

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

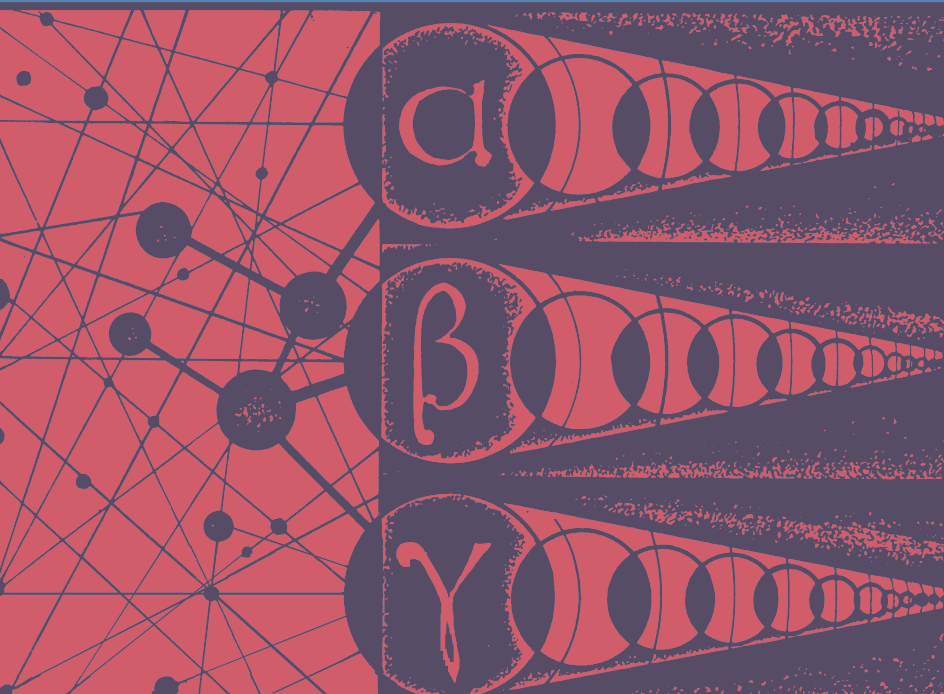
ЗНАНИЕ

8/1974

СЕРИЯ
ХИМИЯ

С. Н. Озиранер

РАДИОАКТИВНЫЕ
ИЗОТОПЫ
И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ



С. Н. Озиранер,

доктор химических наук

**РАДИОАКТИВНЫЕ
ИЗОТОПЫ
И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1974

6П28
О-47

Озиранер С. Н.

0-47 Радиоактивные изотопы и их применение. М., «Знание», 1974.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Химия», 8. Издается ежемесячно с 1964 г.).

Брошюра рассказывает о широком применении радиоактивных веществ в народном хозяйстве.

20408

6П28

СОДЕРЖАНИЕ

Что это такое — радиоактивные изотопы?	4
Радиоактивность	12
Методы получения и выделения радиоактивных изотопов	20
Радиометрия	28
Метод меченых атомов	34
Контроль, управление и автоматизация производства	38
Радиоизотопная энергетика	47
Медицина, биология, химия	52
Биосфера и техника безопасности при работе с радиоактивными веществами	58

Изотопы... Какие разные ассоциации вызывает это слово у людей. С одной стороны, это лучевая болезнь жителей Хиросимы и рыбаков, попавших под радиоактивный дождь; с другой — это тысячи спасенных жизней после облучения кобальтовой пушкой или вживления искусственного стимулятора сердца. В одном случае это слово вызывает чувство тревоги и опасности, в другом — радость творческих находок в науке, талантливых инженерных решений сложных технических задач. И для одних и для других ассоциаций есть веские основания.

Современный этап развития общества, связанный с научно-технической революцией, потепление международной обстановки создают благоприятные условия для широкого применения в мирных целях атомной энергии, в том числе и радиоактивных изотопов. Использование радиоактивных изотопов в народном хозяйстве — в науке и технике, в сельском хозяйстве и медицине — сулит громадные перспективы повышения производительности труда, интенсификации технологических процессов.

Для широкого и продуктивного использования радиоактивных изотопов необходимы их повсеместная популяризация, разъяснение возможностей и пределов применения, а главное преодоление психологического барьера, появившегося в результате бесконтрольного, беспечного обращения с радиоактивными веществами. Именно эти цели преследует настоящая брошюра. Она рассчитана на самый широкий круг читателей и может явиться отправным пунктом для тех, кого всерьез заинтересуют возможности использования радиоактивных изотопов. Автор приносит извинения тем из читателей, кому изложение покажется чересчур популярным. Однако задачи, изложенные выше, не позволили автору избежать этого. Чтобы получить ясное представление о возможностях, тающихся в применении радиоактивных изотопов, необходимо ознакомиться в первую очередь, хоть и в популярном изложении, с понятием изотопии, радиоактивности, а также с методами получения, выделения и регистрации радиоактивных изотопов. Этим вопросам посвящены первые четыре раздела настоящей брошюры.

ЧТО ЭТО ТАКОЕ — РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ!

Все окружающие нас предметы, сама Земля, планеты, Солнце, звезды, вся Вселенная состоят из множества различных веществ с самыми разными свойствами. В определенных условиях эти вещества могут быть твердыми, жидкими или газообразными. Различных индивидуальных веществ очень много, трудно даже оценить их число. Одних органических веществ известно сотни тысяч, а сколько их еще неизвестно! И каждое индивидуальное вещество обладает определенными, только ему присущими, свойствами. Почему так? Чтобы понять это, вообразим себе такой микроскоп, увеличение которого мы можем неограниченно повышать. При рассмотрении какого-либо вещества с возрастанием увеличения микроскопа мы начнем замечать, что оно имеет зернистое строение. Самые маленькие «зерна» вещества, в которых еще сохраняются его свойства, называются молекулами. Все молекулы данного вещества одинаковы и неотличимы друг от друга. «Засечем» одну из молекул и начнем ее рассматривать под еще большим увеличением. Мы увидим, что и молекула имеет зернистое строение. Однако в отличие от одинаковых «зерен» вещества — молекул «зерна» молекул — атомы, как правило, разные. Свойства вещества определяются тем, сколько атомов и какие входят в состав его молекулы. Обычно в качестве примера приводят воду — одно из наиболее распространенных веществ на Земле. Молекулы воды состоят из одного атома кислорода и двух атомов водорода. При изменении числа атомов в молекуле меняются соответственно свойства вещества. Так, молекулы перекиси водорода — вещества, с отличными от воды свойствами, состоят из двух атомов кислорода и двух атомов водорода.

Атомы, таким образом, являются мельчайшими частицами наиболее простых веществ — химических элементов. В природе химических элементов не так много, меньше сотни. Правда, за последние 30 лет ученым удалось создать искусственные элементы, которые на Земле в естественных условиях не встречаются. Но об этом ниже. Химические элементы, как и все вещества, также состоят из молекул, но в их молекулы входят одинаковые атомы данного элемента. В зависимости от числа и расположения атомов в молекуле данный химический элемент может существовать в различных формах. Так, химический элемент углерод встречается в виде трех различных модификаций с совершенно различными свойствами — алмаза, графита и сажи.

Но продолжим наше микроскопическое исследование. На этот раз «засечем» какой-либо атом в молекуле и создадим такое увеличение, чтобы разглядеть его строение. Мы увидим, что атом состоит из центрального ядра, в котором сосредоточена практически вся масса атома, а вокруг ядра движутся элементарные частицы электричества — электроны. Ядро, кроме массы, несет положительный электрический заряд. Величина этого заряда, выраженная в единицах отрицательного электрического заряда электрона, совпадает с числом электронов. Таким образом, атом электрически нейтрален, поскольку суммарный заряд всех электронов и заряд ядра взаимно компенсируются. В свою очередь, число электронов в атоме определяет его сродство к другим атомам и в конечном счете способность образовывать те или иные химические соединения или вещества. Таким образом, число электронов или, что то же самое, заряд ядра атома определяет свойства химического элемента.

В периодической системе, открытой величайшим русским химиком Д. И. Менделеевым, химические элементы располагаются в порядке возрастания электрического заряда ядра их атомов. При этом оказывается, что химические свойства элементов периодически изменяются, что позволяет разбить их на группы, в состав которых входят элементы с близкими свойствами.

Чудесный микроскоп, которым мы сейчас пользовались, к сожалению, существует только в воображении. Полученные с помощью его сведения о строении вещества на самом деле являются результатом кропотливых, часто многолетних героических усилий нескольких поколений ученых.

Истина собиралась по крупицам, через ошибки и заблуждения, надежды и разочарования. Идея об атомном строении вещества зародилась еще в Древней Греции. Стройная картина, которая вырисовывается сейчас, результат более чем двухтысячелетней деятельности человечества в погоне за истиной.

Теперь немного пофантазируем. Представим себе два атома одного и того же элемента, но несколько отличающиеся между собой по массе. В соответствии с тем, что мы узнали ранее, такие два атома будут обладать одинаковыми химическими свойствами, а поскольку взвесить атом очень трудно, то в обычных условиях эти два атома с разными массами неразличимы, точно так же, как без весов неразличима позолоченная фальшивая монета и подлинная.

А возможно ли различие в массе ядра атома при неизменном заряде? Вернемся к нашему чудесному микроскопу и внимательно рассмотрим ядро. Оказывается, оно также имеет зернистую структуру и состоит из «зерен» двух сортов, причем эти «зерна» одинаковы у любых атомных ядер. Это протоны — элементарные частицы с положительным электрическим зарядом, равным заряду электрона, и нейтроны — элементарные частицы с массой, очень близкой к массе протона, но не имеющие электрического заряда. Атомное ядро — очень устойчивая структура, частицы в ядре удерживаются особыми ядерными силами, превосходящими на очень малых расстояниях силы электрического взаимодействия. Благодаря этому одноименно заряженные протоны удерживаются в ядре, несмотря на электрические силы отталкивания. Нейтроны же выполняют роль цементирующей связи. Из всего сказанного следует положительный ответ на поставленный вопрос. В самом деле, два атома, ядра которых состоят из одинакового числа протонов и отличающегося числа нейтронов, будут иметь одинаковые заряды и разные массы. А это значит, что они будут принадлежать одному и тому же химическому элементу и обладать практически одинаковыми физическими и химическими свойствами. Такие отличающиеся по массе атомы одного элемента и называются изотопами, что в переводе с греческого означает занимающие одинаковые места (имеется в виду одна и та же клетка периодической системы элементов Д. И. Менделеева).

О природе ядерных сил, Впрочем, как и о природе других сил, современная физика знает далеко не все. Все

виды взаимодействия, осуществляемые в природе, обусловлены тремя видами сил: гравитационными, электромагнитными и ядерными. Силы гравитации действуют между любыми телами, обладающими массой. Ими определяются движение планет вокруг Солнца, движение Луны и искусственных спутников вокруг Земли, полет снаряда, колебание маятника часов и многие, многие другие явления. Это всегда силы притяжения, и в самом простом случае сила притяжения может быть вычислена по закону всемирного тяготения, открытому Ньютоном еще в 1687 г.

Так два тела на расстоянии r , намного превосходящем размеры тел, взаимно притягиваются с силой

$$F = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

где γ — гравитационная постоянная;
 m_1 и m_2 — массы первого и второго тела.

Как видно, гравитационное притяжение убывает пропорционально квадрату расстояния.

Электромагнитные силы обуславливают не только процессы получения электрической энергии, их роль значительно шире. Ими обусловлены практически все химические и физические процессы, за исключением процессов, происходящих внутри атомного ядра и взаимодействия элементарных частиц. Как это ни покажется странным неискушенному читателю, отскакивание мячика от стены, приклеивание марки к конверту, свечение раскаленной нити в лампочке, образование кристаллов, растворение сахара в чае, образование полимерных материалов, связь атомов в молекуле — все это обусловлено электромагнитными силами.

В отличие от сил гравитации электромагнитные силы могут проявляться как в притяжении, так и в отталкивании. В простейшем случае сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными электрическими зарядами будет:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon \cdot r^2},$$

где q_1 и q_2 — величины зарядов;
 ϵ — диэлектрическая постоянная среды;
 r — расстояние между зарядами.

Здесь также сила убывает пропорционально квадрату расстояния. Причем взаимодействие разноименных зарядов обуславливает притяжение, а одноименных — отталкивание. Взаимодействие многих движущихся зарядов приводит к более сложной зависимости силы электромагнитного взаимодействия от расстояния. В общем случае сила обратно пропорциональна r^n , а n может принимать значения и больше 2. Это приводит к тому, что силы электромагнитного взаимодействия в атомах и молекулах достаточно велики, но действуют только на очень близких расстояниях, соизмеримых с размерами молекул и атомов. В силу этого в межмолекулярных и межатомных взаимодействиях гравитационные силы не оказывают сколько-нибудь заметного влияния. Характер ядерных сил отличается еще более резкой зависимостью от расстояния. Силы убывают по степенной зависимости

$$ar^n,$$

где a и n — постоянные;

r — расстояние между взаимодействующими частицами.

На расстояниях, превосходящих размеры атомного ядра, ядерные силы исчезающе малы, но внутри ядра они значительно превосходят электростатические силы отталкивания между одноименно заряженными протонами.

Небезынтересно привести некоторые количественные характеристики. Размеры молекул, не считая макромолекул полимерных соединений, порядка 10^{-10} — 10^{-11} м. Размеры ядра атома порядка 10^{-14} м. Это значит, что размер ядра по крайней мере в 10 тыс. раз меньше, чем размер атома. Таким образом, плотность ядра в 10^{12} раз выше плотности атома. Как известно, плотность воды при обычных условиях составляет 1000 кг/м^3 , плотность ядерного вещества — примерно 10^{15} кг/м^3 .

Эти расчеты показывают, что атом состоит в основном из... пустоты. Высокая плотность вещества осуществляется в некоторых звездах, так называемых белых карликах, где под действием сил гравитации вещество сжимается настолько сильно, что плотность его может достигать нескольких тонн на кубический сантиметр.

Масса самого легкого ядра — ядра атома водорода составляет около $1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, а масса электрона примерно

в 1800 раз меньше, т. е. на массу электронов приходится около 0,05 % массы всего атома.

