

Прогресс в области получения и производства изотопов

В. В. БОЧКАРЕВ, Н. Е. БРЕЖНЕВА, Е. Е. КУЛИН

1. В 1928 г. в Москве было основано первое в СССР производство естественно-радиоактивных элементов; в конце тридцатых годов были поставлены первые в нашей стране исследования по разделению легких элементов, а 20 лет тому назад начато серийное производство искусственно-радиоактивных и стабильных изотопов.

Открытие искусственной радиоактивности и получение искусственно-радиоактивных изотопов дало людям мощный и тонкий инструмент для проведения научных исследований, для воздействия на вещество и материалы, стали доступными чувствительнейшие способы анализа и контроля, было открыто уникальное средство для диагностики и лечения различных заболеваний. Сейчас нет такой области науки, техники или раздела медицины, где не применялись бы изотопы. Это стало возможным благодаря успехам в разработке методов и технологии получения радиоактивных и стабильных изотопов и организации их постоянно расширяющегося производства.

Как известно, радиоактивные изотопы могут быть получены с помощью ускорителей заряженных частиц, в результате нейтронного облучения в ядерных реакторах и извлечения из продуктов деления тяжелых элементов. Все эти пути были использованы для массового производства изотопов.

25 декабря 1946 г. под руководством академика И. В. Курчатова был пущен первый советский ядерный реактор, а с 1948 г. стал осуществляться регулярный выпуск радиоактивных изотопов для научных исследований, медицины и нужд народного хозяйства. Эта работа была начата Препарационной лабораторией Института биофизики Министерства здравоохранения СССР в тесном сотрудничестве с научными и промышленными организациями Госкомитета по использованию атомной энергии СССР и Академии наук СССР.

В дальнейшем к разработке методов получения и выпуску изотопов были подключены многие научные учреждения и были созданы специализированные лаборатории и производства по выпуску изотопной продукции.

В конце сороковых годов начались исследования по разработке наиболее подходящих методов и технологии получения и выделения радиоактивных изотопов, синтеза меченых соединений, приготовления источников излучений. Какой-либо преемственности или литературных сведений по этим проблемам в то время не имелось, следовательно, научно-технические основы, методы получения, технология производства изотопов, соответствующая аппаратура и другие технические средства были самостоятельно разработаны группой советских ученых и инженеров, в дальнейшем они были развиты с учетом отечественного и зарубежного опыта.

2. Большой цикл работ проведен в области технологии получения изотопов (в том числе источников излучения) путем нейтронного облучения в реакторе, главным образом на основе реакции радиационного захвата (n, γ). В этот цикл входят исследования и специальная очистка «мишенных» материалов, создание пеналов и блочков для облучения в них образцов, разработка цикличности облучения, схем и устройств для загрузки каналов и выгрузки образцов, расчеты и методы контроля плотности нейтронных потоков в местах расположения облученных образцов, степени их активации и, наконец, решение проблем конструкции отдельных элементов реактора, режима его эксплуатации, вопросов безопасности работы и т. д.

В начальный период некоторые короткоживущие радиоактивные изотопы (например, Na^{24} , K^{42} и др.) получали на исследовательском циклотроне Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. В 1949 г. был введен в эксплуатацию тяжеловодный исследователь-

ский реактор (ТВР) Института теоретической и экспериментальной физики АН СССР, специально приспособленный для получения короткоживущих изотопов. В дальнейшем, после реконструкции этого реактора (максимальный поток тепловых нейтронов в нем был доведен до величины $4 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·сек), он стал основной базой для регулярного получения широкой номенклатуры короткоживущих изотопов. Некоторое время они получались и на Первой атомной электростанции в Обнинске; кроме того, изотопы производятся также и на исследовательских реакторах типа ВВР и ИРТ Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Изотопы с относительно небольшими периодами полураспада, но требуемые в больших количествах (P³², I¹³¹ и др.), а также долгоживущие изотопы получают в специальных реакторах с высокой плотностью нейтронного потока.

Следует отметить, что I¹³¹ в течение нескольких лет извлекали из продуктов деления урана, но затем полностью перешли на получение его путем облучения теллура по цепочке Te¹³⁰ (n, γ) Te¹³¹ → I¹³¹. Технология его получения и выделения претерпела ряд изменений и в настоящее время сводится к растворению облученной окиси теллура с последующей высокотемпературной дистилляцией либо без носителя. При этом получают препарат с радиоизотопной чистотой не менее 99,99% и высокой удельной активностью.

