previously (until 2025) conducted with second-year master's students, but after the transition to specialty programs, practice is conducted with fifth-year students.

At the Department of Optics, Spectroscopy and Physics of Nanosystems, masters (until 2025) and specialists (after 2025) undergo pedagogical practice in the department's special

practice. Our task was to train the fifth-year students in the ability to communicate on the topics of the workshop with the junior students of the department, the to ability ask questions correctly and clearly at the stage of admission to the task (the theoretical part of the work), monitor the process of the work and correct in time in case of errors.

Over the years of the workshop, the intern students have significantly modified the tasks: they created a set of questions on admission to tasks, and created a program for testing admission to tasks. Pedagogical practice should be not only a formal stage of education, but also an experience that leaves a significant mark in the professional training of students, in their choice of fields of activity after graduation.

Keywords

Pedagogical practice, masters, specialists, universities, technical universities.

Педагогическая практика в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) является обязательным разделом основной профессиональной образовательной программы магистратуры, входит в раздел «Б2 Практики», в том числе научно-исследовательская работа», и направлена на формирование общекультурных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями настоящего ФГОС ВПО и документами ОПОП направления подготовки к профессиональной составляющей компетентностной модели выпускника.

Цель педагогической практики заключается в формировании готовности выпускников магистратуры к решению задач научно-педагогической деятельности в области высшего профессионального, среднего специального и среднего образования.

Педагогическая практика является неотъемлемой частью подготовки специалистов в технических вузах. Эта форма обучения позволяет студентам не только применять теоретические знания на практике, но и познакомиться с реальной образовательной средой, что в свою очередь способствует их профессиональному росту и развитию. Большинство технических вузов очень серьезно относятся к проведению педагогической практики. Об этом свидетельствует огромное количество методических материалов, опубликованных в интернете и на бумажных носителях [1-6].

Президент В. В. Путин сообщил, что в ближайшие три года учебные заведения в России должны подготовить около миллиона специалистов в области инженерного дела. К 2030 году число специалистов в этой сфере должно вырасти до 1,8 млн. На заседании совета по стратегическому развитию и нацпроектам Президент заявил, что в России необходимо возродить престиж профессии инженера.

В июне вице-премьер Д. В. Мантуров называл основным работодателем предприятия обрабатывающей промышленности. По его словам, к 2026 году дефицит кадров в этой сфере составит 240 тыс. специалистов, треть из которых приходится на инженеров и конструкторов, две трети — на рабочие специальности. По данным исследовательского центра Superjob, дефицит политехнических кадров оценивается в 600 тыс. человек, а инженерные кадры входят в тройку самых востребованных в сфере производства и строительстве.

Для обеспечения поставленных задач необходимо подготовить высококвалифицированные кадры со знанием современной физики. Именно для этого необходимо повышать уровень подготовки по физике начиная со школы. Однако, в «Общероссийском народном фронте» (ОНФ) заявили, что порядка 40 % российских школ в настоящее время имеют открытые вакансии педагогов. Как поясняют в организации, наиболее существенной является нехватка учителей физики и математики. Как пишут «Известия» со ссылкой на исследование ОНФ, о нехватке учителей

математики сообщило 43,8 % опрошенных организацией директоров школ, а о нехватке преподавателей физики — 22,4 % директоров.

О недостатке учителей по физике, даже в школах Подмосковья, говорил губернатор Московской области А. Ю. Воробьев. Проблема укомплектования школ учителями по физике в Подмосковье частично решается переманиванием учителей из других регионов России, что не улучшает ситуацию с преподаванием физики в стране.

Введение физики как обязательного предмета для технических вузов в 2026 году заложено в плане мероприятий по повышению качества математического и естественно-научного образования на период до 2030 года, который правительство утвердило в ноябре 2024 года. Это естественно вызовет увеличение числа сдающих ЕГЭ по физике среди учеников 11 классов, что в свою очередь потребует увеличения количества учителей-предметников по физике. Ведь ни для кого не секрет, что подчас в школах физику ведут не учителя физики, а химики, трудовики и даже физруки!

По информации СМИ, за введение обязательной физики при поступлении для будущих инженеров давно выступают МФТИ, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, МИФИ.

Все вышесказанное свидетельствует о необходимости подготовки преподавателей физики на все уровни образования: университеты, технические университеты, колледжи и школы. Выпускники физического факультета традиционно находят работу в качестве преподавателей и нашего факультета, и вузов страны. В последнее время многие идут работать в лицеи и гимназии. Среди наших выпускников есть как директора школ, так и учителя в школах и региональных центрах для одаренных детей. Однако этого недостаточно. Для повышения квалификации уже работающих учителей-предметников в МГУ с конца 60-ых годов по конец 80-ых годов работали курсы повышения квалификации учителей школ Российской Федерации. С 2010 года работа курсов повышения квалификации учителей ведется для учителей-физиков на базе физического факультета МГУ. На курсах лекции по основным направлениям развития современной физики читают ведущие ученые – сотрудники физического факультета. Проводят обучение и сотрудники факультета одновременно работающие в ФИПИ по формированию ЕГЭ по физике. С 2024 года в рамках комплексной программы переподготовки выпускников факультетов МГУ прошлых лет, готовится программа по подготовке учителей физики для школ из числа наших выпускников прошлых лет.

Значение педагогической практики для студентов

Педагогическая практика играет несколько ключевых ролей в подготовке студентов. Во-первых, она помогает закрепить теоретические знания. После прохождения многих учебных курсов у студентов могут возникнуть трудности с применением полученных знаний на практике. Педагогическая практика предоставляет возможность наблюдать за процессом преподавания, участвовать в организации учебного процесса и оценивать уровень понимания материала учащимися.

Во-вторых, педагогическая практика развивает профессиональные навыки. В процессе общения с учениками, коллегами и руководством, студенты учатся корректно выражать свои мысли. Что являются важными для будущих специалистов, которые будут работать не только в образовательной сфере, но и в других областях, где взаимодействие с людьми имеет большой вес.

В-третьих, педагогическая практика формирует профессиональную идентичность. Студенты, находясь в атмосфере реальной образовательной среды, могут осознать, что именно они хотят делать в будущем. Это может быть научная работа или преподавание различных курсов как в университетах, так и в образовательных учреждениях другого уровня, разработка учебных материалов или другие связанные с образованием направления. Даже для тех, кто выберет путь ученого-теоретика или ученого-экспериментатора, приобретает умение понятно излагать свои мысли, правильно

ставить вопросы значительно поможет им в будущем презентовать свою работу на конференциях или выставках. Участие в практике помогает лучше понять, какое место они хотят занять в своем профессиональном мире

Несмотря на очевидные преимущества, педагогическая практика студентов технических вузов может быть сопряжена с рядом серьезных проблем. Эти трудности могут варьироваться от недостатка подготовки до трудностей во взаимодействии с учащимися и преподавателями.

Одной из главных проблем является недостаток подготовки. Многие студенты приходят на практику без должного опыта и навыков, необходимых для успешной работы со студентами младших курсов. Это может привести к стрессовым ситуациям, когда практикант не знает, как решить конкретную педагогическую задачу или как доходчиво объяснить проблему. Из-за этого могут возникнуть негативные эмоции, что препятствует получению полезного опыта.

Для того чтобы педагогическая практика стала более эффективной и результативной, необходимо обратить внимание на предварительное обучение практикантов. На физическом факультете МГУ это решается следующим образом: читаются спецкурсы по педагогике (психологии обучения) и составлению и решению задач. Педагогическая практика, таким образом является естественным продолжением этих дисциплин, практическим применением теоретически полученных навыков.

Рефлексия является неотъемлемой частью обучения. Она помогает студентам анализировать свой опыт, выявлять недостатки и делать выводы, которые помогут в дальнейшем развитии. Важно, чтобы студенты практиканты имели возможность обсуждать свои успехи и неудачи с преподавателем и коллегами. Обсуждение различных ситуаций поможет быстрее находить эффективные решения, которые могут понадобиться в будущем.

Студенты должны быть готовы к тому, что их методы преподавания могут быть усовершенствованы, и для этого нужно постоянно работать над собой. Потребность и желание постоянно получать новую информацию, готовность учиться на своих и чужих ошибках способны значительно повысить эффективность педагогической практики.

На физическом факультете МГУ педагогическая практика ранее (до 2025 года) проводилась со студентами магистрами второго года обучения, но после перехода к обучению по программам специалитета практика проводится со студентами пятого курса, а роль учеников для них выполняют либо студенты младших курсов физического факультета (физпрактикум кафедры общей физики), либо студенты естественных факультетов (физпрактикум кафедр, ведущих обучение физики на естественных факультетах) либо спецпрактикум на кафедрах. У нас, на кафедре оптики, спектроскопии и физики наносистем есть несколько различных практикумов.

Подробнее опишу практикум по волоконной оптике. Нашей задачей было обучить практикантов умению общаться по материалам задач практикума со студентами младших курсов кафедры, умению правильно и понятно ставить вопросы на этапе допуска к задаче (теоретическая часть работы), отслеживать ход экспериментальной работы и вовремя поправлять в случае ошибок.

С годами меняется характер восприятия студентами информации. Поэтому со временем студенты-практиканты существенно модифицировали задачи практикума: создали набор вопросов по допуску к задачам, создали программу по тестированию на допуск к выполнению задачи, была сделана программа по обработке экспериментальных данных (создание требуемых в задаче графиков). Сперва вопросы тестировали на практикантах при устном ответе, это тестирование показало какие вопросы являются существенными для понимания предмета задачи, а какие второстепенными. На этом этапе практиканты учились корректно ставить вопросы. Далее была создана программа по тестированию. Вопросы программа выбирает случайно из списка. По итогу

подсчитывается процент правильных ответов и показывается на круговой диаграмме. Если показано не 100 процентов правильных ответов, то с преподавателем и практикантом разбираем какие ответы правильные, а какие нет.



Рисунок 1 — Магистр 2 года обучения Прохоров В.В. помогает магистрами первого года обучения пройти компьютерный допуск к задаче

Заключение

Педагогическая практика студентов университетов и технических вузов — это важный этап их профессионального обучения, который открывает перед ними новые горизонты и возможности. Несмотря на существующие проблемы, такие как недостаток подготовки и сложности во взаимодействии с учащимися, существуют также перспективы для улучшения.

Поддержка со стороны вузов, образовательных учреждений и опытных преподавателей — это основа, на которой строится успешное обучение будущих профессионалов. Педагогическая практика должна быть не только формальным этапом образования, но и опытом, который оставляет значимый след в профессиональной жизни каждого студента позволяет им на практике определиться с выбором рода занятий после окончания обучения в вузе. Ответить на вопрос: хотят ли они стать педагогами или наоборот, предпочитают вид деятельности, не связанный с активным общением с людьми.