Если принять за условную единицу массы массу протона или нейтрона, то целочисленное значение массы атома выразится суммой числа протонов и нейтронов. В атомной физике это число носит название массового номера « M ». С другой стороны, мы уже знаем, что число протонов определяет собой заряд атомного ядра « Z » и соответственно принадлежность данного атома определенному химическому элементу. Физики и химики каждому химическому элементу и частице присвоили определенный символ. Например, электрону — « e », протону — « p », нейтрону — « n », водороду — « H », кислороду — « O », железу — « Fe », свинцу — « Pb », урану — « U » и т. д. Чтобы уточнить значение символа, вверху справа пишется массовый номер, а внизу слева — заряд. Так, электрону в этой системе записи соответствует символ ${}_{-1}e^0$, что расшифровывается следующим образом: частица с очень малой массой, обладающая единичным отрицательным зарядом. Однако чаще электрону приписывают символ e^- или β^- , значение которых будет ясно из последующего изложения. Протону соответствует символ « ${}_1p^1$ », а нейтрону — « ${}_0n^1$ », или просто « p » и « n ». Самый легкий и распространенный изотоп водорода ${}_1H^1$ имеет ядро, состоящее из одного протона. Другой изотоп водорода — дейтерий ${}_1H^2$, или тяжелый водород, имеет ядро, состоящее из одного протона и одного нейтрона. В природе водород как химический элемент состоит из смеси двух изотопов — 99,984 % легкого ${}_1H^1$ и 0,016 % тяжелого ${}_1H^2$. Соответственно этому в природной воде имеется всегда соответствующее небольшое количество примеси тяжелой воды, т. е. такой воды, в состав молекул которой входят атомы тяжелого изотопа водорода. Самый распространенный изотоп кислорода ${}_8O^{16}$ имеет в составе ядра 8 протонов и 8 нейтронов. В природе кислород, как и водород, представляет собой смесь изотопов, причем, кроме основного изотопа ${}_8O^{16}$, в смеси содержится 0,04 % изотопа ${}_8O^{17}$ и 0,2 % изотопа ${}_8O^{18}$. Это значит, что в атомных ядрах всех трех изотопов кислорода содержится по 8 протонов и по 8, 9 и 10 нейтронов соответственно. Поскольку символ элемента однозначно определяет заряд ядра, то, как правило, число внизу слева опускают. Так, двум основным изотопам урана — 92-му элементу периоди-

ческой системы ($Z=92$) — соответствуют символы ${}_{92}\text{U}^{238}$ и ${}_{92}\text{U}^{235}$, или просто U^{238} и U^{235} .

Атомное ядро очень прочное образование. Энергия связи протонов и нейтронов в ядре может быть вычислена сравнительно просто. Для этого следует воспользоваться выводом из теории относительности, открытой величайшим физиком Альбертом Эйнштейном. Из этой теории следует, что энергия связи некоторой структуры E пропорциональна дефекту массы Δm , т. е. разности масс исходных составляющих и конечной структуры:

$$E = \Delta mc^2,$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек — скорость света.

Для примера рассчитаем энергию связи ядра атома гелия ${}_2\text{He}^4$, состоящего из двух протонов и двух нейтронов. В атомной физике в качестве единицы массы используют массу, равную $1/12$ массы изотопа углерода ${}_6\text{C}^{12}$. В атомных единицах массы (а. е. м.) массы протона, нейтрона и ядра атома гелия составляют:

$$\begin{aligned} m_p &= 1,00728 \text{ а. е. м.}; \\ m_n &= 1,00867 \text{ а. е. м.}; \\ m_{{}_2\text{He}^4} &= 4,00047 \text{ а. е. м.} \end{aligned}$$

Дефект массы Δm будет:

$$\Delta m = (2m_p + 2m_n - m_{{}_2\text{He}^4}) = 0,03143 \text{ а. е. м.}$$

Поскольку $1 \text{ а. е. м.} = 1,658 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, имеем

$$E = 0,03143 \cdot 1,658 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 4,7 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Это энергия связи одного ядра атома гелия. В 1 кг гелия содержится $1,5 \cdot 10^{26}$ атомов, а энергия, выделяющаяся при образовании 1 кг гелия из протонов и нейтронов, составит немногим более $7 \cdot 10^{14}$ джоулей, или 200 млн. киловатт-часов! Аналогичные процессы происходят в недрах Солнца и многих звезд и являются основным источником их энергии. Расщепление ядра гелия на протоны и нейтроны потребует соответственно затраты такой же энергии.

Из изложенного выше, казалось бы, можно сделать вывод, что у каждого элемента может быть сколь угодно много изотопов, т. е. атомы этого элемента при одинаковом числе протонов в ядре будут отличаться числом нейтронов. Однако вывод этот не совсем верен. Дело в том, что атомное ядро остается устойчивым только в определенных границах

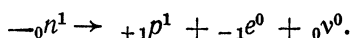
отношения числа нейтронов к числу протонов — $\frac{M-Z}{Z}$. Для легких элементов это отношение близко к единице. Так, у следующего за водородом элемента — гелия наиболее распространенным изотопом является ${}^4_2\text{He}$, ядро которого состоит из двух протонов и двух нейтронов. То же для самых распространенных изотопов: углерода — ${}^{12}_6\text{C}$, азота — ${}^{14}_7\text{N}$, кислорода — ${}^{16}_8\text{O}$ и т. д. С увеличением массового номера отношение между числом нейтронов и протонов постепенно растет. У иода, например, $Z = 53$, а массовый номер устойчивого изотопа $M = 127$ (${}^{127}_{53}\text{I}$). Таким образом, отношение числа нейтронов к числу протонов у иода будет $\frac{127 - 53}{53} = 1,4$. Для указанных выше изотопов урана это отношение составит: для ${}^{238}_{92}\text{U}$ $\frac{238 - 92}{92} = 1,59$ и для ${}^{235}_{92}\text{U}$ $\frac{235 - 92}{92} = 1,55$.

Что же происходит, если в атомном ядре нарушится некоторое оптимальное отношение числа нейтронов к числу протонов? Такие ядра становятся неустойчивыми, они самопроизвольно превращаются в другие, в которых отношение числа нейтронов и протонов будет соответствовать устойчивому ядру. Это значит, что те изотопы, в атомных ядрах которых нарушено оптимальное отношение между числом нейтронов и числом протонов, неустойчивы, или, как их называют в науке, нестабильны. Такие изотопы называются *радиоактивными*.

В следующей главе мы познакомимся с тем, каким путем и с какой скоростью радиоактивные изотопы превращаются в устойчивые, стабильные.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

Каким же путем нестабильные, радиоактивные изотопы приобретают стабильность? Казалось бы, чего проще: при избытке нейтронов ядра должны испускать нейтроны и таким образом превращаться в стабильные. И наоборот, при недостатке нейтронов ядра должны испускать протоны. Однако такой путь, за исключением крайне малого числа случаев испускания нейтронов, в природе не осуществляется. Он энергетически невыгоден. Оказывается, внутри ядра происходят весьма любопытные процессы: при избытке нейтронов последние превращаются в протоны, а при недостатке нейтронов протоны превращаются в нейтроны. Как же так? Протекание любых процессов в природе, будь то в масштабе галактики или в масштабе атомного ядра, происходит таким образом, чтобы неукоснительно соблюдались законы сохранения массы, энергии, заряда. Это значит, что суммарные масса, энергия, заряд замкнутой системы до начала процесса и после его завершения должны оставаться неизменными. Поэтому простое превращение нейтрона в протон и наоборот невозможно, так как протон имеет единичный положительный заряд, а нейтрон электрического заряда не имеет. Закон сохранения заряда соблюдается за счет того, что при превращении, например, нейтрона в протон возникает еще одна частица с очень малой массой и единичным отрицательным электрическим зарядом. Это знакомый нам электрон. В силу некоторых обстоятельств, объяснение которых выходит за рамки настоящей брошюры, вместе с электроном возникает еще одна частица — нейтрино (ν). Это частица, не несущая электрического заряда, с пренебрежимо малой массой. Таким образом, процесс превращения нейтрона в протон может быть записан в следующем виде:



Приведенное выражение иллюстрирует соблюдение законов сохранения массы и заряда. Энергия, выделяющаяся при этом процессе, реализуется в виде кинетической энергии вылетающих из ядра электрона и нейтрино. Таким образом, в нейтронно-избыточных изотопах происходит распад, так называемый радиоактивный распад, заключающийся в том, что нейтрон в ядре превращается в протон; при этом из ядра испускаются частицы — электрон и нейтрино. Такой тип радиоактивного распада носит название (бета) β^- -распада, а поток быстрых электронов, испускаемых радиоактивными ядрами, — потоком β^- -частиц. Испускаемые нейтрино в силу отсутствия в них массы и заряда ничем себя не обнаруживают, поэтому мы исключим их из дальнейшего рассмотрения. Однако энергия β^- -частиц в силу этого принимает самые различные значения от некоторой максимальной величины (в том случае, когда доля энергии, передаваемая нейтрино, равна нулю) до нуля (когда к нейтрино переходит вся энергия процесса). Средняя энергия β^- -частиц примерно равна $1/3$ максимальной энергии (E_{\max}).

В таблицах радиоактивных изотопов, как правило, приводится максимальная энергия β^- -частиц, выраженная в мегаэлектронвольтах (Мэв); 1 Мэв — это энергия, которую приобретает электрон, проходя через ускоряющее электрическое поле в миллион вольт. В отношении одной β^- -частицы это величина небольшая, но если радиоактивного изотопа много и поток β^- -частиц велик, энергия может быть весьма заметной. Но об этом позже.

Что же произошло с радиоактивным изотопом, в ядре которого произошел радиоактивный β^- -распад, т. е. один нейтрон превратился в протон, а масса ядра практически не изменилась? А произошло то, что заряд ядра увеличился на единицу, т. е. радиоактивный изотоп данного элемента превратился в изотоп следующего элемента в периодической системе. Таким образом, при радиоактивном распаде происходит самопроизвольное превращение одного химического элемента в другой.

После акта радиоактивного распада в новом так называемом дочернем ядре может установиться оптимальное отношение числа нейтронов к числу протонов. В этом случае образующийся дочерний изотоп стабилен. Если в ре-

результате одного акта распада оптимальное отношение не достигается, то дочерний изотоп также будет радиоактивным. В результате может иметь место цепочка последовательных β -распадов до тех пор, пока не установится оптимальное отношение числа нейтронов к числу протонов и процесс радиоактивных превращений не завершится образованием стабильного изотопа.

Аналогичная картина будет иметь место и у нейтронно-дефицитных изотопов. В этом случае протон превращается в нейтрон по следующей схеме:



Здесь вместо электрона, как это было в предыдущем случае, образуется другая частица — позитрон, аналогичная электрону, но несущая не отрицательный, а положительный заряд. Этот вид радиоактивного превращения носит название β^+ -распада, а испускаемый поток быстрых позитронов — потоком β^+ -частиц. При таком распаде у дочернего изотопа ядро имеет заряд на единицу меньше, т. е. образуется изотоп элемента, занимающего в периодической системе предыдущее место.

Иногда при β -распаде дочерний изотоп образуется в возбужденном состоянии, т. е. в его ядре имеется избыточная энергия. Эта энергия «высвечивается» в виде очень жестких, проникающих (гамма) γ -лучей, по своим свойствам близких к рентгеновским лучам. Таким образом, β -распад радиоактивных изотопов наряду с испусканием потока быстрых электронов или позитронов может сопровождаться и γ -излучением.

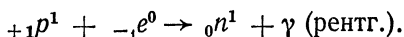
Позитрон по отношению к электрону является античастицей. Из условий симметрии каждой элементарной частице соответствует своя античастица: электрону — позитрон, протону — антипротон, нейтрону — антинейтрон, нейтрино — антинейтрино и т. д. Можно представить себе и антивещество, в котором роль элементарных частиц выполняют античастицы. Не исключено, что во Вселенной существуют отдельные тела или даже целые галактики, состоящие из антивещества. При столкновении частицы и античастицы происходит их взаимное уничтожение так называемая аннигиляция, при которой вместо исчезнувших частицы и античастицы возникают два кванта электромагнитного излучения (две γ -частицы, или два γ -кванта). Так, при β^+ -распаде с излучением позитронов последние

за счет взаимодействия с электронами окружающей среды аннигилируют с образованием двух γ -квантов с энергией 0,5 Мэв. Таким образом, радиоактивный β^+ -распад всегда сопровождается γ -излучением.

Энергия аннигиляции может быть определена так же, как и энергия связи ядра, исходя из следующих данных: массы электрона и позитрона равны и составляют 0,00055 а. е. м. В то же время массе в 1 а. е. м. соответствует энергия 931 Мэв. Поскольку при аннигиляции образуются два γ -кванта, энергия одного γ -кванта равна

$$E_{\gamma} = \frac{931 \cdot 0,00055 \cdot 2}{2} \cong 0,5 \text{ Мэв.}$$

У нейтронно-дефицитных изотопов может иметь место и другой вид радиоактивного распада — так называемый K -захват. В этом случае ядро захватывает из внешней электронной оболочки ближайший электрон (K -электрон), в результате чего протон превращается в нейтрон, а перегруппировка электронов приводит к возникновению рентгеновского излучения — мягких γ -лучей, как это видно из схемы:



У некоторых изотопов, в основном самых тяжелых элементов периодической системы, имеет место еще один вид радиоактивного распада — (альфа) α -распад. В этом случае из ядра испускаются α -частицы — знакомые нам ядра изотопа гелия ${}_2\text{He}^4$, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Дочерний изотоп может быть также неустойчив относительно α -распада, в результате чего может иметь место цепочка α -распадов. При этом, однако, дочерние ядра становятся нейтронно-избыточными, в результате чего вслед за серией α -распадов следует серия β^- -распадов и т. д. Так, в природе изотопы урана U^{238} и U^{235} в конечном счете превращаются в стабильные изотопы свинца Pb^{206} и Pb^{207} .

При α -распаде энергия всех испускаемых α -частиц одинакова, или, как говорят, испускаемые α -частицы моноэнергетичны. Как и β -распад, α -распад может сопровождаться γ -излучением.

Явление радиоактивности было открыто французским ученым Беккерелем в конце прошлого столетия. Им было обнаружено странное засвечивание фотопластинок, нахо-

дившихся в светонепроницаемых кассетах. Впоследствии было установлено, что засвечивались те пластинки, которые находились рядом с препаратами урана. Таким образом было обнаружено, что препараты урана испускают невидимые лучи, засвечивающие фотопластинки и проникающие через материалы, непрозрачные для видимого света. Это явление и получило название «радиоактивности». Дальнейшими работами супругов Марии Кюри-Склодовской и Пьера Кюри было установлено, что радиоактивность сопровождается, кроме излучения, еще и процессом превращения одних элементов в другие. Естественно, что в то время дать правильное объяснение наблюдаемым явлениям было невозможно. Тем более вызывают восхищение первые исследователи радиоактивности, сумевшие разобратся в многообразии явления, установить последовательность превращений и типы распада.

