И.Н.Бекман

ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Спецкурс.

Лекция 20. **ДОРЕАКТОРНАЯ ЧАСТЬ УРАНОВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

Содержание.

1. ДОБЫЧА УРАНОВОЙ РУДЫ 1
1.1 Урановые рудники и запасы урана 1
1.2 Переработка урановой руды. 6
2. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО УРАНА 9
3. ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА. 10
3.1 Гексафторид урана 10
3.2 Методы разделения изотопов 11
3.2.1 Разделение изотопов 11
3.2.2 Изотопные эффекты 13
3.3.3 Газовая диффузия. 14
3.2.4 Диффузия в потоке пара (противопоточная масс-диффузия) 16
3.2.5 Термодиффузия 16
3.2.6 Газовое центрифугирование 17
3.2.7 Электромагнитное разделение. 17
3.2.8 Химическое обогащение 18
3.2.9 Аэродинамическая сепарация 18
3.2.10 AVLIS (испарение с использованием лазера). 18
3.2.11 Дистилляция 19
3.2.12 Электролиз 19
3.2.13 Изотопный обмен 19
3.3 Разделение изотопов урана 21

Урановый топливный цикл – основной цикл современной атомной энергетики. Он состоит из трёх частей: дореакторной, реакторной и послереакторной.

В этой лекции мы рассмотрим дореакторную часть уранового топливо-энергетического цикла, включающего в себя такие стадии, как добычу и обогащение урановой руды, получение металлического урана и его оксидов, обогащение урана изотопом урана-235 (**Рис.1**). Коротко остановимся и на проблеме разделения изотопов (не только урана (топливо), но и изотопов водорода (применительно к замедлителям нейтронов) и бора (применительно к поглотителям нейтронов). Все вопросы, связанные с реакторным материаловедением (изготовление тепловыделяющих элементов, тепловыделяющих сборок, замедлителей, стержней управления и т.п.) будут рассмотрены в 29-ой лекции.

1. ДОБЫЧА УРАНОВОЙ РУДЫ

Исходным этапом ядерного топливного цикла (ЯТЦ) является добыча руды и производство уранового концентрата. Основные стадии этапа: собственно добыча урансодержащей руды; ее механическое обогащение посредством удаления пустой породы; измельчение полученной рудной массы; выщелачивание из нее урана с помощью серной кислоты или карбоната натрия; получение уранового концентрата путем извлечения урановых растворов (экстракцией, сорбцией или селективным осаждением); сушка уранового концентрата и его герметичная упаковка.

1.1 Урановые рудники и запасы урана

Уран - это металл, примерно такой же, как олово или цинк, который содержится в большинстве пород и даже в морской воде. Некоторые типичные концентрации урана в различных средах приведены в таблице (ppm - промилле, одна миллионная часть).

Табл.1 Конценрация урана в различных природных средах

Высокосортные **источники**	2 % U или 20000 ppm U
Низкосортные **источники**	0.1 % U или 1000 ppm U
Гранит	4 ppm U
Скальные породы	2 ppm U
Среднее количество в земной коре	1.4 ppm U
Морская вода	0.003 ppm U

До второй мировой войны уран считался редким металлом. Сейчас известно, уран более распространен, чем ртуть, кадмий, серебро и содержится в промышленных рудах примерно в таких же концентрациях, как мышьяк или молибден. Его средняя концентрация в земной коре примерно 2 части к 1 миллиону, что в переводе на язык весовых единиц равняется миллиардам тонн! Он занимает 48 место по содержанию в кристаллических породах. В литосфере уран более распространен, чем такие недорогие вещества как цинк и бор, встречающиеся в концентрациях 4 г/т. Содержание урана в гранитных породах вполне достаточное, чтобы радиоактивный газ радон, продукт распада, представлял серьезную биологическую опасность в местах выхода гранита на поверхность. Уран обнаружен и в морской воде, в концентрации 150 мкг/м^3. Уран не встречается в виде мощных месторождений, но зато известно большое число минералов, содержащих уран: карнотит, отенит, уранинит, торбернит, тюямунит. Уран входит в достаточной концентрации в 150 различных минералов, и в небольшом количестве - еще в 50. Первоначально его нашли в магматических гидротермальных жилах и пегматитах, включая уранинит и смоляную обманку. В этих рудах уран содержится в виде диоксида, который, в зависимости от степени окисления, имеет средний состав от UO_2 до $UO_{2.67}$. Еще руды, имеющие экономическое значение: аутанит, гидраткальциевый уранильный фосфат; тобернит, гидратмедный уранильный фосфат; коффинит, гидратированный силикат урана; карнотит, гидраткалиевый уранильный ванадат. Урановые руды имеются по всему миру. Запасы и коммерческие сделки выражаются в эквивалентных массах U_3O_8. Месторождения смоляной обманки, самой богатой ураном руды, располагаются главным образом в Канаде, Конго и США.