Кроме широко используемой реакции (n, γ) для получения некоторых изотопов в реакторе применяются ядерные реакции (n, p), (n, α) и вторичные ядерные реакции на тритонах и протонах. Преимущество этих реакций — возможность приготовления препаратов без носителя. Три из этих реакций идут на тепловых нейтронах и давно используются для получения таких важных изотопов, как тритий, C¹⁴ и S³⁵: Li⁶ (n, α) H³, N¹⁴ (n, p) C¹⁴ и Cl³⁵ (n, p) S³⁵.

Другие реакции подобного типа характеризуются наличием энергетического порога, и для их осуществления требуются быстрые нейтроны. При использовании обычных «котельных» нейтронов разной энергии для повышения выхода нужного изотопа в некоторых случаях образец облучают внутри твэлов, так как в них интенсивность быстрых нейтронов больше. Пороговые (n, p)-реакции используются для получения изотопов без носителя, в частности P³² из серы, Co⁵⁸ из никеля, Mn⁵⁴ из

железа и др. Во всех перечисленных случаях после облучения производится химическое разделение элементов для отделения получаемого радиоактивного изотопа от материала мишени и радиоактивных примесей.

Некоторые изотопы получают на основе вторичных реакций, идущих в комбинированных мишенях. Так, например, в мишени, содержащей литий и кислород (в частности, карбонат лития), по уже упоминавшейся реакции Li⁶ (n, α) H³ образуются ядра трития, имеющие достаточную энергию для осуществления в свою очередь реакции O¹⁶ (t, n) F¹⁸, которая и используется для получения этого короткоживущего изотопа. Разработан аналогичный метод получения Mg²⁸ по реакции Mg²⁶ (t, p) Mg²⁸, идущий на мишени, содержащей магний и литий.

Наконец, одним из способов получения радиоактивных изотопов с более высокой удельной активностью и радиоизотопной чистотой является применение изотопно обогащенных мишеней; этот способ все шире используется в последние годы. На этой основе получают K⁴², Sr⁸⁵, Fe⁵⁹, Zn^{69m} и другие изотопы, используемые, в частности, для приготовления медицинских инъекционных препаратов.

К настоящему времени из числа регулярно выпускаемых радиоактивных изотопов около 90 получают нейтронным облучением в реакторе.

3. С помощью ускорителей заряженных частиц, вообще говоря, можно получать большинство из широко применяемых радиоактивных изотопов, но этого не делают, так как многие из них проще и в гораздо больших масштабах можно производить в ядерных реакторах. Однако некоторые радиоактивные изотопы либо не могут быть получены в ядерных реакторах, либо их производство в реакторе, как правило, неэффективно. Например, нейтродефицитные изотопы, которые образуются в реакциях с заряженными частицами. Обычно их получают на циклотронах, как наиболее сильноточных ускорителях требуемого диапазона энергий частиц, благодаря чему эти изотопы и стали называть «циклотронными». Таким образом, способы производства изотопов на реакторах и циклотронах дополняют друг друга, но, за некоторыми исключениями, не конкурируют между собой. Важной особенностью и преимуществом циклотронных изотопов, как и изотопов, получаемых в реакторе по пороговым и вторичным реакциям, является то, что они, имея в большинстве

случаев иную химическую природу, чем материал облучаемой мишени, могут быть выделены из последней без носителя. Это позволяет получать нужные препараты с высокой удельной активностью.

До 60-х годов работы по получению циклотронных изотопов в нашей стране велись в небольшом объеме на исследовательских циклотронах Института атомной энергии, Физико-технического Института, Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) АН СССР и Института физики АН УССР, а в последнее время главным образом в Физико-энергетическом институте (ФЭИ) Госкомитета по использованию атомной энергии.

В 1963 г. вступил в строй полутораметровый циклотрон ФЭИ, специально предназначенный для производства изотопов. Интенсивные исследования по разработке методов получения радиоактивных изотопов на циклотроне, выбору оптимальных условий и режима работы циклотрона для получения различных изотопов, созданию механизированных мишеней и т. д. позволили увеличить номенклатуру циклотронных изотопов до 42 и организовать регулярное производство большинства из них в объемах, удовлетворяющих потребности страны. Для выработки изотопов используются пучки протонов и дейтронов с энергией 22 Мэв, а также α -частиц с энергией 44 Мэв.

4. В течение 20 лет создавались и совершенствовались методы переработки облученных в реакторе и циклотроне материалов, выделения из них изотопов без носителя или с высокой удельной активностью, изотопов, свободных от радиоизотопных примесей, а также методы получения меченых соединений и специальных препаратов. Если в первые годы выпускались несложные, главным образом неорганические соединения, то в дальнейшем были разработаны методы получения сотен сложных меченых органических соединений, фармацевтических, биологически активных и лечебно-диагностических препаратов, в том числе стерильных и аспирогенных инъекционных растворов.