Мы познакомились с двумя характеристиками радиоактивного распада — типом распада и энергией испускаемых частиц и излучений. Есть еще очень важная характеристика, определяющая скорость радиоактивного распада, — период полураспада ($T_{1/2}$, или просто T). Период полураспада характеризует время, в течение которого у половины из имеющихся атомов радиоактивного изотопа произойдет радиоактивный распад. В настоящее время известно более тысячи радиоактивных изотопов, и их периоды полураспада имеют величину от десятков миллиардов лет до тысячных долей секунды. Для практического использования наиболее интересны радиоактивные изотопы с периодом полураспада от нескольких десятков лет до нескольких часов.

Изменение числа радиоактивных атомов во времени подчиняется следующей формуле:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_t — число радиоактивных атомов, оставшихся ко времени t ;

N_0 — число радиоактивных атомов в начальный момент времени;

λ — постоянная распада;

e — основание натуральных логарифмов.

Период полураспада и постоянная распада связаны следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{0,693}{T}.$$

Поскольку в таблицах изотопов приводятся значения T , то изменение числа радиоактивных атомов во времени может быть выражено следующим образом:

$$N_t = N_0 e^{-\frac{0,693}{T}t}.$$

Скорость распада (A), т. е. число актов радиоактивного распада в данный момент t , в единицу времени, будет:

$$A = \lambda N_t = \frac{0,693}{T} N_t.$$

Чем же примечательны радиоактивные изотопы, в каком направлении они могут быть использованы?

Благодаря тому что радиоактивные изотопы испускают при своем распаде поток быстрых заряженных частиц или γ -лучей, они могут быть обнаружены в крайне малых количествах. Современная техника создала специальные счетчики, позволяющие обнаружить каждый быстрый электрон, позитрон или α -частицу. Такими же чувствительными приборами может быть обнаружено и γ -излучение. Благодаря чувствительным методам обнаружения излучений, сопровождающих радиоактивный распад, добавка радиоактивного изотопа к стабильным изотопам данного элемента позволяет проследить за поведением его в различных физических, химических или технологических процессах. Можно проследить и за судьбой того или иного химического элемента или соединения, если в их состав наряду со стабильными изотопами входят также и радиоактивные. Такое направление использования радиоактивных изотопов носит название метода меченых атомов. Меткой являются в данном случае те частицы или лучи, которые сопровождают радиоактивный распад. При использовании метода меченых атомов требуется сравнительно небольшое количество радиоактивного изотопа, не требующее, как правило, специальных мер защиты и особой предосторожности.

Другим направлением применения радиоактивных изотопов является непосредственное использование излуче-

ний, сопровождающих радиоактивный распад. В этом случае существенными являются вид излучения и его энергия. Для такого применения нужны значительные количества радиоактивного изотопа, требующие специальных мер защиты и соблюдения условий, исключающих неконтрольное попадание радиоактивных изотопов в окружающую среду. Количество радиоактивного изотопа можно измерять обычными весовыми единицами — миллиграммами, граммами и даже килограммами. Однако эти единицы применяются при использовании очень больших количеств. Обычно, особенно в методе меченых атомов, применяют другие единицы — кюри (К), тысячную долю кюри — милликюри (мК) и миллионную долю кюри — микрокюри (мкК).

Кюри — это такое количество радиоактивного изотопа, в котором каждую секунду происходит 37 млрд. актов распада ($3,7 \cdot 10^{10}$), т. е. столько, сколько происходит распадов в 1 г радия, вернее его изотопа Ra^{226} с периодом полураспада 1600 лет. Вес 1 кюри любого другого изотопа будет во столько раз меньше, во сколько его период полураспада меньше периода полураспада радия. Кроме того, вес уменьшается с уменьшением массового номера изотопа:

$$\text{Вес 1 кюри в граммах} = \frac{T \cdot M}{1600 \cdot 226},$$

где T — период полураспада изотопа в годах, а M — его массовый номер.

В методе меченых атомов используют радиоактивные изотопы в количестве от долей милликюри до долей микрокюри. При использовании излучений количество радиоактивного изотопа может доходить до миллионов кюри. В природе радиоактивные изотопы встречаются в основном у элементов с зарядом ядра 81 и выше, т. е. у самых тяжелых элементов периодической системы. При этом они находятся в смеси с изотопами других элементов, и их выделение в чистом виде представляет сложную химическую задачу. Радиоактивные изотопы большинства элементов получают искусственным путем методами атомной физики. Об этом и пойдет речь в следующей главе.

Интересно оценить энергию радиоактивного распада. Примем для простоты, что при каждом акте радиоактивного распада выделяется 1 Мэв энергии, а количество изотопа составляет 1 кюри. Исходя из того что

$$1 \text{ Мэв} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ дж},$$

а 1 К соответствует $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду, получаем мощность такого источника:

$$P = 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cong 6 \cdot 10^{-3} \text{ вт, или 6 мвт.}$$

Эта энергия не так уж велика, но если радиоактивность составляет миллионы кюри, то мощность исчисляется киловаттами.

Кстати, расчеты показывают, что высокая температура внутренних слоев Земли, ее вулканическая деятельность обязаны радиоактивному распаду урана, тория и других радиоактивных элементов, залегающих в глубинных формациях.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Из изложенного выше совершенно однозначно определен путь, по которому следует идти, чтобы получить радиоактивные изотопы. Нужно каким-либо способом нарушить в стабильных изотопах, вернее в их ядрах, оптимальное отношение между числом нейтронов и числом протонов. Для этого необходимо бомбардировать стабильные ядра различными частицами как заряженными, так и нейтральными. В качестве заряженных частиц используют наиболее часто протоны (p), дейтоны (d) — ядра тяжелого изотопа водорода (${}_1\text{H}^2$) и реже α -частицы — ядра изотопа гелия (${}_2\text{He}^4$), в качестве нейтральных частиц — нейтроны. Чтобы произошла так называемая ядерная реакция, положительно заряженной частице необходимо преодолеть электростатическое отталкивание положительно заряженного ядра. Поэтому эти частицы должны обладать колоссальной энергией в десятки мегаэлектронвольт. Но даже и в этом случае только небольшая часть быстрых частиц достигает ядра и вступает с ним в ядерную реакцию.

Радиоактивность, возникающая под действием облучения частицами высоких энергий, или нейтронами, получила название искусственной радиоактивности, а образующиеся изотопы — искусственными радиоактивными изотопами в отличие от естественной радиоактивности урана, тория и продуктов их распада, встречающихся в природе.

Интересно отметить, что явление искусственной радиоактивности было открыто супругами Ирен и Жюлио Кюри — вторым поколением прославленных исследователей радиоактивности.

Для получения быстрых заряженных частиц существуют различного типа ускорители — линейные ускорители, циклотроны и т. д. Ускорение заряженных частиц основано на их поведении в электрическом и магнитном полях. Двигаясь в электрическом поле, заряженная частица приобретает энергию, пропорциональную разности потенциалов и заряду частицы. Если разность потенциалов электрического поля U выразить в миллионах вольт, а заряд частицы Z в единицах заряда электрона, то приобретаемая ею энергия $E = U \cdot Z$ Мэв. Линейные ускорители представляют собой откачанную до глубокого вакуума трубу, внутри которой на некотором расстоянии друг от друга расположен ряд электродов. Между соседними парами электродов прикладывается разность потенциалов от генераторов высокого напряжения в сотни тысяч и миллионы вольт. Пролетая последовательно через промежутки между электродами, частицы приобретают все большую энергию. Простейшим линейным ускорителем для электронов является известный всем кинескоп телевизора.

Несмотря на кажущуюся простоту линейного ускорителя, возможности получения частиц очень больших энергий ограничены чисто техническими причинами — непомерной длиной разгонной трубки и в связи с этим трудностями обеспечения глубокого вакуума. Кроме того, каждая пара электродов «запитывается» от своего собственного высоковольтного генератора — сложного, громоздкого и дорогого устройства.

В однородном магнитном поле заряженная частица движется по круговой траектории, радиус которой растет пропорционально скорости и массе частицы и уменьшается с увеличением напряженности магнитного поля. На этом явлении основана работа наиболее распространенного ускорителя-циклотрона, схема которого представлена на рис. 1. Электроды циклотрона в виде пустотелых плоских полуцилиндров вместе с впрыскивающим и выпускным устройством помещаются в вакуумную камеру, которая, в свою очередь, расположена между полюсами магнита, создающего мощное однородное магнитное поле в вертикальном направлении. При заданной напряженности магнитного поля время движения частицы внутри каждого электрода не зависит от ее энергии. Если к электродам подключить источник переменного высоковольтного напряжения, частота которого соответствует времени движе-

ния по одной полуокружности, то после впрыскивания порции частиц они будут ускоряться, пролетая между левым и правым электродами; необходимо только, чтобы в это время напряжение было максимальным. Внутри электрода частицы под действием магнитного поля будут двигаться по полуокружности. К моменту выхода частиц к промежутку между электродами напряжение достигает

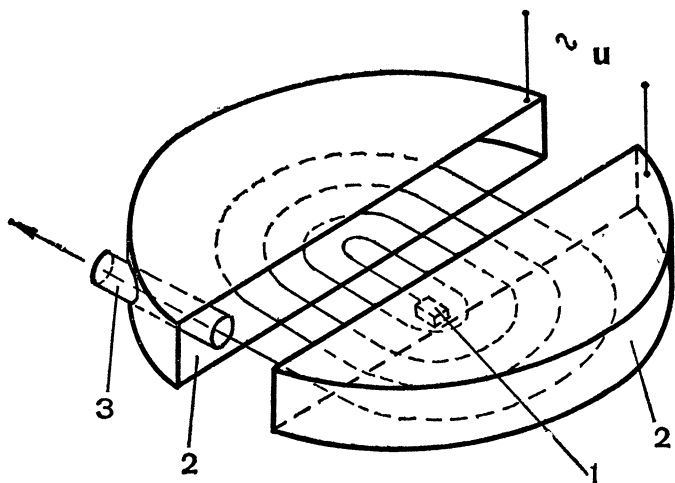


Рис. 1. Схема циклотрона:

1 — инжектор заряженных частиц; 2 — электроды (дуанты); 3 — выпускное устройство; $\sim U$ — к источнику переменного высоковольтного напряжения.

максимальной величины, но в противоположном направлении. Пролетая между правым и левым электродом, частицы приобретут порцию энергии, т. е. получают ускорение. В левом электроде они будут двигаться по полуокружности большего радиуса и к промежутку между электродами попадут к тому моменту, когда электрическое напряжение изменит полярность и достигнет максимальной величины.

Таким образом, частицы будут двигаться как бы по спирали и ускоряться каждый раз, когда они будут пролетать промежутком между электродами. В циклотронах могут быть получены частицы с энергией несколько десятков мегаэлектронвольт. Дальнейшее повышение энергии частиц в циклотроне встречает некоторые принципиальные

трудности. Дело в том, что в соответствии с теорией относительности масса тел не является величиной постоянной и зависит от скорости. Если в состоянии покоя массу частицы обозначить через m_0 , то при скорости v масса частицы приобретает значение

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где c — скорость света.

Пока скорость частиц мала по сравнению со скоростью света, изменением массы можно пренебречь. Для частиц с очень большой энергией изменение массы составляет заметную величину. Из-за этого время пролета частицы внутри электрода будет зависеть от ее энергии. Таким образом, по мере разгона частиц необходимо менять частоту подаваемого высокого напряжения или величину магнитного поля, либо то и другое. Этот принцип используется в самых мощных ускорителях — фазотронах и циклофазотронах. В СССР были построены самые мощные для своего времени ускорители в г. Дубне и под г. Серпуховым, они позволили разгонять протоны и дейтроны до десятков миллиардов электронвольт.

Ускорительная техника достигла такого уровня, что позволяет получать радиоактивные изотопы в промышленных масштабах. Источниками нейтронов, как правило, служат атомные реакторы, в которых наряду с основной задачей — выработкой энергии может решаться и побочная задача — образование радиоактивных изотопов. При ядерных реакциях частицы, которыми производится бомбардировка (на ускорителе или в атомном реакторе), взаимодействуют с атомными ядрами мишени. Образовавшееся новое ядро, как правило, крайне неустойчиво и мгновенно выбрасывает какую-либо частицу. В результате образуется ядро стабильного или радиоактивного изотопа.

Вероятность протекания той или иной ядерной реакции характеризуется сечением реакции σ , т. е. некоторой эффективной площадью поперечного сечения ядра, которая может и не совпадать с истинным геометрическим сечением. В ядерной физике за единицу сечения принята величина

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2,$$

т. е. величина, близкая к среднему значению площади сечения ядра. Для заряженных и достаточно быстрых частиц — протонов, дейтонов, α -частиц сечение реакции составляет десятые, сотые и даже тысячные доли барна. Это объясняется тем, что под действием электростатических сил отталкивания частицы отклоняются от прямолинейного пути и не попадают в ядро. Только небольшая их часть, движущаяся непосредственно «в лоб», достигает атомного ядра и взаимодействует с ним.

Сечение реакции с нейтронами в зависимости от их энергии может достигать десятков, сотен и даже тысяч барн. Создается впечатление, что в отношении нейтронов ядро как бы «раздувается», увеличивает свои размеры. Причина этого явления кроется в особых волновых свойствах материи и находит объяснение в рамках волновой, или квантовой, механики.

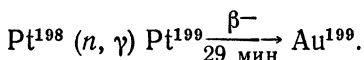
Ядерные реакции символически записываются следующим образом: сначала указывается изотоп мишени, затем в скобках — бомбардирующая и вылетающая частицы и за скобками — конечный изотоп.

Например, радиоактивный изотоп натрия-22 с периодом полураспада 2,6 года получают бомбардировкой магния дейтонами (d). При этом излучается α -частица: $\text{Mg}^{24}(d, \alpha)\text{Na}^{22}$. Бомбардировка дейтонами хрома приводит к образованию радиоактивного изотопа — марганца-52 с периодом полураспада 6 дней и выбросом двух нейтронов: $\text{Cr}^{52}(d, 2n)\text{Mn}^{52}$. Получение радиоактивных изотопов бомбардировкой протонами происходит с меньшим выходом, чем в случае бомбардировки дейтонами. Тем не менее ряд изотопов получают и на этих частицах, например натрий-22, марганец-52 и др.: $\text{Mg}^{25}(p, \alpha)\text{Na}^{22}$, $\text{Cr}^{52}(p, n)\text{Mn}^{52}$. Бомбардировка β -частицами для получения радиоактивных изотопов из-за малого выхода не находит практического применения.

