

7. ПРОИЗВОДСТВО ИЗОТОПОВ

Производство изотопов – эффективная отрасль российской экономики. Только экспорт изотопов ежегодно приносит стране не менее \$35 млн, возможно, что через десять лет эта цифра увеличится на порядок. Основные производства по выпуску как стабильных, так и радиоактивных изотопов были построены в 50-60-е годы. Главными потребителями их продукции были предприятия ВПК, медики, энергетики, металлурги; значительная часть производимых веществ шла на фундаментальные научные исследования. Если не брать в расчет производства по выпуску изотопов урана и плутония, используемых в атомной энергетике, то всего сейчас в стране можно насчитать 17 крупных производителей стабильных и радиоактивных изотопов. Их потребители – оборонная промышленность, которая в достаточно больших количествах закупает для радиологических исследований йод-131, технеций-99, индий-111 и пр.

Надо отметить, что и в СССР экспорт изотопной продукции составлял определенную статью отечественного бюджета -- доходы от продаж изотопов иностранным компаниям в конце 80-х составляли около \$10 млн в год. Тогда экспортировались в основном стабильные изотопы -- более дешевые и менее удобные в применении. Но к середине 90-х, только по официальным данным, экспорт вырос более чем втрое. При этом на стабильные изотопы в денежном выражении приходилось чуть более 12%. В 1996 году российское правительство даже отменило лицензирование для компаний, осуществляющих экспортные поставки стабильных изотопов, однако после этого на Запад из России хлынули такие легальные и нелегальные потоки стабильных изотопов, что цены на некоторые популярные вещества (калий-203, цинк-68) упали на мировом рынке более чем вдвое. Производителям изотопов стоило определенного труда ввести обратно порядок лицензирования экспортных операций. Теперь больше половины экспорта осуществляется через созданную самими производителями компанию "Техснабэкспорт".

Широкое применение изотопов в современной медицине создало на рынке такую ситуацию, при которой спрос на эту продукцию оказался гораздо выше предложения. Сегодня более 70% производимых в мире стабильных изотопов и более 50% радиоактивных используется в медицине. По прогнозам специалистов, эти цифры в ближайшие годы могут только вырасти. Всплеск интереса медиков к изотопам объясняется высокой эффективностью их применения в диагностике. Именно для диагностических целей используется сегодня около 98% изотопов, поступающих в медицинский сектор.

Уникальность изотопной диагностики заключается в ее точности, надежности, возможности частого применения, а главное, способности диагностировать заболевание уже на ранней стадии. Такие радионуклиды, как таллий-201 и рубидий-82, используются для получения изображения сердца, другие (например, технеций-99) используются при сканировании мозга, костных тканей, а также для диагностики таких заболеваний, как рак, болезнь Альцгеймера и др. При высокоэффективной изотопной диагностике, позволяющей определить динамику биохимических процессов во всех участках организма, используется углерод-11, азот-13, фтор-18. Ряд изотопов (палладий-103, иридий-192) уже применяют для лечения раковых заболеваний, а некоторые изотопы можно использовать как анальгетики и стерилизаторы.

В итоге многие российские производители за последние десять лет переориентировались на выпуск изотопов для медицинских целей. Крупнейший российский производитель изотопов, челябинское ПО "Маяк", в последнее время более чем вдвое увеличил производство кобальта-60, который активно используется в том числе и для стерилизации медицинских инструментов (излучаемые этим изотопом гамма-лучи разрушают микроорганизмы и биосубстанции).

Димитровградский НИИ атомных реакторов освоил производство вольфрама-188, необходимого для терапии онкологических заболеваний. Госпредприятие "Сибирский химический комбинат", выпускавшее в последнее время изотопы преимущественно для ядерно-топливного цикла АЭС, начало производство кислорода-18, который будет использоваться исключительно в медицинских целях.