Для выделения из мишеней, получения и очистки меченых соединений и различных специальных радиоактивных препаратов применены практически все современные методы радиохимии и органической химии. В связи с этим советскими учеными интенсивно велась разработка теоретических вопросов адсорбции, сокристаллизации, экстракции, хроматографии, изотопного обмена и других методов, исполь-

зуемых при разделении и выделении изотопов и для получения радиоактивных препаратов.

В технологии получения радиоактивных препаратов традиционно использовались осадительные методы ввиду их простоты и надежности, но особенно широко и эффективно при выделении радиоактивных изотопов применена экстракция. Разработка математической теории равновесных экстракционных систем и методов расчета экстракционных аппаратов, а также изучение механизма экстракции микролигандов вещества из водных растворов позволили применить этот метод для получения многих изотопов из мишеней, облученных в реакторе или циклотроне.

Определенное внимание в последние годы было уделено получению «генераторов» короткоживущих изотопов. Доставка потребителям изотопов с малым периодом полураспада, особенно на дальние расстояния, приводит к большим потерям активности, поэтому во многих случаях применение этих изотопов становится неэффективным. Эти трудности можно преодолеть, используя изотопные генераторы, т. е. генетически связанные системы из двух изотопов, долгоживущего — материнского и короткоживущего — дочернего, который можно многократно выделять на месте потребления по мере его накопления. Были разработаны генераторы изотопов I^{132} , Tc^{99m} , Y^{90} , Sr^{87m} , Ga^{68} , в настоящее время разрабатываются генераторы и для других короткоживущих изотопов.

В целях получения меченых соединений исследована кинетика изотопного обмена нескольких систем, изучен механизм и найдены качественные и некоторые количественные закономерности протекания изотопного обмена трития, углерода, серы, иода и др. На этой основе создана технология получения большого числа меченых соединений, в частности около 40 соединений, меченных тритием, свыше 20 иодпроизводных бензольного ряда и других иодорганических соединений с I^{131} и т. д.

Вместе с тем для получения многочисленных меченых соединений в основном применяется метод прямого химического синтеза, дающий метку в определенном, фиксированном положении, а в некоторых случаях — методы биологического и микробиологического синтеза. Так, многие соединения с тритием получены прямым гидрированием газообразным тритием или мечеными гидридами металлов, каталитическим дегалогидированием и гидролитическим

разложением тритиевой водой. Сотни соединений с C^{14} получены в результате химического синтеза на основе относительно небольшой группы исходных «ключевых» соединений, меченных C^{14} . При этом разрабатывались пути направленного синтеза классов и групп соединений.

Многочисленная группа биологически активных веществ, меченных H^3 , C^{14} и S^{35} , была синтезирована индивидуально. Получены специальные радиоактивные препараты медицинского назначения: инъекционные препараты в изотоническом растворе, коллоидные растворы и суспензии с различными физико-химическими свойствами, меченые белки, металлоорганические и иодорганические органо- и туморотропные препараты, меченные разными изотопами и т. д. Эти исследования в течение первого десятилетия проводились в основном в Препарационной лаборатории Института биофизики МЗ СССР, а затем также силами Изотопной лаборатории Государственного института прикладной химии (ГИПХ) при участии некоторых институтов АН СССР, Министерства высшего и специального среднего образования СССР и Министерства здравоохранения СССР. Выпуск тритированных соединений был освоен в ГИПХе. Схемы синтеза ряда биологически активных веществ разработаны Ленинградским химико-фармацевтическим институтом.

В течение нескольких лет в Институте химической физики АН СССР и в Московском государственном университете ведутся поисковые работы в области «горячего» синтеза — метода получения меченых соединений с помощью ядер отдачи, возникающих при ядерной реакции. Но пока эти работы не получили выхода в производство.

5. В 50-х годах были начаты систематические исследования по изучению физико-химических закономерностей поведения отдельных радиоактивных продуктов деления, созданию промышленных методов извлечения и разработке схем разделения и выделения в чистом виде осколочных радиоактивных изотопов Ru^{106} , Zr^{95} , Nb^{95} , I^{131} , Ce^{144} , Pm^{147} , Y^{90} , Sr^{90} , Cs^{137} , Te^{99} и др.

Основным материалом-поставщиком осколочных элементов являются сбросные растворы атомной промышленности, количество которых достаточно для того, чтобы организовать постоянное производство и выпуск в необходимых объемах указанных изотопов для широкого использования их в народном хозяйстве.