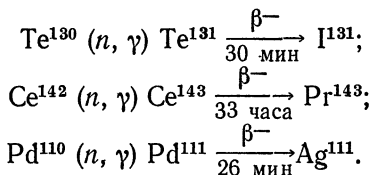
При бомбардировке мишеней заряженными частицами, как правило, образуются изотопы новых, отличных от вещества мишени элементов. Вследствие этого они могут быть отделены от вещества мишени обычными химическими методами, в чистом, без носителя, виде, т. е. радиоактивный препарат содержит атомы только радиоактивного изотопа, и в этом преимущество этого метода получения. Обратная картина имеет место при бомбардировке мишени в реакторе медленными нейтронами. В этом случае нейтрон

захватывается ядрами мишени, а избыточная энергия высвечивается в виде γ -излучения. Образующийся радиоактивный изотоп принадлежит тому же химическому элементу, что и мишень, поскольку заряд ядра не меняется. Чтобы получить высокую радиоактивность препарата, необходимо длительное облучение нейтронами в реакторе с большой плотностью потока нейтронов. Так, например, получают радиоактивный кобальт-60, нашедший самое широкое применение в технике и медицине: $\text{Co}^{59}(n, \gamma)\text{Co}^{60}$. По реакции (n, γ) в атомных реакторах получают значительный ассортимент радиоактивных изотопов для практического использования — бром-82, вольфрам-184, железо-55, золото-198, кальций-45 и многие другие.

Иногда по реакции (n, γ) могут быть получены радиоактивные изотопы и без носителя. Это может иметь место, когда образовавшийся радиоактивный изотоп после β -распада превращается, в свою очередь, не в стабильный, а радиоактивный изотоп. Ниже приводятся примеры такого пути. При облучении платины нейтронами образуется радиоактивный изотоп платины — Pt^{199} с периодом полураспада 29 мин. Вследствие β -распада последнего образуется дочерний радиоактивный изотоп золото-199. Этот процесс может быть записан так:



Радиоактивное золото сравнительно легко отделяется от основной массы платиновой мишени. Аналогично могут быть получены иод-131 облучением теллура, празеодим-143 облучением церия, серебро-111 облучением палладия:



При облучении некоторых изотопов нейтронами в реакторе со значительным выходом может иметь место реакция (n, p) . Именно по этой реакции получают наиболее важные радиоактивные изотопы, широко используемые в биологии, медицине, сельском хозяйстве и в других областях. Это углерод-14 с периодом полураспада 5568 лет,

фосфор-32 с периодом полураспада 14 дней и сера-35 с периодом полураспада 87 дней: $N^{14}(n, p)C^{14}$; $S^{32}(n, p)P^{32}$; $Cl^{35}(n, p)S^{35}$. Естественно, что эти радиоактивные изотопы могут быть получены в чистом виде, без носителя. При работе атомных реакторов происходит деление ядер урана или плутония. В результате идет накопление большого набора различных радиоактивных изотопов так называемых продуктов деления. При регенерации отработанного ядерного «топлива» отдельные радиоактивные изотопы могут быть выделены в чистом виде практически в неограниченном количестве. Наиболее важные из них стронций-90 с периодом полураспада 27 лет, цезий-133 с периодом полураспада 30 лет, прометий-147 с периодом полураспада 2,7 года, церий-144 с периодом полураспада 285 дней и др. В качестве побочного продукта в атомных реакторах образуется нептуний-237, который является сырьем для особо важного радиоактивного изотопа — плутония-238, об использовании которого будет рассказано ниже.

Теорией и практикой выделения радиоактивных изотопов из природной смеси изотопов в урановых и ториевых рудах, из материала мишени, облученной в циклотроне или атомном реакторе, из отходов переработки ядерного горючего занимается радиохимия. Как правило, радиоактивный изотоп присутствует в очень малых концентрациях, и задача сводится к его концентрированию и отделению от основной массы нерадиоактивных компонентов системы. При концентрировании используют особенности распределения микрокомпонента между разными фазами при выделении макрокомпонента, обладающего аналогичными химическими или физико-химическими свойствами. Эти особенности были досконально изучены академиком В. Г. Хлопиным и его учениками. Еще в начале 20-х годов на основании найденных закономерностей был разработан метод концентрирования радия из урановых руд при сокристаллизации с его химическим аналогом — барием, а затем разделения радия и бария. Этот метод был внедрен в промышленное получение радия в нашей стране.

При выделении радиоактивных изотопов часто возникает задача разделения близких по своим свойствам элементов. Эта задача усложняется тем, что концентрации их в исходном веществе могут отличаться в сотни и тысячи раз. Например, уже упоминавшаяся ядерная реакция получе-

ния празеодима-143 требует отделения празеодима от основной массы мишени — церия, а свойства этих редкоземельных элементов очень близки. Еще более сложные задачи возникают при выделении отдельных радиоактивных изотопов из отходов регенерации ядерного топлива, при разделении продуктов деления. Здесь одновременно присутствуют радиоактивные изотопы элементов аналогов: стронций — барий; иттрий — лантан — церий — празеодим — неодим — самарий — европий; бром — иод; близкие по свойствам цирконий и ниобий и много других. Для выделения каждого из элементов используют хорошо разработанные методы сокристаллизации, экстракции и хроматографии. В первом случае используется пусть даже небольшое различие в распределении аналогов между жидкой и твердой кристаллической фазами, во втором — между двумя несмешивающимися жидкостями и в третьем — между раствором и сорбентом. Несмотря на небольшие различия в распределении, многократным повторением процесса удается достичь практически полного разделения.

Производство радиоактивных изотопов приобрело промышленный масштаб. Некоторые из них производятся в количествах, измеряемых килограммами. Радиохимическая промышленность поставляет для нужд науки и техники широкий ассортимент радиоактивных изотопов большинства химических элементов.

РАДИОМЕТРИЯ

Радиометрия — это раздел науки о радиоактивности, в задачи которого входит разработка методов определения количества радиоактивного изотопа, типа и энергии его излучения, а также идентификация, т. е. определение того, какому изотопу принадлежит наблюдаемое ионизирующее излучение. Кроме того, при помощи радиометрических методов может быть определена чистота препарата данного радиоактивного изотопа в отношении других радиоактивных примесей. Методами радиометрии производится нейтронно-активационный анализ — один из самых чувствительных методов элементного анализа без разрушения образца, разработанный благодаря успехам ядерной физики, радиохимии и радиометрии. Одним из самых ранних методов обнаружения излучения радиоактивных изотопов был фотографический. Благодаря ему собственно и было обнаружено явление радиоактивности. Однако метод этот не мог быть использован для количественных измерений. Так же только качественные данные получались при использовании метода фосфоресценции. Суть его заключалась в том, что при попадании быстрых α -частиц на фосфоресцирующий экран в нем возникают световые вспышки, наблюдаемые в микроскоп со сравнительно небольшим увеличением.

Первые количественные измерения, связанные со сравнительным измерением различных радиоактивных препаратов, были выполнены при помощи ионизационной камеры и электрометра. Ионизационная камера представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор. Пластины или электроды этого конденсатора соединяются с электрометром. Электрометр — это прибор, измеряющий разность электрических потенциалов практически без по-

требления тока и обладающий очень высоким внутренним электрическим сопротивлением. Работа двунитного электрометра основана на том, что к двум проводящим очень тонким нитям подводится одноименный электрический заряд от источника разности потенциалов, например от ионизационной камеры. Под действием одноименных электрических зарядов нити отталкиваются друг от друга и расстояние между ними увеличивается. Если в ионизационную камеру поместить радиоактивный препарат, то под действием излучения произойдет ионизация молекул воздуха, он станет проводящим, вследствие этого между электродами пойдет электрический ток, а разность потенциалов между ними будет уменьшаться. Это уменьшение разности потенциалов будет вызывать сближение нитей электрометра. Наблюдая нити в микроскоп со шкалой, можно определить скорость их сближения, например, по числу делений в минуту или по времени прохождения определенного числа делений.

Однонитный электрометр отличается тем, что имеет одну проводящую нить, расположенную между двумя массивными полюсами, к которым прикладывается разность потенциалов, определяющая положение нити. Однонитный электрометр значительно чувствительнее двунитного и предназначен для измерения очень слабых радиоактивных препаратов.

С развитием электронного приборостроения применение электрометров практически прекратилось. Вместо них с ионизационной камерой сочленяются различного типа электронные устройства, измеряющие непосредственно очень слабые электрические токи, вызванные ионизацией. Однако как бы ни были чувствительны эти устройства, с достаточной степенью точности измеряется активность только сравнительно больших радиоактивных препаратов.

Для регистрации отдельных актов радиоактивного распада, т. е. отдельных частиц или γ -квантов, служат различные счетчики. Пропорциональный счетчик представляет собой ту же ионизационную камеру, но к ее электродам прикладывается значительно большая разность потенциалов. Представим себе, что внутрь камеры попала β -или α -частица. Эта частица при столкновении с молекулами газа внутри камеры вызовет образование определенного числа ионов обоих знаков. Если приложенная разность потенциалов создает такое электрическое поле, что обра-

зовавшиеся ионы до столкновения со следующими молекулами приобретут энергию, необходимую для ионизации, число ионов от столкновения к столкновению будет возрастать. Таким образом, одна частица может вызвать значительный импульс тока. Эти импульсы могут быть зарегистрированы соответствующими электронными счетными устройствами. Таким образом, скорость счета импульсов (например, числа импульсов в секунду или минуту) характеризует число актов радиоактивного распада и соответственно количество радиоактивного изотопа. В случае, если регистрируемая частица полностью теряет свою энергию внутри счетчика, величина импульса тока пропорциональна энергии частицы. Этим и определяется название этого типа счетчиков.

Если довести напряжение между электродами счетчика почти до напряжения пробоя, то попадание любой частицы внутрь счетчика вызовет мощный импульс тока, не зависящий от энергии частицы. Такие счетчики носят название счетчиков Гейгера — Мюллера и до сравнительно недавнего времени имели наибольшее распространение. В зависимости от задач эти счетчики имеют различное конструктивное оформление. Для счета γ -квантов они выполняются в виде стеклянной запаянной трубки, внутренние стенки которой покрыты проводящим слоем, а по оси натянута тонкая металлическая нить. Для счета жестких β -частиц вместо стеклянной трубки применяют тонкостенную, порядка 0,1 мм, алюминиевую трубку, а для очень мягких β -частиц и жестких α -частиц — торцовые счетчики с очень тонким слюдяным окном, через которое указанные частицы попадают внутрь счетчика.

Счетчики Гейгера — Мюллера обладают очень важным свойством. В некотором диапазоне прикладываемых напряжений скорость счета практически не зависит от напряжения. Этот участок называется плато. Такое свойство позволяет использовать для питания счетчика высоковольтные выпрямители с не очень высокой стабилизацией.

В последние 10—15 лет наибольшее распространение получили сцинтилляционные счетчики. Этому способствовало создание стабильных и долговечных фотоэлектронных усилителей (ФЭУ). Этот вакуумный электронный прибор состоит из фотокатода, динодов и анода. К каждому последующему диноду и аноду прикладывается возрастающее положительное напряжение по отношению к фотокатоду.

Фотокатод покрыт металлом с малой работой выхода электронов. При попадании на него даже очень слабой вспышки света с поверхности вылетает некоторое количество электронов, которые под действием электрического поля устремляются к первому диноду, приобретая энергию, соответствующую разности потенциалов. При столкновении с поверхностью динода каждый быстрый электрон приводит к эмиссии нескольких электронов. Таким образом, второго динода достигнет усиленный в несколько раз поток электронов. Такое же усиление произойдет на каждом последующем диноде, и на аноде ФЭУ будет зарегистрирован достаточно мощный импульс тока, причем величина этого импульса строго пропорциональна интенсивности световой вспышки. Одновременно с фотоэлектронными усилителями были созданы методы получения крупных монокристаллов, у которых при попадании в них быстрых частиц и γ -квантов возникает вспышка света (сцинтилляция), пропорциональная энергии частицы или γ -кванта. Кристалл-сцинтиллятор вместе с ФЭУ и является сцинтилляционным счетчиком. Выход ФЭУ присоединяется к счетной электронной схеме, с помощью которой измеряется число вызвавших световую вспышку частиц или квантов, или к анализатору импульсов, который вместе с числом может определить и распределение импульсов по энергии. По сравнению с другими счетчиками сцинтилляционные счетчики обладают высокой чувствительностью и высокой эффективностью. Поэтому на мишень, предназначенную для измерения радиоактивности, можно наносить меньшее количество радиоактивного изотопа.

Если в руках исследователя имеется анализатор импульсов, то появляется возможность измерения радиоактивности смеси изотопов и радиоактивности каждого из них в отдельности. Этот метод позволяет применять в опыте одновременно несколько изотопов и следить за каждым из них вне зависимости от наличия остальных.

При использовании радиоактивных изотопов производятся в основном относительные измерения радиоактивности, т. е. сравниваются скорости счета импульсов от разных препаратов в строго идентичных условиях измерения. Если возникает необходимость проведения абсолютных измерений, используют либо специальные счетчики со 100 %-ной эффективностью, или с так называемой 4 π -геометрией, либо проводят сравнительные измерения со

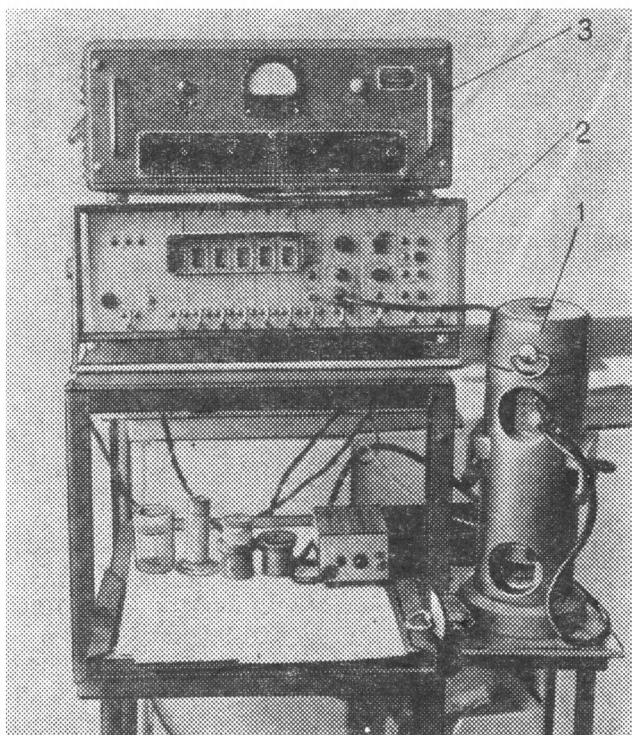


Рис. 2. Установка для измерения радиоактивности:
 1 — сцинтилляционный датчик в свинцовой защите УСД-1; 2 — пересчетный прибор ПП-9; 3 — высоковольтный стабилизированный выпрямитель ВСВ-2.