Список литературы

1. Асалханова В. И. Педагогическая практика студентов (филологический факультет)/Асалханова В. И. и др.; учебно-методическое пособие. Улан-Удэ, Бурят. гос. ун-т, Ин-т пед. образования. Изд-во Бурят. ун-та, 2005. —133 с.
2. Блохина А. Е., Педагогическая практика: методические указания/ Блохина А. Е., Ульямова Л. Н.; Учебнометодическое пособие, Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016.
3. Гребенникова Е. О. Педагогическая практика бакалавров/ Гребенникова Е. О. и др.; учебно-методическое пособие под ред. Сизгановой Е. Ю. Москва: Флинта, 2015. — 183 с.
4. А. В. Ефанов, Педагогическая практика: основы организации и методика проведения. А. В. Ефанов/ О. И. Гадельяина; учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2011. —69 с.
5. Хисматуллина Л. Я. Методические указания к организации и проведению педагогической практики студентов университета/ Хисматуллина Л. Я., Зоткин Н. В учебно-методическое пособие, Самарский государственный университет, 2006.
6. Павлова Я. В., Организация педагогической практики в вузе / Павлова Я. В., Сакович С. И. Современные научные исследования и инновации. 2017. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2017/03/80120>

References

1. Asalhanova V. I. Pedagogicheskaya praktika studentov (filologicheskij fakul'tet)/Asalhanova V. I. i dr.; uchebno-metodicheskoe posobie. Ulan-Ude, Buryat. gos. un-t, In-t ped. obrazovaniya. Izd-vo Buryat. un-ta, 2005. —133 s.
2. Blohina A. E., Pedagogicheskaya praktika: metodicheskie ukazaniya/ Blohina A. E., Ul'maeva L. N.; Uchebnometodicheskoe posobie, Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosuniversitet, 2016.
3. Grebennikova E. O. Pedagogicheskaya praktika bakalavrov/ Grebennikova E. O. i dr.; uchebno-metodicheskoe posobie pod red. Sizganovoj E. YU. Moskva: Flinta, 2015. — 183 s.
4. A. V. Efanov, Pedagogicheskaya praktika: osnovy organizacii i metodika provedeniya. A. V. Efanov/ O. I. Gadelyiina; uchebno-metodicheskoe posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Ros. gos. prof.-ped. un-ta, 2011. —69 s.
5. Hismatullina L. YA. Metodicheskie ukazaniya k organizacii i provedeniyu pedagogicheskoy praktiki studentov universiteta/ Hismatullina L. YA., Zotkin N. V uchebno-metodicheskoe posobie, Samarskij gosudarstvennyj universitet, 2006.
6. Pavlova YA. V., Organizaciya pedagogicheskoy praktiki v vuze / Pavlova YA. V., Sakovich S. I. Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. 2017. № 3 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2017/03/80120>

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ «РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МЕТАЛЛОВ»

Марченко Алла¹

доктор физико-математических наук, профессор, al7140@rambler.ru

Серегин Павел¹

доктор физико-математических наук, профессор, ppseregin@mail.ru

Доронин Вячеслав²

кандидат физико-математических наук, doroninslava@rambler.ru

Петрушин Юрий¹

аспирант, uraordie@mail.ru

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург, набережная реки. Мойки, д. 48

² Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198, Российская Федерация, СПб., ул. Ждановская, д. 13

Аннотация

Разработан лабораторный практикум общезначимой лаборатории по рентгенофлуоресцентной спектроскопии металлов для студентов Института физики РГПУ им. А. И. Герцена.

Ключевые слова

Тормозное излучение, характеристическое рентгеновское излучение, поглощение рентгеновских лучей, рентгенофлуоресцентная спектроскопия.

LABORATORY WORKSHOP X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY OF METALS

Marchenko Alla¹

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, al7140@rambler.ru

Seregin Pavel¹

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, ppseregin@mail.ru

Doronin Vyacheslav²

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, doroninslava@rambler.ru

Petrushin Yury¹

postgraduate student, uraordie@mail.ru

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia, 191186, Russian Federation, Saint-Petersburg, River Moika emb., 48

² Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 197198, Russian Federation, St. Petersburg, 13 Zhdanovskaya Street, 21

Abstract

A laboratory workshop of the general physics laboratory on X-ray fluorescence spectroscopy of metals has been developed for students of the Institute of Physics of the A.I. Herzen Russian State Pedagogical University.

Keywords

Braking radiation, characteristic X-ray radiation, X-ray absorption, X-ray fluorescence spectroscopy.

В настоящей работе рассмотрены основы лабораторного практикума по рентгенофлуоресцентной спектроскопии металлов.

При постановке практикума преследовались следующие цели:

- выработка у студентов навыков работы с современными научно-исследовательскими спектроскопическими приборами,
- обучение современным методам обработки экспериментальных данных с использованием компьютерных технологий, закрепление знаний в области атомной физики, полученных в лекционных курсах.

Непосредственному выполнению практикума предшествует двухчасовая вводная лекция, на которой рассматриваются теоретические основы рентгенофлуоресцентной спектроскопии, а также двухчасовой семинар для ознакомления студентов с основами работы на современном рентгенофлуоресцентном спектрометре.

Практикум проводится в весеннем семестре второго курса бакалавриата, рассчитан на одно четырехчасовое занятие в неделю и состоит из трех разделов: одного лекционного занятия для ознакомления с физическими основами рентгенофлуоресцентной спектроскопии; одного занятия на базе спектрометра RHYWE XR 4.0 Технопарк РГПУ им. А. И. Герцена для получения навыков работы со спектрометром; трех занятий в компьютерном классе для проведения анализа и интерпретации спектров, полученных студентами на предыдущем этапе.

Рентгенофлуоресцентная спектроскопия – это анализ вещества по его характеристическому рентгеновскому спектру. Образцы различных металлов подвергаются полихроматическому рентгеновскому излучению, энергия возникающего излучения флуоресценции анализируется с помощью полупроводникового детектора и определяется энергия соответствующих характеристических рентгеновских линий, а полученная диаграмма Мозли используется для определения частоты Ридберга и констант экранирования.

В настоящем практикуме используется следующее оборудование: экспертный блок RHYWE XR 4.0 35 кВ, Угломер RHYWE XR 4.0 для рентгеновского аппарата, 35 кВ подключаемый модуль XR 4.0 с рентгеновской трубкой W (диаметром 1 и 2 мм.), многоканальный анализатор, детектор энергии рентгеновского излучения RHYWE XR 4.0, образцы семи металлов для рентгеновской флуоресценции, программное обеспечение для многоканального анализатора ПК, Windows 7 или выше.

Теория и расчеты

Когда рентгеновские лучи взаимодействуют с веществом, они теряют энергию из-за комптоновского рассеяния, образования пар и фотоэлектрических эффектов. В диапазоне энергии, доступном во время этого эксперимента, фотоэлектрический эффект играет наиболее важную роль. Это означает, что в атоме на одной из нижних оболочек электрон выбрасывается за счет поглощенной энергии фотона. Теперь свободное пространство занято электроном из одной из высших оболочек. Энергия, которая образуется во время этого процесса, может быть использована для выброса другого электрона из одной из высших оболочек (эффект Оже) или для генерации фотона (флуоресцентное излучение). В первом приближении не вовлеченные электроны считаются фиксированными во время этих процессов. Их влияние учитывается введением так называемой экранирующей константы σ , которая уменьшает действие ядерного заряда.

Энергия связи электрона на n – оболочке атома может быть приближенно описана моделью атома Бора:

$$E_n = -R \cdot h(Z - \sigma)^2 \frac{1}{n^2}$$

где R – частота Ридберга:

$$R = \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} = 3.29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$$

$m = 9.109 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд, $h = 6.621 \cdot 10^{-34}$ Дж.с – постоянная Планка, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Н⁻¹м⁻²Кл² – диэлектрическая проницаемость, Z – атомный номер, σ – постоянная экранирования, n – главное квантовое число.

Постоянная экранирования зависит от местоположения возбужденного электрона и от конфигурации других электронов.

Из-за перехода электрона из n_2 в n_1 ($n_2 > n_1$) и в соответствии с первым уравнением энергия испускаемого излучения равна:

$$E = R \cdot h \left[\frac{(Z - \sigma_{n1})^2}{n_1^2} - \frac{(Z - \sigma_{n2})^2}{n_2^2} \right]$$

и вместо двух констант экранирования для перехода от n_2 к n_1 вводится средняя константа экранирования σ_{21} .

Если E_2^1 отображается как функция Z , то получается так называемая диаграмма Мозли. При $n_2 = 2$ и $n_1 = 1$ (характеристическая линия K_α), вместо последнего уравнения имеем:

$$\sqrt{E} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{Rh} \cdot Z - \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{Rh} \cdot \sigma_{21}$$

Соответственно, следующее уравнение относится к переходу из n_3 в n_1 со средней константой экранирования σ_{32} (характеристическая линия K_β):

$$\sqrt{E} = \frac{\sqrt{8}}{3} \sqrt{Rh} \cdot Z - \frac{\sqrt{8}}{3} \sqrt{Rh} \cdot \sigma_{3,1}$$

Задача 1. Запишите спектры флуоресцентного излучения, генерируемого образцами металла.

Задача 2. Определите значения энергии соответствующих характеристических K_α - и K_β -линий.

Результаты эволюции спектров приведены в таблице 1. Столбцы С и D включают значения энергии характерных K_α - и K_β -линий, которые были получены из спектров всех исследованных металлов (Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, Ag, Sn). Для сравнения в столбцах Е и F приведены соответствующие литературные данные по средним значениям энергии линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$.

Таблица 1

A	B	C	D	E	F
element	Z	$E(K_\alpha)$ exp. / keV	$E(K_\beta)$ exp. / keV	$E(K_\alpha)$ lit. / keV	$E(K_\beta)$ lit. / keV
Fe	26	6,39	7,03	6,397	7,056
Ni	28	7,47	8,26	7,474	8,265
Cu	29	8,04	8,90	8,039	8,905
Zn	30	8,63	9,57	8,627	9,572
Mo*	42	17,38	19,56	17,427	19,608
Ag	47	22,07	24,91	22,076	24,942
Sn	50	25,15	28,46		

Задача 3. Определите частоту Ридберга и константы экранирования с помощью полученных диаграмм Мозли.

На рис. 1 показаны линии Мозли для характерных линий K_α и K_β . R может быть рассчитан с использованием градиентов добавленных линий регрессии.

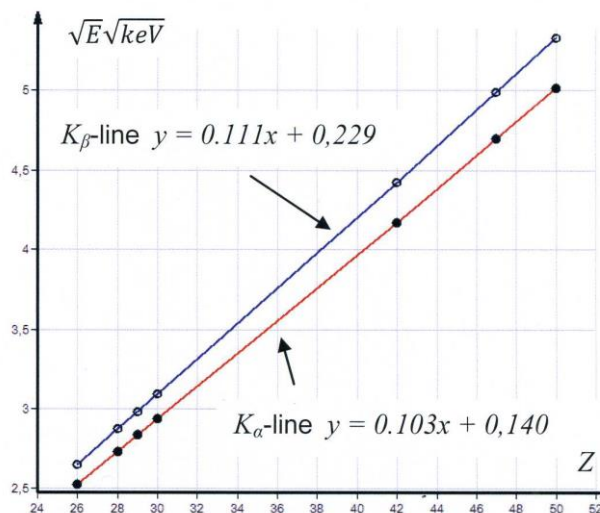


Рисунок 1 — Линии Мозли K_α - и K_β -линий

Градиент линии регрессии K_α -линий определяется следующим образом:

$$m = \frac{\sqrt{3Rh}}{2}$$

Трансформация дает:

$$m^2 = \frac{\sqrt{3Rh}}{4}$$

Введите значение для наклона линии K_α Мозли и переведите кэВ в Дж. Таким образом:

$$\frac{3Rh}{4} = 0,0106 \text{ кэВ} = 1,698 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

$$R = 3,41 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Градиент s_{31} линии регрессии K_β -линии дает:

$$\frac{8Rh}{49} = 0,0123 \text{ кэВ} = 1,974 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

$$R = 3,35 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

При $Z = 0$ и $R \cdot h = 13,6 \text{ эВ}$ получаем: $\sigma_{21} = 1,5$ и $\sigma_{31} = 2,2$

Список литературы

1. Определение состава многокомпонентных халькогенидных полупроводников методом рентгенофлуоресцентного анализа / Г. А. Бордовский, А. В. Марченко, А. В. Николаева, П. П. Серегин, Е. И. Теруков. // Физика и техника полупроводников. — 2014. — Т. 48. — С. 272-277.
2. Рентгенофлуоресцентный анализ стекол $\text{Ge}_{1-x}\text{Sex}$, $\text{As}_{1-x}\text{Sex}$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{AsySex}$ с использованием электронного возбуждения / Е. И. Теруков, П. П. Серегин, А. В. Марченко, Д. В. Жилина, К. У. Бобохужаев. // Физика и техника полупроводников. — 2015. Т. 49. — С. 1397-1401.