Технология получения осколочных элементов с учетом состава растворов, загрязненных примесями катионов коррозионного происхождения, предусматривает этап концентрирования их методом соосаждения такими носителями, как гидроокись железа, с последующим переводом концентрата в азотнокислый раствор, содержащий стронций, церий, прометий, иттрий, цирконий, ниобий, рутений. Радиоактивные изотопы цезия и технеция на этом этапе переводят в щелочной декантат, откуда их извлекают методами адсорбции на неорганических сорбентах, в случае цезия — на ферроцианиде никеля и в случае технеция — на органических смолах.

В настоящее время для переработки азотнокислого концентрата, содержащего элементы второй и третьей группы, а также цирконий, ниобий и рутений, используется осадительно-экстракционная схема. Для выделения наиболее перспективных для использования долгоживущих элементов — церия, прометия и стронция — применяется отделение их от балластных примесей либо осаждением с носителем — кальцием в виде щавелевокислых солей с последующим выделением стронция нитратным осаждением в виде безводного нитрата, либо экстракцией. Использование эффективных экстрагентов дает возможность извлечь из азотнокислой смеси изотопов практически весь стронций и редкоземельные элементы. Дальнейшее разделение редкоземельных элементов осуществляется экстракционным способом в системе трибутилфосфатазотная кислота. Разделение стронция и кальция, как и очистка его от примесей бария, свинца и других элементов, осуществляется также экстракционным способом. Чистота полученных препаратов долгоживущих осколочных элементов весьма высокая. Степень очистки стронция от церия составляет 10^4 — 10^5 , а от прометия и других трехвалентных редкоземельных элементов — 10^2 — 10^3 . Степень обогащения прометия на конечных этапах переработки по церию равна 10^6 , по другим редкоземельным элементам — 10^4 . Выходы указанных элементов составляют 95—98%.

Внедренная в производство технология получения Pm^{147} , в основе которой лежит метод распределительной хроматографии, позволила значительно снизить весомость прометия (до 1,5 мг/кюри), что расширило области его использования.

Следует отметить, что отечественная технология получения наиболее важной группы

осколочных элементов своей комплексностью и простотой выполнения выгодно отличается от технологий, применяемых за рубежом.

Разработанные технологические методы позволили получить для изготовления первых изотопных источников тока, работавших на автоматической метеостанции и станции космических лучей, сотни тысяч кюри Sr^{90} и Cs^{137} , десятки тысяч кюри Ce^{144} . Выделенный радиоактивный технеций был использован для исследований сверхпроводимости и антикоррозийных свойств.

Указанный цикл работ развивался в основном в Институте физической химии АН СССР с привлечением других научно-исследовательских учреждений и при участии промышленных предприятий.

6. Большие работы проведены по созданию радиоизотопных источников ионизирующего излучения различных типов, размеров, номиналов и разного назначения.

В конце 40-х годов было начато производство гамма-источников, получаемых в результате нейтронного облучения, а затем — источников на основе осколочных элементов. Вначале они выпускались для гамма-дефектоскопии и в медицинских целях, а позднее — для радиоизотопных приборов и мощных облучательских установок.

Уже в первые три года гамма-дефектоскопическими источниками были обеспечены нужды сотен промышленных предприятий различных ведомств нашей страны. Вначале выпуск ограничивался в основном кобальтовыми источниками. В настоящее время для гамма-дефектоскопии серийно производится 17 типов источников с изотопами Co^{60} , Ir^{192} , Cs^{137} , Tl^{204} и Se^{75} . При этом их номиналы находятся в пределах 0,1—300 *г-экв* Ra, а создаваемая их γ -излучением мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м — в диапазоне $2 \cdot 10^{-5}$ — 10^{-1} *р/сек.*

Начиная с 1949 г. регулярно выпускаются кобальтовые иглы и аппликаторы для онкологии. В 1949—1950 гг. была обеспечена «зарядка» кобальтом первых в нашей стране телерадиевых аппаратов (по 10 *г-экв* Ra), затем отечественных гамма-терапевтических установок ГУТ-Со-20 и ГУТ-Со-400 (с источником из кобальта соответственно по 20 и 400 *г-экв* Ra). С 1963 г. выпускаются мощные гамма-терапевтические аппараты «Луч-1» и «Рокус», каждый с источником до 4000 кюри Co^{60} . Разработаны также кожные и глазные бета-аппликаторы с Pm^{147} , Tl^{204} , P^{32} , Y^{90} .

бета- и гамма-источники для внутритканевой и внутрисполостной терапии.