строго эталонированным препаратом того же изотопа. При абсолютных измерениях радиоактивность препарата выражают в кюри или долях кюри. Для измерения радиоактивных препаратов в десятки, сотни и тысячи кюри используют калориметры, с помощью которых определяют тепловую мощность препарата, например, в ваттах или долях ватта; эту величину по известной энергии радиоактивного распада легко пересчитать в единицы радиоактивности.

При измерениях активности следует учитывать естественный фон, обусловленный слабой радиоактивностью горных пород, почвы, воды, окружающих предметов за счет

наличия в них следов естественных радиоактивных элементов — урана, тория и продуктов их распада, природных радиоактивных изотопов калия и некоторых других элементов. Кроме того, фон создается потоком космических лучей, проходящих от Солнца, далеких звезд и галактик. Наконец, испытания ядерного оружия привели к повышению радиоактивного фона за счет рассеивания радиоактивных продуктов деления.

При измерениях очень малых радиоактивностей наличие фона может привести к грубым ошибкам. Поэтому счетчики помещают внутрь толстой свинцовой камеры, а время измерения по возможности увеличивают. Последнее обстоятельство связано со среднестатистической ошибкой

$$\Delta = \pm \frac{100}{\sqrt{n}} \%,$$

где n — число зарегистрированных импульсов. Так, при числе импульсов 100 ошибка составит $\pm 10\%$, а при числе импульсов 10 000 — всего $\pm 1\%$.

Фотография современной установки для измерения радиоактивности с помощью счетчика представлена на рис. 2.

МЕТОД МЕЧЕНЫХ АТОМОВ

Первые работы в этом направлении были выполнены еще в начале нашего столетия, когда исследователь мог располагать только естественными, встречающимися в природе, радиоактивными изотопами. Среди продуктов распада радия есть радиоактивный изотоп свинца — радий-*D*. С помощью этого изотопа стало возможным определить скорость диффузии атомов свинца в металлическом свинце. Под давлением соединили две пластинки свинца с хорошо пришлифованными поверхностями. При этом в одну из пластинок ввели радиоактивный свинец — радий-*D*. По истечении некоторого времени пластинки отделили друг от друга и определили количество и глубину проникновения радия-*D* в нерадиоактивную свинцовую пластинку. Никаким другим методом, естественно, такое исследование не могло быть проведено. Впоследствии, когда стали доступны радиоактивные изотопы практически всех химических элементов, для изучения диффузии метод меченых атомов нашел самое широкое применение.

Благодаря тому что радиоактивные изотопы могут быть обнаружены в очень малых количествах, во много раз меньших, чем позволяют обнаружить обычные аналитические методы, большое число исследований было направлено на изучение поведения различных веществ в ультрамалых, практически в невесомых количествах.

В разделе, посвященном получению и выделению радиоактивных изотопов, мы упоминали о работах академика В. Г. Хлопина и его школы по изучению закономерностей поведения веществ в ультрамалых количествах. Было установлено, что при выпадении кристаллических осадков макрокомпонента из растворов микрокомпонент захватывается осадком, если он кристаллизуется в подобных кри-

сталлических решетках и не захватывается, если эти решетки не подобны (не изоморфны). Также были изучены закономерности захвата микрокомпонента за счет адсорбции на осадках, как кристаллических, так и аморфных, например гидроокисях. Наконец, захват микропримесей может осуществляться различными коллоидными частицами, образуя так называемые радиоколлоиды. Все особенности поведения вещества в ультрамалых количествах были установлены методом меченых атомов, т. е. за поведением, распределением между фазами, захватом и т. д. исследователь мог следить по радиоактивности микрокомпонента. Никакой другой путь для решения такой задачи, пожалуй, непригоден. Эти работы имели огромное значение не только в решении радиохимических задач, связанных с концентрированием и выделением в чистом виде радиоактивных изотопов, но и для решения задач аналитической химии.

В частности, при помощи метода меченых атомов был изучен захват примесей в ряде технологических процессов. Для этого предполагаемые примеси «метились» радиоактивным изотопом, а после проведения процесса определялось содержание «метки» в конечном продукте. Аналогичным путем было исследовано влияние различных примесей на точность химических анализов. Метод меченых атомов нашел широкое применение при решении ряда технических задач. Так, износостойкость автомобильных шин в различных условиях определялась по количеству перешедшего в дорожное покрытие радиоактивного изотопа, введенного в шину; по распределению радиоактивного изотопа определялась интенсивность перемешивания реагентов в химических аппаратах, шихты в домнах и т. п. В сельском хозяйстве метод меченых атомов применяется при изучении поведения разных удобрений, путей и скорости их движения в теле растения. Большое число работ было посвящено биологическим и медицинским исследованиям. Введение радиоактивных изотопов в состав пищи или лекарства позволяет самым подробным образом проследить за их движением в организме, определить, какая часть и какими органами усваивается, какая часть и в виде чего выводится из организма. Метод меченых атомов позволяет изучить пути миграции различных элементов в морях, океанах и геологических процессах. Он позволяет проникнуть в тайны механизма химических превращений. Как известно,

химические реакции могут проходить в несколько стадий с образованием промежуточных веществ. Однако количество и время существования этих промежуточных продуктов могут быть столь малыми, что обнаружение их обычными методами невозможно. Исследователь может высказать только предположение об одном, а не другом пути протекания процесса. Для доказательства и проверки этого предположения в систему вводится меченный радиоактивным изотопом предполагаемый промежуточный продукт. Если по завершении этого процесса радиоактивный изотоп перейдет в конечный продукт, значит предположение оказалось правильным. В противном случае оно являлось ошибочным.

Приведенные примеры показывают, какие неисчерпаемые возможности заключены в применении метода меченых атомов. Трудно назвать те отрасли человеческой деятельности, особенно научно-исследовательской, где бы метод не дал самых продуктивных результатов. При этом для его осуществления не требуются значительные затраты. Стоимость небольшого количества препарата радиоактивного изотопа или меченого им соединения невелика, а аппаратура для регистрации и измерения радиоактивности доступна и может служить многие годы. Следует подчеркнуть еще одно немаловажное обстоятельство, способствующее широкому внедрению метода меченых атомов: для работы требуются столь небольшие количества радиоактивного изотопа (доли микрокюри), что работа с ним не требует специальных мер предосторожности и может быть выполнена в обычной заводской или сельской лаборатории, а то и в цехе или поле.

При применении метода меченых атомов следует учитывать наличие или отсутствие изотопного обмена. Поясним, что это значит. Выше уже подчеркивалось то обстоятельство, что изотопы по своим физическим и химическим свойствам практически неразличимы. Пусть, например, мы имеем баллон с углекислым газом, молекула которого состоит из атома углерода и двух атомов кислорода (CO_2). Пусть далее некоторая доля атомов углерода будет представлена в виде радиоактивного изотопа C^{14} . Будем пропускать углекислый газ через воду. Часть его растворится в воде. Если теперь измерить радиоактивность воды, то по этой величине можно определить растворимость углекислого газа в воде. При этом мы совершенно справедливо

считаем, что доля радиоактивных атомов углерода по отношению ко всем атомам углерода одинакова как в газовой, так и в жидкой фазе. Это значит, далее, что метка с радиоактивным углеродом должна быть введена в той же химической форме, что и изучаемое вещество, т. е. в виде углекислого газа.

Представим себе, что по причине отсутствия меченого углекислого газа мы ввели бы, например, другой газ — метан, молекулы которого состоят из атома углерода и четырех атомов водорода (CH_4) с радиоактивной меткой также в виде C^{14} . Проведем тот же опыт и измерим радиоактивность воды. В этом случае будет определена растворимость не углекислого газа, а метана. Этот вывод можно сделать на основании предположения, что молекулы углекислого газа и метана совершенно не обмениваются своими атомами углерода. Однако можно найти такие условия проведения эксперимента, например, при высокой температуре, когда изотопный обмен проходит с большей или меньшей скоростью. Завершением изотопного обмена является такое состояние, при котором во всех фазах и соединениях системы отношение количеств радиоактивного изотопа к стабильному одинаково. В этом случае поведение метки точно определяет поведение исследуемого вещества. Если же изотопный обмен не происходит или происходит медленно или частично, выводы из экспериментальных данных должны быть сделаны с учетом этого обстоятельства.

Изотопный обмен служит не только критерием законности применения метода меченых атомов, но и сам по себе является тонким методом изучения ряда процессов.

Так, по скорости изотопного обмена могут быть сделаны выводы о прочности химической связи атомов в молекуле, о структуре молекул, об устойчивости химических соединений в различных процессах и т. д. Особые успехи были достигнуты с помощью изотопного обмена в изучении механизма различных химических процессов, особенно каталитических.

КОНТРОЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Метод меченых атомов, как это стало ясно из предыдущего раздела, основан на том, что атомы радиоактивных и нерадиоактивных изотопов химических элементов обладают одинаковыми свойствами. В то же время радиоактивные атомы могут быть обнаружены в ничтожно малых количествах, благодаря тому что в процессе радиоактивного распада происходит испускание заряженных частиц или γ -лучей. Современная радиоэлектронная аппаратура позволяет зафиксировать каждый акт радиоактивного распада. Таким образом, радиоактивное излучение является меткой, вывеской радиоактивного изотопа. Во всех последующих главах объектом применения будут не сами изотопы, а те излучения, которые сопровождают радиоактивный распад.

Быстрые частицы, проходя через вещество, производят в нем ионизацию, постепенно теряя свою энергию. Пробег частицы в веществе зависит в первую очередь от природы частицы. Наименьшим пробегом обладают α -частицы. Их пробег в твердом веществе измеряется микронами. β -Частицы обладают значительно большим пробегом, и в воздухе он может составлять несколько метров. Наибольшим проникающим действием обладают γ -лучи. Они могут проникать даже через свинцовый экран значительной толщины. Пробег частицы зависит также от ее энергии. Естественно, что чем энергия выше, тем больше пробег. В-третьих, пробег зависит от плотности вещества, в котором тормозится излучение. Чем выше плотность, тем интенсивнее

торможение. На основе этих особенностей взаимодействия излучения с веществом строятся различные приборы контроля и управления технологическими процессами, всевозможные датчики, сигнализаторы. Этих приборов различного назначения в настоящее время изготавливается очень много. Поэтому мы рассмотрим только небольшую часть наиболее характерных и простых.

Как уже упоминалось выше, α -излучение очень сильно поглощается веществом, производя мощную ионизацию. Поэтому приборы и устройства с α -излучателями используют явление ионизации газа под действием α -частиц. Ионизованный газ проводит электрический ток. Чем больше ионизация, тем больше электропроводность газа.

При производстве непроводящих электрический ток материалов (диэлектриков) — пластмасс, искусственного волокна, бумаги, взрывчатых веществ — в результате трения на них возникают электрические заряды, которые приводят к спутыванию нитей, слипанию поверхностей, к искрению. Не говоря уже о том, что эти явления резко снижают производительность машин, они могут за счет искрения вызвать пожары и взрывы. Если между изоляционным материалом и заземленным корпусом машины установить источник α -излучения, то вследствие ионизации воздуха электрические заряды будут стекать на землю. В результате производительность машин резко возрастает, а опасность аварий сводится к минимуму. Источники α -излучения для снятия электрических зарядов производятся в промышленных масштабах и нашли широкое применение в текстильной промышленности, полиграфии, при производстве пленочных материалов и в других отраслях народного хозяйства. Для изготовления α -излучателей для снятия электрических зарядов чаще всего используется изотоп плутония — Pu^{239} . Для этих же целей применяется прометий-147, испускающий мягкие, т. е. малой энергии, β -частицы.

Мощную ионизацию α -частицами используют для создания различных анализаторов газа и газовых детекторов. Мы уже упоминали о том, что величина ионизации при прочих равных условиях зависит от вещества, с которым взаимодействует излучение. Чтобы произвести ионизацию молекул вещества, необходимо затратить некоторую энергию. Чем меньше энергия ионизации молекул, тем больше образуется ионов, тем большую электропроводность приоб-

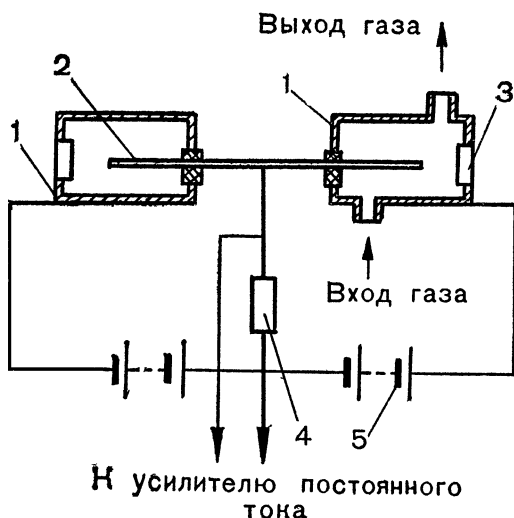


Рис. 3. Схема газового ионизационного детектора:

1 — эталонная и рабочая камеры; 2 — центральный электрод; 3 — источники α -или β -излучения; 4 — высокоомное сопротивление; 5 — источник питания.

ретает вещество. Для измерения ионизации в газах пользуются ионизационной камерой, которая представляет собой либо две плоские металлические пластинки, либо металлический цилиндр с центральным тонким электродом. Если между пластинками или между корпусом и центральным электродом приложить электрическое напряжение, то в цепи пойдет очень малый ток, обусловленный слабой ионизацией газа в ионизационной камере за счет космического излучения и теплового движения молекул газа. Если внутри камеры поместить источник α -излучения, ток резко возрастет. Величина тока под воздействием постоянного источника излучения зависит от состава газа внутри ионизационной камеры: изменяется состав газа, изменяется ионизационный ток. На этом принципе построены различные сигнализаторы превышения допустимой концентрации различных опасных газов — метана в шахтах, угарного газа, водорода и др. Ионизационные газовые детекторы применяются для технологического контроля в хи-

мической промышленности. В некоторых случаях вместо α -излучающих изотопов — радия, полония применяют и β -излучающие изотопы — протий-147, стронций-90 и др.