Помимо производства изотопов в России все более активно идет производство радиофармпрепаратов на их основе, разворачивается и сеть лечебных центров, в которых возможно использование радионуклидов и стабильных изотопов, как для диагностики, так и терапии.

7.1 Производство стабильных изотопов

Производство стабильных изотопов (дейтерий, изотопы бора, бериллия и т.п.) для нужд ядерной индустрии давно осуществляется в промышленных масштабах. В последнее время резко возросли потребности в стабильных изотопах медицинского назначения.

Стабильный изотоп кислорода ^{18}O используется для ранней диагностики рака на позитронно-эмиссионных томографах (ПЭТ). Недавно фирма «Оксимед» (Рошино) начала его промышленное

производство. Проект рассчитан на производство 10 кг изотопа кислорода ^{18}O в год, вся продукция идет на экспорт

Необходимость массового использования медицинских препаратов меченных изотопом ^{13}C для диагностических целей требует существенного увеличения его мирового производства до сотен кг в год. К сожалению, стоимость его получения традиционными методами очень высока. Более перспективной в этом смысле является лазерная технология разделения стабильных изотопов элементов средних масс, которая при производстве изотопа ^{13}C дает возможность существенно снизить себестоимость. На основе разработок ГНЦ РФ ТРИНИТИ в 1997 г. в г. Калининграде создан завод с объемом выпуска около 15 кг в год изотопа ^{13}C , причем на этом же оборудовании получают в год до 150 кг в год изотопа ^{12}C с обогащением 99.99%.



Рис. 10. Технологическая линия получения изотопа ^{13}C

Производство высокообогащенного изотопа ^{13}C по комбинированной технологии, при которой обогащение производится в 2 приема:

- на первой (лазерной) стадии осуществляется селективная мультифотонная диссоциация молекул фреона при помощи лазерного излучения и получается продукт с 30-35% содержанием ^{13}C при производительности 3-х модулей до 1,5 г/час (при

уменьшении производительности до 0,6 г/час можно получить 90% обогащение);

- на второй стадии более высокое обогащение до 99,9% получается традиционным способом на центрифугах.

Важно, что получаемый по этой технологии $^{13}\text{CO}_2$ содержит пониженную концентрацию тяжелых изотопов кислорода по сравнению с $^{13}\text{CO}_2$, получаемым другими методами (обычное содержание ^{18}O в $^{13}\text{CO}_2$ - 5-7%).

Одновременно завод выпускает соединения, меченные стабильным изотопом ^{13}C : CO_2 , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , CaCO_3 , Хладон-114В2 (1,1,2,2-Тetraфтордibромэтан) $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$, ^{13}C -мочевина: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.

Предприятие «Обеспечение РФЯЦ-ВНИИЭФ» совместно с Российским Федеральным Ядерным Центром – Всероссийским Научно-исследовательским Институтом Экспериментальной Физики



(г.Саров) выпускает в промышленных объемах целый ряд стабильных изотопов и постоянно расширяет номенклатуру продукции, получаемой в том числе и с помощью новых (нецентрифужных) методов наработки. Номенклатура изотопной продукции включает, углерод -13 и 12, кремний-28, 29 и 30, сера-32, 33, 34 и 36, цинк- 64, 66, 67, 68, 70, криптон- 78, 80, 82, 83, 84, 86, ксенон-124, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 134 и 136, молибден-100, германий-76, селен-74, никель-58, 61 и 64, кислород-18.

Электрохимический завод, ПО ЭХЗ, г.Зеленогорск – выпускает изотоп ^{57}Fe 80% обогащением, а также широкую гамму

изотопов титана, хрома никеля, теллура, олова, свинца и иридия. Объем выпускаемых за год продуктов достигает нескольких сотен килограммов. Изотопы ПО «ЭХЗ» применяются в атомной энергетике, медицине, электронике, в научных исследованиях микромира и макрокосмоса. Завод имеет ряд опытных каскадов для разработки технологии и производства небольших количеств изотопов уникально высоких концентраций.