References

1. Opredelenie sostava mnogokomponentnykh khalkogenidnykh poluprovodnikov metodom rentgenofluorescentnogo analiza / G. A. Bordovsky, A. V. Marchenko, A. V. Nikolaeva, P. P. Seregin, E. I. Terukov. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. — 2014. —Т. 48. — S. 272 – 277.
2. Rentgenofluorescentnei analiz stekol $\text{Ge}_{1-x}\text{Sex}$, $\text{As}_{1-x}\text{Sex}$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{AsySex}$ s ispolzovaniem elektronnoho возбуждениy / E. I. Terukov, P. P. Seregin, A. V. Marchenko, D. V. Zhilina, K. U. Bobokhuzhaev. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. — 2015. —Т. 49. — S. 1397 – 1401.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВЫХ ЛАБОРАТОРИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ

Саранцев Андрей Владимирович
учитель физики, annasara0@yandex.ru

Манин Константин Владимирович
кандидат биологических наук, учитель химии, kmanin@internet.ru

ГАНОУ СО «Губернаторский Лицей», Российская Федерация, УФО, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Лучистая 10

Аннотация

На основе анализа результатов методических разработок цифровых лабораторий по теме «Тепловые явления» была установлена целесообразность её применения на уроках естественнонаучной направленности. Выполнение фронтальных лабораторных работ с использованием цифровых лабораторий расширяет круг возможных измерений, а также способствует увеличению интереса к изучению предметов естественнонаучной направленности.

Ключевые слова

Новые обучающие технологии; цифровая лаборатория Releon; уроки физики; цифровые датчики, физика.

EFFECTIVENESS OF DIGITAL LABORATORIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF NATURAL SCIENCES

Sarantsev Andrei V.¹
physics teacher, annasara0@yandex.ru

Manin Konstantin V.¹
PhD, chemistry teacher, kmanin@internet.ru

GANOUSO "Governor's Lyceum", Russian Federation, Ural Federal District, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, Luchistaya St. 10

Abstract

Based on the analysis of the results of methodological developments of digital laboratories on the topic "Thermal phenomena", the expediency of its application in natural science lessons was established. Performing front-end laboratory work using digital laboratories expands the range of possible measurements, and also increases interest in the study of natural science subjects.

Keywords

New learning technologies; Releon digital laboratory; physics lessons; digital sensors, physics.

Установлено, что высокая степень погружения в изучаемые процессы и вовлеченность учащихся в познание позволяет повысить мотивацию к обучению, а детальная визуализация процессов повысит эффективность запоминания изучаемых элементов [1]. Улучшение качества образования через обеспечение образовательных учреждений информационно-коммуникативными технологиями, создание дополнительных электронных учебных программ и практикумов, а также повышение уровня знаний и навыков учителей и учеников по использованию этих технологий является актуальной задачей для многих стран мира [3]. Необходимость применения

различных подходов для формирования ключевых компетенций обучающихся через дидактические игры, игровые технологии, проектно-исследовательскую деятельность рассматривается многими современными дидактами. В рамках реализации международного проекта INOVEST была создана Лаборатория Интеллектуальных Систем и Технологий «ЛИСТ» на базе Минского городского института развития образования, которая позволяет создать условия для непрерывного повышения квалификации педагогических работников г. Минска в сфере использования современных технических средств обучения и способствует освоению оборудования новых цифровых лабораторий и знакомству с основами образовательной робототехники. Кроме того, цифровые лаборатории от RHYWE (Германия) включают в себя **специально подобранные и адаптированные наборы** с мобильным устройством для измерений и обработки данных, с беспроводными датчиками и программным обеспечением для проведения лабораторных работ и экспериментов как в классе, так и на улице. Необходимо отметить, что за время использования цифровых лабораторий RHYWE в России не было зафиксировано ни одного отказа продукции по причине технической неисправности [9].

Поэтому в данной работе будет продолжено применение цифровых лабораторий фирм «Releon» и «Научные развлечения» в процессе обучения физики и химии по теме «Тепловые явления».

Цель исследований состояла в изучении эффективности применения цифровых лабораторий фирм «Releon» и «Научные развлечения» в процессе обучения физики и химии по теме «Тепловые явления».

Материалы и методы

Цифровые лаборатории «Releon» подходят как для базового уровня изучения естественных наук, так и для профильного обучения. Могут применяться для любых типов занятий и возрастных групп: от начальной школы (к примеру, использование датчика расстояния при знакомстве с линейкой) и заканчивая старшей школой (работая с осциллографом из комплекта для регистрации и изучения электрических сигналов).

Датчики из комплектов позволяют заменить или не использовать часть устаревшего оборудования. Или, наоборот, задействовать старое для построения новых экспериментов. В нашем случае мы использовали датчик высоких температур и калориметр для наших экспериментов.

Перед началом работы необходимо установить программное обеспечение Releon Lite для своей операционной системы с сайта производителя из раздела «Поддержка» [4]. Методики экспериментов и детальное описание датчиков прилагается к набору цифровой лаборатории.

В данном исследовании применялись датчики высокой температуры для регистрации изменений температурного режима в процессе реакции нейтрализации [5].

В опыте на «установление термодинамического равновесия» показывают процесс установления термодинамического равновесия между порциями воды в пробирке и стакане. Один датчик температуры помещается в пробирку, второй датчик температуры горячей водой. В пробирку с помощью шприца наливают порцию 10 мл холодной воды, вставляют пробку с датчиком и укрепляют датчик на стальном листе. Глубина погружения датчика в воду должна быть 1-2 см. В стакан наливают горячую воду из электрического чайника из-под крана и устанавливают стакан. Устанавливают второй датчик над стаканом. В меню программы выбирают сценарий «Установление теплового равновесия и количество теплоты, переданное от одного тела к другому» и запускают регистрацию данных. Опускают корпуса датчиков температуры вдоль стального листа так, чтобы пробирка с одним датчиком и второй датчик оказались в стакане с горячей водой. Не вынимая пробирки из горячей воды, в течение 1-2 мин наблюдают выравнивание температур на графике [7].

В 2022-2023 учебном году с помощью данного цифрового оборудования было проведено более шестнадцати уроков в параллели 9-х классов. Дети получили наглядные представления о кинематике, электричестве и магнетизме; научились структурировать и анализировать результаты физических экспериментов; с удовольствием поработали в команде, улучшая навыки коммуникации [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На уроке по физики применялась цифровая лаборатории «Научные развлечения», где использовался датчик температур 0-120 градусов Цельсия при изучении температурных изменений в ходе установление термодинамического равновесия. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

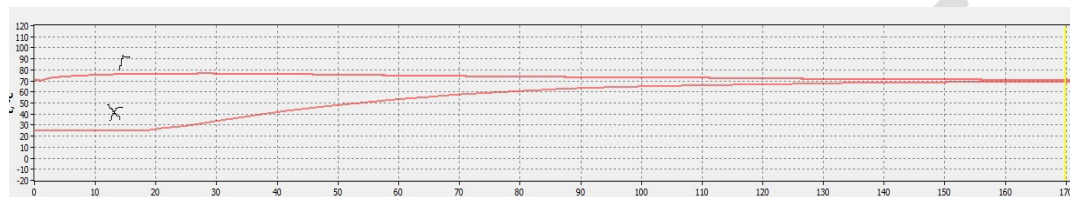


Рисунок 1 — Использование датчика температур 0-120 градусов Цельсия при изучении темы «Установление термодинамического равновесия»

В данном демонстрационном эксперименте исследовался процесс установление термодинамического равновесия между холодной и горячей водой. Термодинамическое равновесие описывает ситуацию, при которой система сохраняет свои характеристики постоянными на протяжении времени. В этом состоянии отсутствуют необратимые процессы, такие как теплопередача, диффузия или химические реакции, которые могут приводить к рассеиванию энергии. Таким образом, в термодинамическом равновесии система обладает стабильностью, где все её параметры, включая температуру, остаются неизменными. Методика проведения данного эксперимента описана в методических разработках фирмы Научные развлечения [6].

В данном эксперименте использовались две пробирки и два температурных датчика для контроля температуры в каждой из них. Одна пробирка содержала холодную воду, температура которой фиксировалась первым датчиком и отображалась на графике x , а вторая пробирка содержала горячую воду, температура которой отображалась на графике r . На рисунке 2 видно, что в течение первых 20 секунд температура холодной воды была значительно ниже, чем температура горячей воды. После того как пробирка с холодной водой была помещена в сосуд с горячей водой, мы наблюдали резкое повышение температуры холодной воды, в то время как температура горячей воды оставалась стабильной. Период, в течение которого температура холодной воды изменялась с 25 до 68 градусов, иллюстрирует принцип теплопередачи, при котором теплота передается от горячей воды к холодной, что в конечном итоге приводит к изменению температур обеих пробирок. Начиная с 150-й секунды, температурные кривые обеих пробирок выравниваются и образуют единую линию. С этого момента можно сделать вывод о достижении термодинамического равновесия, поскольку температура перестает изменяться.

На уроке химии применялся датчик высоких температур цифровой лаборатории Releon при изучении температурных изменений в ходе реакции нейтрализации. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

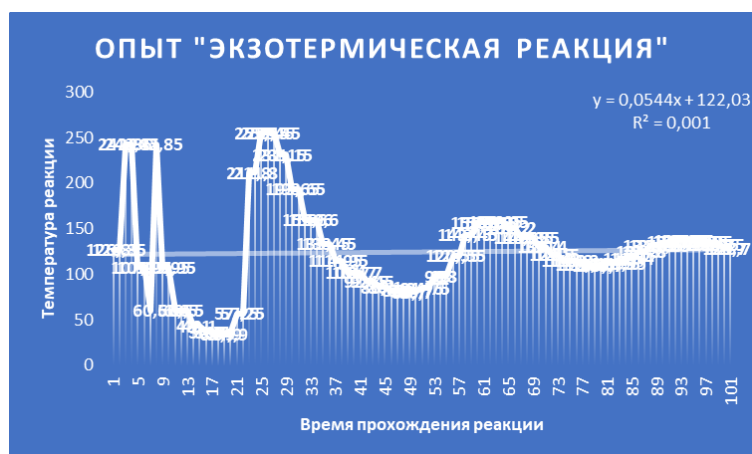


Рисунок 2 — Использование датчика высоких температур при изучении темы «Экзотермическая реакция»

Как видно на рисунке 2 величина фиксированной температуры зависит от стадии и времени прохождения химической реакции. Почти все химические реакции сопровождаются либо выделением, либо поглощением тепла. Реакции, протекающие с выделением тепла, называются экзотермическими реакциями. Продукты экзотермической реакции содержат меньший запас энергии, чем реагенты. В результате экзотермической реакции вещества нагреваются. Выделившееся тепло передается в окружающую среду до тех пор, пока не происходит выравнивание температур. Так, например, реакция кислоты с основанием – экзотермический процесс: на каждый моль образующейся воды выделяется 57,22 кДж тепла. Методика проведения данного опыта описана в методических разработках фирмы Releon.