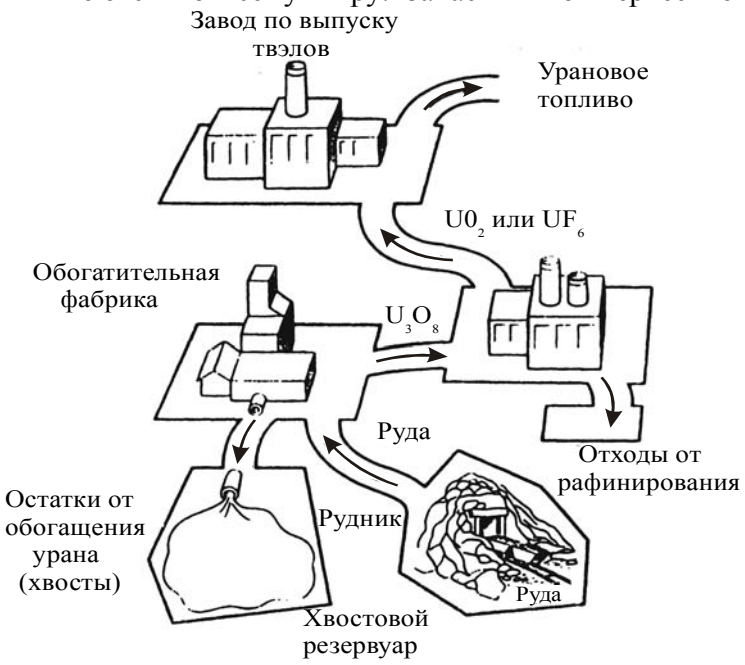


Рис.1 Схема дореакторной части уранового топливного цикла

Добыча урановой руды производится на рудниках и открытых карьерах обычными способами и методом подземного выщелачивания. При изготовлении оружейных ядерных материалов для первых советских атомных бомб использовалась руда из Чехословакии и ГДР. Урановые рудники, расположены в массиве Рудных гор: Чехословакии (г.Яхимталле), в горах Германии (гг. Иоганнгеоргенштадт, Шнейберг и Обершлем) и Болгарии (Родопы). Немецкие месторождения были уникальны – по содержанию урана руда превышала отечественную в 100 раз. Сейчас эти рудники практически полностью выработаны. Большее содержание урана в руде встречается только в американском Колорадо-Спрингс и в Южной Африке. Большинство из добывающегося в США урана вырабатывается из получаемого в штатах Юта, Колорадо, Нью-

Мексико, Аризона, Вайоминг карнотита. Минерал, названный коффинит, открытый в 1955 году в Колорадо, очень богатая руда - содержание урана ~61%. Впоследствии коффинит нашли в Вайоминге и Аризоне. В 1990 году производство уранового концентрата в США составило 3417 тонн. В 1992 г. в 21 стране мира действовало 55 урановых рудников. За период с 1938-1992 гг. добыто около 1,6 млн т природного урана. Лидеры по добыче урана прекрасно известны: это, прежде всего, Канада и Австралия. Далее Нигер, Казахстан и Россия. В 2001 году доля стран и регионов в мировом производстве урана распределялась следующим образом: Канада – 30%, Австралия – 22%, Африка – 19%, Узбекистан – 7%, Россия – 6%, Казахстан – 5%, США – 4%, Европа – 3%, другие – 4%.

