

Типовые ошибки при решении заданий раздела «Квантовая физика» в ЕГЭ по физике и способы их устранения

**Филиппов
Владимир Владимирович**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики ЛГПУ имени П.П. Семёнова-Тян-Шанского, председатель региональной предметной комиссии по проверке заданий с развёрнутым ответом ЕГЭ по физике в Липецкой области, wwfilippow@mail.ru

**Манаенкова
Ольга Анатольевна**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики и физики ЛГПУ имени П.П. Семёнова-Тян-Шанского, omali@yandex.ru

**Басова
Анастасия Владимировна**

студентка ЛГПУ имени П.П. Семёнова-Тян-Шанского, учитель физики МАОУ СОШ № 18 г. Липецка, nasty48-48@mail.ru

Ключевые слова: единый государственный экзамен по физике, квантовая физика, методика преподавания физики, типичные ошибки, единый государственный экзамен.

По мере становления физики как науки учёные выяснили, что законы и принципы, образовавшиеся на базе исследования макроскопических объектов, не могут быть применены в области микромира. Для области атомных масштабов были найдены новые законы и принципы, которые составляют основу квантовой физики. Раздел «Квантовая физика» — один из самых сложных для изучения в школе. Многие концептуальные вопросы квантовой механики дискутируются и не имеют завершённой картины описания в школьном курсе физики¹. Первое упоминание о строении вещества встречается в 7-м классе, затем в 8-м классе при изучении тепловых и электрических явлений, в 9-м классе при знакомстве с физикой атомного ядра. И только в 11-м классе учащиеся приступают к изучению основных принципов и законов квантовой физики, которые носят, по мнению Ю.А. Саурова, пропедевтический характер². Курс квантовой физики имеет ряд особенностей, делающих этот раздел сложным для понимания в школьном курсе физики. Подробнее мы рассмотрим это ниже при изложении методических рекомендаций по устранению типичных ошибок в выполнении заданий ЕГЭ данного раздела.

Целью данной статьи является анализ типичных ошибок, возникающих у учащихся при решении задач в разделе «Квантовая физика», определение способов их устранения, а также обсуждение методических рекомендаций для учителей, подготовленных на основе анализа типовых

¹ Марков В.Н., Пухов Н.М., Твердислов В.А. Основы современной физики и космологии. От неживого к живому: учебное пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2021. — 326 с.

² Сауров Ю.А., Уварова М.П. Теория и методика обучения физике: учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Юрайт, 2021. — 263 с.

Таблица 1

Средний процент выполнения заданий по квантовой физике в КИМ 2016–2021 гг.

№ задания (уровень)	Год написания КИМ по физике в Липецкой области					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
19 (б)	—	64,71	88,506	77,56	86,96	74,35
20 (б)	76,91	61,34	75,90	86,54	72,48	60,67
21 (б)	77,45	55,46	55,20	51,60	53,56	63,10
22 (б)	76,83	—	—	—	—	—
26 (п)	—	—	—	—	25,76	—
27 (п)	27,29	—	8,80	—	—	—
31 (в)	—	26,89	—	—	—	—
32 (в)	—	—	—	5,34	—	10,50
МПБ	50	50	52	52	53	53
МПБКФ	5	7	5	7	5	7
СПБ	24,0	26,5	25,8	27,5	27,3	29,1
СПБКФ	3,35	3,18	3,01	2,83	2,92	2,93

ошибок участников ЕГЭ 2016–2021 гг. по физике.

Основные материалы, используемые для анализа, взяты из региональных отчётов ЕГЭ 2016–2021 гг. по Липецкой области и ежегодных методических рекомендаций

для учителей, подготовленных на основе анализа типовых ошибок участников. В табл. 1 и на рис. 1 приведены статистические данные результатов выполнения заданий ЕГЭ по квантовой физике в период с 2016 по 2021 гг. в Липецкой области.