Из приведённых на диаграмме данных видно, что величина температуры изменялась в диапазоне приведённых интервалов времени. С 4 по 22 минуту эксперимента наблюдалась первая стадия химической реакции, связанная с затратой внутренней энергии системы, что связано с добавлением кислоты к исходному раствору гидроксида натрия (рис. 2). С 22 по 31 минуту эксперимента наблюдалась вторая стадия химической реакции, связанная с выделением энергии в систему, что связано с образованием продукта реакции нитрата натрия (рис. 2). Наличие соли в растворе тоже можно подтвердить, при помощи датчика, регистрирующего нитрат-анионы в растворе спустя некоторое время. [2]

Следовательно, преимущества использования педагогом цифровой лаборатории в ходе урочной и внеурочной деятельности очевидны: эксперимент становится информационно более насыщенным, наглядным и понятным ученикам, так как получаемые в процессе проведения эксперимента результаты измерений в виде графиков и таблиц отображаются на экране. Выполнение фронтальных лабораторных работ с использованием цифровых лабораторий расширяет круг возможных измерений, а также возрастает интерес к изучению химии. Кроме того, применение датчика температуры позволяет наглядно увидеть на графике по изменению температур даже незначительные выделения тепла, что в обычном эксперименте показать очень проблематично.

Выводы

Таким образом, применение данной цифровой лаборатории Releon действительно способствует развитию творческого потенциала учащихся и позволяет наглядно продемонстрировать некоторые тепловые явления. А использование цифровой лаборатории «Научные развлечения» позволяют адаптировать учебный материал под индивидуальные потребности и уровень подготовки каждого ученика, что способствует более эффективному обучению. По графику процесса «Установление

термодинамического равновесия» можно утверждать мы можем заключить, что процесс теплопередачи не только выравнивает температуры, но и приводит к значительным изменениям во внутренней энергии холодной воды.

Список литературы

1. Герасимова И. В., Курганова Н. А. «Электронное строение атома в виртуальной реальности: интегрированный урок химии и информатики». // «Информатика в школе», 2023, №2. URL: http://infojournal.ru/journals/school_02-2023/.
2. Выскребенцева С. В. «Использование цифровых лабораторий на уроках химии и во внеурочное время». URL: <https://www.prodlenka.org/metodicheskie-razrabotki/488676-ispolzovanie-cifrovyyh-laboratoriy-na-urokah-h>.
3. Касперский И. В., Парамонов А. И. «Применение технологии дополненной реальности на уроках химии для развития индивидуального подхода в образовании». // «Непрерывное профессиональное образование лиц с особыми потребностями: сборник статей V Международной научно-практической конференции, Минск, 14 декабря 2023. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/54082>.
4. Методические разработки лаборатории «Releon»: Лабораторная работа №6 «Экзотермические реакции» [Электронный ресурс]. URL: <https://rl.ru/support>.
5. Петрова М. А. «Многообразие датчиковых систем для компьютеризированного физического эксперимента». // Вестник Пермского Государственного Гуманитарно-Педагогического Университета. Серия: Информационные компьютерные технологии в образовании, 2009, №5, с. 146-158. – URL: eLIBRARY ID: 21681314; EDN: SGLTMX.
6. Поваляев О. А., Ханнанов Н. К., Хоменко С. В. Механические явления. Руководство по выполнению демонстрационного эксперимента – М.: ООО «МАКССПЕЙС», 2013. – 72 с.
7. Потоскуев С. Э. «Учебные цифровые лаборатории в практике общеобразовательной школы». // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Наука, Образование, Общество: Тенденции и Перспективы развития». - Чебоксары, 03 декабря, 2017. – URL: eLIBRARY ID: 32261816; EDN: YLKBFR.
8. Саранцев А. В. Современный лабораторный практикум по физике на основе цифровой лаборатории как основа внедрения ФГОС. // Современные тренды развития математики, физики, информатики в условиях реализации ФГОС: Материалы форума, Екатеринбург, 23 марта 2023 года. – Екатеринбург: Государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Свердловской области "Институт развития образования", 2023. – 136 с. – URL: eLIBRARY ID: 54370429; EDN: BCVWWG.
9. Цифровая лаборатория. Методическое руководство по работе с комплектом оборудования и с программным обеспечением фирмы "Научные развлеченья" / [А.Н. Болгар, О. А. Поваляев, Н. К. Ханнанов, С. В. Хоменко]. - Москва, 2011, с. 89.

References

1. Gerasimova I. V., Kurganova N. A. "Elektronnoe stroenie atoma v virtual'noi real'nosti: integrirovannyi urok khimii i informatiki". // "Informatika v shkole", 2023, No. 2. URL: http://infojournal.ru/journals/school_02-2023/.
2. Vyskrebentseva S. V. "Ispol'zovanie tsifrovyykh laboratoriy na urokakh khimii i vo vneurochnoe vremya". URL: <https://www.prodlenka.org/metodicheskie-razrabotki/488676-ispolzovanie-cifrovyyh-laboratoriy-na-urokah-h>.
3. Kasperskii I. V., Paramonov A. I. "Primenenie tekhnologii dopolnennoi real'nosti na urokakh khimii dlya razvitiya individual'nogo podkhoda v obrazovanii". // "Nepreryvnoe professional'noe obrazovanie lits s osobymi potrebnostyami: sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 14 dekabrya 2023. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/54082>.
4. Metodicheskie razrabotki laboratorii «Releon»: Laboratornaya rabota №6 «Ekzotermicheskie reaktsii» [Elektronnyi resurs]. URL: <https://rl.ru/support>.
5. Petrova M. A. "Mnogobrazie datchikovykh sistem dlya komp'yuterizirovannogo fizicheskogo eksperimenta". // Vestnik Permskogo Gosudarstvennogo Gumanitarno-Pedagogicheskogo Universiteta. Seriya: Informatsionnye komp'yuternye tekhnologii v obrazovanii, 2009, No. 5, s. 146-158. – URL: eLIBRARY ID: 21681314; EDN: SGLTMX.
6. Povalyaev O. A., Khannanov N. K., Khomenko S. V. Mekhanicheskie yavleniya. Rukovodstvo po vypolneniyu demonstratsionnogo eksperimenta – М.: ООО "МАКССПЕЙС", 2013. – 72 s.
7. Potoskuev S. E. "Uchebnye tsifrovye laboratorii v praktike obshcheobrazovatel'noy shkoly". // Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauka, Obrazovanie, Obshchestvo: Tendentsii

- i Perspektivy razvitiya". - Cheboksary, 03 dekabrya, 2017. – URL: eLIBRARY ID: 32261816; EDN: YLKBFR.
8. Sarantsev A. V. Sovremennyy laboratornyy praktikum po fizike na osnove tsifrovoy laboratorii kak osnova vnedreniya FGOS. // Sovremennyye trendy razvitiya matematiki, fiziki, informatiki v usloviyakh realizatsii FGOS: Materialy foruma, Ekaterinburg, 23 marta 2023 goda. – Ekaterinburg: Gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya Sverdlovskoi oblasti "Institut razvitiya obrazovaniya", 2023. – 136 s. – URL: eLIBRARY ID: 54370429; EDN: BCVWWG.
 9. Tsifrovaya laboratoriya. Metodicheskoe rukovodstvo po rabote s komplektom oborudovaniya i s programmym obespecheniem firmy "Nauchnye razvlecheniya" / [A. N. Bolgar, O. A. Povalyaev, N. K. Khannanov, S. V. Khomenko]. - Moskva, 2011, s. 89.

НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Старокуров Юрий Владимирович

ассистент, yurikstar@physics.msu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет, физический факультет. Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Аннотация

При изучении раздела термодинамика и молекулярная физика в рамках курса общей физики на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова поведение термодинамических систем анализируется как с помощью методов статистической физики, так и термодинамическими методами. На семинарах в основном рассматриваются задачи, связанные с равновесными состояниями и квазистатическими процессами в термодинамических системах. В курсе практически не уделяется внимание неравновесным процессам, что приводит к искаженному пониманию студентами физической сути явлений и процессов, происходящих в реальных неизолированных системах. В работе предлагается дополнить традиционное рассмотрение неравновесных процессов задачами, связанными с анализом поведения подобных систем. Для расширения круга рассматриваемых на семинарах проблем в данной работе предлагается набор задач, доступных для решения и понимая первокурсниками. Предложенный набор задач может быть использован как в высшей школе, так и при подготовке талантливых школьников и студентов колледжей к олимпиадам высокого уровня и дальнейшей профессиональной деятельности.

Ключевые слова

Неравновесный процесс, первое начало термодинамики, уравнение состояния идеального газа, термодинамика, молекулярная физика.

NONEQUILIBRIUM PROCESSES IN THE COURSE OF GENERAL PHYSICS

Starokurov Yuriy V.¹

assistant professor, yurikstar@physics.msu.ru

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, 119234, Russian Federation, Moscow, Leninskie Gory, 1 bldg. 2

Abstract

In Thermodynamics and Molecular Physics as a part of General Physics course at the Faculty of Physics of M. V. Lomonosov Moscow State University the behavior of thermodynamic systems is analyzed using statistical physics methods and that of thermodynamics. Usually problems related to equilibrium states and quasi-equilibrium processes in thermodynamic systems are considered during seminars, while almost no attention is drawn to nonequilibrium processes. This approach appears to cause students to misunderstand physical phenomena and processes occurring in real non-isolated systems. The author of this paper suggests extending the range of traditionally considered nonequilibrium processes. This paper proposes a set of problems accessible for solution and understanding by first-year students. One can use this set of problems in higher education as well as in training talented school and college students for high-level olympiads and further professional operation.

Keywords

Nonequilibrium process, the first law of thermodynamics, ideal gas law, thermodynamics, molecular physics.

На физическом факультете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова общая физика изучается первые три года обучения. В первом семестре студенты осваивают в рамках общей физики механику, во втором – термодинамику и молекулярную физику, в третьем – электричество и магнетизм, в четвёртом, – изучается оптика, в пятом – атомная физика и, завершая курс общей физики, в шестом семестре – физику атомного ядра и элементарных частиц.

Термодинамика и молекулярная физика, которую начинают осваивать студенты в весеннем семестре первого курса, изучает широкий круг явлений и процессов, а именно макроскопические процессы и явления, связанные с огромным количеством содержащихся в телах атомов и молекул. При этом методы, присущие термодинамике органично дополняют методы молекулярной физики, хоть и заметно отличаются от них.