Замечание. Источники урана - это, например, геологические породы, из которых извлекается уран. При этом затраты на его экстракцию должны окупаться сложившимся рыночным ценам. В настоящее время ни морская вода, ни любые граниты не являются источниками, но, в принципе, могут стать таковыми, если цены на уран будут достаточно высоки. Изучение природных ресурсов и возможных иных источников, из которых возможно рентабельное извлечение урана, влияет на соотношение затрат и цен. Изменения в затратах или ценах могут заметно повлиять и на оценки ресурсов урана. Однако, любые прогнозы пригодности какого-либо минерала для извлечения из него урана, основанные на сегодняшних стоимостных показателях и сегодняшнем уровне геологических знаний, вероятно, будут чрезвычайно грубыми.

Атомная энергетика развивается, доля ее в мировой энергетике постоянно растет, так что потребность в уране постепенно увеличивается. Сейчас текущее производство урана закрывает примерно 50% потребностей АЭС. Разница покрывается складскими запасами различного сырья и из вторичных источников.

Табл.2 Мировые запасы урана

Страна	**Тонн, U_3O_8**	**Процент от общих запасов**
Австралия	889 000	27 %
Казахстан	558 000	17 %
Канада	511 000	15 %
Южная Африка	354 000	11 %
Намибия	256 000	8 %
Бразилия	232 000	7 %
Россия	157 000	5 %
США	125 000	4 %
Узбекистан	125 000	4 %
Всего в мире	3 340 000	

СССР был крупнейшим в мире производителем урана.

Общие запасы урана в СССР на 1 января 1955 года составляли 28000 тонн в 27 основных месторождениях, переданных для эксплуатации. Сразу после Войны было выявлено также более сотни мелких месторождений, которые в результате отработки оказались неэффективными для добычи урана. Наибольшее число месторождений найдено в Узбекистане, Казахстане и Киргизии. В итоге десятилетней деятельности крупных коллективов геологов, геофизиков и других специалистов в целом в СССР и странах Восточной Европы было открыто, разведано и передано в эксплуатацию более 50 месторождений урана с общими запасами 84 000 тонн. Таким образом, устойчивая база для реализации советского атомного проекта была успешно создана.

В 1991 г. запасы уранового концентрата СССР оценивались в 13,5 тыс.т. На территории СССР девять из 15 рудоносных районов с крупными месторождениями урановых руд подверглись освоению и разработке: Стрельцовский (Читинская обл) и Ставропольский в России, Кировоградский и Криворожский вблизи г. Желтые воды на Украине, Закаспийский (Актау) и Кокчетавский (Степногорск) в Казахстане, Прибалхашский в Казахстане, Кызылкумский и

Карамазовский в Узбекистане. Месторождения в Узбекистане и Таджикистане иссякли к 90-м годам XX века. Распределение урановых рудников по территории России представлено на **Рис.2.**

В восьмидесятые годы уранодобывающая промышленность СССР добывала до 16 тыс.т урана в год.

Ресурсы бывшего СССР с учетом разведанных традиционных месторождений составляют более 15% мировых запасов (около 685 тыс. т). Помимо традиционных урановых месторождений при оценке мировых запасов учитывается также уран в фосфатных месторождениях и заскладированные запасы урана для ядерной энергетики и военных программ. На 1 января 1994 г. мировые запасы урана составили 4,4 млн т в традиционных месторождениях, 22,6 млн. т – в фосфатных месторождениях и за складированных запасах гражданского и военного применения 370 тыс. т и 445 тыс. т. Кроме этого, к урановым ресурсам относят уран, содержащийся в морской воде (40 млрд. т) и земной коре (1,5 трон т). Россия занимает 7-е место в мире по разведанным запасам урана в недрах (около 180 тыс. т). Первые места занимают: Австралия (более 894 тыс. т), Казахстан (681 тыс. т) и Канада (507 тыс. т). 30% урансодержащих руд бывшего СССР находится на территории России. Производство урановых концентратов сосредоточено (около 85%) в девяти странах (Австралия, Габон, Канада, Намибия, Нигер, Россия, США, Франция, ЮАР).