7.3 Получение изотопов в ядерных реакторах

Как известно, оружейные изотопы, и, в первую очередь ^{239}Pu , нарабатываются в промышленных ядерных реакторов, специально сконструированных для этих целей. В последнее время началась активная реконструкция «военных» реакторов с целью расширения производства на них «мирных» изотопов (как стабильных, так и радиоактивных), в первую очередь – медицинского назначения.

Среди так называемой реакторной группы изотопов важное место имеет радиоактивный, гамма-излучающий изотоп кобальт-60. радиационной модификации свойств полимеров и изделий.

Облучательные установки, использующие в качестве источника гамма-излучения кобальт-60 находят широкое применение во многих отраслях экономики и предназначены в частности для: стерилизации продуктов питания (для сохранения урожая, мяса и яиц), стерилизации медицинских инструментов и материалов; стерилизации и дезинсекции пищевых продуктов; стимуляции роста и урожайности зерновых и овощных культур; обеззараживания и очистки промышленных и бытовых стоков, твердых отходов различных видов производств; облагораживания и упрочнения изделий из дерева; упрочнения различных видов стекла специального назначения и его окраски; радиационной обработке различных изделий из полимеров, для придания им новых потребительских свойств (повышенная механическая и термическая устойчивость, изменение электрохимических свойств, придание "памяти" и пр.)

Радионуклидные гамма-облучательные установки характеризуются низким собственным энергопотреблением; простотой и надежностью в эксплуатации, пригодностью для многоцелевого использования при переработке жидких, сыпучих и блочных изделий и материалов, наконец, с точки зрения инвестиций и оборачиваемости капитала, радионуклидные установки гарантируют окупаемость затрат в течение 2 - 4 лет. Гамма-стерилизаторы различной мощности используются в больницах, поликлиниках, аэропортах, в фермерских хозяйствах для противомикробной обработки различных изделий и материалов, предпосевной обработки семян, различной сельскохозяйственной продукции, стимуляции роста эмбрионов рыб, птиц и т.д. Биорадиационные и радиационно-химические технологии используются для переработки биополимеров в высокоценные товары: пекарские и кормовые дрожжи; спирты, корма и сорбенты.

ПО «Маяк» начал конверсионную программу по производству ^{60}Co , а также трития, изотопов молибдена и стабильного изотопа гелия-3.

Для расширения производства изотопов планируется ремонт реактора «Людмила», что позволит ещё лет 15 работать в этом направлении достаточно надёжно. Этот реактор имеет мощность 1000 МВт и наряду с производством гражданской продукции изготавливает «оружейные» изотопы: тритий и плутоний-238. Другим реактором двойного назначения является «Руслан», который был введен в эксплуатацию в 1948-1951 году. В конце 80-х его реконструировали из реактора на тяжелой воде в легководный реактор мощностью 1000 МВт. «Руслан» также используется для производства «оружейных» изотопов. Сейчас его переводят на выпуск «гражданских» изотопов. Это очень сложный процесс, так как нужно изменять активные зоны реакторов, проводить большие конструкторские и исследовательские работы.

Не только военные реакторы можно приспособить для производства коммерческих изотопов. Изотопы можно производить и на некоторых типах реакторов, работающих на атомных электростанциях.