Устройство ионизационного газового детектора ясно из представленной на рис. 3 схемы. Две идентичные ионизационные камеры «запитываются» (5) навстречу друг другу. Если источники α - или β -излучения, подаваемое на камеры напряжение и состав газов в эталонной и рабочей камере одинаковы, то и ионизационные токи в обеих камерах будут одинаковы. На высокоомном сопротивлении (4) эти токи будут взаимно скомпенсированы, и подаваемое на усилитель напряжение будет равно нулю. На практике трудно выполнить условия полной идентичности обеих камер и режима их работы. Поэтому перед усилителем устанавливается устройство коррекции нулевого отсчета. Если в рабочей камере состав газа изменится, изменится и ионизационный ток. В результате на усилитель поступит сигнал, величина которого будет соответствовать величине изменения состава газа. Ионизационный детектор — прибор весьма чувствительный. В некоторых случаях он позволяет зафиксировать изменение состава газа в сотые и тысячные доли процента.

При постоянном составе газа ионизационный ток в камере зависит от его давления. Чем выше давление, тем сильнее ионизация. Эта зависимость используется для создания очень чувствительных ионизационных манометров. Особенно эффективно их применение для измерения низких давлений.

Ток в ионизационной камере зависит также и от содержания твердых взвешенных в газе частиц. На этом принципе построены противопожарные сигнализаторы дыма и другие устройства.

Под воздействием ионизирующего излучения радиоактивных изотопов некоторые вещества (люминофоры) испускают видимый свет. Различные смеси люминофоров со следами радиоактивных изотопов позволяют создавать светящиеся в темноте разнообразными цветами составы. Эти составы используют для производства светознаков ограждения, шкал и стрелок приборов, используемых в затемненных помещениях. Как правило, в целях безопасности обслуживающего персонала в светосоставах используют α -излучатели и мягкие β -излучатели.

Значительное число приборов контроля и автоматизации технологических процессов построено на явлении поглощения ионизирующих излучений веществом. Если на пути потока β -частиц или γ -лучей установить экран из какого-либо вещества, то поток за экраном будет слабее исходного, а при значительной толщине экрана практически полностью исчезнет. Ослабление потока ионизирующего излучения экраном зависит от энергии излучения, толщины экрана и его химического состава. Можно всегда подобрать такой радиоактивный изотоп, чтобы поглощение при заданной толщине экрана составляло заметную величину.

Поглощение γ -лучей веществом подчиняется весьма простой зависимости. Если поток γ -лучей, исходящий от источника, обозначить через I_0 , а поток прошедших через вещество — толщиной x — I_x , то $I_x = I_0 e^{-\mu x}$, где μ — коэффициент поглощения, зависящий от энергии γ -лучей и состава поглощающего вещества. Таким образом, измеряя начальный и конечный потоки при известном значении коэффициента поглощения, можно вычислить толщину поглощающего слоя. Поглощение β -частиц сложнее. Быстрые электроны, проходя через вещество, за счет взаимодействия с атомами постепенно теряют свою энергию. Для них существует так называемая толщина полного поглощения, зависящая от энергии электронов и состава поглощающего вещества. Если имеется поток быстрых моноэнергетических электронов заданной энергии, то, проходя через слой вещества (достаточно тонкий), на выходе остается тот же поток, но с электронами меньшей энергии. В этом случае о толщине экрана можно судить по уменьшению энергии частиц. Если толщина станет равной или большей толщины полного поглощения, поток за экраном полностью исчезнет.

При радиоактивном распаде, как уже упоминалось, поток электронов (β -частиц) не моноэнергетический, а представляет собой набор электронов с энергией от нуля до некоторого максимального значения. Поэтому при прохождении через экран определенной толщины меняется не только энергия, но и величина потока. Если поглощение не превышает 70—80 %, в первом приближении можно пользоваться формулой, приведенной для γ -лучей.

Если между источником β -частиц или γ -лучей и ионизационной камерой или счетчиком поместить поглощаю-

щее вещество, то величина ионизационного тока или скорость счета будет уменьшаться с увеличением толщины поглощающего вещества. На этом принципе работают различного типа толщиномеры. Для измерения толщины тонких полимерных пленок или тонкой бумаги в качестве источника ионизирующего излучения применяют радиоактивные изотопы, испускающие мягкие β -частицы. Для металлической фольги, картона и тому подобных листовых материалов применяют источники с жесткими β -частицами; для металлического проката — γ -излучение различной жесткости. Если связать выход ионизационной камеры или счетчика с исполнительным механизмом прокатного стана, каландровой машины или устройством, регулирующим зазор между валками, то можно осуществить автоматическое регулирование толщины изготавливаемого материала. Для определения толщины различных покрытий можно использовать свойство отражения β -частиц от поверхности. Степень отражения зависит от толщины и материала покрытия. Таким образом можно измерить толщину лакокрасочных покрытий на металлах, толщину изоляционного лака на проводах и т. д. Такой толщиномер также может служить датчиком для автоматического регулирования толщины покрытия.

На свойстве поглощения излучения веществом основана работа важных приборов технологического контроля — сигнализаторов и измерителей уровня жидких и сыпучих веществ. Сигнализаторы уровня представляют собой систему, состоящую из источника ионизирующего излучения и детектора (ионизационная камера, счетчик), помещенную в технологическом аппарате у верхней крышки или у дна. Если пространство между источником и детектором заполняется жидкостью или сыпучим веществом (зерно, песок и т. д.), то сигнал детектора резко уменьшается. Таким образом, система, установленная вблизи крышки, является сигнализатором переполнения аппарата, а у дна — опорожнения.

Вполне понятно, что сигналы детектора могут быть введены в систему автоматического управления технологическим процессом.

Схемы описанных устройств представлены на рис. 4 и 5.

Принцип работы уровнемера с радиоактивным источником несколько отличен. Источник ионизирующего излучения помещается в герметический поплавок, перемещаю-

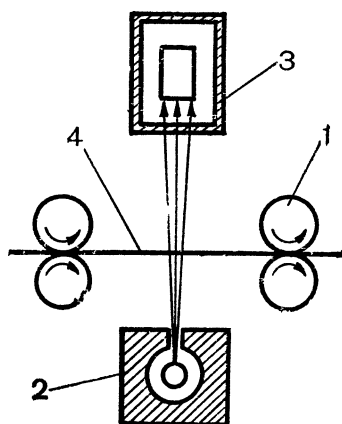


Рис. 4. Схема радиационного толщиномера:

1 — валки; 2 — источник излучения в защитной камере; 3 — счетчик или ионизационная камера; 4 — прокатываемый материал.

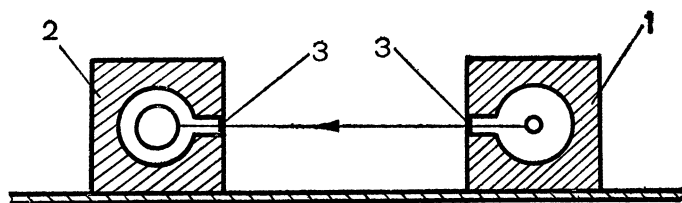


Рис. 5. Схема работы датчика переполнения или опорожнения: 1 — камера для источника излучения; 2 — камера для детектора излучения; 3 — герметизирующая фольга из нержавеющей стали.

щийся по вертикальной направляющей. Детектор помещается на крышке. При изменении уровня жидкости изменяются расстояние между источником и детектором и в соответствии с этим величина сигнала детектора. Этот сигнал может быть подан на показывающий или записывающий вторичный прибор, шкала которого тарирована в литрах или кубометрах, либо в систему автоматического управления.

Для источников ионизирующего излучения в уровнемерах, как правило, используют γ -излучающие радиоактивные изотопы, такие, как кобальт-60, цезий-137 и др.

К этому же классу приборов и устройств технологиче-

ского контроля относятся дефектоскопы. Рентгеновский аппарат, с помощью которого производятся снимки внутренних органов, является одним из ранних видов дефектоскопов. Рентгеновские лучи неодинаково поглощаются различными органами и тканями, в силу чего на фотопленке или светящемся под действием рентгеновских лучей экране, помещенными за объектом просвечивания, возникает изображение, по которому можно установить имеющее место отклонения от нормы. Однако для рентгеновских лучей достаточно прозрачными являются биологические объекты, обладающие небольшой плотностью, сравнительно тонкие слои древесины и пластмассы и только очень тонкие слои металлов. Кроме того, рентгеновская аппаратура громоздка и тяжела. Как же проверить качество отливки или сварного шва? Часто возникает необходимость просветить трубу или аппарат, заглянуть в двигатель или компрессор, не вскрывая их. С рентгеновской аппаратурой здесь не подступиться, да и жесткость рентгеновских лучей здесь недостаточна. На помощь приходят изотопные дефектоскопы с мощными источниками γ -излучающих изотопов в сотни, тысячи и даже десятки тысяч кюри. Обычно это те же кобальт-60 и цезий-137. В тех случаях, когда требуется более мягкое излучение, могут быть использованы европий-155, таллий-204 и другие изотопы.

Четкость изображения, или, как говорят, разрешающая способность дефектоскопа, тем выше, чем меньше размер источника и чем дальше он находится от просвечиваемого объекта. Чтобы выполнить это условие, и необходимы очень мощные источники.

Проверку разрешающей способности дефектоскопа производят при помощи специального эталона из того же материала, что и просвечиваемая деталь или устройство. Эталон, как это видно из рис. 6, представляет собой прямоугольный параллелепипед с пазами различной глубины. Глубина паза выражена в процентах от толщины. Таким образом, сравнивая контрастность обнаруженного дефекта с контрастностью паза, можно определить размеры и глубину дефекта.

Некоторые радиоактивные изотопы испускают рентгеновское излучение непосредственно, например тулий-170. Кроме того, при торможении сравнительно мягких β -частиц возникает тормозное рентгеновское излучение. На этом принципе могут быть построены очень портативные рентге-

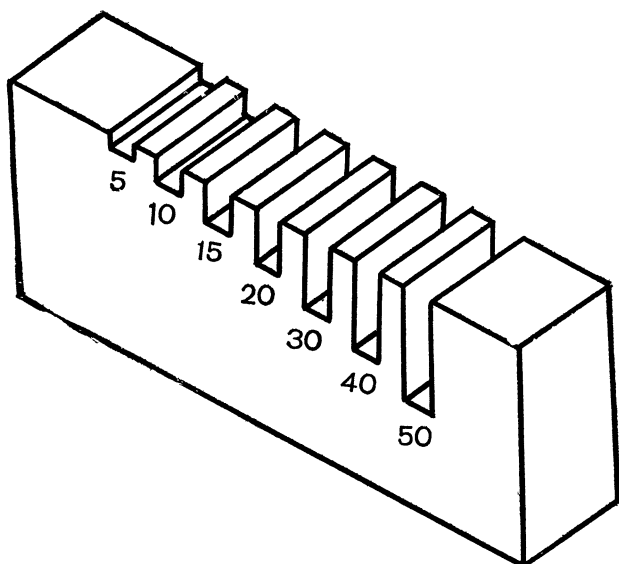


Рис. 6. Эталон для дефектоскопии. У пазов указана глубина в процентах от полной толщины эталона.

новские аппараты, не требующие электрических источников энергии и высоковольтного оборудования. Они могут быть размещены в небольшом чемоданчике. Такой аппарат совершенно незаменим в руках врача, обслуживающего высокогорные пастбища, полярные экспедиции, геологические партии — людей, находящихся в труднодоступных районах.

Дефектоскопия сварных соединений, отливок и различных узлов получила самое широкое распространение, а в ряде процессов стала обязательным методом контроля качества.

Наконец, в методах контроля и управления применяются различные счетчики деталей и изделий, движущихся по конвейеру или другому транспортному устройству. Их принцип также основан на поглощении ионизирующего излучения деталями или изделиями, проходящими между источником и детектором. На этом же принципе работают безконтактные счетчики оборотов.

РАДИОИЗОТОПНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

В уже рассмотренных областях применения радиоактивных изотопов энергетические соображения не принимались во внимание как второстепенные.

В настоящем разделе будут приведены те случаи применения радиоактивных изотопов, в которых используется непосредственно энергия радиоактивного распада. Конечно, энергия радиоактивного распада одного атома чрезвычайно мала. Но если радиоактивных атомов много, если их количества исчисляются граммами или даже килограммами, то мощность радиоактивного распада может составлять величину от долей ватта до нескольких сотен ватт. Наличие энергии радиоактивного распада это еще полдела. Необходимо уметь ее полезно использовать, а это, оказывается, не так просто.

В природе действует один из наиболее общих законов — закон сохранения энергии, суть которого заключается в том, что в заданной изолированной системе запас энергии остается постоянным; может происходить только превращение одного вида энергии в другой в строго соответствующих (эквивалентных) количествах. Превращение энергии из одного вида в другой совершается в различного рода преобразователях и устройствах. Так, с помощью гальванических элементов или электрических аккумуляторов происходит превращение химической энергии в электрическую, в электромоторах — электрической в механическую, а в электрических генераторах — наоборот, механическая энергия превращается в электрическую. В утюге или электроплитке электрическая энергия переходит в тепловую, аналогично тому, как при трении или работе какого-либо станка механическая энергия в конечном счете превращается в тепло. Во всех перечисленных примерах один вид

энергии полностью превращается в другой без каких-либо ограничений и условий, или, как говорят в технике, все эти устройства имеют коэффициент полезного действия (КПД), равный единице, или 100 %. Совсем иначе обстоит дело с тепловой энергией. В различных тепловых машинах — паровой машине, турбине, двигателе внутреннего сгорания — в полезную механическую энергию можно превратить только часть тепловой энергии, другая ее часть рассеивается в окружающей среде. Поэтому КПД тепловых машин всегда меньше единицы. Он тем выше, чем выше температура рабочего тела (пар, газ) и чем ниже его температура после завершения рабочего цикла. Так, коэффициент полезного действия паровоза не более 0,1, или 10 %, а современной тепловой электростанции 30—40 %. Чем же объяснить такое особое свойство тепловой энергии? Все другие виды энергии связаны с упорядоченным движением: электрическая — с упорядоченным движением электрических зарядов; химическая — с упорядоченным протеканием химических реакций; механическая — с упорядоченным движением частей механизмов. Тепловая же энергия связана с хаотическим, беспорядочным движением молекул и атомов в веществе. Поэтому невозможно с КПД, равным 100 %, превратить тепло в любой другой вид энергии. Чтобы достичь в тепловой машине КПД, равного 100 %, необходимо охладить рабочее тело до температуры, при которой тепловое движение молекул полностью прекращается, т. е. до абсолютного нуля. Такой процесс недостижим. Атомная энергия радиоактивного распада превращается в кинетическую энергию частиц и γ -лучей, разлетающихся во всех направлениях, которая, в свою очередь, превращается в тепловую энергию среды, поглощающей излучение. Поэтому на устройства, использующие энергию радиоактивного распада, распространяются те же ограничения, что и на другие тепловые машины.