Мощные бета- и гамма-источники на основе Co^{60} , Cs^{137} и Sr^{90} используются в облучательских аппаратах для радиационно-химических процессов, лучевой стерилизации, в экспериментальных облучателях. В последние годы созданы различного типа и назначения килокюриные изотопные тепловые блоки на основе α - и β -радиоактивных изотопов, причем некоторые из них выпускаются серийно.

Созданы изотопные источники рентгеновского излучения, источники для снятия электростатического электричества, многочисленные типы источников для радиоизотопных приборов технологического контроля, сигнальных установок, для проверки и градуировки радиометрической и дозиметрической аппаратуры, начат выпуск «мессбауэровских» источников.

Коллективами ряда научных учреждений разработаны многочисленные методы получения источников с использованием электролитического осаждения, внедрения изотопа в оксидную пленку, ионообменные материалы, специальные эмали и стекла, методы приготовления керамических источников, источников на цеолитах, на основе клатратов и т. д. Создано специальное производство альфа-, бета- и гамма-источников. Организован серийный выпуск нейтронных источников.

Следует отметить, что за последние годы значительно улучшилось качество изотопных источников ионизирующих излучений. В настоящее время выпускаются источники, активность которых в 10—100 раз выше по сравнению с источниками, выпускаемыми десять лет назад. Введение многослойной ампулировки и улучшение качества сварки ампул позволило обеспечить надежную герметичность гамма-источников и повысить чистоту их поверхностей в соответствии с международными рекомендациями.

Разработаны новые технологические приемы и покрытия для фиксации радиоактивных веществ на подложках и герметизации альфа- и бета-источников, позволившие сделать их достаточно надежными, герметичными и вместе с тем сохранить высокий выход излучения. Так, термoxidная технология, использованная при изготовлении некоторых типов образцовых бета-источников, позволила получить прочную фиксацию активного вещества на подложке при незначительном (1—2%) поглощении излучения в активном слое.

Во всех этих работах кроме промышленных предприятий Госкомитета по атомной энергии СССР принимали также участие Радиевый институт, Всесоюзный научно-исследовательский институт радиационной техники, Препарационная лаборатория Института биофизики МЗ СССР, Изотопная препаративная лаборатория ГИПХа, Институт физической химии АН СССР и др.

Следует отметить, что в 50-х годах в Физическом институте АН СССР, а затем и в ГИПХе были начаты исследования по созданию радиолюминесцентных самосветящихся красок, светознаков и автономных источников света на основе радиоактивных изотопов, в результате чего в нашей стране было создано специальное производство радиоизотопных светоматериалов. Наиболее широко для этих целей используется тритий.

7. С первых дней организации массового выпуска изотопной продукции стали разрабатываться методы контроля ее качества и паспортизации. В первую очередь это касалось разработки методов и аппаратуры для абсолютных и относительных измерений активности твердых, жидких и газообразных образцов, а также мощности экспозиционной дозы, создаваемой гамма-источниками. В дальнейшем были разработаны методы проверки радиоизотопного состава радиоактивных препаратов и источников с помощью средств ядерной спектрометрии, а также для изучения других радиационно-физических характеристик (равномерность распределения активности в источниках, создаваемые ими дозные поля, выход частиц и квантов, действующие электронные и γ -спектры).

Наряду с разработкой и освоением прецизионных методов измерений в ведущих изотопных лабораториях созданы простые и экспрессные методы измерений, а также полуавтоматические устройства для использования в производственных условиях. Разработано большое число образцовых источников и растворов для градуировки аппаратуры и относительных измерений активности, созданы наборы образцовых спектрометрических альфа- и гамма-источников (ОСАИ и ОСГИ) и начат их серийный выпуск.

Разработаны и применены многочисленные физико-химические методы идентификации, анализа и определения химического и радиохимического состава меченых соединений и специальных препаратов с использованием хроматографии и электрофореза на бумаге, тонко-

слойной хроматографии, радиометрии, полярографии, кулонометрии, эмиссионного спектрального анализа, ультрамикроскопии и элементарного анализа.

Многие из разработанных контрольно-измерительных и аналитических методик были унифицированы в масштабах страны, а частично — в рамках СЭВ.

Закрытые радиоактивные источники и изделия проходят специальную проверку на герметичность оболочки и отсутствие загрязненности их поверхности радиоактивными веществами в соответствии с установленными санитарными правилами и нормами.