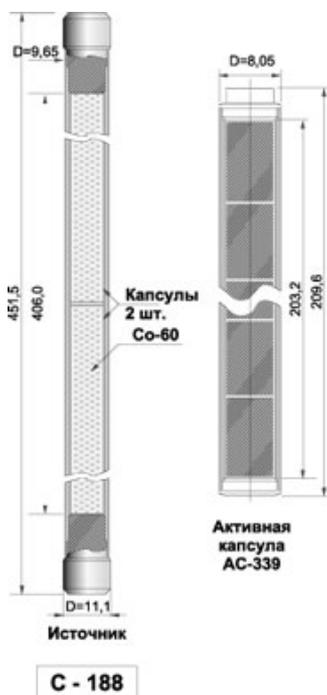


В частности, для этой цели подходят каналные реакторы типа РБМК. Именно такие реакторы установлены на Ленинградской АЭС. Ключевым преимуществом реализации радиационных технологий в канальном реакторе РБМК-1000 является его конструктивная особенность, позволяющая осуществлять загрузку и выгрузку облучаемых образцов и изделий на работающем реакторе в любой момент времени в многочисленных каналах, обеспечивая поддержание на высоком уровне всех условий ядерной и



радиационной безопасности. В этом отношении РБМК выгодно отличается от корпусных реакторов типа ВВЭР, где реализация радиационных технологий ограничена условиями эксплуатации реактора. Такое облучение обеспечивает производство медицинских изотопов, изотопов масштабного общепромышленного назначения, управление свойствами различных материалов, сплавов, химических соединений, полупроводников, природных кристаллических структур, готовых изделий интеллектуальной электроники и многих других изделий. В настоящее время ЛАЭС успешно сотрудничает с отечественными и зарубежными заказчиками в области поставок радиоизотопной продукции и оказания услуг по радиационной обработке материалов.

Среди изотопной продукции ЛАЭС первое место занимает ^{60}Co . Возможности канальных реакторов РБМК-1000 этой АЭС позволяют накапливать кобальт-60 с удельной активностью 50...100 Ки/г, в объемах до 10 миллионов Ки в год, как в виде сырья, так и в виде источников. Накопление кобальта-60 в реакторах ЛАЭС осуществляется в облучательных устройствах, совмещающих в себе функции безопасности (поглощение нейтронов) и накопления изотопа. Облученный кобальтовый



материал (в форме кобальтовых таблеток (диаметром 6.8 мм и высотой 1.5 мм) с никелевым покрытием герметизируют в первичные активированные капсулы из нержавеющей стали 06Х18Н10Т. Геометрические размеры капсул (наружный диаметр - 8.2 мм; длина - 210 мм) соответствуют размерам внутренних капсул источников, производимых в России и за рубежом.

На ЛАЭС также организован выпуск кремния, легированного нейтронно-трансмутационным методом. Природный кремний состоит из смеси стабильных изотопов - ^{28}Si (92,28%), ^{29}Si (4,67%) и ^{30}Si (3,05%). Благодаря полупроводниковым свойствам, кремний широко используется в передовых отраслях промышленности ведущих стран мира. Наиболее актуально использование полупроводниковых свойств кремния в различных электротехнических приборах и устройствах, которые играют важнейшую роль во всех областях электротехники, электроники и связи. В целом надежность и электрофизические параметры готовых приборов в первую очередь зависят от исходной чистоты, точности и равномерности дозировки легирующих примесей при сохранении однородности свойств монокристаллов кремния.

Область применения радиационно-легируемого кремния необычайно широка: силовые полупроводниковые приборы, вставки постоянного тока для преобразования переменного тока в постоянный, силовые фотоэлектронные преобразователи для солнечных электростанций, мощные диоды и тиристоры для электрифицированного железнодорожного и автомобильного транспорта, высоковольтные и сильноточные полупроводниковые приборы для ядерной физики и электроники, в электронно-измерительном приборостроении; в фотоэлектронных преобразователях энергии, в системах оптической техники и т.п.