Самым простым случаем использования энергии радиоактивного распада является создание тепловых изотопных источников. Выделяющееся тепло используется для поддержания необходимой температуры внутри различных космических аппаратов или приборных отсеках автоматических устройств, работающих в труднодоступных местах на Земле. При этом следует учесть, что в зависимости от периода полураспада применяемого изотопа такой источник тепловой энергии может работать десятки лет без за-

метного снижения мощности. Однако значительно чаще возникает необходимость не в источнике тепла, а в источнике электрической энергии. Изотопные источники электрической энергии автономны, могут работать непрерывно годы. Они абсолютно незаменимы для питания бортовой аппаратуры космических аппаратов и устройств питания автоматических метеостанций, расположенных в труднодоступных, горных и полярных областях, питания телеметрической аппаратуры и т. п. Изотопные источники электрической энергии используются в качестве источников питания электростимуляторов сердечной деятельности. В радиоизотопной энергетике применяются различные радиоактивные изотопы с различными характеристиками. Наиболее важными характеристиками являются вид излучения, период полураспада и удельное энерговыделение, т. е. мощность в ваттах на 1 г изотопа.

Ниже представлены эти характеристики для изотопов, имеющих практическое значение.

Изотоп	Период полураспада	Вид излучения	Удельное энерговыделение, вт/г
Стронций-90	27,7 года	β	0,95
Цезий-137	30 лет	β, γ	0,42
Церий-144	284 дня	β, γ	25,6
Прометий-147	2,7 года	β	0,33
Кобальт-60	5,3 года	β, γ	17,4
Тулий-170	134 дня	β , рентген	15,6
Полоний-210	138 дней	α, γ	140
Плутоний-238	89 лет	α	0,56
Кюрий-242	163 дня	α , рентген	120
Кюрий-244	17,6 года	α , рентген	2,9

Первые четыре радиоактивных изотопа являются продуктами деления урана и при развитой атомной энергетике могут быть получены практически в неограниченных количествах. Несмотря на это, их применение ограничено из-за наличия проникающего γ -излучения, испускаемого либо непосредственно, либо тормозного γ -излучения и рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии β -частиц с веществом. Для этих источников энергии требуется тяжелая защита от излучения, либо их применение ограничивается объектами, где нет людей и живых орга-

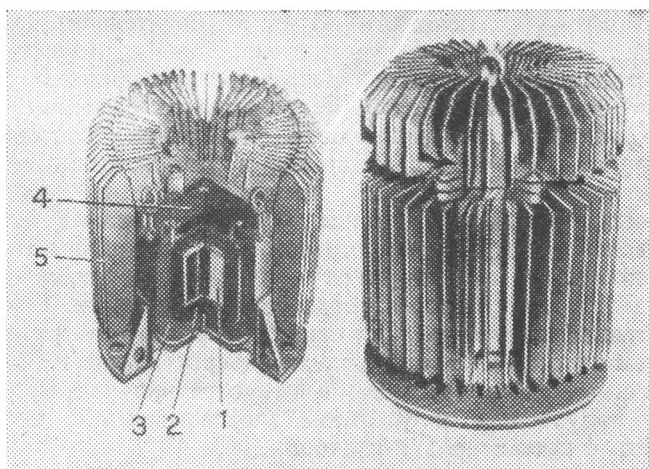


Рис. 7. Фотография и схематический разрез изотопного термоэлектрического генератора «Бета-С» на основе стронция-90:

1 — изотопный тепловой блок; 2 — защита; 3 — теплоизолирующие экраны; 4 — полупроводниковый термоэлектрический преобразователь; 5 — кожух-радиатор.

низмов. Исключение составляет прометий-147, который испускает очень мягкие β -частицы, защита от которых не вызывает особых трудностей. Кобальт-60 и тулий-170 получают в значительных количествах при облучении нейтронами стабильных кобальта и тулия в атомных реакторах. Однако для их использования так же, как и для описанных выше β -излучателей, имеют место те же ограничения. Что касается последних четырех α -излучателей, то их применение весьма перспективно из-за очень высокого энерговыделения. Особенно перспективно использование плутония-238, чистого α -излучателя, без сопутствующего γ -излучения или рентгеновского излучения.

В изотопных источниках для преобразования тепловой энергии в электрическую чаще всего используют полупроводниковые термоэлектрические преобразователи, работа которых основана на том, что при наличии разности температур на концах преобразователя возникает электрическое напряжение. Нагревание осуществляется за счет радиоактивного распада, а охлаждение — за счет сброса тепла

в окружающую среду. Чем больше разность температур между горячим и холодным концами, тем выше КПД преобразователя. Современные устройства имеют КПД, равный 5—10 %. Это значит, что на каждые 100 вт тепловой мощности можно получить 5—10 вт электрической. Остальное тепло может быть использовано непосредственно для подогрева. Радиоизотопные источники энергии уже сейчас широко используются как в СССР, так и в США для питания космических объектов, автоматических метеостанций с передачей информации по радио.

В качестве примера на рис. 7 представлены фотография и схематический разрез изотопного термоэлектрического генератора «Бета-С» на основе использования стронция-90. Такие генераторы серийно выпускаются в Советском Союзе и служат источником питания автоматических метеостанций, расположенных в труднодоступных районах.

Радиоизотопный блок (1) расположен внутри защитного кожуха (2). Затем следует слой экранов (3), служащих тепловодом к полупроводниковому термоэлектрореобразователю (4). Интенсивное охлаждение осуществляется при помощи наружного кожуха (5).

МЕДИЦИНА, БИОЛОГИЯ, ХИМИЯ

Применение радиоактивных изотопов в медицине и биологии началось давно, еще со времени открытия радиоактивности, и постоянно развивается. Мы уже рассматривали некоторые примеры в разделе, посвященном методу меченых атомов. Однако те примеры касались в основном изучения путей и механизмов движения веществ в живых тканях и организме. Здесь мы рассмотрим применение радиоизотопов не только в исследовательском плане, но и в целях диагностики и терапии.

Болезненные процессы в организме прежде всего сказываются на протекании обмена веществ. Нарушения в обмене можно проследить введением веществ и препаратов с радиоактивной меткой. С ее помощью можно определить, какая доля введенного препарата ассимилировалась организмом, а какая выведена. Далее можно определить, какой именно орган повинен в ассимиляции. Данные сравниваются с результатами, полученными на здоровых людях или животных. Таким образом, могут быть зафиксированы нарушения в тех или иных органах. Так, при нарушениях функций щитовидной железы в ней избирательно задерживается радиоактивный йод. Диагностика функциональных расстройств с помощью радиоактивных препаратов в ряде клиник нашла широкое применение.

Отечественная радиохимическая промышленность составляет значительное число препаратов с радиоактивными изотопами для диагностических и терапевтических целей. Например:

натрий-24 — состояние локального тканевого кровотока, проницаемости капилляров и мета-

- болизма натрия в организме при различных заболеваниях;
- фосфор-32 — диагностика и лечение заболеваний крови, диагностика злокачественных новообразований, лечение хронического лейкоза, заболеваний кожи;
- хром-51 — диагностика заболеваний крови и желудочно-кишечных кровотечений, беззондовое определение кислотности желудочного сока;
- стронций-85 — диагностика первичных и вторичных злокачественных опухолей скелета;
- йод-131 — оценка состояний сердечно-сосудистой системы, исследование состояния печени и желчного пузыря, лучевая терапия при поражении лимфатических узлов злокачественными опухолями, исследование функциональной деятельности почек, диагностика и лечение заболеваний щитовидной железы и др.;
- золото-198 — лучевая терапия злокачественных новообразований.

Более подробная информация по этому вопросу имеется в каталоге Всесоюзного объединения «Изотоп» «Медицинские радиоактивные препараты и изделия». В каталоге приведены данные о радиоизотопных препаратах и изделиях, лечебно-диагностические свойства которых испытаны ведущими медицинскими учреждениями и на применение которых имеется разрешение Министерства здравоохранения СССР.

Помимо различных препаратов, предназначенных для диагностики и лечения, самое широкое распространение получили изделия и установки для локального и общего облучения больных. Хорошо известно, что под действием ионизирующего облучения в живой клетке могут происходить различные изменения вплоть до ее гибели. Эти изменения зависят от дозы облучения. При определенных дозах может быть нарушен генетический аппарат клетки, в результате чего здоровая клетка может переродиться в злокачественную. При больших дозах облучения в клетке могут быть нарушены жизненно важные функции и она погибнет. На этом принципе и основана лучевая терапия. Современная медицина оснащена широким ассортиментом средств

лучевой терапии. Кто не слышал о кобальтовой пушке? Она представляет собой источник γ -излучения препарата кобальта-60, заключенный в толстую защитную свинцовую оболочку с узким цилиндрическим отверстием, через которое выходит пучок γ -лучей. Чтобы уберечь обслуживающий персонал от облучения, отверстие закрывается пробкой, манипуляции с которой осуществляются дистанционно. Пучком γ -лучей облучают опухоль. Важно при этом провести облучение таким образом, чтобы убить злокачественные клетки, а здоровые клетки повредить как можно меньше. В случае γ -облучения это достигается тем, что облучение производится несколькими источниками одновременно с таким расчетом, чтобы пучки от разных источников пересекались в нужном месте. Тогда доза в месте пересечения пучков будет кратна числу источников, а все остальные места прохождения пучка получают однократную дозу. Тот же эффект может быть достигнут и одним источником, если необходимое место облучать с разных направлений последовательно. В случае необходимости облучить наружные ткани или ткани, лежащие неглубоко, вместо γ -облучения применяют облучение α - и β -частицами. Как мы уже знаем, для этих частиц пробег невелик — от нескольких миллиметров для α -частиц до нескольких сантиметров для β -частиц. В качестве излучателей применяются радиоактивные аппликаторы и иглы. Первые представляют собой той или иной формы поверхность, покрытую препаратом радиоактивного изотопа. Поверх радиоактивного слоя наносится защитное покрытие, чтобы предотвратить возможность перехода радиоактивного препарата на места облучения и в окружающую среду. Защитное покрытие должно быть достаточно тонким, чтобы не поглотить значительную долю излучения, и достаточно прочным и надежным. В зависимости от типа и энергии излучения в качестве защитного покрытия применяют фольгу из алюминия и нержавеющей стали, эмали и полимерные пленки. При помощи аппликаторов лечат рак кожи, катаракты (помутнение хрусталика) и много других заболеваний.

На рис. 8 представлены изображения глазных аппликаторов на основе изотопов — стронция-90 (β -излучение) и кобальта-60 (γ -излучение).

Радиоактивные иглы представляют собой металлические тонкие капилляры с заостренным концом (типы иглы для шприцов), в канал которых вводится радиоактивный пре-

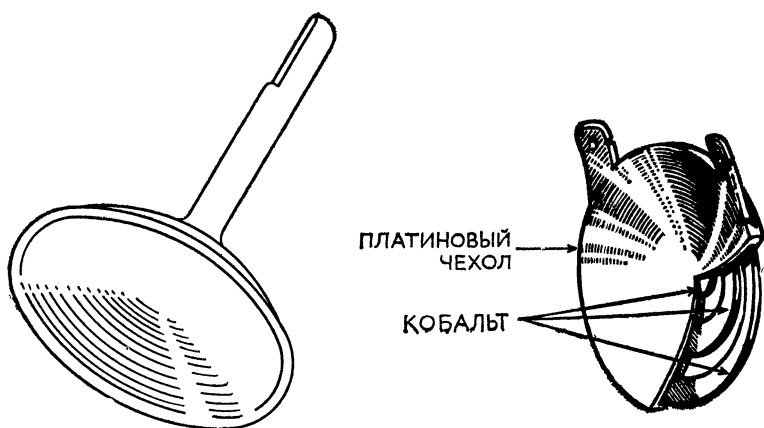


Рис. 8. Глазные аппликаторы:
а — на основе стронция-90; *б* — на основе кобальта-60.

парат, чаще всего в виде тонкой проволоочки. В СССР выпускаются штифты на основе золота-198 и наборы игл на основе кобальта-60.

Для лечения пораженных тканей такие иглы в определенном количестве и на определенное время вводят в эти ткани. Создавая необходимую дозу облучения, убивают злокачественные клетки, не затрагивая здоровые. Иглы могут быть достаточно длинными, а радиоактивный препарат размещаться только у острия. Таким способом может быть достигнуто местное облучение тканей, расположенных не только у поверхности, но и на достаточной глубине.

Помимо глазных аппликаторов, в широком ассортименте выпускаются кожные аппликаторы для лечения многих кожных заболеваний. Изготавливаются они на основе фосфора-32, кобальта-60, таллия-204, прометия-147.

К медицине и биологии примыкает лучевая стерилизация. Основана она на том, что облучение предметов, подлежащих стерилизации, производят такой дозой, которая является губительной для всех микроорганизмов. Для стерилизации используются мощные источники γ -лучей на основе радиоактивных кобальта-60 и цезия-137.

В первую очередь лучевая стерилизация удобна в отношении перевязочных материалов, игл, шприцов и другого

медицинского инструментария. В самом деле, указанные предметы могут быть простерилизованы после того, как они помещены в герметичную упаковку. При обычной тепловой стерилизации упаковка производится после нее, что может привести к нарушению стерильности.

Таким же путем можно стерилизовать ампулы с препаратами для инъекций. При этом доза должна быть такой, чтобы убить микроорганизмы и не вызвать нежелательных изменений в самом препарате.

Одно время предпринимались усиленные попытки применить лучевую стерилизацию пищевых продуктов с тем, чтобы удлинить сроки их хранения. Особенно это важно в отношении мясных и молочных продуктов. Пока эти попытки не дали хороших результатов, так как при значительных дозах облучения в самих пищевых продуктах происходят распад и накопление веществ, изменяющих вкус и запах, а иногда и вредных для организма. Тем не менее не исключено, что будут найдены такие формы облучения, при которых нежелательные последствия не будут иметь места.

Клетки различных органов по-разному чувствительны к ионизирующему излучению. При одних и тех же дозах одни клетки погибают, а другие остаются практически без нарушений и продолжают выполнять свои функции. Наиболее чувствительны к облучению зародышевые клетки. На этом их свойстве основывается применение облучения картофеля и семян для удлинения сроков их хранения без прорастания. Этот метод очень важен и перспективен и позволяет сохранить большие количества пищевых продуктов в овощехранилищах и элеваторах.