Помимо общих требований к качеству всех радиоактивных препаратов, медицинские препараты должны соответствовать также требованиям фармакопеи. Поэтому они не только приготавливаются в условиях особого санитарно-гигиенического режима, но на заключительной стадии технологического процесса все инъекционные препараты стерилизуются, а перед выпуском проводится их биоконтроль — контроль на стерильность и апиrogenность. Кроме того, по установленному в нашей стране порядку каждый новый лечебно-диагностический радиоактивный препарат подвергается испытаниям на токсичность и другим лабораторным исследованиям на животных, а затем проходит клинические исследования на людях. Только после успешного завершения всех этих исследований и испытаний и на основании рекомендации Фармакологического комитета Министерство здравоохранения СССР дает разрешение на применение нового радиоактивного препарата в клинической практике.

В работе по созданию и применению методов и средств контроля качества и испытаний радиоактивных препаратов и источников приняли участие Препарационная лаборатория Института биофизики МЗ СССР, Изотопная лаборатория ГИПХа, Радиевый институт, Союзный научно-исследовательский институт приборостроения, Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений и др.

8. Широкое развитие получили исследования в области создания методов, технологии и установок для получения обогащенных стабильных изотопов и меченых ими соединений. Развивались методы диффузионного и термодиффузионного разделения, ректификации, электролиза, дистилляции, химического обмена,

электромагнитного разделения. На основе полученных результатов налажено крупное отечественное производство стабильных изотопов. Разделение стабильных изотопов стало постоянной программой в ядерной технике.

Эти исследования и выпуск стабильных изотопов, соединений и изделий на их основе осуществлены организациями Госкомитета по атомной энергии СССР. Министерства химической промышленности СССР и других ведомств. В Физико-химическом институте им. Л. Я. Карпова изучены процессы разделения изотопов кислорода дистилляцией воды и химическим обменом, концентрирования изотопа N^{15} методом химического обмена, получения изотопа B^{10} ректификацией BCl_3 ; кроме того, проведены работы по исследованию кинетики процессов разделения стабильных изотопов в колоннах. В результате этих исследований были созданы установки для получения изотопов O^{18} и N^{15} , сооружена полупромышленная установка для получения B^{10} .

Лабораторией стабильных изотопов химического факультета МГУ проведена большая работа по исследованию возможности разделения стабильных изотопов бора, углерода, кислорода, азота, титана. Впервые была показана возможность разделения изотопов бора с использованием химообменных систем BF_3 и его комплексов с анизолом, фенетолом и хлорексом.

На кафедре разделения и применения изотопов Московского химико-технологического института были изучены процесс разделения изотопов серы методом химического обмена, возможность разделения изотопов водорода, азота, кислорода на цеолитах и концентрирование O^{18} ректификацией, исследовались системы BF_3 и его комплексов для определения возможности осуществления технологического процесса разделения изотопов бора, рассмотрены перспективы применения химического обмена для разделения стабильных изотопов элементов средних и тяжелых масс.

Под научным руководством Института физических проблем АН СССР осуществлено промышленное выделение дейтерия низкотемпературной дистилляцией.

На кафедре разделения изотопов Московского инженерно-физического института проводятся работы по разделению изотопов методом диффузии против потока пара.

Сухумским физико-техническим институтом выполнен комплекс работ в области разделения изотопов элементов легких и средних масс

(бора, азота, кислорода, углерода, неона, аргона, криптона, серы, хлора) методами дистилляции, диффузии против потока пара, химическим обменом и обменной дистилляцией. Разработаны приборы и методы для измерений изотопного состава вещества, элементы и системы для автоматизации процессов разделения. Эти исследования легли в основу создания Научно-исследовательского института стабильных изотопов с опытным производством в Тбилиси.

Институтом атомной энергии им. И. В. Курчатова и другими организациями Госкомитета по использованию атомной энергии СССР выполнен широкий цикл исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке методов и средств электромагнитного разделения изотопов большой группы элементов.

Наряду с крупными электромагнитными разделительными установками разработана и применяется серия небольших лабораторных сепараторов, в том числе двухступенчатых для получения изотопов высокого обогащения (порядка 10^4 за один цикл разделения).

Работа отечественных электромагнитных установок позволила накопить значительный запас разнообразных стабильных изотопов и создать Государственный фонд изотопов. В настоящее время фонд располагает различными соединениями 210 изотопов 49 химических элементов, предназначенных в основном для выдачи во временное пользование научным и промышленным организациям страны. Из этого фонда ежегодно производится около 1200 поставок изотопно-обогащенных материалов и до 500 поставок изотопных мишеней различным организациям Советского Союза и за границу. Кроме изотопных мишеней и изделий в продажу выпускается широкая номенклатура соединений, меченных стабильными изотопами, в том числе 163 соединения с дейтерием, 34 с N^{15} , 22 с O^{18} и др.