Термодинамика, или общая теория теплоты, является аксиоматико-эмпирической наукой, построенной на обобщении большого количества опытных фактов. Она не вводит никаких специальных гипотез и конкретных представлений о строении вещества и физической природе теплоты. Ее выводы основаны на общих принципах или началах, являющихся обобщением опытных фактов. Термодинамика рассматривает «теплоту» как род какого-то внутреннего движения, но не пытается конкретизировать этот тип движения. [6, 7, 10]

Молекулярная физика, наоборот, исходит из представления об атомно-молекулярном строении вещества и рассматривает «теплоту» механистическим образом, как беспорядочное движение атомов и молекул, опираясь на их статистические характеристики. Молекулярная физика в широком смысле слова изучает не только макроскопические явления, но также рассматривает свойства и строение отдельных молекул и атомов. Методы, применяемые в молекулярной физике в дальнейшем используются, как в курсе электричества и магнетизма, так и в курсах атомной и ядерной физики.

Еще в XIX веке существование атомов и молекул казалось научному сообществу сомнительным, поэтому методы молекулярно-кинетической теории не находили одобрения среди тех ученых, которые отрицательно относились ко всяким новым гипотезам и теориям, основанным на абстрактных построениях. В этих условиях строгое разделение между термодинамикой и молекулярно-кинетической теорией было обосновано, поскольку требовалось разделять подтверждённые факты от красивых стройных теоретических правдоподобных гипотез.

На рубеже XX века появились опытные подтверждения существования атомов и молекул, что повлекло быстрое развитие молекулярной физики и её слияние с термодинамикой. Молекулярно-кинетическая теория в основном утратила свой гипотетический характер, который ей придавали в начале её развития. Поэтому отпала необходимость в том принципиальном разграничении между термодинамикой и молекулярно-кинетической теорией, которое очень строго проводилось на ранней стадии развития этих разделов физики. [6, 7, 10]

При изучении курса «Термодинамика и молекулярная физика», подаваемый материал опирается на базовые знания, полученные студентами ранее, при изучении ими школьного курса физики. При этом происходит актуализация полученных школьных знаний и их расширение за счёт более детального описания сути физических процессов и использования более сложного математического инструментария. [8, 5]

Курс «Термодинамика и молекулярная физика» на физическом факультете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова разделен на четыре тематических логически замкнутых блока:

- 1) Термодинамика и основы молекулярно-кинетической теории.
- 2) Статистический подход к молекулярным явлениям.
- 3) Явления переноса.
- 4) Реальные газы и жидкости.

В первом тематическом блоке рассматриваются следующие явления и термодинамические методы их описания [9]:

- 1) Эмпирические основы термодинамики. Температура и эмпирические температурные шкалы, тепловое равновесие. Тепловое расширение тел и термоупругие свойства вещества. Газовые законы и уравнение Менделеева-Клайперона.
- 2) Уравнение теплового баланса, первое начало термодинамики. Теплоемкость. Равновесные процессы в идеальном газе.
- 3) Равновесные циклические процессы и их КПД, обратимые равновесные циклические процессы. Второе и третье начала термодинамики.
- 4) Энтропия как термодинамическая функция и её изменение в различных процессах.

Таким образом, в первом тематическом блоке курса рассматриваются за редким исключением только равновесные состояния и квазистатические процессы в идеальных газах, фактически повторяя и заметно углубляя в этой части школьный курс термодинамики. При этом крайне незначительно рассматриваются более близкие к реальности неравновесные процессы: на семинарах разбираются лишь задачи, посвящённые расчёту изменения энтропии при установлении термодинамического равновесия. К подобным задачам можно отнести, например, задачи о вычислении изменения энтропии в изолированных системах:

- 1) при выравнивании температур двух тел, находящихся в тепловом контакте друг с другом;
- 2) при смешении идеальных газов;
- 3) при расширении идеальных газов в пустоту (процесс Гей-Люссака).

При этом обычно не рассматриваются неизолрированные системы. В результате у студентов формируется представление, что описание таких систем термодинамическими методами практически не реализуемо, а энтропия придумана, как вспомогательный удобный инструмент для расчёта КПД циклов, который можно использовать, в том числе, и для неравновесных процессов, но исключительно в изолированных системах.

Введение в курс задач о неравновесных процессах в неизолрированных системах, тривиальное решение которых можно построить с помощью методов классической термодинамики, позволит (1) улучшить понимание студентами термодинамики неравновесных процессов; (2) упростить понимание последующих разделов курса «Термодинамика и молекулярная физика» и (3) заложить основу для дальнейшего освоения теоретического курса «Термодинамика и статистическая физика», т.е. в полной мере реализовать концентрическую модель обучения физике [11].

Далее представлен предлагаемый набор задач о неравновесных процессах в идеальных газах, для решения которых достаточно рассмотреть начальное и конечное равновесные состояния, воспользоваться первым началом термодинамики, проанализировать работу внешних сил и определить изменение внутренней энергии при переходе между этими состояниями [1, 2, 3, 4]:

Задача 1. Внутри откачанной до глубокого вакуума установки находится герметичный теплоизолированный цилиндрический сосуд, заполненный идеальным одноатомным газом. Сосуд закрыт сверху теплонепроницаемым поршнем. Газ занимает

при этом объём V . На поршень ставят гирю той же массы, что и масса поршня. Найти объём газа в новом положении равновесия.

Задача 2. Внутри откачанной до глубокого вакуума установки находится герметичный теплоизолированный цилиндрический сосуд, заполненный идеальным одноатомным газом. Сосуд закрыт сверху теплоизолированным поршнем, на котором стоит гиря. Объём, занимаемый газом, равен при этом V . Гирю с поршня снимают. Найти объём газа в новом положении равновесия. Массы поршня и гири одинаковы.

Задача 3. В вертикальном теплоизолированном цилиндрическом сосуде под массивным поршнем находится 1 моль идеального одноатомного газа при температуре T_0 . Начнём сжимать газ, опуская поршень. После того, как совершили работу A , поршень отпустили, и он остановился в новом положении равновесия. Найти температуру T_k в этом состоянии. Внешнее давление считать равным нулю.

Задача 4. Один моль идеального газа с постоянной теплоемкостью C_V заключен в цилиндр с адиабатическими стенками и поршнем, который может перемещаться в цилиндре без трения. Поршень находится под постоянным внешним давлением P_1 . В некоторый момент времени внешнее давление скачкообразно уменьшают или увеличивают до P_2 . (Этого можно достигнуть, например, снимая часть груза с поршня или добавляя новый груз.) В результате газ изменяет свой объём. Вычислить температуру и объём газа после того, как установится термодинамическое равновесие.

Задача 5. В цилиндрическом сосуде объёма $2V_0$ под тяжёлым поршнем находится одноатомный идеальный газ при температуре T_0 и давлении $P_0/2$, занимающий объём V_0 . Над поршнем создан вакуум. Внизу в сосуде имеется небольшое отверстие, перекрытое краном. Снаружи пространство заполнено тем же газом при давлении P_0 и температуре T_0 . Сосуд теплоизолирован. Кран на короткое время приоткрывают так, что давление внутри и снаружи быстро выравнивается. После чего кран закрывают, при этом поршень медленно поднимается вверх. Найдите температуру газа под поршнем после установления равновесия.

Задача 6. Одноатомный идеальный газ в количестве $\nu = 1$ моль находится в теплоизолированном цилиндре с поршнем. Дно цилиндра заряжено зарядом q , а поршень – зарядом $-q$. Газ медленно получает от нагревателя количество теплоты Q . Насколько изменится температура газа? Считайте, что электрическое поле однородно, трения нет. Диэлектрическая проницаемость газа равна единице.

Задача 7. В цилиндре с теплонепроницаемыми стенками под массивным теплонепроницаемым поршнем находится идеальный одноатомный газ. На поршень поставили гирю, масса которой равна массе поршня. После того как система пришла в новое состояние термодинамического равновесия, гирю быстро сняли и вновь дожались наступления равновесного состояния. Определите, какая температура T газа установится в цилиндре после четырех таких циклов, если первоначальная температура равнялась $T_0 = 300$ К. Считайте, что трение между поршнем и стенками цилиндра пренебрежимо мало. Внешним давлением можно пренебречь.

Предложенный набор задач или аналогичный будет полезен не только в курсе общей физики для студентов физических специализаций в классических университетах, но в технических вузах, а также для школьников, участвующих в олимпиадах по физике высокого уровня [3, 11].

Список литературы

1. Баканина Л. П. Сборник задач по физике: Для 10-11 классов с углубленным изучением физики. / Л. П. Баканина, В. Е. Белонучкин, С. М. Козел, под редакцией С. М. Козела. - М.: Вербум-М, 2003. - 264 с.: ил.
2. Воробьёв И. И. Задачи по физике: Учеб. пособие; / И. И. Воробьёв, П. И. Зубков, Г. А. Кутузова, О. Я. Савченко, А. М. Трубочев, В. Г. Харитонов, под ред. О. Я. Савченко. 3е изд., испр. и доп. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 1999. 370 с

3. Всероссийские олимпиады по физике. 1992-2001: / А. Н. Варгин, В. Н. Дерябкин, С. М. Дунин, С. М. Козел, В. А. Коровин, А. П. Крюков, Л. А. Мельниковский, В. В. Можаяев, В. А. Орлов, О. Ю. Овчинников, Ю. А. Самарский, В. П. Слободянин, А. А. Шеронов, Ю. В. Чешев, В. И. Чивилев, Под. ред. С. М. Козела, В. П. Слободянина. - М.: «Вербум-М», 2002. - 392 с.
4. Гинзбург В. Л. Сборник задач по общему курсу физики. В 5 кн. Кн. П. Термодинамика и молекулярная физика / В. Л. Гинзбург, Л. М. Левин, Д. В. Сивухин, И. А. Яковлев; под ред. Д. В. Сивухина. — 5-е изд., стер. — М.: ФИЗМАТЛИТ; ЛАНЬ, 2006. - 176 с. - ISBN 5-9221-0603-1.
5. Грачёв А. В. Физика. 10 класс. Учебник. Базовый и углублённый уровни / А. В. Грачёв, В. А. Погожев, А. М. Салецкий, П. Ю. Боков, - 9-е изд., - М: Просвещение, 2023 – 463 с., ил.
6. Кикоин А. К. Молекулярная физика. / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин, редактор В. А. Григорова. М.: Наука, 1976, - 480 стр. с илл.
7. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. Учеб. пособие для вузов. / А. Н. Матвеев, редактор Г. Н. Чернышева, М.: Высшая школа, 1987. – 400 с., ил.
8. Мякишев Г. Я. Физика. 10 класс. Углублённый уровень. Молекулярная физика. Термодинамика. Учебник / Г. Я. Мякишев, А. З. Сияков – 8 издание – М.: Дрофа, 2019 - 351 стр.
9. Программа «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА» курса общей физики // кафедра общей физики физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова: официальный сайт. – Москва, [2025]. – URL: <http://genphys.phys.msu.ru/rus/edu/gen-prog-mol.php/> (дата обращения: 28.02.2025). – Режим доступа: свободный.
10. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. П. Термодинамика и молекулярная физика. / Сивухин Д. В., редактор Миртова Д. А. — 5-е изд., испр. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 544 с.
11. Якута А. А. Состав, цели и задачи учебной дисциплины: основы методики подготовки и проведения лекций, семинарских занятий и практикумов: Учебное пособие для студентов магистратуры / А. А. Якута. – М.: Физический факультет МГУ, 2017. – 98 с.

