

Н.Я.Флексер

Радиоактивные и з о т о п ы в научных исследованиях

Н. Я. ФЛЕКСЕР,
кандидат технических наук

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1966

530.3

Φ71

Введение

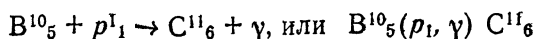
Впервые радиоактивные изотопы были получены искусственным путем в 1934 году, когда в одном из своих опытов Фредерик и Ирен Жолио-Кюри поставили на пути движения альфа-частиц тонкую алюминиевую пластинку. Убрав радиоактивный источник, они обнаружили, что излучение продолжается. Но теперь, неожиданно для ученых, источником радиоактивного излучения стала уже сама алюминиевая пластинка. Они выделили излучающее вещество — им оказался фосфор. Так впервые был выделен возникший в результате облучения алюминиевой пластинки радиоактивный изотоп фосфора.

Ученым удалось получить таким же путем еще несколько радиоактивных изотопов. Стало ясно, что радиоактивные изотопы элементов, не существующие в природе, могут быть созданы в лаборатории.

Что произошло, когда в алюминиевую пластинку попали альфа-частицы (ядра гелия с массовым числом 4 и зарядом 2)? Попадая в ядро атома алюминия, у которого массовое число равно 27, а заряд 13, и выбив из него нейтрон, альфа-частица изменила его состав: массовое число стало равным 30, а заряд 15.

Если обратиться к периодической системе элементов, то можно установить, что ядро с таким зарядом может быть только ядром фосфора. Следовательно, произошло превращение одного элемента — алюминия, в другой элемент — фосфор. Так как у природного фосфора массовое число равно 31, то в данном случае был получен изотоп природного фосфора — фосфор-30, у которого в ядре не хватает одного нейтрона. Отсутствие одного нейтрона вызывает неустойчивость ядра этого изотопа, а следовательно, его радиоактивность. Устойчивое состояние наступит лишь тогда, когда ядро выбросит позитрон и нейтрино и превратится в устойчивый атом другого элемента — кремния. Позже было установлено, что для по-

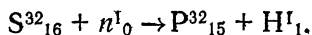
лучения искусственных радиоактивных изотопов пригодны не только α -частицы, но и протоны и дейтроны — ядра тяжелого изотопа водорода — дейтерия. Под действием этих частиц изменяется состав ядра атома, происходит ядерная реакция. Продуктами этих реакций во многих случаях являются атомные ядра изотопов, не встречающихся в природе, причем эти ядра всегда радиоактивны. Но, как и все прочие, они обладают положительным электрическим зарядом и для проникновения в другое атомное ядро должны преодолеть отталкивающее действие его электрического поля. Чтобы сообщить им необходимую энергию, используют ускорители. Энергия частиц становится достаточной, чтобы попасть в ядро и вызвать в нем ядерную реакцию. Вот как протекает, например, реакция получения радиоактивного углерода C^{14}_6 :



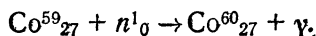
Это значит, что в исходное ядро — ядро бора (B^{10}_5), влетает протон (p^1_1), в результате чего возникает радиоактивный изотоп углерода с одновременным испусканием гамма-кванта (γ). Таков первый способ получения радиоактивных изотопов.

Второй способ заключается в выделении радиоактивных изотопов из отходов, образующихся при делении урана. Так могут быть получены широко применяющиеся в научных исследованиях радиоактивные изотопы стронция, рубидия, йода и др.

Самым распространенным способом промышленного получения радиоактивных изотопов является третий способ: облучение ядер медленными нейтронами. Если направить пучок нейтронов на ядро какого-либо элемента, то часть нейтронов будет захватываться ядром — произойдет реакция радиационного захвата (открытая итальянским ученым Э. Ферми), которая служит теперь основой получения почти всех радиоактивных изотопов. В качестве источников нейтронов используются ядерные реакторы. Нейтроны освобождаются при делении ядер урана и замедляются в графите или воде. Имеется несколько типов таких реакций. Вот как, например, протекает реакция получения из серы радиоактивного изотопа фосфора:



Но чаще всего такая реакция сопровождается захватом нейтрона ядром с последующим испусканием γ -кванта, т. е. реакция типа (n, γ) . В результате образуется ядро с тем же порядковым номером, что и исходное, например:



Полученные изотопы очищают от посторонних примесей. Это наиболее трудная задача. Изотопы для медицинских исследований необходимо наиболее тщательно очистить от примесей других элементов, которые, воздействуя на организм, могут исказить результаты. В других случаях достаточно очистить изотопы только от других радиоактивных веществ.

Известно более десятка способов разделения изотопов. Метод диффузии заключается в том, что смесь газообразных изотопов пропускается через пористые перегородки. Газы с более легкими атомами движутся быстрее, проходят перегородку раньше газов с тяжелыми атомами. Таким образом, происходит концентрация отдельных изотопов, позволяющая отделять их друг от друга.

Иногда смесь газообразных изотопов помещают в закрытый сосуд, у которого одна стенка горячая, а другая холодная. Более легкие изотопы будут скапливаться у горячей стенки и подниматься вверх, а более тяжелые—у холодной и опускаться. Такой способ разделения изотопов называется термодиффузией. Он достаточно прост, но не отличается высокой производительностью. Для увеличения производительности берут несколько сосудов и соединяют их последовательно.

В способе центрифугирования смесь изотопов помещается во вращающуюся емкость, где под действием центробежных сил более тяжелый изотоп оттесняется к стенкам, а легкий концентрируется в середине. Осуществляя соответствующим образом подогрев, добиваются еще и того, что легкий изотоп поднимается вверх, а тяжелый опускается вдоль стенок емкости вниз. Как и в предыдущем способе, для увеличения производительности разделения используют несколько установок, соединенных последовательно.

Существует способ электромагнитного разделения. С помощью специальных установок — электромагнитных разделителей создаются сильные электрические и магнитные поля. Ионизованная под действием пучка электронов газообразная смесь изотопов проходит через электрическое поле, которое сортирует ионы в зависимости от их массы на более быстрые и медленные. Далее смесь проходит через магнитное поле, под действием которого ионы в зависимости от их массы меняют направление движения. Электромагнитный способ обладает рядом достоинств. Основное из них заключается в возможности получения почти идеально химически чистых изотопов.

Используются также способы химического выделения и хроматографического разделения. В первом — смесь радиоактивных изотопов растворяют в какой-либо кислоте, а затем выделяют изотоп из раствора в виде осадка. Но этот способ пригоден не всегда, особенно при незначительных количествах радиоактивного изотопа. Некоторые изотопы могут очень

быстро распадаться, и пока их выделяют таким способом, остается очень мало радиоактивных атомов.

Широкое распространение получил более оперативный способ, называемый хроматографическим разделением. Он был открыт еще в 1903 году, но тогда ученые не могли предположить, каким полезным он станет в химии. Если пропустить через колонку, наполненную мелкими частицами, смесь красителей, то на ней можно будет наблюдать столько цветных колец, сколько было разных красителей. По этому явлению такой способ разделения получил название хроматографического, от греческого слова *chroma* — цвет. Причина осаждения находящегося в растворе вещества на поверхности частиц кроется в силах притяжения молекулярного сцепления. Такое явление — поглощение из газов или растворов находящихся в них веществ поверхностью твердого тела — называется адсорбцией. Его часто используют на практике; например, очистка загрязненного воздуха в противогазе основана на явлении адсорбции.

Подбирая соответствующим образом тот или иной адсорбент — порошок, на котором должно произойти осаждение, можно добиться того, что один из находящихся в растворе изотопов осядет на нем, а другой беспрепятственно выйдет из колонки. Теперь остается только пропустить через колонку такой раствор, который сможет отобрать у адсорбента захваченный им изотоп. Описанный способ применяется часто в более сложной форме, которая позволяет разделить друг от друга три, а иногда даже и больше различных радиоактивных изотопов.

Полученные тем или иным способом радиоактивные изотопы могут быть переведены в жидкое, твердое или газообразное состояние.

Жидкие и газообразные радиоактивные изотопы применяются в основном в качестве индикаторов в методе меченых атомов, а твердые — как источники радиоактивного излучения. Твердые и порошкообразные источники радиоактивного излучения могут быть выполнены в виде ампул в металлической оболочке или в виде проволоки. Размеры проволоки малы. Например, изотоп кобальта-60, активностью до 10 милликюри, имеет длину порядка 10 мм, а диаметр 1 мм. Жидкие радиоактивные источники расфасовываются в стеклянные ампулы самых разнообразных размеров.