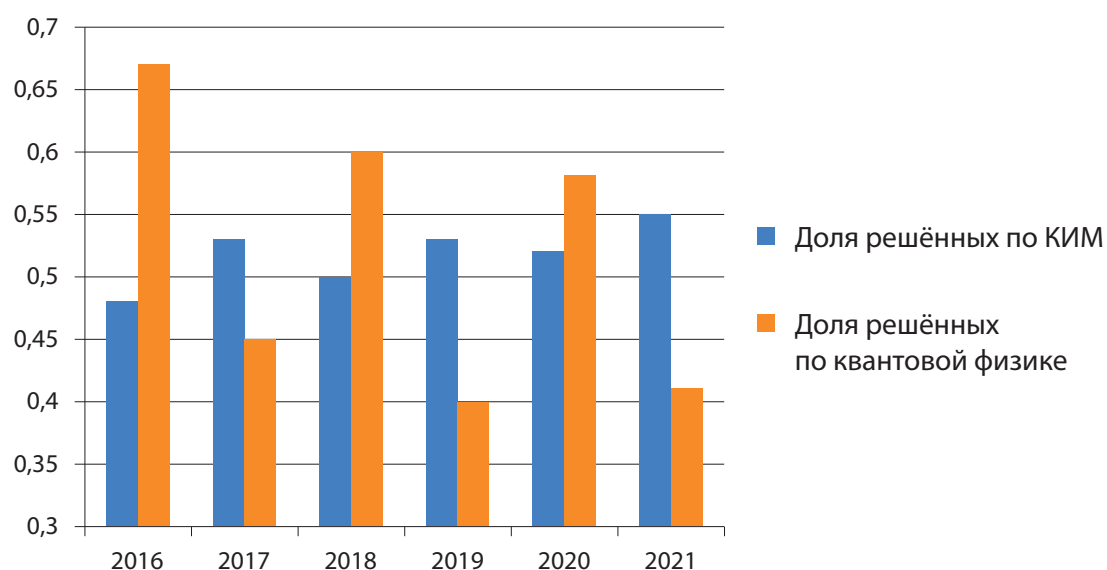


Рис. 1. Результаты выполнения заданий ЕГЭ по квантовой физике в Липецкой области

Доля «решённых по КИМ» задач определялась отношением среднего первичного балла (СПМ) в данном году к максимальному первичному баллу (МПБ), отводимому на всю работу (согласно спецификации КИМ данного года). Доля «решённых по квантовой физике» заданий определялась аналогично: отношение полученного среднего первичного балла по квантовой физике (СПБКФ) к части баллов, отводимых на данный раздел в соответствующем году (МПБКФ — максимальный первичный балл по квантовой физике).

Данные рис. 1 свидетельствуют, что средний процент выполнения заданий по квантовой физике весьма нестабилен. Это связано с тем, что в различные годы по данному разделу предлагаются КИМ, существенно отличающиеся по уровню требуемых знаний, умений и навыков³. Задания по квантовой физике требуют особого внимания, так как процент их выполнения остаётся ниже ожидаемых результатов в случае включения задач высокого уровня в данный раздел.

Из табл. 1 видно, что задания 19–22, имеющие базовый уровень сложности, выполнены более чем на 50%. Выполнение заданий 19 и 20 достигает высокого уровня 86% (охватываемые темы: периодическая система Менделеева, химические элементы, ядерные реакции, закон радиоактивного распада, атомные спектры, энергетические уровни, внешний фотоэффект, свойства фотонов), задания 21 — 77%, а задания 22 — 76%. Следует отметить, что в рассматриваемом временном интервале только в 2016 г. задание 22 было посвящено квантовой физике⁴. Задания 19 и 20 предполагают проверку знаний базового уровня, не требуют серьёзных расчётов и направлены на усвоение основных правил и законов квантовой физики. Задание 21 на соот-

ветствие проверяет знание изменений физических величин в процессах и умение устанавливать соответствия между графиками и физическими величинами, между физическими величинами и формулами и выполняется, как правило, чуть хуже. Наиболее низкие результаты показаны по темам: фотоэффект, энергетические переходы в атоме, закон радиоактивного распада (анализ графика).