References

1. Bakanina L. P. Sbornik zadach po fizike: Dlya 10-11 klassov s uglublennym izucheniyem fiziki. / L. P. Bakanina, V. E. Belonuchkin, S. M. Kozel, pod redaksiyey S. M. Kozela. - М.: Vербум-М, 2003. - 264 с.: ил.
2. Vorob'yov I. I. Zadachi po fizike: Ucheb. posobiye; / I. I. Vorob'yov, P. I. Zubkov, G. A. Kutuzova, O. YA. Savchenko, A. M. Trubachev, V. G. Kharitonov, pod red. O. YA. Savchenko. 3e izd., ispr. i dop. Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy universitet, 1999. 370 s
3. Vserossiyskiye olimpiady po fizike. 1992-2001: / A. N. Vargin, V. N. Deryabkin, S. M. Dunin, S. M. Kozel, V. A. Korovin, A. P. Kryukov, L. A. Mel'nikovskiy, V. V. Mozhayev, V. A. Orlov, O. YU. Ovchinnikov, YU. A. Samarskiy, V. P. Slobodyanin, A. A. Sheronov, YU. V. Cheshev, V. I. Chivilev, Pod. red. SM. Kozela, V. P. Slobodyanina. - М.: «Vербум-М», 2002. - 392 с.
4. Ginzburg V. L. Sbornik zadach po obshchemu kursu fiziki. V 5 kn. Kn. P. Termodinamika i molekulyarnaya fizika / V. L. Ginzburg, L. M. Levin, D. V. Sivukhin, I. A. Yakovlev; pod red. D. V. Sivukhina. — 5-e izd., ster. — М.: FIZMATLIT; LAN', 2006. - 176 s. - ISBN 5-9221-0603-1.
5. Grachev A. V. Fizika. 10 klass. Uchebnik. Bazovyy i uglublyennyy urovni / A. V. Grachev, V. A. Pogozhev, A. M. Saletskiy, P. YU. Bokov, - 9-e izd., - M: Prosveshcheniye, 2023 – 463 с., ил.
6. Kikoin A. K. Molekulyarnaya fizika. / A. K. Kikoin, I. K. Kikoin, redaktor V. A. Grigorova. М.: Nauka, 1976, - 480 str. s ill.
7. Matveyev A. N. Molekulyarnaya fizika. Ucheb. posobiye dlya vuzov. / A. N. Matveyev, redaktor G. N. Chernysheva, М.: Vysshaya shkola, 1987. – 400 с., ил.
8. Myakishev G. YA. Fizika. 10 klass. Uglublennyy uroven'. Molekulyarnaya fizika. Termodinamika. Uchebnik / G. YA. Myakishev, A. Z. Sinyakov – 8 izdaniye – М.: Drofa, 2019 - 351 str.
9. Programma «MOLEKULARNAYA FIZIKA I TERMODINAMIKA» kursa obshchey fiziki // kafedra obshchey fiziki fizicheskogo fakul'teta MGU im. M. V. Lomonosova: ofitsial'nyy sayt. – Moskva, [2025]. – URL: <http://genphys.phys.msu.ru/rus/edu/gen-prog-mol.php/> (data obrashcheniya: 28.02.2025). – Rezhim dostupa: svobodnyy.
10. Sivukhin D. V. Obshchiy kurs fiziki: Ucheb. posobiye: Dlya vuzov. V 5 t. T. P. Termodinamika i molekulyarnaya fizika. / Sivukhin D. V., redaktor Mirtova D. A. — 5-e izd., ispr. — М.: FIZMATLIT, 2005. - 544 s.
11. Yakuta A. A. Sostav, tseli i zadachi uchebnoy distsipliny: osnovy metodiki podgotovki i provedeniya lektsiy, seminarских zanyatiy i praktikumov: Uchebnoye posobiye dlya studentov magistratury / A. A. Yakuta. – М.: Fizicheskiy fakul'tet MGU, 2017. – 98 s.

**КОЛЛЕГИ АСТРАХАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА О
НАУЧНО- ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ Ю.А.
ГОРОХОВАТСКОГО. ПАМЯТИ УЧЕНОГО И ЧЕЛОВЕКА**

Стефанова Галина Павловна¹

доктор педагогических наук, профессор, профессор-консультант

stefanova.galina@yandex.ru

Матвеев Данила Юрьевич¹

кандидат физико-математических наук, доцент, danila200586@mail.ru

Смирнов Владимир Вячеславович^{1,2}

доктор педагогических наук, кандидат физико-математических наук, доцент,

smirnov.v.aspu@mail.ru

¹ Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, ЮФО, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 20, А

² Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф. М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 414000, Российская Федерация, ЮФО, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Никольская, 6

Аннотация

Коллеги-астраханцы делятся своими воспоминаниями о личных встречах и деловом общении с Юрием Андреевичем Гороховатским.

Ключевые слова

Гороховатский Юрий Андреевич, память, воспоминания.

**COLLEAGUES OF ASTRAKHAN STATE UNIVERSITY ON THE SCIENTIFIC
AND PEDAGOGICAL ACTIVITIES OF YU.A. GOROKHOVATSKY. IN
MEMORY OF A SCIENTIST AND A MAN**

Stefanova Galina P.¹

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Consulting Professor

stefanova.galina@yandex.ru

Matveev Danila Y.¹

Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor,

danila200586@mail.ru

Smirnov Vladimir V.^{1,2}

Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor, smirnov.v.aspu@mail.ru

¹ Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, 414056, Russian Federation, Southern Federal District, Astrakhan region, Astrakhan, Tatishcheva str., 20, A

² The Caspian Institute of Marine and River Transport named after Admiral F.M. Apraksin is a branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "VGUVT", 414000, Russian Federation, Southern Federal District, Astrakhan region, Astrakhan, Nikolskaya str., 6

Abstract

Astrakhan colleagues share their memories of personal meetings and business communication with Yuri Andreevich Gorokhovatsky.

Keywords

Gorokhovatsky, Yuri Andreevich, memory, memories.

Юрий Андреевич Гороховатский – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, несколько десятилетий бессменный заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена в Санкт-Петербурге с 1991 года.

Первое знакомство с Ю. А. Гороховатским произошло в 1997 году на конференции «Физика в системе современного образования» (ФССО), которая проходила в городе Волгограде на базе Волгоградского государственного педагогического института (ныне Волгоградский государственный социально - педагогический университет, ВГСПУ). Конференция была международной, в ней принимали участие коллеги из Голландии и других европейских стран. Выступления иностранных ученых переводила с английского языка на русский жена Юрия Андреевича – Наталья Гороховатская. Участников конференции из разных городов России было очень много. Организация конференции была великолепная. Юрий Андреевич дружил с ректором ВГСПУ - Данильчуком Валерием Ивановичем и вся административная команда университета, кафедры, структурные подразделения работали четко и слаженно. В последующие годы конференция ФССО проводилась каждые два года в различных городах на площадках ведущих университетов: в Ярославле (ЯГПУ), Петрозаводске (КГПУ), Астрахани (АГУ), Дивноморске (Донской государственный технический университет) и многих других. Конечно, основной базой проведения этой конференции был РГПУ им. А. И. Герцена в Санкт – Петербурге.

Юрий Андреевич был одним из авторов идеи создания конференции ФССО. Конференция ФССО являлась и является значимым событием в научно- педагогической деятельности многих ее участников, особенно для молодых, начинающих исследователей. Несколько лет Стефанова Г. П. состояла в Программном комитете конференции и участвовала в его заседаниях в Санкт-Петербурге. Всегда нас радушно встречал Юрий Андреевич, приглашал в свой маленький кабинет, угощал чаем или кофе. Под его руководством на заседаниях осуществлялся тщательный отбор докладов участников, распределение их по секциям. Юрий Андреевич и его коллеги старались привлечь большое число участников, организовывались не только произносимые доклады, но и выступления со стендовыми докладами. Действительно, эта конференция была чрезвычайно многолюдной, востребованной и очень интересной. В дни проведения конференции проходили встречи с ведущими учеными, педагогами, проводились экскурсии в различные структурные подразделения университетов, научные лаборатории, музеи инновационных технических устройств, технопарки. Весьма ценным мероприятием были выступления главных редакторов известных издательств научной и учебной литературы по физике, учебников, учебных пособий, а также демонстрация учебного и научного оборудования по физике. Участники конференции имели уникальную возможность познакомиться с организацией учебного процесса в других вузах, оснащением лабораторий, учебных аудиторий, установить контакты с

учеными, обсудить темы и результаты своих исследований, наметить дальнейшие перспективы работы.

В 2008 году в сентябре конференция ФССО проходила в г. Астрахани, на базе Астраханского государственного университета. Вся наша команда под руководством ректора А. П. Лунева тщательно готовилась к ее проведению. Работали все запланированные секции, «круглые столы», ведущие фирмы «Росучприбор», «L - микро», «Учебная техника», «PHYWE» демонстрировали на отдельных площадках учебное лабораторное и демонстрационное оборудование по физике. Астраханский государственный университет является крупным, динамично развивающимся образовательным центром на юге России, включающий 8 учебных корпусов, 5 общежитий, технопарк, студенческий ресторан, концертный зал на 500 мест, спортивные площадки. Все аудитории были отремонтированы, оснащены современной мебелью и оборудованием. Были проведены экскурсии по вузу, учебным и научным лабораториям. В работе конференции принимал участие известный ученый, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН Крохин Олег Николаевич. Он открывал конференцию, сделал доклад на пленарном заседании, что явилось знаменательным событием для всех участников.

Во время проведения конференции в Астрахани была организована незабываемая поездка на теплоходе по реке Волге с остановкой на острове. Физики, как известно, являются и лириками: пели бардовские песни под гитару, читали стихи, шутили, смеялись. На итоговом заседании конференции Юрий Андреевич Гороховатский сформулировал выработанные руководителями секций предложения, адресованные нашему Министерству и вузам по совершенствованию преподавания физики в магистратуре, бакалавриате, оснащению лабораторий, реализации современных Федеральных государственных стандартов по направлениям педагогического образования, физике конденсированного состояния.

Юрий Андреевич Гороховатский являлся автором учебников, учебных пособий по курсу общей физики, монографий, написанных на высоком научном и методическом уровне. Его научная деятельность была связана и исследованием свойств диэлектриков, электретным эффектом в биоразлагаемых полимерных пленках. Юрий Андреевич оказал неоценимую помощь нашим молодым исследователям, выпускникам нашего университета, которые обучались в магистратуре и аспирантуре РГПУ на кафедре общей и экспериментальной физики (Матвеев Д., Бурда В., Плешакова А., Тимофеева К., Кайрова А., Кударова Н.). Большинство из них успешно защитили кандидатские диссертации.

Матвеев Д. Ю. вспоминает, что, будучи руководителем лаборатории термоактивационной и диэлектрической спектроскопии тонких плёнок НИИ физики РГПУ им. А. И. Герцена, Юрий Андреевич еженедельно просто блестяще читал нам увлекательные и занимательные лекции по физике диэлектриков, а также проводил научные семинары, на которые все ходили с удовольствием. Написанные Юрием Андреевичем на высоком научном и методическом уровне авторские пособия пользовались большой популярностью у студентов-магистрантов и аспирантов. На кафедре Юрия Андреевича работали и работают высококвалифицированные специалисты-физики, такие как В. М. Грабов, В. А. Комаров, Д. Э. Темнов, О. В. Чистякова и др. За годы учебы сотрудники кафедры сумели привить нам интерес к

науке, процессу эксперимента, обсуждению полученных результатов и дискуссиям об их трактовке.