Под действием облучения в веществе могут происходить самые разнообразные химические процессы. Изучением этих процессов занимается возникшая новая отрасль науки — радиационная химия.

Благодаря успехам радиационной химии стало возможным изучить элементарные процессы, вызванные ионизирующим излучением, образование реакционноспособных ионов и радикалов. Это, в свою очередь, послужило основой для более глубокого понимания лучевых поражений организма и методов их предупреждения и лечения. Результаты исследований в области радиационной химии являются также основой создания новых, так называемых радиационно-химических, технологических процессов — синтез по-

лимерных материалов, создание материалов с особыми свойствами, ускорение химических реакций и многих других. Целый ряд химических процессов осуществляется только в условиях повышенных температур или давлений. Облучение ионизирующим излучением позволяет осуществить эти процессы при обычных условиях или значительно их ускорить.

В настоящее время радиационно-химические процессы внедрены в полупромышленных и в промышленных масштабах, число их с каждым годом увеличивается.

Значительно число работ по изучению влияния ионизирующих излучений радиоактивных изотопов на наследственность. Эти работы имеют первостепенную важность как с точки зрения предупреждения нежелательных генетических изменений, так и с точки зрения целенаправленного радиационного изменения наследственных признаков, создания растений и животных с новыми полезными свойствами, создания более продуктивных сортов и пород. Недалеко то время, когда с помощью радиационной генетики будут создаваться новые полезные растения и животные с наперед заданными наследственными свойствами.

БИОСФЕРА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Сейчас настало время вернуться снова к самому началу нашего повествования. Там шла речь об ассоциациях и эмоциях, связанных со словами «изотопы», «излучение» и т. д. После всего здесь написанного от ассоциаций и эмоций можно сознательно, со знанием дела перейти к объективной оценке значения применения радиоактивных изотопов: определить добро это или зло; что весомее — польза для человечества или возможные пагубные последствия?

Конечно, никто не станет отрицать, что бесконтрольное проникновение в окружающую нас среду радиоактивных изотопов чревато самыми серьезными последствиями. Об этом много писалось и в научной и популярной литературе в связи с испытаниями ядерного оружия. Происходило непрерывное заражение атмосферы, почвы и воды радиоактивными веществами. В настоящее время благодаря усилиям, в первую очередь Советского Союза, заключен ряд международных соглашений, способствовавших оздоровлению окружающей среды с точки зрения уровня радиоактивных загрязнений. Однако прогресс нельзя остановить. Атомная энергетика все время развивается, ее удельный вес в общем энергетическом балансе непрерывно увеличивается и в дальнейшем будет увеличиваться еще быстрее. Сейчас уже совершенно ясно, что сжигание угля, нефти и других горючих ископаемых — невосполнимые потери сырья химической промышленности, будущих пищевых продук-

тов, новых материалов. Запасы минерального топлива не бесконечны, и при современных темпах их добычи они могут быть исчерпаны в обозримом будущем. Использование атомной энергии во все возрастающих масштабах позволит задержать этот процесс. Но работа атомных энергетических установок, — электростанций, кораблей и т. п., короче, любого атомного реактора, — приводит к накоплению радиоактивных продуктов в качестве неминуемых отходов.

Возможно, что с освоением управляемого термоядерного синтеза количество радиоактивных отходов будет сведено к минимуму, но в настоящее время и в ближайшем будущем вместе с выработкой энергии за счет деления атомных ядер будет происходить накопление радиоактивных отходов. Нелепо думать, что это обстоятельство может заставить запретить или ограничить производство атомной энергии. Ведь никому не придет в голову запретить или ограничить использование автомобилей, развитие химической промышленности или металлургии из-за того, что отходы их самым пагубным образом сказываются на окружающей нас среде, нарушая условия обитания животного и растительного мира. Самыми действенными средствами здесь являются совершенствование технологии, создание более рациональных машин, двигателей и механизмов, разработка безотходных процессов, создание безопасных способов переработки и захоронения отходов. Точно так же должен стоять вопрос и в отношении отходов атомной энергетики.

К настоящему времени разработан ряд методов обращения с радиоактивными отходами и способов их безопасного захоронения.

Мы достаточно подробно ознакомились, какая колоссальная польза может быть получена от применения радиоактивных изотопов практически во всех отраслях человеческой деятельности. Однако основная масса радиоактивных продуктов должна быть надежно захоронена таким образом, чтобы полностью исключить их попадание в окружающую среду. Для этого радиоактивные отходы предварительно выдерживают в емкостях из нержавеющей стали и после того, как их радиоактивность в значительной мере снизится, они включаются в различные твердые устойчивые среды — стекло, битум, цемент и др. Эти блоки могут сколь угодно долго безопасно храниться в подземных хранилищах. В некоторых случаях имеется возможность

закачивать жидкие радиоактивные отходы в глубинные пласты или выработанные нефтяные или соляные каверны, если имеется полная уверенность в том, что за несколько сотен лет будет исключен какой-либо контакт этих пластов и каверн с поверхностью земли.

Как видно, можно избежать бесконтрольного попадания радиоактивных веществ в окружающую среду. В настоящее время разными законодательными актами, особенно в Советском Союзе, строго регламентированы меры по обеспечению безопасности как при работе с радиоактивными веществами, так и по методам их хранения и захоронения. К сожалению, в некоторых капиталистических странах чисто экономические соображения приводят к тому, что вопросам безопасности уделяется недостаточно внимания. Имеются случаи сброса радиоактивных отходов в моря, океаны и даже в реки, заражения поверхностных слоев земли и сброс радиоактивных аэрозолей в атмосферу. Однако в целом можно сказать, что меры по обеспечению безопасности биосферы радиоактивными веществами, принимаемые в законодательном порядке, значительно эффективнее, чем в отношении нерадиоактивных, но не менее токсичных отходов промышленности, транспорта, сельского хозяйства.

Работа с радиоактивными препаратами и источниками ионизирующих излучений, их использование в СССР регламентируются Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений (ОСП-72).

Эти Правила устанавливают требования к размещению лабораторий, учреждений и предприятий, предназначенных для работы с применением радиоактивных веществ и других источников ионизирующих излучений; требования к получению, учету и хранению радиоактивных веществ, к водоснабжению и канализации, к сбору, удалению и обезвреживанию твердых и жидких радиоактивных отходов. Санитарными правилами регламентируются допустимые уровни радиоактивных загрязнений. Содержание и дезактивация рабочих помещений, оборудования, средств индивидуальной защиты и личной гигиены, требования к радиационному контролю. Основные санитарные правила утверждены Главным санитарным врачом СССР и распространяются на все без исключения лаборатории, учреждения, предприятия и другие организации, работа которых свя-

зана с производством, обработкой, применением, хранением, транспортировкой радиоактивных веществ и других источников ионизирующих излучений.

Они разработаны в соответствии с Основами законодательства Союза ССР и союзных республик о здравоохранении, Санитарными нормами проектирования СН-245-71 и Нормами радиационной безопасности НРБ-69.

В Нормам радиационной безопасности приводятся данные о содержании радиоактивных изотопов в органах или тканях, соответствующем предельно допустимой дозе облучения, о пределах годового поступления радиоактивных изотопов, о среднегодовой допустимой концентрации в атмосферном воздухе и в воде, о предельно допустимой радиоактивности радиоизотопных источников на рабочем месте, не требующей регистрации или получения разрешения санитарно-эпидемиологической службы. Эти нормативы составлены практически для всех применяемых радиоактивных изотопов. Предельно допустимые концентрации определяются многими факторами — скоростью накопления и выделения в организме данного изотопа, его периодом полураспада, типом и энергией радиоактивного распада. Так, если токсичность β - и γ -излучения принять равной 1, то воздействие α -излучения в 10 раз сильнее, протонов — то же в 10 раз, тяжелых ядер — в 20 раз, тепловых нейтронов — в 3 раза, нейтронов разных энергий — в 2,5—10,5 раза.

Контроль за выполнением всех законодательных актов, правил и норм возложен на органы санитарной инспекции, а ответственность за их неукоснительное соблюдение — на руководство учреждений и организаций.

В Советском Союзе при Государственном комитете по использованию атомной энергии СССР создана специализированная организация — Всесоюзное объединение «Изотоп» с разветвленной сетью контор.

В функции В/О «Изотоп» входит поставка заинтересованным организациям препаратов радиоактивных и стабильных изотопов, различных источников ионизирующих излучений, оборудования для работы с радиоактивными веществами, средств защиты от ионизирующих излучений, приспособлений для безопасной работы, дозиметрической аппаратуры, радиоизотопных приборов, сигнализаторов, датчиков, излучателей, счетчиков и т. д.

По всей этой продукции выпускаются каталоги, информационные сообщения и прейскуранты. Через свои демонстрационные залы «Изотоп» оказывает консультацию.

Необходимые справки могут быть получены через Московское межобластное отделение В/О «Изотоп» по адресу: 117261, Москва, В-261, Ленинский проспект, 70/11, тел. 130-52-03.

Если по прочтении этой брошюры у части читателей будет разрушен психологический барьер, о котором шла речь в самом начале, если у некоторых из них возникнет стремление использовать в своей работе неисчерпаемые возможности, тающиеся в радиоактивных изотопах, если в результате этого стремления в каких-то конкретных случаях будут повышены производительность труда, качество продукции, созданы новые процессы и усовершенствованы старые, автор будет считать свою задачу выполненной.

Соломон Наумович ОЗИРАНЕР

**РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Редакторы В. П о з д ы ш е в
Обложка И. З о т к и н а

Художественный редактор В. К о н ю х о в

Технический редактор А. К р а с а в и н а
Корректор Л. С о к о л о в а

А02832 Индекс заказа 44108. Сдано в набор 6/VI-74 г. Подп. к печати 23/VII-74 г.
Формат 84×108^{1/32} Бумага типографская № 3 Бум. л. 1 Печ. л. 2
Усл.-печ. л. 3,36 Уч.-изд. л. 3,0 Тираж 50 520 экз. Заказ 1104 Цена 10 коп.
Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 3/4

Чеховский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Чехов Московской области

УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!

РЕДАКЦИЯ СЕРИИ «ХИМИЯ» ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЗНАНИЕ», СТРЕМЯСЬ СДЕЛАТЬ СВОЮ ЛИТЕРАТУРУ БОЛЕЕ ИНТЕРЕСНОЙ И ДЕЙСТВЕННОЙ, ПРОСИТ ВАС ЗАПОЛНИТЬ НАСТОЯЩУЮ АНКЕТУ. ЗАПОЛНЕННУЮ АНКЕТУ ПРОСИМ ВЫСЛАТЬ ПО АДРЕСУ: МОСКВА, ЦЕНТР, НОВАЯ ПЛОЩАДЬ, 3/4, ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ», РЕДАКЦИЯ СЕРИИ «ХИМИЯ». ОТВЕЧАЯ НА АНКЕТУ, НУЖНО ПОДЧЕРКИВАТЬ ТЕ ОТВЕТЫ, КОТОРЫЕ СООТВЕТСТВУЮТ МНЕНИЮ ОТВЕЧАЮЩЕГО. АНКЕТУ ПОДПИСЫВАТЬ НЕ ОБЯЗАТЕЛЬНО.

ЗА ПРОДЕЛАННУЮ РАБОТУ БУДЕМ ВАМ ОЧЕНЬ ПРИЗНАТЕЛЬНЫ.

АНКЕТА

I. УДОВЛЕТВОРЯЕТ ЛИ ВАС ЛИТЕРАТУРА
ПО ФОРМЕ ИЗЛОЖЕНИЯ

- 1) ДА
- 2) НЕТ

ПО СОДЕРЖАНИЮ

- 3) ДА
- 4) НЕТ

ПО ОФОРМЛЕНИЮ

- 5) ДА
- 6) НЕТ

II. КАКИЕ БРОШЮРЫ СЕРИИ «ХИМИЯ» ТЕКУЩЕГО ГОДА ОКАЗАЛИСЬ ВАМ ОСОБЕННО ПОЛЕЗНЫМИ (ПЕРЕЧИСЛИТЬ НАЗВАНИЯ)

III. КАКИЕ БРОШЮРЫ, ИЗДАННЫЕ НАМИ ЗА ТО ЖЕ ВРЕМЯ, ВЫ СЧИТАЕТЕ НЕУДАЧНЫМИ (ПЕРЕЧИСЛИТЬ)

IV. КАКИЕ БРОШЮРЫ ИНТЕРЕСУЮТ ВАС БОЛЬШЕ ВСЕГО

- 7) ПО ПРОФИЛЮ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
- 8) ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ КРУГОЗОРА
- 9) ОБЗОРНОГО ХАРАКТЕРА

V. СКОЛЬКО ЛЕТ ВЫ ПОЛЬЗУЕТЕСЬ НАШЕЙ ЛИТЕРАТУРОЙ

- 10) ДО 3 ЛЕТ
- 11) ОТ 4 ДО 6 ЛЕТ
- 12) СВЫШЕ 6 ЛЕТ

**VI. БЫВАЮТ ЛИ ТРУДНОСТИ В ПРИОБРЕТЕНИИ НА-
ШЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

- 13) ДА
- 14) НЕТ

VII. ВАШЕ ОБРАЗОВАНИЕ

- 15) СРЕДНЕЕ
- 16) СРЕДНЕЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
- 17) НЕЗАКОНЧЕННОЕ ВЫСШЕЕ
- 18) ВЫСШЕЕ
- 19) ИМЕЮ УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ

VIII. ВАШ ВОЗРАСТ

- 20) ДО 20 ЛЕТ
- 21) С 21 ДО 30 ЛЕТ
- 22) С 31 ДО 45 ЛЕТ
- 23) С 46 ДО 55 ЛЕТ
- 24) СТАРШЕ 55 ЛЕТ

IX. ВАШЕ СОЦИАЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

- 25) РАБОЧИЙ
- 26) КОЛХОЗНИК
- 27) СЛУЖАЩИЙ
- 28) ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАБОТНИК
- 29) ПРЕПОДАВАТЕЛЬ
- 30) НАУЧНЫЙ РАБОТНИК

X. МЕСТО ВАШЕГО ПРОЖИВАНИЯ

- 31) СТОЛИЦА РЕСПУБЛИКИ
- 32) ОБЛАСТНОЙ ГОРОД
- 33) РАЙОННЫЙ ГОРОД, ПОСЕЛОК
- 34) СЕЛЬСКАЯ МЕСТНОСТЬ

**ВАШИ ПОЖЕЛАНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ
О БРОШЮРАХ СЕРИИ «ХИМИЯ».**

10 коп.

Индекс 70074