

А. В. Пец

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАДАНИЙ  
ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО АТОМНОЙ ФИЗИКЕ  
С УЧЕТОМ НОВОЙ СИСТЕМЫ СИ**

Поступила в редакцию 12.05.2021 г.

Рецензия от 20.05.2021 г.

100

*Изменения в системе СИ, внесенные в 2019 г., недостаточно отражены в задачах практикума по атомной физике. На примере спектра эмиссии атомарного водорода предложено вычислять не только частотную постоянную Ридберга, но и эффективную массу электрона, показатель преломления воздуха. Показано, что цифровой спектрометр имеет достаточную точность для количественного изучения изотопического эффекта от протона.*

*Changes in the SI-2019 system are proposed to be taken into account by correcting of the educational experiment in atomic physics. From the data on the emission spectrum of atomic hydrogen, it was proposed to calculate not only the Rydberg constant, but also the effective mass of the electron, the refractive index of air. It is shown that a digital spectrometer allows one to quantitatively study the isotope effect of a proton.*

**Ключевые слова:** система СИ, лабораторный практикум по атомной физике, цифровой спектрометр, изотопический эффект

**Keywords:** SI system, educational experiment in atomic physics, digital spectrometer, isotope effect

В новой редакции системы СИ [1: 2] введены семь фундаментальных физических величин, имеющих фиксированные числовые значения. Точными величинами по договоренности считаются скорость света в вакууме  $c$ , постоянная Планка  $h$ , элементарный заряд  $e$ , постоянная Больцмана  $k$ , постоянная Авогадро  $N_A$ , одна из частот квантового перехода в цезии-133, светоотдача  $K$ .

Таким образом, многие комбинации физических величин после 2019 г. имеют точные значения, тогда как ранее содержали числовые неопределенности, и наоборот. Например, магнитная постоянная  $\mu_0$  и электрическая постоянная  $\epsilon_0$  теперь являются экспериментально определяемыми величинами, но их произведение детерминировано квадратом скорости света:  $\epsilon_0 \mu_0 = c^2$ .

Вместе с тем значения единиц измерения технических величин (силы тока, напряжения, длины и т. п.) с большой точностью сохранились, но для их воспроизведения не требуется привязка к искусственным эталонам.



Отмеченные особенности развития метрологии физических измерений недостаточно отражены в имеющихся учебных курсах по физике. Например, в лабораторном практикуме по атомной физике становится неактуальным измерение числового значения постоянной Планка (исследования фотоэффекта, спектральных закономерностей атомов и т. д.)

В данной работе предложен обновленный подход к проведению учебного занятия по атомной физике, учитывающий особенности новой системы СИ. В качестве объекта рассмотрим исследование эмиссионного спектра водорода. В стандартной постановке [3] по результатам измерений длин волн требуется оценить значения постоянной Ридберга и затем постоянной Планка. Мы предлагаем иную систему целей и задач, основанную на понятии эффективной массы электрона, где  $m_e$  — масса электрона. Коэффициент  $p$  учитывает изотопический эффект от массы протона  $m_p = p \cdot m_e$ . Постоянную Ридберга представим в следующем виде:

$$R = \frac{e^4}{8h^2} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0^2} \cdot \frac{p}{1+p} m_e.$$

Величина  $\varepsilon_0$  известна с относительной стандартной погрешностью  $1,5 \cdot 10^{-12}$  [2]. Для технических приложений достаточно оставить девять значащих цифр:  $\varepsilon_0 \approx 8,85418781 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ .

Исходя из этого формулируем две основные задачи лабораторного занятия: 1) оценка по результатам измерения  $R$ ; 2) оценка параметра  $p$  для табличного значения массы электрона.

Цель №1 может быть достигнута с использованием призмного спектрометра типа УМ-2. Погрешность определения массы электрона составит менее 5%.

Решение задачи №2 требует большей точности измерения  $R$ . В данной работе показано, что цифровой спектрометр из набора учебного оборудования компании «Научные развлечения» [5] позволяет оценить параметр  $p$  с погрешностью не хуже 2%. Однако необходимо учитывать, что если период  $T$  волны является инвариантом, то длина волны  $\lambda_3$ , измеренная спектрометром, зависит от показателя преломления  $n$  воздуха:

$$\lambda_3 = \frac{c}{n} \cdot T.$$

Период  $T$  электромагнитной волны находим по формуле Бальмера [4], что позволяет поставить задачу №3: спектроскопическое определение показателя преломления воздуха. Приведем результаты решения задач №2 и 3.

Измеренные цифровым спектрометром длины волн трех последовательных эмиссионных линий атомарного водорода:

$$\lambda_\alpha = 656,30 \text{ нм}, \lambda_\beta = 486,13 \text{ нм}, \lambda_\gamma = 434,03 \text{ нм}.$$



Показатель преломления воздуха вычисляли по эмпирической формуле для нормальных условий [4]:

$$n = 1 + 28,71 \cdot 10^{-5} (1 + 5,67 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda_3^2).$$

Здесь длина волны  $\lambda_3$  в воздухе выражена в нм.

Результаты оценки параметра  $p$  изотопического сдвига спектральных линий водорода приведены в нижеследующей таблице:

Показатель преломления воздуха	Оценка $p$
$n = 1$	4000
$n = 1,0002871$	1860
Учет дисперсии показателя преломления	1862

102

Физический смысл показателя  $p$  состоит в том, что он определяет отношение массы ядра водорода (протона) к массе электрона. Табличное значение  $p_{\text{табл}} = 1836$ . Отклонение измеренного значения  $p$  от табличного составляет менее 2 %.

Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что оценка величины  $p$  чувствительна к выбору значения показателя преломления газовой среды, в которой находится приемник. Поэтому имеет смысл и обратная задача №3 — по заданному (табличному) значению  $p$  найти показатель преломления воздуха:  $n = 1,000295$ .

Таким образом, переход к системе СИ-2019 позволяет расширить спектр задач физического лабораторного практикума.

### Список литературы

1. *Committee on Data for Science and Technology* : [официальный сайт]. URL: <https://codata.org> (дата обращения: 07.05.2021).
2. *National Institute of Standards and Technology* : [официальный сайт]. URL: <https://www.nist.gov> (дата обращения: 07.05.2021).
3. *Определение постоянной Ридберга и постоянной Планка из спектра атомарного водорода: метод, указания / сост. Л. Г. Скорняков, В. Г. Мазуренко. Екатеринбург, 2017.* URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/47052/1/pR\\_pP\\_2017.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/47052/1/pR_pP_2017.pdf) (дата обращения: 08.05.2021).
4. *Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. 2-е изд., испр. СПб., 2010.*
5. *Научные развлечения* : [официальный сайт]. URL: <https://nau-ra.ru> (дата обращения: 08.05.2021).

### Об авторе

Александр Васильевич Пец — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: [pets119@rambler.ru](mailto:pets119@rambler.ru)

### The author

Dr Aleksandr V. Pets, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: [pets119@rambler.ru](mailto:pets119@rambler.ru)