На ЛАЭС осуществляется радиационное легирование кристаллов кремния диаметром до 305 мм,



объем радиационно-легируемого кремния — 300 т в год. Принципиальным моментом нейтронно-трансмутационного легирования является то, что легирующие примеси не вводятся в исходный материал извне, а образуются в процессе облучения непосредственно из атомов легируемого материала. В основе метода лежат ядерные реакции, которые протекают в кристалле кремния. Под воздействием потока тепловых нейтронов происходит образование радиоактивного изотопа ^{31}Si и его последующий распад с образованием стабильного фосфора ^{31}P . Образующийся ^{31}P создает проводимость n-типа. В РБМК-1000 спектр нейтронов существенно мягче, чем в легководных исследовательских и энергетических реакторах. Благодаря большому размеру реактора, поток тепловых нейтронов в активной зоне имеет требуемую равномерность для легирования вертикальной гирлянды слитков кремния. К тому же, плотность потока нейтронов при работе РБМК-1000 на заданной мощности остается практически постоянной за все время облучения. Все эти факторы приводят к снижению количества радиационных

дефектов в облученном материале, что, в конечном итоге, обеспечивает высокое качество легирования кремния. На ЛАЭС для легирования кремния используются облучательные каналы реактора с водяным охлаждением. Облучательные комплексы реакторов ЛАЭС оснащены системами автоматизированного контроля потока нейтронов, позволяющих обеспечить требуемое качество и технологичность процесса легирования слитков кремния.

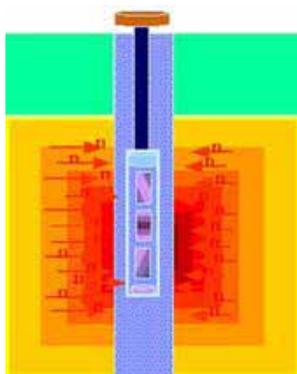
Отметим, что в этих же каналах может быть обеспечена радиационная модификация свойств других кристаллических материалов, в том числе полудрагоценных и драгоценных камней в объеме до нескольких тонн.

ЛАЭС производит и другие радионуклиды медицинского и общетехнического назначения. (Табл. 4).

Табл.4. Радионуклиды медицинского и общепромышленного назначения, производство которых осуществляется на Ленинградской АЭС

1.	Углерод-14	9.	Селен-75	17.	Иод-125
2.	Сера-35	10.	Рубидий-86	18.	Самарий-145
3.	Кальций-45	11.	Молибден-99	19.	Неодим-147

4.	Скандий-46	12.	Олово-113	20.	Гадолиний-153
5.	Хром-51	13.	Индий-114m	21.	Тантал-182
6.	Железо-59	14.	Кадмий-115m	22.	Вольфрам-185
7.	Кобальт-60	15.	Сурьма-124	23.	Иридий-192
8.	Цинк-65	16.	Теллур-125m	24.	Ртуть-203



Облученные в нейтронном потоке реактора мишени направляются на специализированные предприятия для радиохимической переработки. Целевые радионуклиды выделяются в элементарном состоянии или в виде растворов неорганических соединений, которые в дальнейшем используются для приготовления радиофармпрепаратов, меченных органических соединений или источников ионизирующих излучений.

Радионуклиды применяются в адресной диагностике и лечении различных заболеваний человека, изучении технологических, физико-химических, биологических процессов и позволяют изучать перемещение вещества в пространстве и во времени на любой стадии исследуемого процесса.

Одним из широко применяемых в различных областях науки и техники является радионуклид углерод-14. Объем производства углерода-14 (в виде $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$) - до 300Ки/год с удельной активностью по изотопу близкой к теоретически возможной. В качестве стартового материала для получения углерода-14 в нейтронном потоке реакторов планируется использование нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ или нитрида алюминия AlN .

Другими радионуклидами являются ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), ^{125}I , ^{35}S , ^{45}Ca , ^{51}Cr , ^{86}Rb , ^{124}Sb , ^{145}Sm , ^{153}Gd , ^{203}Hg . Нарботка радионуклидов осуществляется в герметичных блок-контейнерах, содержащих ампулы со стартовыми веществами. Для производства радионуклидов используются каналы камеры деления, центральные гильзы датчиков для контроля энерговыделения по высоте активной зоны реактора и специальные облучательные каналы. В каналы загружаются вертикальные гирлянды, состоящие из блок-контейнеров.