Транспортировка радиоактивных изотопов осуществляется в специальных контейнерах из пластмассы, алюминия, стали или свинца. Материал контейнера и толщина его стенок выбираются в соответствии с видом излучения и его энергией. Так, источники гамма-излучения, например кобальт-60 и цезий-137, всегда упаковываются в свинцовые контейнеры, а источники бета-излучения, фосфор-32, — в пластмассовые.

Радиоизотопные методы исследований

Область научных исследований, в которой применяются сейчас радиоактивные изотопы, поистине безгранична. Это объясняется их специфическими свойствами, и в первую очередь большой энергией излучения, позволяющей обнаружить ничтожно малые количества радиоактивного изотопа. Большим преимуществом является независимость их радиоактивного распада от внешних условий: температуры, вибрации и агрегатного состояния самого радиоактивного изотопа. Важна также и тождественность химических свойств радиоактивных и стабильных изотопов одного и того же элемента. И, наконец, наличие разных видов излучения с различной проникающей способностью. Все это является крайне заманчивым для экспериментаторов и благодаря таким свойствам радиоактивные изотопы и использование радиоизотопных методов получили широкое практическое применение в самых разнообразных научных исследованиях.

Итак, радиоактивные изотопы используются как источники излучения или как индикаторы — указатели.

В первом случае исследователь устанавливает изотоп, с одной стороны, изучаемого объекта, а с другой, измеряет интенсивность излучения, которое пришло через этот объект, т. е. просвечивает его. Степень ослабления зависит от толщины, плотности, химического состава объекта. Поэтому результаты таких наблюдений говорят о многом: какова плотность объекта, равномерно ли она распределена по всем его частям, какую он имеет влажность и толщину, однороден ли по составу. Этот метод исследований носит название гаммаскопии и в качестве источников излучения использует гаммы, излучающие радиоактивные изотопы, такие, как Co^{60} , Cs^{137} .

С помощью гаммаскопии контролируют качество изготовления или монтажа стальных и бетонных конструкций, определяют плотность грунта в основании и в теле сооружения. Но не все радиоактивное излучение проходит через находящийся на его пути объект, часть его отражается. Оказалось, что по этому, так называемому рассеянному излучению, тоже можно судить о свойствах исследуемого объекта. Такой прием исследований называется гамма-гамма-методом. В геофизических методах разведки полезных ископаемых он получил название гамма-гамма-каротажа¹ и широко применяется на практике. Для этого в пробуренной скважине передвигают источник гамма-излучения и регистрируют излучение, рассеянное породами. По величине рассеяния определяют плотность и состав залегающих пород.

¹ Каротаж — способ изучения пород без отбора образцов.

Но не только гамма-излучающие изотопы применяются в качестве источников излучения. Для определения толщины тонких покрытий применяются источники альфа- и бета-излучения, а для исследования влажности — источники нейтронного излучения. Принцип нейтронного метода измерения влажности заключается в том, что поток быстрых нейтронов испытывает наибольшее замедление в объекте при столкновении с ядрами атомов водорода. Это приводит к появлению медленных нейтронов, число которых и характеризует степень влажности.

Но наибольшее значение нейтронное излучение имеет в активационном анализе для определения в однородном объекте различных примесей. Для этого исследуемый объект облучают нейтронами, в результате чего слагающие его элементы становятся источниками радиоактивного излучения. По виду и энергии радиоактивного излучения исследователь может установить не только наличие самых незначительных примесей, но и их химический состав. Например, с помощью этого метода, называемого активационным анализом, можно установить присутствие теллура в количестве 10^{-20} г. Конечно, никакой другой метод анализа не может выявить таких сверхмикроскопических количеств.

Применяя радиоактивные изотопы в качестве источников излучения, исследователи часто используют ионизирующую способность излучения. Наибольшей такой способностью обладает альфа-излучение, которое выбивает у атомов электроны, в результате чего возникают положительно и отрицательно заряженные ионы. Ионизирующая способность радиоактивного излучения используется во многих радиоизотопных приборах. Иногда ионизирующая способность используется исследователями как самостоятельный фактор воздействия на облучаемый объект. Так лечат злокачественные опухоли, выводят новые виды растений, получают новые материалы и т. д.

Второе направление — использование изотопов как индикаторов, т. е. указателей, — метод меченых атомов. Он заключается в том, что в исследуемую среду вводится незначительное количество химического соединения, в состав которого входит радиоактивный изотоп, и ведутся наблюдения за его дальнейшим распределением в этой среде. Такие наблюдения позволяют установить, куда движется исследуемая среда, например, в какую сторону движутся подземные воды, как происходит обмен веществ или перемешивается расплавленная сталь. Если при проведении эксперимента исследователь зафиксирует время введения меченого вещества и время его обнаружения в объекте, то, зная расстояние, пройденное меченым веществом, он может вычислить скорость движения, например, скорость передвижения наносов в реках, питательных веществ в растениях, крови в организме человека.

Метод радиоактивных индикаторов позволяет исследователю установить количество какого-либо вещества, растворенного в данном объекте. Для этого часть вещества метят радиоактивным изотопом и перемешивают в объекте. После этого, отобрав пробу, определяют, какое количество меченого вещества присутствует в отобранном объеме. Такой прием исследования носит название изотопного разведения и чрезвычайно эффективен, так как позволяет определить количество вещества в растворе без выделения его в чистом виде.

Таким образом, в методе меченых атомов радиоактивный изотоп будет вести себя так, как ведет та среда, в которую он введен. Но в связи с тем, что поведение изучаемой среды еще неизвестно, то в некотором смысле радиоактивному изотопу предоставлена полная свобода действий. И задача состоит в том, чтобы обнаружить присутствие радиоактивного изотопа по свойственному ему радиоактивному излучению.

Обнаружение радиоактивных изотопов

Способов обнаружения радиоактивных изотопов немного, всего три — фотографический, ионизационный и сцинтилляционный, но их вполне достаточно, чтобы проводить любые исследования. В основе всех способов обнаружения лежат те явления, которыми сопровождается прохождение радиоактивного излучения в веществе.

Исторически первый способ регистрации — фотографический, и, собственно говоря, с его помощью французский ученый Анри Беккерель впервые обнаружил, что некоторые вещества способны испускать лучи. Способность радиоактивного излучения вызывать почернение фотографической эмульсии и сейчас широко используется в практике научных исследований. Наиболее часто он применяется в гамма-дефектоскопии сварных швов, стальных и бетонных конструкций, для регистрации радиоактивного излучения, прошедшего через контролируемое изделие. Там, где плотность вещества была ниже, чем в остальной части конструкции, на пленке после проявления будут темные места, а в местах с повышенной плотностью — светлые.

Важно то, что в методе меченых атомов с помощью фотопленки можно получить картину распределения меченого изотопом вещества. В медицинских исследованиях фотопленку накладывают на некоторое время на ткань, в которой должно распределиться введенное ранее вещество. Радиоактивное излучение, попадая на пленку, выдает присутствие радиоактивного изотопа, а тот, в свою очередь, вещества, в состав которого он введен. Проявив пленку, получают видимое изобра-

жение распределения вещества. Такой способ регистрации называется автордиографией, а пленка с изображением — радиоавтографом. Техника этого метода постоянно совершенствуется и сейчас на снимке можно получить даже картину распределения радиоактивного изотопа в отдельной клетке. Фотографический способ обнаружения радиоактивного излучения очень нагляден, но «фотографируемый» изотоп должен быть, как правило, неподвижен.

На способности радиоактивных излучений ионизовать атомы и молекулы основаны ионизационные способы обнаружения. Но здесь нужны уже приборы. Наиболее широкое применение получили газоразрядные счетчики. Газоразрядные счетчики были впервые предложены в 1908 году Гейгером и Резерфордом и с тех пор не претерпели каких-либо принципиальных изменений. Такой счетчик представляет собой стеклянный или металлический баллон диаметром 30 мм, запаянный с одного или двух концов. По его оси натянута изолированная тонкая нить из вольфрама, железа или другого металла. Она является анодом счетчика, а катодом служит та часть стеклянного баллона, которая покрыта с внутренней стороны проводящим слоем, или же стальной цилиндр, вставляемый в баллон. Между анодом и катодом создается постоянное электрическое поле с разностью потенциалов до 2000 в. Счетчик заполняется каким-либо одноатомным газом, например аргоном, с добавлением многоатомных галогенных газов.