Задания повышенного уровня сложности 26 и 27 выполнены менее чем на 30%. Существенные затруднения вызвала в 2018 г. задача повышенного уровня на тему «внешний фотоэффект», её смогли решить 8,8% учащихся:

На металл падает поток фотонов с длиной волны в 3 раза меньше «красной границы» фотоэффекта. Во сколько раз уменьшится максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, вылетающих из этого металла, если длину волны падающего света увеличить в 1,5 раза?

Представленная выше задача требовала существенно больше вычислительных шагов, чем на базовом уровне, что могло вызвать «математические» затруднения. Также необходимо указать на недостаточный уровень освоения понятия «красная граница фотоэффекта».

В целом задания развёрнутой части 27, 31 и 32, имеющие повышенный и высокий уровень сложности, выполнены менее чем на 30%. Темы указанных заданий охватывают широкий круг вопросов: фотоны и их свойства, внешний фотоэффект и его применение, давление света, опыт Лебедева, корпускулярно-волновой дуализм, ядерная модель атома, квантовые постулаты Н. Бора, испускание и поглощение света атомами, спектры, строение атомного ядра, закон радиоактивного распада, ядерный реактор и др.

Невысокий процент выполнения этих заданий, на наш взгляд, объясняется тем, что они, как правило, носят интегрированный характер и требуют применения знаний из других разделов, таких как кинематика, молекулярная физика, электродинамика и волновая оптика. Учитывая всё вышесказанное, рассмотрим наиболее частые ошибки и сложности при решении заданий высокого уровня.

³ Демидова М.Ю. Методические рекомендации для учителей, подготовленные на основе анализа типичных ошибок участников ЕГЭ 2020 года по физике // Педагогические измерения. — 2020. — № 3. — С. 91–112.

Демидова М.Ю. Методические рекомендации для учителей, подготовленные на основе анализа типичных ошибок участников ЕГЭ 2020 года по физике // Педагогические измерения. — 2016. — № 3. — С. 74–91.

⁴ Там же.

Пример задания 31

При увеличении в 2 раза частоты света, падающего на поверхность металла, запирающее напряжение для вылетающих с этой поверхности фотоэлектронов увеличилось в 3 раза. Первоначальная длина волны падающего света была равна 250 нм. Какова частота, соответствующая «красной границе» фотоэффекта для этого металла?

Типичные ошибки:

- учащиеся не знают понятия «запирающее напряжение»;
- не могут правильно записать положения теории и закон фотоэффекта, а также описать вновь вводимые в решении буквенные обозначения физических величин;
- совершают математические ошибки при вычислении.

Пример задания 32

На расстоянии 6 м от точечного источника монохроматического излучения с длиной волны 0,6 мкм перпендикулярно падающим лучам расположена пластинка площадью 8 мм², на которую падает каждую секунду $6 \cdot 10^{12}$ фотонов. Какова мощность излучения источника, если он излучает свет одинаково во все стороны? Площадь сферы радиусом R рассчитывается по формуле: $S = 4\pi R^2$.

Типичные ошибки:

- учащиеся не могут выделить часть энергии, падающей на часть сферы;
- испытывают трудности при использовании формул для внешнего фотоэффекта;
- путают мощность и энергию;
- совершают математические ошибки при вычислении.

Указанные сложности и ошибки при решении задач обусловлены неумением применять законы квантовой физики в нестандартных ситуациях, недостаточной практикой решения задач, особенно требующих знания различных разделов физики, несформированностью необходимого математического аппарата.

Несмотря на то что в большинстве школ региона выстроена система профильного обучения, способная оказывать поддержку учащимся при достаточной мотивации к обучению, где на изучение квантовой физики отводится около

45–50 ч, вопросы повышения качества выполнения заданий повышенного и высокого уровня сложности раздела «Квантовая физика» стоят достаточно остро. Повышение качества изучения указанного раздела требует от учителя не только увеличения объёма часов и механического прорешивания подобных задач КИМ ЕГЭ из данного раздела, но и большой методической работы.