Дочерний изотоп технеций-99m, образующийся при распаде молибдена-99, извлекается на радиохимической установке по экстракционной технологии (централизованном генераторе) и в виде препарата "Раствор натрия пертехнетата" и доставляется в клиники для проведения радиодиагностических исследований. На основе этого препарата непосредственно перед проведением радиодиагностических исследований, готовят радиофармпрепараты, такие как "Пирфотекс, Tc-99m"; "Бромезида, Tc-99m"; "Цитратех, Tc-99m". Ежемесячный объем поставки препарата Tc-99m в лечебные учреждения г. С.-Петербурга позволяет проводить около 3000

диагностических процедур.

Производство ^{125}I на ЛАЭС находится на уровне 200 Ки в год. На основе радиоизотопа ^{125}I синтезируются стероидные гормоны, меченные радионуклидом ^{125}I , а также изготавливаются йодные источники, предназначенные для проведения радиодиагностических анализов и научно-исследовательских работ в области биоорганической химии, генной инженерии и медицины. Использование стероидных гормонов, меченных радионуклидом ^{125}I в медицине, позволяет осуществлять раннюю диагностику онкологических заболеваний, выявлять нарушения функции половых желез и надпочечников, системы гипоталамус-гипофиз-кора надпочечников и т. д.

Третьим типом реакторов, используемым для наработки радионуклидов, являются жидкосольевые ядерные реакторы. На них, в частности, производятся «медицинские» радиоактивные изотопы ^{99}Mo и ^{89}S . Более подробно эти вопросы изложены в курсе лекций ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ.

7.4 Получение изотопов на ускорителях

Далеко не все изотопы можно получать в атомных реакторах по ядерным реакциям с участием нейтронов. Многие радионуклиды синтезируют на ускорителях протонов и тяжелых ионов, например, на циклотронах. На циклотронах реализован комплекс по производству радиоактивных изотопов йода-123, фтора-18, углерода-11, азота-13, кислорода-15, рубидия-81, галлия-67, индия-111, таллия-201 и радиофармпрепаратов (РФП) на их основе. Производство короткоживущих изотопов осуществляется на базе циклотрона DC72, обеспечивающего высокие интенсивности пучков легких ионов высоких

энергий и ускорение тяжелых ионов низких энергий, в то время как наработка ПЭТ изотопов (ПЭТ-позитронная эмиссионная томография) ведется на специализированном ПЭТ-циклотроне.

В настоящее время циклотроны внедряются в медицину не только как производители радионуклидов и радиофармпрепаратов, но и как источники протонов и высокоэнергетических нейтронов. Протонные пучки, например, применяются для облучения внутриглазных мишеней. Тем самым возникает возможность осуществления одного из перспективных методов лечения онкологических больных - лучевой терапии злокачественных опухолей пучками протонов. Лечение меланомы глаза протонными пучками может считаться одним из наиболее успешных методов лечения рака.

Сверхбыстрые нейтроны (энергия до 70 МэВ) нашли применение в лучевой терапии онкологических больных. Нейтронный источник от циклотрона обеспечивает как квазимоноэнергетические нейтроны из тонких литиевых и бериллиевых мишеней, так и нейтроны непрерывного спектра. Плотные потоки быстрых нейтронов не имеют преимуществ в отношении геометрического распределения поглощенной дозы по сравнению с обычно применяемыми видами радиации (гамма-лучи и электроны), однако, обладают благоприятными изменениями ряда факторов биологического действия, связанными с высокими значениями линейных передач энергии. Это, например, повышенное значение относительной биологической эффективности, сниженное значение кислородного отношения, меньшая зависимость от фазы клеточного цикла и режима фракционирования.

Более подробно применение циклофонов для производства изотопов медицинского назначения описано в курсе лекций ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА.