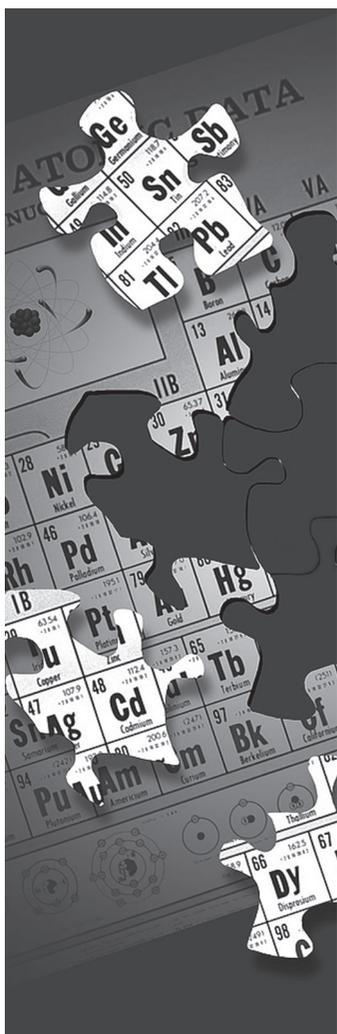


И. Ю. Кочергина, О. Н. Рыжова
МГУ им. М. В. Ломоносова

РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

в конкурсных и олимпиадных задачах



Способы применения радиоактивных материалов в жизни современного человечества очень разнообразны. Приведём лишь два примера. Радионуклиды давно используются в медицине для лечения и диагностики заболеваний. Для внедрения инновационных подходов к терапии заболеваний необходимо создание новых источников излучения с заданными свойствами. В диагностике для обнаружения новообразований и других видов патологии используют позитронно-эмиссионную томографию, возможности которой в значительной степени определяются арсеналом радиоактивных фармацевтических препаратов — биологически активных молекул, в состав которых входят короткоживущие нуклиды [1]. Поиск новых радиофармпрепаратов и разработка методов их синтеза — поле деятельности учёных-радиохимиков.

Не менее важная сфера применения радионуклидов — ядерная энергетика. Около 17% электроэнергии в мире производится на атомных электростанциях [2, 3]. Кроме того, использование радионуклидов в качестве первичных источников энергии позволяет создавать компактные энергетические установки. Ключевое преимущество таких ядерных батарей заключается в том, что они не требуют обслуживания на протяжении срока работы, который измеряется десятками лет. Именно поэтому они так важны при исследовании космоса — соединения радиоактивных элементов применяются в ядерных батареях для космических аппаратов [4]. Подобные источники энергии используются также и на Земле, в труднодоступных зонах, например на арктических станциях.

За время применения человечеством радионуклидов накопились значительные объёмы разнообразных радиоак-

тивных отходов. Термин «объекты ядерного наследия» объединяет законсервированные, выведенные из эксплуатации атомные электростанции и исследовательские реакторы, хранилища радиоактивных отходов, рудники, где ранее велась добыча соединений радиоактивных элементов. Изучение радиоактивности необходимо для мониторинга радиационного загрязнения окружающей среды, контроля за выбросами радиоактивных веществ и обеспечения безопасности населения [5].

В целом можно заключить, что изучение физики и химии соединений радионуклидов играет важную роль в различных аспектах жизни, от медицины и энергетики до охраны окружающей среды. Знания в этой пограничной между химией и физикой области помогают оптимальным образом использовать радиоактивные материалы, обеспечивая безопасность и благополучие общества.

Рассмотрим, как эта важная тема отражается в материалах ЕГЭ и вступительных экзаменов по химии и физике.

Явление радиоактивности и радиоактивные превращения изучаются в школьных курсах химии и физики. А вот на итоговой аттестации эту тему можно встретить лишь в КИМ ЕГЭ по физике. В качестве примера приведём типовое задание 16 из демоверсии ЕГЭ по физике 2024 г. [6]: «Ядро платины ${}_{78}^{174}\text{Pt}$ испытывает α -распад, при этом образуются α -частица и ядро химического элемента ${}_{Z}^AX$. Определите заряд Z (в единицах элементарного заряда) ядра X ».

Если говорить о вступительных экзаменах в университет, то вопросы о радиоактивности и радиоактивных превращениях присутствуют в программах для поступающих в МГУ как по физике, так и по химии (см. таблицу), причём наблюдается практически полное перекрытие программ по следующим пунктам: состав ядра атома, изотопы, радиоактивные превращения

и ядерные реакции. Налицо проявление межпредметного характера данной темы: знания в области ядерных превращений важны и для будущих физиков, астрономов и геологов, которым предстоит испытание по физике, и для будущих химиков или медиков, которые готовятся проходить дополнительное испытание по химии.

Сопоставление программ для поступающих в МГУ по физике [7] и по химии [8]

Физика	Химия
Состав ядра атома. Изотопы. Энергия связи атомных ядер. Понятие о ядерных реакциях. Радиоактивность. Виды радиоактивных излучений и их свойства. Цепные ядерные реакции. Термоядерная реакция	Строение атома. Атомное ядро. Изотопы. Стабильные и нестабильные ядра. Радиоактивные превращения, деление ядер и ядерный синтез. Уравнение радиоактивного распада. Период полураспада

Чтобы определить, насколько часто встречаются задачи на радиоактивные превращения в материалах письменных вступительных экзаменов по химии и в заданиях университетских химических олимпиад, таких как «Покори Воробьевы горы!» и «Ломоносов», мы проанализировали весь массив опубликованных конкурсных задач с 1990 г. и до настоящего времени [9–13]. Было обнаружено 20 оригинальных задач разной степени сложности, при этом можно отметить более частое появление комплексных расчётных задач на радиоактивность в последнее десятилетие. В качестве примеров мы выбрали несколько экзаменационных и олимпиадных заданий разных лет, расположив их в порядке усложнения.

Первые две задачи относительно простые, в них проверяется наличие базового представления о составе атома и о видах радиоактивных превращений. Задача 2 лишь немногим сложнее задачи из КИМ ЕГЭ по физике, приведённой выше, и то лишь за счёт того, что в ней фигурируют сразу два вида превращений — и α -, и β -распад.

Задача 1. Сколько протонов, нейтронов и электронов входит в состав атома урана-238?

Решение

Номер элемента уран в таблице Менделеева — 92. Это означает, что заряд ядра атома урана $Z = 92$, число протонов, которые обеспечивают такой заряд, также равно 92. Поскольку атом в целом электронейтрален, число отрицательно заряженных электронов в атоме урана также составляет 92. Число нейтронов равно разности массового числа и заряда ядра атома:

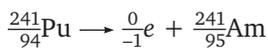
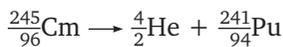
$$N = 238 - 92 = 146.$$

Ответ: 92 протона, 146 нейтронов, 92 электрона.

Задача 2. При α -распаде ядра атома кюрия ^{245}Cm образуется радиоактивный изотоп элемента X, ядро которого, в свою очередь, претерпевает β -распад. Определите X, запишите уравнения двух упомянутых ядерных превращений.

Решение

Для успешного решения этой задачи необходимо знать, что представляют собой α - и β -частицы — это ядро атома гелия ^4_2He и электрон e^- соответственно. Тогда можно записать уравнения распадов, соблюдая баланс массы и заряда:



Ответ: X — изотоп плутония $^{241}_{94}\text{Pu}$.

Следующая задача также посвящена естественным радиоактивным превращениям. Её решение основано на том, что только α -распад сопровождается изменением (уменьшением на 4 единицы) массы атома, а на заряд ядра атома влияют оба типа превращений, но по-разному. Задачу можно попытаться решить подбором, записывая последовательно уравнения α - и β -распадов

в надежде получить в результате требуемый нуклид, однако гораздо экономичнее оказывается другой способ решения, не подразумевающий записи уравнений распадов, а только вычисления.

Задача 3. В результате серии последовательных радиоактивных распадов нуклид ^{237}Np превращается в нуклид ^{205}Tl . Сколько α - и β -распадов включает эта серия ядерных превращений?