Вылетевшая из атома изотопа частица, например электрон, при попадании в счетчик взаимодействует с атомами заполняющего его газа и образует на пути своего движения ионы. Положительные ионы под действием электрического поля устремляются к катоду, а отрицательные к аноду, образуя на своем пути все новые и новые ионы. Этот процесс протекает очень быстро и приводит к тому, что в счетчике на какое-то мгновение возникает ток. За счет этого напряжение на нагрузочном сопротивлении падает, что и является признаком того, что в счетчик влетела частица. Такой скачок напряжения, или, как его называют, импульс, усиливают с помощью соответствующей электронной схемы и передают на регистрирующий прибор. Так, с помощью газоразрядного счетчика регистрирующий прибор указывает на присутствие радиоактивного изотопа.

Газоразрядные счетчики различаются между собой по размерам, материалу катода, форме и другим признакам. В зависимости от вида излучения и его энергии экспериментатор выбирает тот или иной счетчик. Так как регистрация гамма-квантов в отличие от бета-частиц осуществляется по вторичным электронам, выбиваемым гамма-квантами из атомов вещества катода счетчика, то для таких целей катод де-

лают из тяжелых элементов, а для регистрации бета-частиц, наоборот, из легких металлов. Иногда даже стеклянный баллон запаивают только с одной стороны, а другой закрывают тонким слюдяным окошком, позволяющим альфа- и бета-частицам беспрепятственно проникать внутрь счетчика.

Наконец, третий способ обнаружения радиоактивного излучения — сцинтилляционный — основан на свойстве некоторых веществ (сцинтилляторов) под действием излучения давать световые вспышки. Такими веществами являются неорганические кристаллы — йодистый натрий, активированный таллием, сернистый цинк и органические вещества — нафталин, стильбен, жидкие фосфоры и некоторые пластмассы. Частица или гамма-квант, попадая в плотную среду сцинтиллятора, взаимодействуют с его атомами, за счет чего часть их переходит в возбужденное состояние. Обратный переход атомов в нормальное состояние сопровождается испусканием света — люминесценцией. Такой способ обнаружения был известен очень давно, но не получал широкого распространения, так как наблюдать световые вспышки визуально довольно утомительно. Лишь в 1947 году, когда к сцинтиллятору был добавлен фотоумножитель, появился сцинтилляционный счетчик, которым и пользуются теперь для обнаружения радиоактивного излучения.

Итак, сцинтилляционный счетчик состоит из кристалла и фотоумножителя. Теперь уже не надо вести визуальные наблюдения за световыми вспышками — это делает фотоэлемент, находящийся в фотоумножителе. Падающие на него фотоны света преобразуются в электроны и двигаются по направлению к первому диноду (так называется первый электрон в умножителе). Попадая в него, электроны сами выбивают из атомов слагающего его вещества еще несколько электронов, которые, попадая в поле притяжения следующего, второго, динода, начинают двигаться к нему. В результате столкновения со вторым динодом число электронов еще больше увеличивается. Этот процесс повторяется на всех динодах и в результате, после попадания электронов на анод, на выходе счетчика возникает довольно большой импульс напряжения, который несложно зарегистрировать. Сцинтилляционный счетчик, соединяя в себе достоинства газоразрядного счетчика, обладает дополнительно большей эффективностью и разрешающей способностью.

В практике научных исследований иногда встречаются задачи, когда нужно распознать присутствие того или иного изотопа. На такой вопрос приходится отвечать экспериментаторам, изучающим, например, взаимное перемешивание двух сред, каждая из которой мечена разным радиоактивным изотопом. Взяв пробу, необходимо установить, присутствуют ли в ней оба радиоактивных изотопа или только один. А если

один, то какой? Это можно определить, ведь изотопы не близнецы, и у каждого из них свое излучение.

Для этого подключают сцинтилляционный счетчик к особому прибору — гамма-спектрометру, который по свойственной каждому изотопу энергии излучения безошибочно укажет, какие изотопы присутствуют в пробе.

Для регистрации нейтронов годятся как газоразрядные, так и сцинтилляционные счетчики. Для этого внутрь счетчика или на его поверхность наносится бор, который, захватывая медленные нейтроны, испускает альфа-частицу и превращается в литий. Альфа-частица ионизует газовое пространство счетчика и вызывает импульс, который регистрируется прибором.

Но обнаружить изотоп еще недостаточно, надо определить его количество — активность. Это сделать несложно. Относительное количество изотопа определяется с помощью электронных счетных устройств. Они состоят обычно из радиосхемы, усиливающей и формирующей импульсы, и электро-механического счетчика, который и показывает количество поступивших к нему импульсов. При этом электро-механический счетчик может показать либо полное количество импульсов за все время наблюдений, либо их среднее число в единицу времени. С помощью зависимостей по числу зарегистрированных импульсов определяется уже абсолютное количество изотопа.

В этом смысле ионизационные и сцинтилляционные способы регистрации имеют несомненное преимущество перед фотографическим способом. Хотя последний и достиг теперь большого совершенства, он все же не позволяет еще и сейчас с достаточной точностью установить количество радиоактивного изотопа.

Так современная электроника обеспечивает экспериментатору возможность в различных условиях определять присутствие и количество радиоактивного изотопа. Вместе с тем, учитывая неравноценность указанных способов обнаружения радиоактивности, в каждом конкретном случае исследователю приходится выбирать тот или иной способ регистрации.

Прежде чем приступить к проведению какого-либо исследования, экспериментатору приходится решать ряд более мелких, частных методических вопросов, порой тесно связанных между собой. Во-первых, выбрать наиболее подходящий для данных условий и задачи исследований тип радиоактивного изотопа по виду его излучения, альфа, бета или гамма, энергии излучения и периоду полураспада. Поясним это на примере.

В медицине для определения скорости движения крови в организме человека применяют радиоактивный изотоп натрия с периодом полураспада 8 суток. В обоих случаях принцип проведения самого эксперимента практически одинаков: фик-

сируется время ввода изотопа в исследуемую среду и время его появления на определенном расстоянии от места запуска. Но в первом случае продолжительность движения изотопа составляет несколько минут, а во втором — несколько суток.

Что было бы, если бы строители не провели до начала эксперимента необходимой методической подготовки, не обратили внимания на продолжительность периода полураспада и не сопоставили его с возможной продолжительностью исследований, которая составляет несколько суток. Очевидно, что учитывая аналогию в методике, они запустили бы в подземный поток короткоживущий изотоп натрия, который, кстати, по всем остальным характеристикам подходит для таких исследований, и безуспешно ждали бы его появления в контрольных скважинах. Изотоп, конечно, появился бы, но в таких ничтожных количествах, которые нельзя было обнаружить. Так, если не знать продолжительности периода полураспада, измерение может дать искаженные результаты.

Во-вторых, исследователю приходится решать вопрос и о том, сколько же взять радиоактивного изотопа (в первую очередь это относится к методу меченых атомов). Если, например, активность радиоактивного изотопа, предназначенного для просвечивания какой-либо конструкции с целью отыскания в ней дефектов, окажется недостаточной, то это сразу же будет обнаружено в период проведения самого эксперимента. Значительно сложнее будет обнаружить такую же ошибку при исследовании методом меченых атомов путей движения нового вида лекарства, меченого радиоактивным изотопом. Отсутствие лекарства, которое должно было дойти до какого-либо органа, может привести к ложным выводам — оно не эффективно, так как при приеме не доходит до больной ткани или органа, и поэтому изготавливать его не следует. А на самом деле количество радиоактивного изотопа, введенного в исследуемое лекарство, оказалось просто недостаточным, чтобы обнаружить радиоактивное излучение и, следовательно, присутствие лекарства.

В методе меченых атомов приходится, кроме того, учитывать и возможные химические реакции, которые могут произойти между соединением, меченым радиоактивным изотопом и средой, в которую это соединение введено.

Вопрос о том, какую следует применить аппаратуру для регистрации радиоактивного излучения, также обязан решать экспериментатор. Нельзя обходить и вопросы техники безопасности — ведь радиоактивные изотопы при неправильном обращении с ними могут оказать вредное воздействие не только на организм экспериментатора, но и на людей, не связанных с этими исследованиями.

Теперь понятно, насколько важна и необходима предварительная методическая проработка экспериментов, которые

будут проводиться с использованием радиоактивных изотопов. Поэтому исследователи всякий раз проводят тщательную методическую подготовку своих экспериментов.

Этим еще раз подтверждается и другая сторона вопроса — успешное завершение того или иного исследования в целом зависит не от каких-то сверхъестественных качеств радиоизотопного метода, как впрочем и любого другого метода, не только от того, что новый радиоизотопный метод оказался эффективнее, а от того, насколько правильной и всеобъемлющей была методическая подготовка всего исследования. Поэтому, когда мы будем знакомиться в дальнейшем с примерами использования радиоактивных изотопов в научных исследованиях, не надо забывать о той проделанной учеными колоссальной и трудоемкой работе, которая предшествовала каждый раз проведению этих исследований.

Изотопы в исследованиях промышленных процессов

После того как были разработаны методы получения значительных количеств разнообразных радиоактивных изотопов, исследователи смогли использовать их для изучения и контроля промышленных процессов. К ним относятся такие отрасли, как, например, металлургия, машиностроение, строительство, легкая и пищевая индустрия и т. д.

В металлургии большую роль играет получение чистых и высококачественных металлов и сплавов. Их требуют электронная и атомная техника, химическое машиностроение, ракетостроение и другие отрасли. Ведь долговечность и надежность изделий, их вес прежде всего зависят от присутствия в металлах различных примесей. Например, примесь серы ухудшает качество металла.

Используя метод меченых атомов, ученые изучили пути попадания серы в жидкий металл и помогли установить возможности обессеривания его шлаком. Радиоактивный изотоп серы, добавленный в газ, отапливающий мартеновские печи, показал, что значительная часть серы, содержащейся в газе, попадает в металл. После очистки газа от серы качество металла заметно повысилось.

В другом случае исследователи ввели в огнеупорный кирпич радиоактивный кальций и по отобранным пробам стали установили, что огнеупорный кирпич футеровки может переходить в расплавленный металл и тем самым загрязнять его. Так радиоактивные изотопы помогли металлургам улучшить процессы выплавки стали.

В некоторых случаях радиоактивные изотопы позволили

улучшить и технологию варки стали. Так, при производстве стали высокого качества необходимо знать время, в течение которого легирующий металл равномерно распределится по всей массе расплавленной стали. Добавив в этот металл радиоактивный изотоп, удалось установить, за какое время он равномерно перемещается по всему объему мартеновской печи. В результате была установлена оптимальная продолжительность перемешивания металла. С помощью радиоактивных изотопов определялась скорость движения газа и шихты в доменной печи, а также решались многие другие задачи.

Радиоактивные изотопы позволяют вести наблюдения за состоянием внутренней части доменных печей, облицованной огнеупорной кладкой. Для этого в кладку помещают радиоактивный изотоп, а с наружной стороны устанавливают счетчик, регистрирующий излучение, и таким образом контролируют присутствие изотопа. Если кладка разрушилась, то радиоактивный изотоп выпадает из облицовки и с наружной стороны не наблюдается радиоактивного излучения.

Контроль качества готовой продукции ведется с помощью гамма-дефектоскопии, позволяющей обнаружить в материале газовые поры, пустоты, шлаковые включения и другие нарушения.

В качестве источников гамма-излучения для просвечивания больших толщин, до 200 мм, применяют радиоактивный кобальт или цезий, а при малой толщине просвечивания — изотопы иридия и европия. Как правило, для регистрации прошедшего через контролируемый объект излучения применяется рентгеновская пленка. Этот метод достаточно отработан и давно применяется для контроля промышленных изделий и сварных стыков и тем не менее он непрерывно совершенствуется (особенно аппаратура).

Радиоактивные изотопы применяются и для исследования износа готовых деталей в процессе эксплуатации механизмов. При исследованиях износа деталь покрывают металлом, в составе которого имеется радиоактивный изотоп. В деталь вводят изотоп либо при ее изготовлении, либо активируют готовую в потоке нейтронов. Иногда удобно высверлить в детали отверстие и вставить туда проволоку, содержащую радиоактивный изотоп.

Наблюдая за такими деталями, можно достаточно подробно исследовать их износ в процессе работы механизма без его остановки и разборки. Чаще всего такой метод применяется для исследования износа деталей, установленных в двигателях внутреннего сгорания. Процесс износа исследуется по изменению радиоактивности жидкой смазки, омывающей деталь, меченную радиоактивным изотопом. Увеличение радиоактивности смазки указывает на интенсивный износ, а ста-

билизация уровня радиоактивности — на замедление этого процесса. С помощью радиоактивных изотопов исследовался износ автомобильных и тракторных двигателей. В результате этого были получены данные об износе поршневых колец в зависимости от режима работы двигателя, температуры, вязкости смазки, степени очистки воздуха и прочих условий.

С помощью радиоактивных изотопов исследовался износ режущего инструмента. Исследуя активированными нейтронами радиоактивность стружки, выходящей при обработке металла резцом, можно установить, при каких режимах работы наблюдается наибольший износ, как он зависит от марки обрабатываемого металла, материала самого резца и его формы. Иностранная печать сообщала, что таким методом всесторонне исследовался износ бурового инструмента, предназначенного для добычи угля в шахте.

Потери металла имеют место не только при износе деталей.

Колоссальные убытки причиняет коррозия металла. В Англии, например, около 30% ежегодно производимой стали идет на компенсацию потерь металла от коррозии. В США ежегодно теряется по той же причине до 25 млн. т железа. Механизм коррозии, особенно степень участия в этом явлении кислорода и воды, изучен еще недостаточно. Сейчас радиоактивные изотопы применяются для изучения коррозии стали, кобальта, меди и других металлов в различных средах. Так, с помощью радиоактивных изотопов меди и железа исследовался механизм окисления меди и железа при температуре 1000°, а с помощью радиоактивного йода (J-131) — механизм коррозии железа. Результаты позволяют получить более точные данные о механизме коррозии и разработать эффективные меры ее предупреждения.

В области физики твердого тела для изучения характера межатомного взаимодействия, перемещения атомов и их дальнейшего распределения большое практическое значение имеют закономерности процесса диффузии и самодиффузии, выражающиеся в проникновении атомов одного металла в другой. Для изучения этих процессов в настоящее время применяются радиоактивные изотопы железа, кобальта, серебра, меди, серы и некоторых других элементов.

Методика проведения таких исследований крайне разнообразна. Иногда на пластинку металла наносят дополнительный слой, содержащий радиоактивный изотоп. Через некоторое время с поверхности металла снимают тонкие слои до тех пор, пока на пластинке не останется никаких следов радиоактивности. Это позволяет установить глубину проникновения радиоактивных атомов в металл. Можно и не снимать эти слои. Тогда измеряют интенсивность излучения с обратной

стороны пластинки, которая постоянно увеличивается за счет диффузии.

При изучении диффузии чрезвычайно полезным оказался метод автордиографии. Ведь он позволяет получить наглядную картину распределения диффузионных потоков радиоактивных атомов. С помощью радиоактивных изотопов уже изучена самодиффузия в серебре, никеле, железе, кобальте, цирконии и в других металлах в широком диапазоне температур, а с помощью радиоактивного углерода исследован перенос углерода в железе и никеле.

Результаты исследований показали, что радиоактивное излучение является эффективным средством воздействия на различные химические вещества и материалы. В результате такого воздействия в ряде случаев можно получить новые химические материалы или же придать известным ранее материалам новые, более полезные свойства. В первую очередь это относится к искусственным материалам со сложной структурой — полимерам. Такие материалы образуются при объединении большого числа исходных молекул — мономеров в одну большую молекулу. Полимерных материалов очень много, свойства их крайне разнообразны, что позволяет применять их во всех областях техники.

С помощью радиоактивных излучений можно упростить получение известных ранее полимерных материалов. Так, взамен довольно сложной технологии получения полиэтилена из этилена может быть использована новая, более простая, основанная на облучении этилена γ -излучением. Полученный материал приобретает даже более высокие качества. Теперь имеются способы получения органического стекла толщиной 25 см, что при обычной технологии сталкивается с некоторыми трудностями.

Радиационные методы позволяют более просто осуществлять процессы полимеризации тетрафторэтилена и формальдегида. Они также способствуют расширению ассортимента полимерных материалов, позволяя осуществлять полимеризацию тех исходных мономеров, которые не поддавались прежде такому процессу. Сейчас получены такие полимеры, как полибутилен, полиизоамилен и другие, обладающие весьма важными для практических целей свойствами.

Радиоактивные излучения придают готовым полимерам новые свойства или изменяют их в желаемом направлении. Для этого можно облучать полимер, либо смесь полимера с мономером, либо одновременно несколько полимеров. В полимере под действием радиоактивного излучения преобладают процессы укрупнения отдельных молекул или, наоборот, молекулы полимера разукрупняются. Но во всех случаях в результате облучения полимер получает обычно новые свойства. Например, широко известный полимер тефлон наряду

с большими достоинствами имеет существенный недостаток — не приклеивается к другим материалам. Чтобы устранить этот недостаток, исследователи облучили тефлон с добавленными к нему другими полимерами. В результате новый полимер получил способность приклеиваться. В другом случае, изменив количество добавляемого в тефлон полимера, у нового материала удалось только уменьшить в необходимых пределах способность к деформации. Уже это оказалось вполне достаточным для использования нового материала в качестве прокладок. С помощью такого же приема исследователи добились и того, что полученный на основе тефлона полимер стал хорошо окрашиваться.

Облучение полимеров может придать им или изменить их пористость, морозостойкость, смачиваемость, влагопоглощение. Силиконовые резины становятся в результате облучения более морозостойкими, органическое стекло приобретает пористость, что позволяет использовать его для тепло- и звукоизоляции. Существенно меняются свойства резины, получаемой непосредственно из облученного каучука. Такая резина имеет повышенную прочность, износостойкость, переносит повышенные температуры и менее чувствительна к действию масел и химически агрессивных сред.

Под действием радиоактивного излучения у металлов также меняются их физические свойства. В результате облучения нейтронами сплава меди и золота структура сплава за счет увеличения скорости диффузии упорядочивается уже через 10 часов, в то время как обычно такое явление наступает значительно позже. Облучение металлов нейтронами и гамма-квантами приводит к существенному изменению их механических свойств. Допустимая нагрузка на растяжение у облученного нейтронами металла повышается на 60%, у никеля — на 35%, а прочность на сдвиг у меди — в 8 раз. При облучении гамма-квантами кристаллов цинка его прочность, наоборот, снижается в среднем на 30%, что также может представить практический интерес. Перспектива улучшения свойств металлов, конечно, заманчива, но она пока еще не всегда эффективна, так как облучение нейтронами приводит к возникновению наведенной радиоактивности.

Недавно было обнаружено, что слабые гамма- и бета-излучения тоже изменяют свойства металлов, но только в поверхностных слоях. А ведь это очень важно, так как теперь можно достаточно просто облицовывать металлические изделия прочным слоем того же металла. В первую очередь это относится к режущему инструменту — сверлам, фрезам, метчикам, зубилам. Облученными сверлами можно сделать без заточки в 50 раз больше отверстий в стали, чем обычными сверлами, а облученными фрезами обработать в 100 раз больше изделий из высокопрочной стали.

Опыты показали, что у облученных Со-60 образцов цинка, алюминия, бериллия и золота возросла твердость и уменьшился износ при трении. У углеродистой стали износ при трении уменьшился почти в 3 раза. При облучении этим изотопом изменение свойств металлов наблюдается только в поверхностных слоях, на глубине до 0,5 мм. Аналогичные результаты были получены и при облучении бронзы γ -лучами — ее износ также уменьшился в 3 раза. Все это очень важно и поэтому исследователи настойчиво разрабатывают методику и приемы нового вида обработки металлов.

Многие другие материалы также меняют свои свойства под действием облучения. Пропитанная стирилом сосна становится после облучения в 2 раза прочнее на изгиб и сжатие, чем необлученная.

А вот обычное оптическое стекло после облучения темнеет и пропускает меньше света, касторовое масло затвердевает, кожа становится непромокаемой, парафин превращается в похожее на каучук вещество. Вот какие неожиданные изменения могут происходить с веществами и материалами под влиянием излучения радиоактивных изотопов.

Развитие же атомной техники требует создания таких материалов, которые не меняли бы свои свойства под действием ядерного излучения. Повышенной радиоактивной стойкостью обладают некоторые полимерные лакокрасочные покрытия. Из них подбирают наиболее стойкие к радиации, слабо загрязняющиеся и легко смываемые лакокрасочные составы или многослойные покрытия, которые после загрязнения радиоактивностью постепенно, слой за слоем, могут быть очищены. Многослойные покрытия значительно удобнее, так как при отслоении получают твердые, легко перерабатываемые радиоактивные отходы.

Применение метода меченых атомов позволяет исследователям проникнуть в сущность механизма многих химических реакций. Это относится, например, к горению углерода и водорода, реакции разложения и обмена, которые только на первый взгляд кажутся простыми, а на самом деле требуют еще тщательного исследования. Дело в том, что некоторые простые реакции проходят через ряд определенных стадий, при которых образуются промежуточные продукты, не поддающиеся выделению. Поэтому мы и не знаем, в какой стадии и в каком количестве начинают принимать участие те или иные атомы. Используя метод меченых атомов, исследователи имеют возможность ближе познакомиться с ранее скрытым от них механизмом химических реакций. Для этого в «подопытной» молекуле метят какой-либо атом и ведут за ним наблюдения на всех стадиях реакции или же, что иногда особенно интересно, наблюдают за ним в процессе обратной реакции, когда меченый атом может покинуть конечный продукт

реакции и перейти обратно в первоначальный. Последнее важно потому, что дает возможность определить скорость обратной реакции и установить константу химического равновесия.

С помощью радиоактивных изотопов исследователи могут наблюдать теперь за реакциями молекулярных перегруппировок, когда целые атомные группы в молекуле обмениваются местами. Так, изотоп водорода помог обнаружить водородную перегруппировку, доказавшую подвижность атомов водорода в молекуле бензола.

Большое значение имеет исследование реакций полимеризации. Они начинаются тогда, когда к мономеру добавляют соединение—инициатор, которое под действием внешних причин начинает расщепляться и присоединяться к молекуле мономера. Исследования с мечеными молекулами инициатора дают важные сведения о природе процесса полимеризации, о среднем молекулярном весе полученного полимера, длине его молекул, что необходимо для улучшения технологии производства синтетических материалов.

Для исследования механизма получения синтетических смол и вулканизации каучуков успешно применялся радиоактивный изотоп серы.

Радиоактивные изотопы оказались чрезвычайно полезными при разделении различных элементов. В первую очередь это относится к 14 редкоземельным элементам, расположенным вместе с лантаном в одной клетке. Химические свойства и строение этих элементов очень сходны — у всех на внешней оболочке атомов имеется одинаковое количество электронов, что существенно затрудняет их разделение. Вместе с тем спрос на эти элементы достаточно большой — они нужны для производства лаков, красок, катализаторов, изготовления специальных сортов стекла, диэлектриков, огнеупоров и т. д. Добавляя в редкоземельные элементы их радиоактивные изотопы, удастся проконтролировать процессы их разделения: распределение по фракциям, количество, степень чистоты.

Многие химические реакции проводятся с использованием ускорителей — катализаторов, механизм действия которых является сейчас предметом серьезного изучения. Сюда же относится и механизм действия специальных добавок, повышающих активность катализаторов. С помощью радиоактивных изотопов водорода и углерода исследователям удастся установить, однородна или неоднородна поверхность различных катализаторов. Кроме того, радиоизотопные методы позволяют установить количество посторонних атомов и степень их подвижности на поверхности катализатора, определить его поверхность, оценить и правильно подобрать для различных условий состав добавок, увеличивающих активность катализаторов. Такого рода исследования очень важны.

так как с помощью катализаторов получают многие необходимые для промышленности химические соединения: серная кислота, аммиак, азотная кислота и др. Исследования катализаторов были проведены непосредственно в производственных условиях. Здесь с помощью радиоактивного изотопа кобальта исследователи получили возможность вести непрерывные наблюдения за количеством катализатора, остающегося в определенные моменты времени в аппарате.

Повышение активности катализаторов позволяет значительно ускорить прохождение реакции. Вводя радиоактивные изотопы непосредственно в катализатор или только облучая его, исследователи установили, что такой прием повышает каталитическую активность. Так некоторые типы катализаторов после предварительного облучения увеличили эффективность вдвое. Хотя такие исследования пока еще малочисленны, но они убедительно показывают значение радиоактивных изотопов для улучшения действия и качества катализаторов.

Многие исходные продукты получения полимерных материалов, моющих средств, ионообменных смол, ядохимикатов для борьбы с вредителями вырабатываются путем введения в состав молекул некоторых веществ атомов Cl, Br, F и J. В настоящее время такие процессы осуществляются под воздействием света или ультрафиолетовых лучей. Исследователи предложили испробовать еще один путь — воздействовать на ход реакции ядерным излучением. Первые же опыты дали обнадеживающие результаты. Так, под воздействием γ -излучения радиоактивного кобальта, даже при низких температурах, значительно ускоряется процесс хлорирования бензола. Такие результаты не единичны — процесс хлорирования многих веществ значительно улучшается под действием ядерного излучения.

В последние годы радиоактивные изотопы широко используются в строительной технике. С помощью Co-60 исследуют грунты на строительных участках, выясняя их плотность. Существующие способы определения характеристик грунтов основаны на извлечении и последующем исследовании образца грунта. Потому они трудоемки и недостаточно оперативны, особенно при исследовании грунтов на значительных глубинах. Кроме того, характеристики грунтов, полученные по образцам, не всегда в полной мере отражают действительное состояние основания сооружения. Преимущество радиоактивных методов заключается в возможности исследования грунтов без нарушения их естественной структуры и отбора специальных образцов, проведения дистанционных наблюдений, а также быстрота и высокая точность измерений.

Вначале был разработан наиболее простой способ, основанный на том, что степень ослабления излучения возрастает

с увеличением плотности просвечиваемого грунта. Этот принцип использован в радиовилках — приборах, позволяющих определять абсолютную плотность или относительное изменение влажности без отбора проб. В зависимости от назначения радиовилки имеют различное конструктивное оформление, но основные элементы у них общие: две полые, скрепленные трубки, в одной из которых находится источник радиоактивного излучения, например Со-60, а в другой счетчик. Такие приборы позволяют просвечивать грунт как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. С помощью таких плотномеров исследовались грунты на многих отечественных и зарубежных стройках.

Далее появился другой способ, основанный на регистрации рассеянного грунтом излучения. Плотномеры, работающие на этом принципе, имеют уже не две трубки, а только одну, в которой установлены и источник радиоактивного излучения, Со-60 или Cs-137, и счетчик. Между источником и счетчиком устанавливается свинцовая пластинка, которая загораживает счетчик от излучения, идущего непосредственно от источника, но не мешает проникновению излучения, которое рассеялось грунтом. Такие плотномеры тоже позволяют исследовать плотность и влажность грунта как на поверхности, так и глубоко под землей. В последнем случае пробуривают скважину необходимой глубины и опускают туда плотномер. Этот метод впервые нашел широкое применение при поисках, разведке и разработке полезных ископаемых в нефтяной и угольной промышленности.

В последние годы появился еще один метод определения влажности грунта — нейтронный. Он уже позволяет исследовать не только относительные изменения влажности, но и абсолютные. Основу этого метода составляет то, что поток быстрых нейтронов испытывает наибольшее замедление при столкновении с ядрами атомов водорода, что приводит к появлению медленных нейтронов, которые и характеризуют степень влажности. В качестве источников нейтронов используются радио-бериллиевые или полониево-бериллиевые источники.

Работы по оценке качества оснований сооружений дорожных покрытий, непосредственно земляных гидротехнических сооружений в процессе их возведения и эксплуатации проводятся в Советском Союзе и за рубежом с помощью радиоизотопных плотномеров и влагомеров.

Радиоизотопные методы измерения плотностей успешно могут быть использованы для стационарных наблюдений за уплотнением насыпей, слабых оснований под сооружением. Для этого при возведении сооружения плотномер устанавливают в его теле и ведут непрерывные наблюдения за изменением плотности. Такие исследования выясняют, как меняется

плотность грунта в зависимости от характера и величины действующей нагрузки, количества выпавших осадков и других фактов. Показания могут автоматически записываться на ленту самописца; последующая расшифровка дает картину состояния сооружения.

Важную роль при эксплуатации сооружений играют наблюдения за возможными смещениями грунта в основании. Радиоактивные изотопы намного упрощают эту задачу. В стенку скважины специальным стреляющим приспособлением вводят радиоактивный репер — стальной прут, содержащий радиоактивный Со-60. Периодически контролируя его положение с помощью счетчика, получают возможность обнаружить самые незначительные смещения грунта в основании сооружения.

Радиоактивные изотопы успешно применяются и при контроле искусственного укрепления оснований сооружений, которое наиболее часто применяется в практике гидротехнического строительства. Для укрепления оснований в пробуренные в земле скважины закачивают под давлением цементный раствор, который заполняет в грунте трещины и пустоты.

При проведении таких работ необходимо знать, на каком расстоянии должны находиться скважины, чтобы цементный раствор, вышедший из одной скважины, соединился потом с таким же, но вышедшим из других соседних скважин. Ведь только тогда в грунте будет образована вертикальная стенка из цементного раствора, и неплотная зона основания будет надежно укреплена. Такую задачу решают с помощью меченого цемента. Для этого цемент облучают нейтронами или же погружают на некоторое время в радиоактивный раствор, например хлористого Fe-59. На поверхности раствора образуется тонкая радиоактивная пленка. Закачав раствор радиоактивного цемента, уже легко можно узнать расстояние, на которое он, прежде чем затвердеть, отойдет от скважины. А это позволит в свою очередь правильно определить расстояние между скважинами, предназначенными для закачки раствора. После искусственного укрепления основания плотность грунта в зоне цементационной завесы может быть проверена методом гамма-гамма-каротажа.

Радиоизотопные методы применяются для исследования плотности бетонной смеси тяжелого бетона биологической защиты атомных электростанций и готовых сборных железобетонных элементов. Бетон, подаваемый в блоки бетонирования, должен обладать заданными свойствами, определенным объемным весом, влияющим на прочность и водонепроницаемость бетонной кладки. Плотность смеси контролируется с помощью плотномеров. В вертикальной части прибора, погружаемой в жидкий бетон, установлен источник радиоактивного излучения Со-60 или Cs-137, а в горизонтальных плечах прибора, ко-

торые находятся на поверхности бетона,— газоразрядные счетчики. Так контролировалась плотность бетонной смеси на строительстве Братской, Бухтарминской и Днепродзержинской ГЭС. Это позволило своевременно вносить соответствующие коррективы в процессы приготовления бетона и его последующей укладки. Контролируя укладку тяжелого бетона биологической защиты на Белоярской атомной электростанции им. Курчатова и Ново-Воронежской атомной электростанции, исследователям удалось узнать не только распределение плотностей бетона в блоке, но и предсказать даже вероятность образования неплотных мест в защите. В результате были выбраны такие составы тяжелого бетона, которые заведомо гарантировали заданные значения объемного веса и полностью обеспечивали защитные свойства бетона.

Массивный бетон контролируется методом гамма-гамма-каротажа. Для этого в скважину диаметром порядка 30 мм спускается источник радиоактивного излучения и счетчик. Такой выборочный прием контроля скоро заменит применяющуюся еще и сейчас довольно трудоемкую оценку плотности массивного бетона по вынутым из скважины образцам — кернам.

Радиоактивные изотопы применяются также для исследования сборного железобетона. Для контроля малоармированных изделий простой конфигурации используется установка, в которой специальный механизм передвигает источник радиоактивного излучения и счетчик. Таким образом удастся определить плотность и однородность бетона по длине и высоте балки. Эта же установка применялась и для контроля заполнения цементным раствором каналов с арматурой в предварительно напряженных железобетонных изделиях.

Радиоактивные изотопы исследуют и новые виды железобетонных изделий, например центрифугированные опоры линий электропередач. Вследствие недостаточной проработки бетона при вибрировании и центрифугировании на отдельных участках трубчатого элемента не исключена возможность образования неплотных зон, которые, естественно, не могут быть обнаружены при осмотре. На заводах сборного железобетона такие конструкции исследуются с помощью специальных радиоизотопных установок, использующих метод гаммаскопии и позволяющих проконтролировать плотность бетона в опоре.

Радиоактивные излучения применяются для контроля наружного, защитного слоя бетона, под которым находится арматура, а также для контроля самой арматуры — определения ее профиля, размеров и расположения в изделии. Преимуществом такого метода по сравнению с прежними является то, что теперь для проведения выборочного контроля уже не надо разрушать часть изделия и обнажать арматуру. У нас таким методом контролируют продукцию заводов сборного

железобетона, а за рубежом, например в ГДР, пролетные строения мостов.

В последнее время для исследования сборных железобетонных элементов начинает применяться метод гамма-дефектоскопии, который уже давно успешно применяется для контроля металлических конструкций. Возможность и целесообразность применения этого метода для контроля бетона уже подтверждена результатами отечественных и зарубежных исследований. Он позволяет определить по снимку плотность бетона, наличие пустот и раковин, плотность прилегания бетона к арматуре, профиль арматуры, ее количество и т. д. Таким методом контролировались некоторые элементы моста метро в Москве, а также сборные железобетонные элементы производственного предприятия в Херсоне. В Англии этим методом исследовался маяк, собираемый из цилиндрических оболочек с вертикальной предварительно напряженной арматурой. Радиоактивный Со-60 закреплялся в контейнере по оси башни, а с ее наружной стороны укреплялись кассеты с пленками. Все обнаруженные по снимкам некачественные места немедленно укреплялись путем нагнетания в пробуренные отверстия цементного раствора.

Радиоактивные изотопы оказались чрезвычайно полезными в исследованиях наземных и подземных вод, когда необходимо установить направление течения, взаимное перемешивание и циркуляцию донных и поверхностных струй, скорость движения и расходы. Для определения скоростей и расхода в наземный поток запускается радиоактивный раствор и определяется время, за которое он достигнет контрольного створа, находящегося ниже по течению реки. Такие исследования были успешно проведены для определения времени движения воды в реке. Радиоактивный Вг-82 вводился при помощи приспособления в воду, а закрепленные на поплавках счетчики регистрировали его прохождение. Так как этот изотоп имеет период полураспада 34 часа, то уже через несколько суток все следы радиоактивности в реке полностью исчезли. В трубопроводах можно измерять как время движения радиоактивного индикатора между двумя створами, так и его концентрацию. Последний прием позволяет определить с достаточной точностью расход воды.

Радиоактивные изотопы применяются также для исследования взаимного перемешивания различных вод. В Англии с помощью радиоактивного Р-32 определялась степень перемешивания сточных вод, вытекающих из трубопровода, с морской водой. Эти исследования позволили установить причины интенсивного загрязнения прибрежной полосы моря.

Но наиболее эффективными радиоизотопные методы оказались при исследованиях подземных вод. Этим, в частности, и объясняется успешное применение радиоактивных изотопов

в исследованиях фильтрационного режима гидротехнических сооружений. Гидротехнические сооружения должны быть предельно водонепроницаемы. И это понятно. Ведь если в той или иной части земляной плотины будет сильно просачиваться вода, то может произойти значительное вымывание грунта—механическая суффозия, приводящая иногда к аварии всего сооружения.

Как же своевременно узнать о том, что фильтрация превышает дозволённые скорости? Еще недавно для этого использовались лишь солевые индикаторы и красители. Первые индикаторы выдавали свое присутствие тем, что, растворившись в воде, меняли ее электропроводность, а вторые окрашивали воду. Но ведь подземная вода иногда сама может иметь естественную засоленность или окраску. Поэтому применение таких индикаторов оказывалось не всегда эффективным. Вот почему в последнее время были испробованы новые способы, среди которых наиболее перспективным оказался метод радиоактивных индикаторов. Принцип определения скоростей и направления движения потока таким методом заключается в том, что в пусковую скважину вводят какое-либо радиоактивное соединение. После этого ведут наблюдение за тем, в какой из группы контрольных скважин, расположенных недалеко от пусковой, появится радиоактивный индикатор. Его появление позволяет установить не только направление движения потока, но и время движения между двумя скважинами. В свою очередь эта величина позволяет уже рассчитать скорость, расход потока и другие наиболее важные данные.

Есть и другой способ, когда наблюдения ведутся только в пусковой скважине, в которую запущен радиоактивный индикатор. Чем быстрее индикатор выходит из скважины, тем выше скорость движения фильтрационного потока. Сейчас в лабораториях ведутся исследования, которые должны показать, можно ли таким способом определить дополнительно, в какую сторону от скважины выходит радиоактивный индикатор. Тогда и для определения направления движения фильтрационного потока понадобится только одна скважина.

К радиоактивному изотопу предъявляются высокие требования. Ведь ему нужно без потерь дойти от пусковой до контрольной скважины, а поэтому он не должен адсорбироваться на частицах грунта, прожить столько, чтобы, попав в контрольную скважину, быть еще радиоактивным. К тому же вид его радиоактивного излучения и энергии должны быть такими, чтобы по ним можно было безошибочно установить появление изотопа в контрольной скважине. Для многих случаев наилучшим индикатором оказался радиоактивный J-131.

Новый метод полностью оправдывает себя: он позволяет получать надежные и точные результаты. Такой метод был

применен на канале им. Москвы, на Волжской, Камской и Горьковской гидроэлектростанциях.

Ампула с радиоактивным изотопом при помощи специального приспособления разбивалась в пусковой скважине, и изотоп вместе с фильтрационным потоком попадал в контрольную скважину. Момент появления радиоактивного изотопа регистрировался газоразрядными счетчиками, подключенными к автоматическому прибору, установленному в помещении для наблюдений. Одновременно с введением изотопа в пусковую скважину на этом приборе пускались часы. Когда изотоп появлялся в непосредственной близости от счетчика, начинал работать уже сам прибор — он автоматически включал самописец, который регистрировал характер прохождения индикатора, и останавливал ход часов. После прохождения радиоактивного индикатора прибор автоматически выключал и запись. По записи были определены скорость движения потока и его расход. Аналогичные исследования были проведены в ГДР, Чехословакии и Польше.

Метод радиоактивных индикаторов применяется также для изучения движения подземных вод при гидрогеологических изысканиях и при разработке торфяных залежей. В качестве индикаторов используются радиоактивные изотопы водорода и серы. В практике встречаются случаи, когда необходимо выявить в сооружении отдельные неплотные зоны, которые являются причиной возникновения местных, сосредоточенных очагов фильтрации. Для отыскания таких зон в пусковую скважину вводят радиоактивный индикатор и тщательно перемешивают по всему ее объему. После этого определяют глубину в контрольной скважине, на которой раньше всего появится радиоактивный индикатор. Это значит, что здесь фильтрационный поток движется быстрее, чем на других глубинах, и указывает на наличие неплотной зоны.

С помощью радиоактивных изотопов можно проводить непосредственное изучение в натурных условиях механической суффозии. Для этого скважину достаточно заполнить меченым радиоактивным изотопом частицами грунта соответствующего размера и проследить за тем, появляются ли они в дальнейшем в нижнем бьефе водохранилища. Такие исследования позволяют объективно установить, вымываются ли при данном режиме фильтрации частицы грунта из тела земляной плотины.

Не меньшую опасность для сооружения представляет другой вид суффозии — химическая, когда из основания сооружения вымываются химические вещества, например соли кальция из известковых пород. Существующие методы изучения этого явления сводятся к тому, что в скважинах или выходящих на поверхность водах определяется в определенные моменты времени содержание соли. Из какой зоны основания, с

какой глубины и с какой интенсивностью протекает этот процесс, установить таким методом, конечно, трудно.

Радиоактивные изотопы и здесь могут принести пользу. В скважину опускают газоразрядный счетчик и засыпают его грунтом, в котором концентрация радиоактивной соли такая же, как и нерадиоактивной в близлежащих зонах основания. Измеряя после этого через определенные интервалы времени радиоактивность в скважине, можно установить интенсивность вымывания радиоактивной соли, которая будет характеризовать интенсивность химической суффозии. Если же удастся обнаружить выходы радиоактивной соли с фильтрационным потоком на поверхность земли и ее количество в общем количестве вымываемой соли, то это позволит оценить степень воздействия химической суффозии на исследуемый участок по сравнению со всем основанием.

Для понижения уровня грунтовых вод и последующего их отвода оборудуется дренажная сеть, которая может быть выполнена в виде прорытых в земле траншей или уложенных в нее труб с пористыми стенками. Подземные воды всегда несут с собой большое количество мелких частиц грунта, которые, попадая в трубы, засоряют их и нарушают тем самым работу всей дренажной сети. Контроль состояния дренажной сети проводится методом радиоактивных индикаторов. Для этого в дренаж на некотором расстоянии от ее устья вводится раствор радиоактивного индикатора, например S-35, и определяется время ее движения в дрене. Через некоторое время, например через месяц, делают повторный запуск. Если в этом случае скорость движения будет другой, то это укажет на нарушение работы дрены.

Часто можно наблюдать, как бурное течение маленького горного ручья свободно передвигает по дну большие камни. Такую колоссальную работу проделывают не только горные, но и равнинные реки с относительно спокойным течением. Они постоянно и непрерывно переносят огромное количество различных наносов — ила, песка, мелкой гальки, которые, откладываясь в дальнейшем на различных участках реки, образуют мели и перекаты.

Такая на первый взгляд безобидная работа реки может причинить очень много неприятностей строителям плотин, портов, судоходных и оросительных каналов. Ведь переносимые водой наносы, постоянно откладываясь в водохранилище перед плотиной, уменьшают объем водохранилища. Попадая в судоходный канал или акваторию порта, они уменьшают глубину и затрудняют судоходство, а оседая в оросительных каналах, нарушают их работу и затрудняют доступ воды на орошаемые поля.

Для того чтобы выработать эффективные мероприятия по защите от заиления, необходимо иметь данные о количестве

поступающих наносов и их дальнейшем распределении. Такие данные получали исключительно путем замеров глубины реки на различных участках. Но эти простые наблюдения очень длительны и трудоемки — в ряде случаев заметные изменения глубины происходят не так быстро. Кроме того, такой прием не давал убедительного ответа на вопрос, откуда взялись отложившиеся на данном участке реки частицы, если выше по течению реки имеется, например, два очага размыва. Конечно, большую помощь в решении этого вопроса оказали различные красители. Окрасив песок на размываемых участках реки в разные цвета, уже можно было точно установить, какой из них и где откладывается.

Но при изучении движения наносов важно знать и количественную сторону этого явления — интенсивность. Для того чтобы получить такие данные с помощью краски, необходимо через определенные промежутки времени отбирать со дна реки пробы и в них определять количество окрашенного песка. Это очень трудоемкая работа. Применение радиоактивных изотопов для метки наносов позволило достаточно просто устанавливать не только пути передвижения наносов и места их отложения, но и интенсивность этих процессов.

Достаточно опустить на дно счетчик и по показаниям прибора установить, в каком количестве и где присутствуют меченые наносы. Получив такие данные, в определенные моменты времени можно достаточно просто подсчитать интенсивность размыва или отложения наносов.

Сделать же наносы радиоактивными не представляет особых затруднений. Песок, например, можно поместить в реактор и он станет радиоактивным. Так готовили меченый песок для изучения движения наносов в Калифорнийском заливе в США.

Для облучения песка можно использовать передвижной генератор нейтронов — тогда эта операция намного упрощается, так как радиоактивный материал можно получить непосредственно на месте, даже не беря его с исследуемого участка.

Есть и другой путь — использование явления адсорбции. Для этого частицы песка помещают на некоторое время в какой-либо радиоактивный раствор, в результате чего на их поверхности образуется тонкая радиоактивная пленка. Чтобы уберечь ее от возможных последующих механических повреждений, частицы песка покрывают иногда дополнительно слоем лака или клея. Конечно, исследователям приходится продельвать большую подготовительную работу, с тем чтобы узнать, каким радиоактивным изотопом лучше всего метить частицы. Наиболее подходящими изотопами оказались Sc-46, Cr-51, Fe-59 и Zn-65.

В ряде случаев целесообразно приготовить радиоактивное

стекло, которое впоследствии размельчают до размеров частиц песка или же размельченное стекло облучают в реакторе.

При помощи радиоактивных изотопов исследователи научились теперь метить речную гальку и изучать образование отмелей и перекатов. В просверленное в гальке отверстие вводят радиоактивный изотоп таллия, что позволяет обнаружить ее в воде на глубине до 0,5 м, а на берегу — в радиусе до двух метров.

Проведенные в СССР, Англии, Румынии, Японии и США исследования передвижения наносов с помощью радиоактивных изотопов дали интересные результаты. Вот как проводились такие исследования на Каспийском море в районе Красноводской косы. Естественный песок, меченный радиоактивным железом, закрепленным на поверхность агар-агаром, равномерно распределялся в море на участке длиной 40 м. После этого на соседних участках с помощью передвижаемых по дну газоразрядных счетчиков велись поиски меченого песка. Проведенные исследования позволили изучить характер динамики наносов: определить направление, скорость и относительную интенсивность продольного перемещения песка, а также выявить некоторые качественные стороны этого процесса.

С помощью радиоактивных изотопов можно исследовать процессы размыва берегов рек, водохранилища и отыскивать таким образом источники дополнительного поступления наносов. В этом случае грунт, меченный радиоактивным изотопом, помещают в пробуренные в береговом обрыве горизонтальные скважины и ведут наблюдения за его появлением на более низких отметках — на берегу реки или водохранилища. Даже незначительное количество радиоактивного грунта на берегу реки может быть легко обнаружено, что укажет на разрушение берега.

Во многих случаях предназначенную для промышленных целей воду очищают от наносов в специальных сооружениях — отстойниках. Вода в них движется с небольшой скоростью: сначала оседают на дно сооружения более крупные, а потом мелкие частицы. Радиоактивные изотопы помогают исследовать работу таких сооружений. Пометив различные фракции наносов разными изотопами и запустив их одновременно во входящую в отстойник воду, можно установить, какие фракции оседут в отстойнике и займет ли каждый вид наносов предназначенное ему место. Если мелкие частицы не успевают осесть, то это указывает, что данная конструкция отстойника работает неудовлетворительно.

Иногда работу отстойника оценивают по тому, насколько быстро движется в нем вода. Для этого в воду заливают небольшое количество радиоактивного раствора и определяют

время его появления на выходе из отстойника. В США, например, с помощью радиоактивного J-131 было установлено, что в отстойнике имеется сосредоточенное течение, которое не дает мелким наносам вовремя оседать на дно и нарушает режим работы всего сооружения.

Приведенные примеры использования радиоизотопных методов в научных и промышленных исследованиях дают представление о том, насколько в них нуждается современная наука и техника.

За несколько десятилетий своего существования радиоактивные изотопы стали необходимым оружием в арсенале ученого, инженера, врача, археолога, метеоролога. Области их применения непрерывно продолжают расширяться, и сейчас уже невозможно представить себе без радиоактивных изотопов прогресс человеческого общества.

Содержание

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Радиоизотопные методы исследований	7
Обнаружение радиоактивных изотопов	9
Изотопы в исследованиях промышленных процессов .	14

Николай Яковлевич ФЛЕКСЕР

Редактор *И. Б. Файнбойм*
Худож. редактор *Е. Е. Соколов*
Техн. редактор *М. Т. Перегудова*
Корректор *Е. А. Ольховская*
Обложка *А. П. Кузнецова*

Сдано в набор 6 I 1966 г.	Подписано к печати 2.II 1966 г.	Изд. № 57.
Формат бум. 60×90 ¹ / ₁₆ .	Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0.	Уч.-изд. л. 1,81.
А 00562.	Цена 6 коп.	Тираж 64 400 экз. Заказ 45.

Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Новые серии научно-популярных брошюр

1. Радиоэлектроника и связь. Индекс 70091.

Брошюры этой серии охватывают широкий круг проблем современной электроники, рассказывают о всем новом, что характерно для передового фронта этой области техники.

В то же время, поскольку брошюры рассчитаны не только на специалистов, в них объясняются физические, математические и химические основы действия современных приборов, даются справочные сведения о приложениях электроники.

В 1966 году выйдут следующие работы:

«Лазеры сегодня и завтра», «Искусственные спутники Земли и радиосвязь», «Можно ли моделировать мозг?», «Помехоустойчивость, надежность, кибернетика», «Кристалл вместо лампы», «Машина распознает образы», «Радиолокация планет», «Цветное телевидение», «Что такое бионика» и др.

2. Наука о Земле. Индекс 70090.

В серии выпускаются работы о новейших достижениях географии, геологии, океанологии и других наук, изучающих нашу планету. Среди авторов — ведущие советские и зарубежные ученые.

В 1966 году читатели получат следующие брошюры: Щербakov Д. И., Сидоренко А. В. «Актуальные проблемы науки»; Бломберг Р. «Змеи-гиганты и страшные ящеры» (перевод со шведского); Варенцов М. И., Рябухин Г. Е. «Месторождения-гиганты»; Муромцев А. М. «Исследования Мирового океана»; Погосян Х. П. «Новое в изучении атмосферы»; Баников А. Г. «Заповедники СССР»; Анучин В. А. «Природа и общество» и др.

Любую брошюру можно предварительно заказать в ближайшем книжном магазине по аннотированному тематическому плану издательства.

Тот, кто хочет получать брошюры регулярно, из номера в номер, может подписаться на них в почтовом отделении или у общественного распространителя печати по месту работы.

Подписная цена на одну серию:
с 1 апреля до конца года — 81 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»