Юрий Андреевич отдавал должное увлечениям аспирантов гитарой и музыкой, приглашая их к участию в кафедральных и университетских мероприятиях.

В памяти астраханских коллег Гороховатский Юрий Андреевич всегда останется крупным ученым, наставником, блестящим организатором и просто замечательным человеком.

ФССО-2025

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ КЛАССИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ

Толстик Алексей Леонидович

доктор физико-математических наук, профессор, tolstik@bsu.by

Белорусский государственный университет, 220030, Республика Беларусь, Минск, пр. Независимости, д. 4

Аннотация

Проанализирован опыт разработки и использования современных лазерных систем, адаптированных к учебному процессу в классических и технических университетах. Анализируются тенденции развития высшего образования в области лазерной физики и нелинейной оптики, отмечается значимость лабораторных практикумов для подготовки квалифицированных специалистов, способных работать с современным лазерным оборудованием и системами регистрации энергетических, временных и спектральных характеристик лазерного излучения. Представлены разработки и методики использования в лабораторных практикумах как классических лазеров с ламповой накачкой, так и современных лазерных систем на основе диодной накачки и активированных оптических волокон, включая генерацию нано-, пико- и фемтосекундных лазерных импульсов. Предлагается ряд работ по спектральной перестройке частоты лазерного излучения: генерация второй и третьей гармоник, параметрическая генерация света, генерация лазера на красителе с селективным резонатором, лазера с распределенной обратной связью, лазера на вынужденном комбинационном рассеянии. Особое внимание уделено практическому использованию лазеров в высокотехнологичных процессах, включая оптическое манипулирование микро- и биообъектами, лазерную атомно-эмиссионную спектроскопию, лазерную обработку материалов. Экспериментальные работы подкреплены расчетными заданиями с использованием компьютерного моделирования режимов генерации непрерывного и импульсного лазерного излучения, его распространения и взаимодействия с различными материалами. Приводится информация по методическим разработкам, внедренным в образовательный процесс на физическом факультете Белорусского государственного университета.

Ключевые слова

Лазерная физика, нелинейная оптика, режимы лазерной генерации, перестройка частоты генерации, применения лазеров, методика преподавания лазерной физики.

ADVANCED LASER SYSTEMS IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF CLASSICAL AND TECHNICAL UNIVERSITIES

Tolstik Alexei L.¹

Dr. Sc. in physics and mathematics, professor, tolstik@bsu.by

Belarusian State University, 220030, Nezavisimosti Ave. 4, Minsk, Republic of Belarus

Abstract

The experience of development and use of advanced laser systems adapted to the educational process in classical and technical universities is analyzed. The tendencies of development of higher education in laser physics and nonlinear optics are analyzed, the importance of laboratory workshops for training of qualified specialists able to work with advanced laser equipment and systems for registration of energy, time and spectral characteristics of laser radiation is noted. Developments and methods of using in laboratory

workshops both classical lamp-pumped lasers and advanced laser systems based on diode pumping and activated optical fibers, including generation of nano-, pico- and femtosecond laser pulses, are presented. A number of works on spectral frequency tuning of laser radiation are proposed: generation of second and third harmonics, parametric light oscillation, generation of dye laser with selective resonator, laser with distributed feedback, laser on stimulated Raman scattering. Special attention is paid to the practical use of lasers in high-tech processes, including optical manipulation of micro- and bio-objects, laser atomic emission spectroscopy, and laser processing of materials. Experimental work is supported by calculation tasks using computer modeling of continuous and pulsed laser radiation generation modes, its propagation and interaction with various materials. The information on methodical developments introduced in the educational process at the Physics Faculty of the Belarusian State University is given.

Keywords

Laser physics, nonlinear optics, laser generation modes, generation frequency tuning, laser applications, laser physics teaching methodology.

Вопрос подготовки квалифицированных научно-технических кадров является одной из приоритетных задач системы высшего образования. Среди наукоемких областей можно выделить лазерную физику, которая преподается практически во всех классических и технических университетах. Лазерные технологии имеют все более широкое распространение и охватывают различные области жизни человека, включая оптоволоконную связь, нано- и биотехнологии, методы оптического исследования сред и лазерной обработки материалов, военные и медицинские применения и многое другое. Бурное развитие лазерных систем в последние десятилетия определяют необходимость постоянной актуализации учебного материала. Наиболее сложные вопросы обусловлены необходимостью модернизации лабораторных практикумов, которые являются неотъемлемой частью подготовки специалистов с практическими навыками работы. Выпускники университетов должны иметь подготовку, позволяющую активно участвовать в научных исследованиях, проводимых в научно-исследовательских институтах, в инновационных разработках промышленных предприятий, а также использовать современное оборудование в технологических процессах.

В Республике Беларусь подготовка специалистов по современным оптическим направлениям развернута в ряде университетов: Белорусский государственный университет (БГУ), Белорусский национальный технический университет, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Гомельский и Гродненский государственные университеты и др. Подготовка специалистов в области лазерной физики по новым учебным планам осуществляется в рамках четырехлетних специальностей «Физика» и «Прикладная физика», а также шестилетней специальности «Фундаментальная физика» с присвоением степени магистра. Например, на физическом факультете, факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ ведется подготовка специалистов по специализациям «Лазерная физика и спектроскопия», «Квантовая радиофизика и лазерные системы», «Физическая оптика», «Лазерные оптические технологии». Углубленная подготовка по лазерной физике и нелинейной оптике на ряде специализирующих кафедр расширяется в связи с введением новых профилей по современным направлениям науки и техники. В последние годы на физическом факультете БГУ была открыта англоязычная магистратура по направлениям «Photonics» и «High Power Laser and Optics». Расширяется магистерская подготовка и для выпускников совместного института Даляньского политехнического университета и

Белорусского государственного университета. Все это требует актуализации лекционных курсов и лабораторных практикумов.

Следует отметить, что выпускаемые в настоящее время промышленностью специализированные лазерные системы не удовлетворяют потребностям учебного процесса, так как в них технически не предусматривается возможность самостоятельного монтажа студентами отдельных элементов (как правило, это закрытые конструкции с оптимизированными характеристиками). Доступ к лазерным элементам разрешается только специалистам. В учебном процессе главное дать практические навыки, научить юстировать лазерные системы, управлять их характеристиками. При этом основное требование – соблюдение требований техники безопасности при монтаже и юстировке лазерных систем студентами.

В рамках государственных научно-технических программ Республики Беларусь в течение 20 лет нами был разработан комплекс лазерного оборудования на основе современной элементной базы [1, 2]. Среди разработок можно выделить следующие:

- Лазер на иттрий-алюминиевом гранате для специального практикума по лазерной физике и нелинейной оптике;
- Учебно-исследовательский комплекс на основе лазера с диодной накачкой;
- Лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации;
- Модульный нелинейно-оптический лазерный комплекс для изучения перестройки частоты на основе параметрических процессов;
- Научно-учебный лабораторный фемтосекундный лазерный комплекс;
- Лабораторный комплекс по нелинейной оптике фемтосекундных импульсов;
- Модульный научно-учебный лазерный комплекс на основе активных и пассивных волоконно-оптических элементов;
- Научно-учебный лазерный лабораторный комплекс для оптического манипулирования микрообъектами (оптический пинцет);
- Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр;
- Образовательный программный комплекс для моделирования процессов взаимодействия лазерного излучения с нелинейными средами и наноструктурированными материалами.

Первая разработка - лазер на иттрий-алюминиевом гранате для специального практикума по лазерной физике и нелинейной оптике (рисунок 1) – была выполнена в 2003 году и до сих пор используется в ряде университетов в лабораторных практикумах и при выполнении научных исследований. Было изготовлено и поставлено 20 лазеров (Беларусь – 6, Россия – 9, Тайвань - 3, Япония – 1, Испания – 1). Базовый практикум по лазерной физике включил лабораторные работы по изучению энергетических и временных характеристик твердотельных лазеров в режиме свободной генерации, пассивной и активной модуляции добротности, пассивной синхронизации мод, генерации второй гармоники. На Петербургской технической ярмарке 2012 года разработанный лазер отмечен серебряной медалью в номинации «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года».

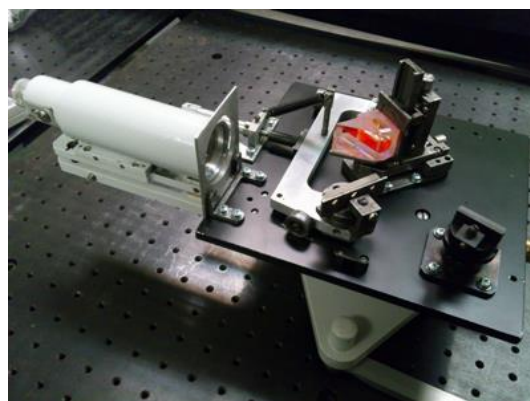
Последующее развитие лазерной физики привело к созданию серии перестраиваемых по частоте лазеров. Были созданы: лазер на красителе с селективным резонатором и возможностью перестройки частоты в диапазоне 100 нм, лазер с распределенной обратной связью, позволяющий получить узкую (менее 100 пм), перестраиваемую по длине волны линию генерации, лазер на вынужденном комбинационном рассеянии с возможностью генерации двух наборов трех стоксовых компонент, переключаемых за счет изменения поляризации излучения накачки (рисунок 2). Лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации предназначен для обучения студентов современным методам управления спектральными характеристиками лазерной генерации и основам конструирования лазерных систем с перестраиваемой по частоте генерацией, а также для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований.



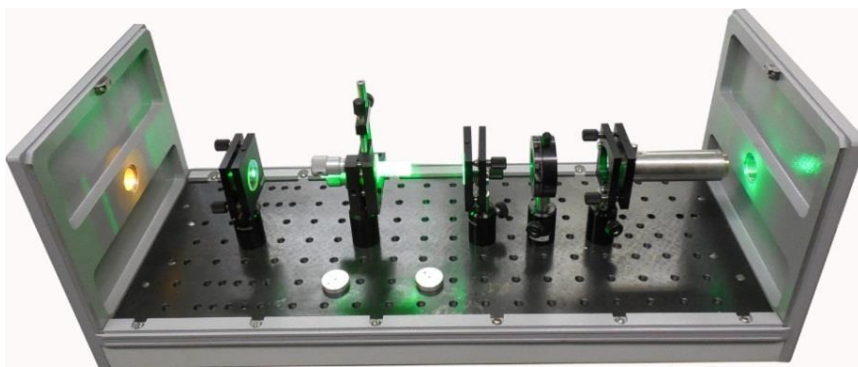
Рисунок 1 — Лазер на иттрий-алюминиевом гранате для специального практикума по лазерной физике и нелинейной оптике (БГУ, СП «Лотис ТИИ»)



а



б



6

Рисунок 2 — Лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации в составе: лазер на красителе с селективным резонатором (а), лазер с распределенной обратной связью (б), лазер на вынужденном комбинационном рассеянии (в)

Следующим шагом было создание модульного нелинейно-оптического лазерного комплекса для изучения перестройки частоты на основе параметрических процессов. Разработка была выполнена совместно с белорусско-японским предприятием «ЛОТИС-ТИИ», изготовлено 10 комплексов, поставленных в Беларусь, Россию, Китая, Объединенные Арабские Эмираты. Модульная структура комплекса (рисунок 3) позволила обеспечить изучение студентами и магистрантами принципов преобразования частоты лазерной генерации на основе нелинейно-оптических процессов (генерация второй и третьей гармоник, параметрическая генерация), а также реализовать узкую линию генерации (0,1 нм) при перестройке частоты наносекундных лазерных импульсов в широком спектральном диапазоне (от 400 нм до 2,4 мкм).