Решение

Обозначим число α -распадов через x , число β -распадов — через y . Изменение массы атома связано только с α -распадами:

$$4x = 237 - 205 = 32,$$

$$x = \frac{32}{4} = 8.$$

Итак, серия радиоактивных превращений включала 8 α -распадов.

Поскольку β -частица — электрон с нулевым массовым числом и единичным отрицательным зарядом, общее изменение заряда ядра атома после серии превращений можно выразить как

$$93 - 81 = 2x - y,$$

$$12 = 16 - y,$$

$$y = 4.$$

Ответ: 8 α -распадов, 4 β -распада.

Следующая задача показывает развитие идеи задачи 3. Здесь также нужно определить число произошедших α -распадов. Кроме того, чтобы получить правильный ответ, учащиеся должны сопоставить образование гелия в результате ядерных реакций с тем фактом, что α -частица — это ядро атома гелия.

Задача 4. Горная порода содержит 508 г тория-232 и 100 г свинца-208, который образовался из тория в результате цепочки радиоактивных распадов. Сколько процентов тория, изначально содержавшегося в породе, распалось? Сколько литров гелия (н.у.) при этом образовалось?

Решение

Цепочка распадов тория-232 заканчивается устойчивым нуклидом свинец-208: $^{232}\text{Th} \rightarrow \dots \rightarrow ^{208}\text{Pb}$. Определим количество вещества образовавшегося свинца, которое равно количеству вещества распавшегося тория:

$$n(^{208}\text{Pb}) = \frac{m}{M} = \frac{100}{208} = 0,481 \text{ (моль)},$$
$$n_{\text{расп}}(^{232}\text{Th}) = n(^{208}\text{Pb}) = 0,481 \text{ моль}.$$

Масса распавшегося тория-232 составляла

$$m_{\text{расп}}(^{232}\text{Th}) = n \cdot M = 0,481 \cdot 232 = 111,5 \text{ (г)}.$$

Изначально в породе содержалось тория-232

$$m(^{232}\text{Th}) = 508 + 111,5 = 619,5 \text{ (г)}.$$

Доля распавшегося изотопа: $w = \frac{111,5}{619,5} = 0,180$ (или 18,0%).

Цепочка распадов включает α - и β -распады. Поскольку массовое число меняется только при α -распаде, можно найти число α -распадов:

$$\frac{232-208}{4} = 6.$$

Найдём количество вещества и объём (при н.у.) выделившегося в результате α -распадов гелия:

$$n(\text{He}) = 6 \cdot 0,481 = 2,886 \text{ (моль)},$$

$$V(\text{He}) = 2,886 \cdot 22,4 = 64,6 \text{ (л)}.$$

Ответ: 18,0%; 64,6 л.

Кроме естественной радиоактивности, участники экзаменов или олимпиад должны быть знакомы и с искусственными ядерными реакциями. Им посвящены очень удачно дополняющие друг друга задачи 5 и 6. В первой из них необходимо лишь определить массовое и зарядовое число ядра нового атома, при этом не требуется уравнение ядерной реакции. В условии второй задачи определены и сталкивающиеся атомы, и образующийся атом нового элемента. Решающий задачу должен самостоятельно сделать

вывод о том, что вместе с новым атомом образуются три нейтрона, которым в сумме соответствует нулевой заряд и масса 3.

Задача 5. При столкновении ядер цинка-70 и свинца-208 выделяется нейтрон и образуется ядро нового элемента. Определите массовое число и заряд этого ядра.

Решение

Учитывая то, что должны соблюдаться балансы массы и заряда, определим массовое число и заряд ядра нового элемента:

$$A = 70 + 208 - 1 = 277,$$

$$Z = 30 + 82 = 112.$$

Ответ: 277; 112.

Задача 6. В г. Дубне Московской области находится Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), в котором на ускорителе тяжёлых ионов были синтезированы изотопы многих новых элементов Периодической системы. Так, бомбардировка ядер ^{243}Am (мишени) ионами ^{22}Ne привела к образованию ядер изотопа элемента с номером 105 (дубний, ^{262}Db). Запишите уравнение этой ядерной реакции. Кратко поясните, почему мишень облучают ионами, а не нейтральными атомами.