Исторически квантовая физика как фундаментальная теория появилась сравнительно недавно и изучается в конце школьного курса физики. Её изучение сопровождается определёнными трудностями: небольшим количеством демонстрационных опытов, высокой степенью абстракции, применением теоретических моделей, невозможностью осуществления непосредственного наблюдения явлений в микромире. Для успешного формирования основных квантово-механических понятий, по мнению Ю.А. Саурова, необходимо их разнообразное и многократное применение⁸.

Основные рекомендации по устранению пробелов в изучении раздела «Квантовая физика» в целях повышения качества выполнения заданий ЕГЭ сводятся к работе учителя по следующим направлениям.

Формирование понятий квантовой физики путём перехода от материальных объектов через чувственное восприятие к абстрактному мысленному образу и тем самым развитие у учащихся теоретического мышления, то есть мышления, способного использовать абстрактные понятия для объяснения конкретных физических понятий.

Развитие теоретического мышления предполагает решение квантово-механических модельных задач, примеры которых представлены М.Ю. Королёвым в статье «Квантово-механические модельные задачи в школьном курсе физики»⁹. А в указанной выше работе Ю.А. Саурова и К.А. Коханова приводятся общие и частные вопросы

⁸ Сауров Ю.А., Коханов К.А. Освоение границ применимости знаний при изучении квантовой физики // Физика в школе. — 2019. — № 6. — С. 19–27.

⁹ Королёв М.Ю. Квантовомеханические модельные задачи в школьном курсе физики // Физика в школе. — 2011. — № 6. — С. 49–53.

методики рассмотрения границ применимости знаний при изучении современной физики, что особенно актуально в свете изменений в ЕГЭ 2022 г.

Усиление наглядности на уроке: использование не только зрительных образов изучаемых объектов, но и различных моделей как опоры для мышления и памяти (применение таблиц, графиков, материальных и идеальных моделей, использования мысленного эксперимента).

Например, при изучении темы фотоэффекта имеет смысл обращаться к следующим графическим задачам.

Выделение достаточного времени на решение задач и последовательность действий при их решении. При этом важны анализ текста физической задачи или физического явления, рассматриваемого в ней; составление модели, описывающей данное явление; запись законов, необходимых для описания модели, их обоснование; рассмотрение границ применимости законов; составление плана решения; собственно решение и анализ полученных результатов.

Выполняя анализ задачи, учитель может расставлять акценты на теоретическом

№ 1. На рис. 2 приведён график зависимости задерживающего напряжения от частоты электромагнитного излучения, действующего на катод вакуумного фотоэлемента. Какое задерживающее напряжение соответствует точке А на графике?⁷

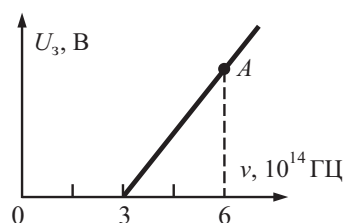


Рис. 2

№ 2. На рис. 3 показана вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента, на катод которого действует свет с длиной волны 450 нм. Найдите красную границу фотоэффекта для данного катода⁸.

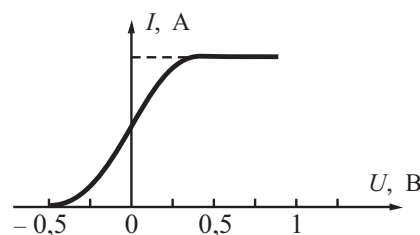


Рис. 3

№ 3. Для определения постоянной Планка была составлена цепь, представленная на рис. 4. Когда скользящий контакт потенциометра находится в крайнем левом положении, гальванометр при освещении фотоэлемента регистрирует слабый фототок. Передвигая скользящий контакт вправо, постепенно увеличивают запирающее напряжение до тех пор, пока не прекратится фототок. При освещении фотоэлемента фиолетовым светом с частотой $\nu_2 = 750$ ТГц запирающее напряжение $C_{32} = 2$ В, а при освещении красным светом с частотой $\nu_1 = 390$ ТГц запирающее напряжение $C_{31} = 0,5$ В. Какое значение постоянной Планка было получено?⁹