Большинство стабильных изотопов используется в ядернофизических исследованиях. Значительная часть их служит в качестве исходного материала для получения радиоактивных изотопов с высокой удельной активностью, и затем используется в технике, биологии и медицине.

9. Развитие производства, рост номенклатуры и расширение общего объема выпуска радиоизотопной продукции в СССР за 20 лет можно проиллюстрировать следующими основными данными.

В текущем году серийно выпускается 134 радиоактивных изотопов, а номенклатура стабильных изотопов доведена до 220. Осваивается производство ряда новых изотопов, в том числе циклотронных. Номенклатура регулярно выпускаемых меченых соединений с радиоактивными изотопами за первые пять лет (1948—1952 гг.) выросла в 15 раз (с 4 до 60 наименований), за следующее пятилетие (1953—1957 гг.) она была доведена до 284 и в настоящее время достигла 961 наименования, в том числе: неорганических 461, органических 437 и медицинских препаратов 63. Общая номенклатура выпускаемой в нашей стране изотопной продукции за последние 10 лет выросла более чем в шесть раз, в том числе номенклатура стабильных обогащенных изотопов — в 5 раз, меченых соединений с радиоактивными изотопами — в 3,5 раза, а число освоенных производством и выпускаемых лечебно-диагностических препаратов — в 8 раз. Номенклатура изотопной продукции в целом составляет около 3000 наименований, в том числе меченых соединений с радиоактивными изотопами — 961, со стабильными изотопами — 560, разных типов источников α - β - γ -тормозного и нейтронного излучения — 1387.

236 284
Постоянно увеличивается и общий объем выпуска изотопной продукции. Если за первые десять лет потребителям было направлено около 150 тыс. «посылок» с открытыми радиоактивными изотопами (не считая источников излучений), в 1963 г. их было послано 52,8 тыс., а сейчас их поставляется около 70 тыс. в год. Только за последние пять лет через Всесоюзное объединение «Изотоп» поставлено изотопной продукции на общую сумму около 49 млн. руб. (не считая тепловых изотопных блоков и других специальных изделий), причем за этот период объем поставок изотопной продукции возрос более чем вдвое.

В 1967 г. Всесоюзным объединением «Изотоп» было поставлено 318 различных меченых соединений с C^{14} общей активностью более 80 кюри, 42 меченых соединения с P^{32} (145 кюри), 73 соединения с S^{35} (90 кюри), 24 соединения с I^{131} (240 кюри), шесть соединений с Au^{198} (245 кюри) и т. д.

Увеличивается выпуск различных источников излучения. Ежегодно выпускается по 30—50 тыс. источников для нейтрализаторов электростатических зарядов на основе Pu^{239} , по 40—60 тыс. альфа-источников для противопожарных приборов, сигнализирующих о появлении дыма и т. д. Ежегодно народное хозяй-

ство страны приобретает до 1 млн. кюри гамма-источников из Co^{60} , а общая активность ежегодно выпускаемых меченых соединений (открытых радиоактивных препаратов) превышает 1000 кюри.

В 1968 г. общий выпуск радиоактивных препаратов и источников (исключая блоки для изотопной энергетики) в денежном выражении составил несколько млн. руб. В настоящее время в нашей стране радиоактивные изотопы регулярно применяют 4200 организаций, большинство из которых (около 2500) — промышленные предприятия, а также свыше 600 научно-исследовательских, более 500 лечебных учреждений и др.

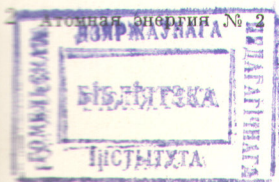
Начиная с 1951 г. СССР начал экспортировать изотопную продукцию. Первые экспортные поставки (Na^{24} , P^{32} , I^{131}) были осуществлены в сентябре 1951 г. в ЧССР. В настоящее время изотопы, меченые соединения и источники поставляются в широком ассортименте в 17 стран, причем ежегодный объем экспортных поставок составляет в денежном выражении до 15% объема поставок на внутренний рынок.

10. В итоге двадцатилетней творческой и организаторской деятельности многочисленных коллективов ученых, инженеров и других специалистов в нашей стране созданы научно-технические основы производства изотопов, источников излучений, изделий и меченых соединений, методов их контроля и паспортизации, спроектированы и построены специальные установки, лаборатории, цеха и заводы, основана новая отрасль ядерной техники.

В Советском Союзе создана и развивается производственная база, которая позволит обеспечить все расширяющийся выпуск разнообразной изотопной продукции необходимого ассортимента, высокого качества и в достаточных для удовлетворения потребителей нашего народного хозяйства количествах.

Однако сделано еще далеко не все. Кроме того, постоянно возникают новые запросы и более высокие требования. Поэтому в области научных исследований, разработки и совершенствования технологических процессов, организации и развития изотопных производств и системы поставок изотопной продукции в нашей стране в ближайшие годы необходимо решить много проблем и задач. Кратко укажем некоторые из них. Итак, необходимо:

— Расширить номенклатуру выпускаемых серийно радиоактивных изотопов; организовать регулярный выпуск короткоживущих изотопов в изотопных радиохимических лаборато-



риях при исследовательских ядерных реакторах союзных республик, а также в Ленинграде и Сибири для удовлетворения нужд соответствующих территориальных зон.

— Обеспечить дальнейшее расширение ассортимента выпускаемых в СССР соединений, меченных радиоактивными изотопами, и медицинских радиоактивных препаратов с учетом кооперации и специализации радиоизотопного производства в рамках СЭВ. Следует обратить особое внимание на создание новых оригинальных отечественных препаратов и изделий.

— Улучшить качество ряда выпускаемых изотопов, источников и меченых соединений — повысить их удельную активность (C^{14} , Ca^{47} , Co^{60} и др.), радиоизотопную чистоту (Na^{24} , As^{74} , Hg^{197} и др.), а также радиохимическую чистоту некоторых меченых соединений и инъекционных растворов.

— Пополнить Государственный фонд стабильных изотопов некоторыми изотопами, отсутствующими или имеющимися в недостаточном количестве, в первую очередь изотопами элементов платино-иридиевой группы, Hg^{196} , Ca^{46} и др.; обеспечить выпуск некоторых стабильных изотопов с лучшими характеристиками по проценту обогащения и чистоте (в частности, соединений с дейтерием, V^{10} и др.).

— Освоить выпуск новых альфа-источников на основе Pu^{238} и Am^{241} , точечных, а также мощных бета-источников с высокой удельной активностью на основе Sr^{90} и Pm^{147} , источников мягкого рентгеновского и γ -излучения, мессбауэровских, а также более мощных и малогабаритных нейтронных источников.

— Освоить выпуск термо-, радиационно-химически стойких высокоактивных материалов из продуктов деления для использования их в качестве мощных источников излучения; развить работу по созданию новых типов изотопных блоков для генераторов тепловой

и электрической энергии и обеспечить выпуск изотопов Sr^{90} , Cs^{137} , Ce^{144} , Pm^{147} , Pu^{238} и Sm^{244} в объемах, необходимых для нужд развивающейся изотопной энергетики.

— Вести широкие комплексные теоретические и экспериментальные исследования, развивающие и углубляющие научные дисциплины, на которых основаны получение, выделение и разделение изотопов, приготовление меченых соединений и препаратов, создание источников излучения и специальных изделий; осуществлять поиски новых направлений, разработку новых методов, технологических схем и средств получения радиоизотопной продукции высокого качества; совершенствовать и разрабатывать новые методы испытаний и контроля физико-химических, радиационно-физических, эксплуатационно-технических и биологических характеристик источников излучения, меченых соединений и медицинских препаратов.

— Проводить работу по совершенствованию и автоматизации технологических процессов производства изотопной продукции в целях улучшения качества, повышения технико-экономических показателей и снижения себестоимости производства изотопов и отпускных цен на них.

— Улучшить организацию снабжения изотопной продукцией, создав на производствах и во Всесоюзном объединении «Изотоп» постоянно пополняемый резерв пользующихся спросом источников и меченых соединений с тем, чтобы обеспечить оперативное выполнение текущих заказов потребителей.

Можно не сомневаться, что научные и производственные коллективы, ведущие разработку и выпуск изотопной продукции, с успехом решат поставленные перед ними задачи, обеспечат дальнейший прогресс в этой области с тем, чтобы изотопы еще шире использовались в науке, медицине и народном хозяйстве.

Изотопы в научных исследованиях

В. И. Спицын

Изотопы химических элементов приобрели в настоящее время огромное теоретическое и прикладное значение, которое, несомненно, не могли даже и предвидеть авторы открытия замечательного явления изотопии. Как известно, изотопы радиоактивных элементов были обнаружены в 1906—1910 гг. на примерах полного совпадения химических свойств тория,

иония и радиотория, свинца и радия D, радия и мезотория (I), эманаций радия, тория и актиния.

В результате разработки метода масс-спектрометрии в 1912—1919 гг. были открыты первые изотопы нерадиоактивных элементов — неона, аргона, криптона, ксенона, хлора и др. Искусственная радиоактивность, впервые осу-