Рисунок 3 — Модульный нелинейно-оптический лазерный комплекс для изучения перестройки частоты на основе параметрических процессов

Последующее развитие лазерной физики обусловило необходимость разработки фемтосекундных лазерных систем. Эти работы выполнялись совместно с Белорусским национальным техническим университетом. Благодаря возможности получения высоких интенсивностей при относительно малых энергиях импульсов и компактности фемтосекундные лазерные системы вытесняют в ряде случаев крупные лазерные установки с большей длительностью импульсов и находят многочисленные применения

(стандарты частоты, обработка материалов, сверхбыстрая спектроскопия и т.д.). Легко достигаемые высокие интенсивности в выходном излучении фемтосекундных систем сделали их незаменимыми в нелинейной оптике, позволяя реализовать такие необычные эффекты, как генерация спектрально широкополосного суперконтинуума, предельно коротких - аттосекундных импульсов, рентгеновского излучения.

Разработанный научно-учебный лабораторный комплекс по нелинейной оптике фемтосекундных импульсов позволил изучить физических основы синхронизации мод и генерации ультракоротких импульсов, приобрести практические навыки по измерению характеристик лазерного излучения фемтосекундной длительности, исследовать особенности генерации второй гармоники фемтосекундных импульсов и генерации суперконтинуума. Комплекс внедрен в учебный процесс на физическом факультете БГУ и используется при проведении научных исследований, выполнении лабораторных работ, курсовых и дипломных проектов, магистерских и кандидатских диссертаций.

Тенденции последних лет в развитии лазерных технологий определяют переход к волоконным лазерным системам с возможностью получения мощной лазерной генерации за счет увеличения длины активной среды. Потребности в адаптированных к промышленному применению волоконных источниках лазерного излучения постоянно возрастают. Неоспоримыми достоинствами этого типа лазеров являются высокая мощность, эффективность и качество пучка, надёжность, низкие эксплуатационные затраты, компактность, отсутствие или минимальное распространение излучения в свободном пространстве. Наличие волоконного вывода излучения позволяет встраивать волоконные лазеры в уже существующие технологические установки. Такие лазеры позволяют получать как непрерывное, так и импульсное (вплоть до сотен фемтосекунд) излучение и широко используются для обработки материалов, например, для лазерной сварки на автомобильных заводах.

Разработанный модульный научно-учебный лазерный комплекс на основе активных и пассивных волоконно-оптических элементов (рисунок 4) позволил осуществить генерацию как непрерывного излучения, так и сверхкоротких фемто- и пикосекундных лазерных импульсов. Новизна разработки определяется использованием модульной структуры комплекса, позволяющей студентам изучать принципы накачки, усиления и генерации лазерного излучения с использованием

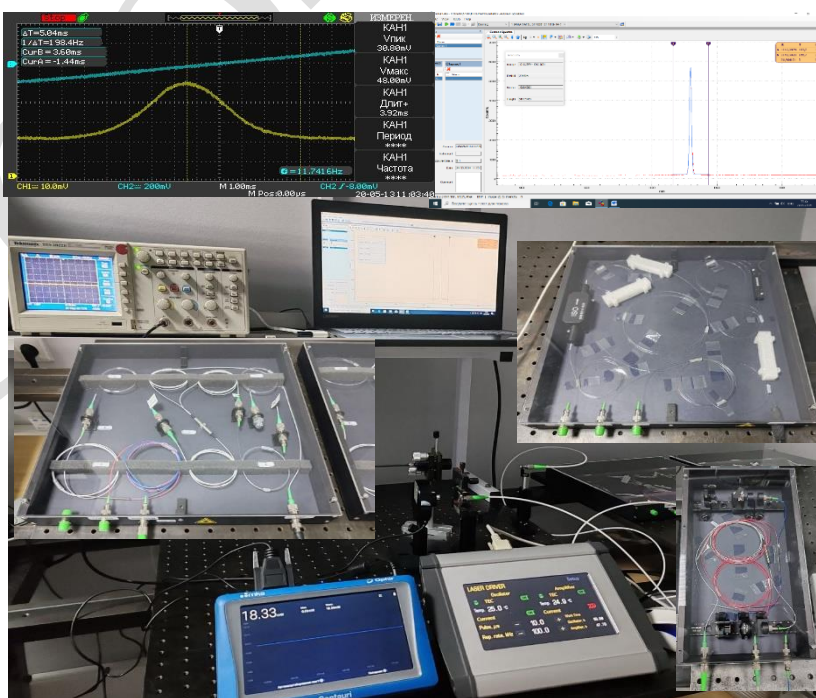


Рисунок 4 — Модульный научно-учебный лазерный комплекс на основе активных и пассивных волоконно-оптических элементов

активированных оптических волокон, а также реализацию перестройки длительности лазерных импульсов в пико- и фемтосекундном диапазонах. Студенты получили возможность изучения принципа генерации лазерного излучения на основе

активированных волокон, включая генерацию и усиление фемтосекундных импульсов, а также использования лазерного излучения для обработки материалов. Эти возможности представляют особый интерес для подготовки специалистов в области современных лазерных, нано- и биотехнологий. Внедрение в 2024 году лазерного комплекса в образовательный процесс на физическом факультете БГУ позволит совершенствовать теоретические знания и развить практические навыки в области оптики, лазерной физики, нанопотоники и физики наноматериалов.

Наряду с разработкой лазерных систем постоянный интерес связан с расширяющимися областями их использования. В качестве примера приведем разработанный научно-учебный лазерный лабораторный комплекс для оптического манипулирования микрообъектами (рисунок 5). Комплекс позволяет студентам ознакомиться с принципом работы оптического пинцета – уникального инструмента, получившего широкое развитие в последнее время. Уникальность оптического пинцета заключается в возможности осуществления захвата и перемещения объектов микронного и субмикронного размера с помощью световых пучков. Преимущество использования световых лучей для управления заключается в том, что это бесконтактный метод, позволяющий осуществлять дистанционное управление микрообъектами в среде, в том числе через прозрачное препятствие, а также гарантирующий отсутствие посторонних примесей в рабочей области. Поставленный лабораторный практикум позволяет изучить принцип действия оптического пинцета, захват и целевую доставку микрообъектов с помощью гауссовых, бесселевых и сингулярных световых пучков, а также исследовать влияние интенсивности и фазово-поляризационной структуры лазерного излучения на силу оптического захвата. Эти возможности представляют особый интерес в ряде областей, таких как нанотехнологии и микромеханика, биотехнологии и микрохирургия.

Таким образом, разработанные комплексы лазерно-оптического оборудования охватывают как базовые (классические) работы, так и широкий спектр расширенных заданий, позволяя проводить лабораторные практикумы с использованием современной элементной базы. Разработки внедрены в учебный процесс на физическом факультете БГУ и используются при подготовке специалистов и магистров в области нелинейной оптики и лазерной физики [3]. Учащиеся приобретают практические навыки работы с современным лазерным оборудованием, опыт юстировки оптических систем, осваивают методики проведения измерений энергетических, временных и спектральных характеристик лазерного излучения, анализа полученных экспериментальных данных и сопоставления с теоретическими расчетами. Благодаря своим техническим характеристикам,

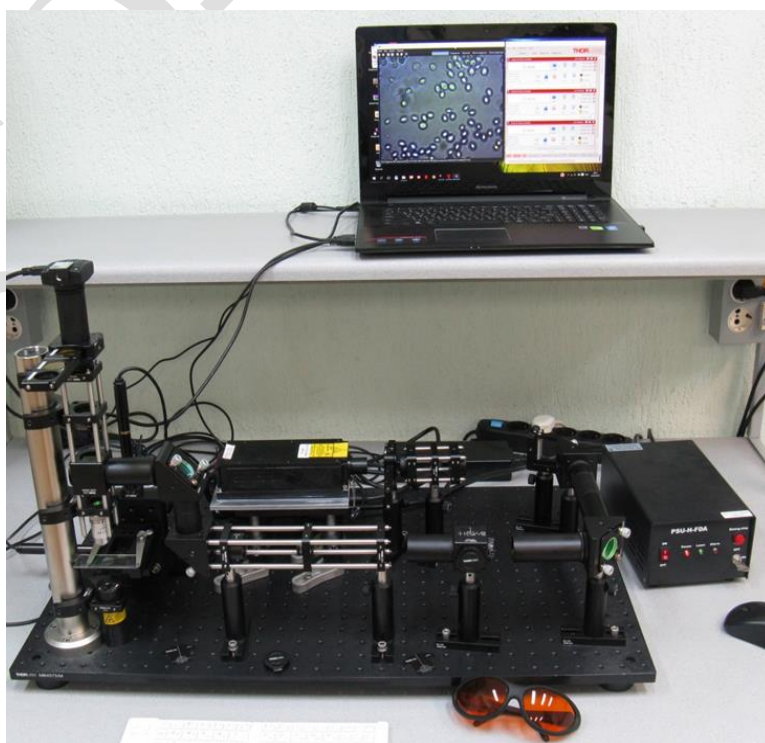


Рисунок 5 — Научно-учебный лазерный лабораторный комплекс для оптического манипулирования микрообъектами (оптический пинцет)

отвечающим современному уровню лазерной техники, разработанные комплексы также эффективно используются при проведении научных исследований.

В заключение отметим, что представленные разработки выполнены в рамках подпрограммы «Научно-учебное оборудование» государственных научно-технических программ Республики Беларусь «Эталоны и научные приборы» и «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» и отмечены пятью серебряными медалями в номинации «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» На Петербургских технических ярмарках.

Список литературы

1. Толстик А. Л. Учебно-научные лабораторные комплексы по лазерной физике / А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, Н. Н. Васильев, И. Н. Агишев // Вестник БГУ. Сер. 1. — 2013. — № 1. — С.3-10.
2. Агишев И. Н. Лабораторный практикум по лазерной физике и нелинейной оптике / И. Н. Агишев И. Н., А. Л. Толстик // Современный физический практикум: материалы XI Международной учебно-методической конференции, Минск, 12-14 октября 2010 года, Белорусский государственный университет. — Минск. — 2010. — С.243-244.
3. Физика лазеров и нелинейная оптика. Лабораторный практикум: учеб. пособие / А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, Д. В. Горбач, И. Н. Агишев. — Минск: БГУ, 2021. — 195 с.

References

1. Tolstik A. L. Uchebno-nauchnye laboratornye komplekсы po lasernoy fizike / A. L. Tolstik, E. A. Melnikova, N. N. Vasil'ev, I. N. Agishev // Vestnik BSU. Ser. 1. — 2013. — № 1. — S.3-10.
2. Agishev I. N. Laboratorniy praktikum po lasernoy fizike i nelineynoy optike / I. N. Agishev, A. L. Tolstik // Sovremenniy fizicheskii praktikum: materialy XI Mejdunarodnoy uchebno-metodicheskoy konferencii, Minsk, 12-14 oktobra 2010 goda, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet. Minsk — 2010. — С.243-244.
3. Fizika laserov i nelineynay optika. Laboratorniy praktikum: ucheb.posobie / A. L. Tolstik, E. A. Melnikova, D. V. Gorbach, I.N. Agishev. — Minsk: BGU, 2021. — 195 s.