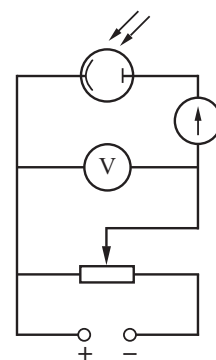


Рис. 4

⁷ Кирик Л.А., Генденштейн Л.Э., Гельфгат И.М. Задачи по физике для профильной школы с примерами решений. 10–11 классы / под ред. В.А. Орлова. — М.: ИЛЕКСА, 2017. — 416 с.

⁸ Там же.

⁹ Рымкевич А.П. Физика. Задачник. 10–11 кл.: пособие для общеобразоват. учреждений — 10-е изд., стереотип. — М.: Дрофа, 2006. — 188 с.

материале, тем самым делая применение законов квантовой физики более осмысленным¹⁰.

Поскольку само решение выполняется с помощью математических преобразований физических формул, логических умозаключений, расчётов, оценок порядка полученной величины, то на этом этапе алгоритмические предписания, приёмы действия могут существенно облегчить получение конечного результата. Здесь учитель может отрабатывать приёмы решения задач для закрепления и умения их использовать в дальнейшем. А для этого, на наш взгляд, необходима более ориентированная самостоятельная работа учащегося.

Самостоятельная работа не должна сводиться только к решению большого количества типовых задач, но включать в себя работу с текстом учебника, дополнительной литературой, работу с наглядным материалом: графиками, таблицами, рисунками.

Использование исторического материала, методологических положений, интерпретация новых понятий, строгая логика поучения нужных выводов из экспериментов.

Например, после изучения темы «Световые кванты. Уравнение фотоэффекта» учащимся можно порекомендовать статью А. Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» Изучив её, учащиеся могли бы ответить на вопросы, поставленные учителем, например, «отказывается ли Эйнштейн от волновой теории света, выдвигая гипотезу о квантах света? Совпадает ли формула, приводимая в статье, с формулой в учебнике?» и т.д.

Усиление практической направленности при изучении теоретического материала (решение физических задач, выполнение физических опытов, применение изученных явлений на практике).

¹⁰ Сауров Ю.А. Мултановский В.В. Квантовая физика: модели уроков: кн. для учителя — М.: Просвещение, 1996. — 272 с.

Изучение квантовой физики немислимо без формирования мировоззренческих и методологических знаний. Для глубокого понимания квантовых явлений учащимся необходимо видеть место квантовой теории в физике. На примере квантовой физики особенно наглядна роль науки в жизни современного общества. Использование квантовой физики и развитие современных отраслей науки, таких как нанотехнологии, биоинженерия, атомная энергетика и др.¹¹

Стоит отметить, что в целях повышения методического и дидактического уровня преподавания школьного курса физики в регионе регулярно проводятся мероприятия с учителями физики на базе ЛГПУ им. П.П. Семёнова-Тян-Шанского: методические семинары, региональные конференции, курсы повышения квалификации. Все они направлены на оказание необходимой методической помощи в преподавании сложных аспектов различных разделов физики, в том числе и квантовой; методики решения олимпиадных задач, задач ЕГЭ высокой и повышенной сложности. Кроме того, регулярно проводится анализ типичных ошибок учащихся ЕГЭ предыдущих лет. В регионе успешно функционирует методическое объединение учителей физики, курсы повышения квалификации при Институте развития образования Липецкой области, проводятся предметные научно-практические конференции, способствующие повышению качества преподавания физики.

Важность раздела квантовой физики аргументирована её фундаментальностью для осмысления свойств материи. Без правильного понимания основополагающих законов физики микромира невозможно представить современную биологию, медицину, химию, технологию и технику. Развитие информационных технологий также требует применения квантовых вычислений, что подчёркивает важность изучения квантовой физики и знания её основ для широкого круга специалистов.

¹¹ Там же.