Решение

Уравнение ядерной реакции:



Для получения сверхтяжёлого ядра бомбардирующая частица должна иметь большую кинетическую энергию (скорость). До высоких скоростей удаётся разогнать именно ионы, поскольку заряженные частицы хорошо реагируют на приложенное электрическое и магнитное поле, изменяя траекторию и скорость движения.

Последний вопрос задачи 6 оказался трудным для участников олимпиады «Ломоносов», где она была предложена учащимся 11 классов. Многие из них ответили, что мишень облучают именно ионами, так

как ионы — более реакционноспособные частицы. В этом неправильном ответе явно проглядывает смешение понятий «химическая реакция» и «ядерная реакция».

Рассмотрение задач на радиоактивные превращения не будет полным, если не коснуться такого важного аспекта, как кинетика естественных радиоактивных превращений. Закон радиоактивного распада, связывающий массу радиоизотопа в определённый момент времени с его исходной массой и периодом полураспада, входит в программу для поступающих в МГУ по химии. Следующая задача иллюстрирует его применение.

Задача 7. «Тирольский ледяной человек», мумия, обнаруженная в леднике на севере Италии в 1991 г., идеально сохранилась. Это позволило провести радиоуглеродный анализ, показавший, что содержание ^{14}C в образце составляет 69% по сравнению с живыми организмами. Определите возраст мумии, если период полураспада ^{14}C равен 5730 лет.

Решение

Закон радиоактивного распада:

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau}},$$

где m_0 — исходная масса изотопа в образце, m — масса изотопа в образце к моменту времени t , τ — период полураспада данного изотопа. В соответствии с условиями,

$$m = 0,69m_0.$$

Подставим это выражение в закон радиоактивного распада:

$$0,69m_0 = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}},$$

прологарифмируем:

$$\lg 0,69 = \frac{t}{5730} \lg 0,5$$

и найдём

$$t = \frac{5730 \cdot (-0,161)}{(-0,301)} = 3064,9 \text{ лет.}$$

Ответ: 3065 лет на момент проведения анализа.

Данная задача, кроме демонстрации применения расчётов по закону радиоактивного распада, знакомит учащихся с тем, как работает радиоуглеродный метод датировки органических останков (метод геохронологии).

Задача 8. Препарат радиоактивного ^{125}I , предназначенный для лечения онкологических заболеваний, содержит примесный радионуклид ^{124}I . В момент выделения радионуклидов из мишени их молярное соотношение составляло $^{125}\text{I} : ^{124}\text{I} = 25$. Какое время нужно хранить препарат, чтобы количество вещества примесного радионуклида стало в 100 раз меньше количества ^{125}I ? Периоды полураспада ^{125}I и ^{124}I равны 59,4 и 4,18 суток соответственно.

Решение

Закон радиоактивного распада может быть записан как для массы, так и для количества вещества радионуклида:

$$n(t) = n_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau}},$$

где n_0 — исходное количество радионуклида, $n(t)$ — количество, оставшееся к моменту времени t , τ — время полураспада данного радионуклида.

Запишем выражения закона радиоактивного распада для обоих радионуклидов (^{125}I обозначим индексом 1, ^{124}I — индексом 2):

$$n_1(t) = n_{0,1} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{59,4}}$$

$$n_2(t) = n_{0,2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{4,18}}$$

Разделим первое выражение на второе:

$$\frac{n_1(t)}{n_2(t)} = \frac{n_{0,1}}{n_{0,2}} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{59,4} - \frac{t}{4,18}} = \frac{n_{0,1}}{n_{0,2}} \cdot 2^{\frac{t}{4,18} - \frac{t}{59,4}}$$

По условию, молярное соотношение составляло 25 в начальный момент и стало равно 100 в момент времени t . Подставим эти величины в формулу:

$$100 = 25 \cdot 2^{\frac{t}{4,18} - \frac{t}{59,4}}$$

$$4 = 2^2 = 2^{\frac{t}{4,18} - \frac{t}{59,4}}$$

отсюда

$$2 = t \frac{59,4 - 4,18}{4,18 \cdot 59,4}$$

$$t = 8,98$$

Ответ: 8,98 суток.

Отобранные нами задачи, посвящённые радиоактивным превращениям, показывают, что интерес к этой теме растёт с течением времени. Присутствие данной темы в материалах вступительных экзаменов и олимпиад по химии вполне оправданно, ведь поступившим на химический факультет МГУ предстоит изучение курса «Радиохимия», который включает не только лекции и семинары, но и практические занятия. Важно и то, что с 2022 г. абитуриенты химического факультета при поступлении могут предоставлять свои баллы ЕГЭ по выбору — или по физике, или по биологии, и доля предоставляющих баллы по биологии очень велика. Эти абитуриенты не готовились к ЕГЭ по физике, поэтому для них вдвойне важно познакомиться с радиоактивными превращениями при подготовке к вступительному экзамену по химии или на химической олимпиаде.

Публикация подготовлена в рамках работ по теме государственного задания «Информационно-методическое обеспечение развития фундаментального химического образования и научных исследований по химии».

ЛИТЕРАТУРА

1. Вацадзе С.З., Ерёмин О.Е., Веселова И.А. и др. Радиофармпрепараты группы катехоламинов, меченные ^{18}F , в диагностике нейродегенеративных заболеваний и нейроэндокринных опухолей: подходы к синтезу и перспективы развития // Успехи химии. — 2018. — № 87(4). — С. 350–373.
2. Атомная энергетика в мире [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://aem-group.ru/mediacenter/informatoriy/atomnaya-enegetica-v-mire.html>

Ключевые слова: письменный вступительный экзамен по химии, химические олимпиады, конкурсные задачи, радиоактивные превращения.

Key words: written entrance examination on chemistry, Chemistry Olympiad, competitive tasks, radioactive transformations.

DOI: 10.62709/0368-5632-2024-7-56-61

3. Волков В.Н. Атомная энергетика России: современные стратегии развития // Химия в школе. — 2022. — № 4. — С. 5–11.

4. Двирный В.В., Крушенко Г.Г., Елфимова М.В. и др. Ядерные энергетические установки для космических аппаратов // Информационные технологии и математическое моделирование в экономике, технике, экологии, образовании, педагогике и торговле. — 2016. — № 8. — С. 55–72.

5. Крупская В.В., Бирюков Д.В., Белоусов П.Е. и др. Применение природных глинистых материалов в рамках работ по повышению уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2. — С. 30–43.

6. ФИПИ. Единый государственный экзамен по физике 2024 г.: демонстрационный вариант, кодификатор, спецификация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://fipi.ru/ege/demoversii-specifikacii-kodifikatory#/tab/151883967-3>

7. Программа вступительных испытаний по физике в МГУ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.msu.ru/entrance/program/phys.html>

8. Программа вступительных испытаний по химии в МГУ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.msu.ru/entrance/program/chem.html>

9. Кузьменко Н.Е., Ерёмин В.В., Чуранов С.С. Сборник конкурсных задач по химии. — М.: Экзамен, 2001.

10. Кузьменко Н.Е., Теренин В.И., Рыжова О.Н. и др. Химия: формулы успеха на вступительных экзаменах / Под ред. Н.Е. Кузьменко, В.И. Теренина. — М.: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006.

11. Кузьменко Н.Е., Теренин В.И., Рыжова О.Н. и др. Вступительные экзамены и олимпиады по химии: опыт Московского университета / Под ред. Н.Е. Кузьменко, О.Н. Рыжовой, В.И. Теренина. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.

12. Кузьменко Н.Е., Рыжова О.Н., Теренин В.И. и др. Олимпиады и конкурсные экзамены по химии в МГУ. — М.: Лаборатория знаний, 2019.

13. Рыжова О.Н., Теренин В.И., Кузьменко Н.Е. и др. Химия: Олимпиады и вступительные экзамены по химии в МГУ. — М.: Лаборатория знаний, 2024.