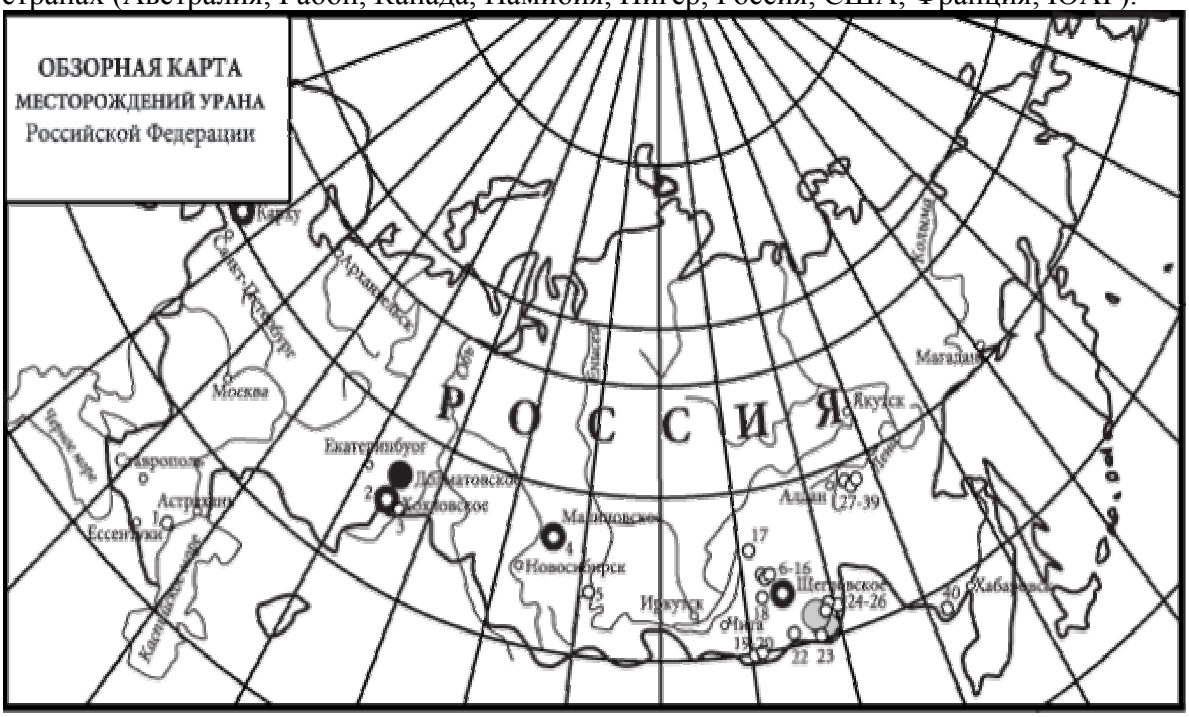


Рис.2 Расположение урановых месторождений на территории России

<u>Балансовые месторождения</u>. Стрельцовский урановорудный район: Стрельцовское, Лучистое, Широндукуевское, Тулукуевское, Октябрьское, Дальнее, Новогоднее, Юбилейное, Пятилетнее, Весеннее, «Антей», Аргунское, Мартовское, Малотулукуевское, Жерловое. Зауральский урановорудный район: Далматовское. <u>Забалансовые месторождения</u>. Ергенинский урановорудный район: 1 – Степное. Зауральский урановорудный район: 3 – Добровольное. Республика Хакассия; 5 – Приморское. Республика Бурятия, Витимский урановорудный район: 6 – Хиагдинское; 7 – Радионовское; 8 – Витлауское; 9 – Количикан; 10 – Джилиндинское; 11 – Тетрахское; 12 – Вершинное; 13 – Неточное; 14 – Кореткондинское; 15 – Намару; 16 – Дыбрын. За пределами Витимского района: 17 – Имское; 18 – Буяновское. Читинская область: 19 – Горное; 20 – Березовое; 22 – Дурулгуевское. Стрельцовский урановорудный район: 23 – Цаган-Торон; 24 – Юго-Западное; 25 – Широндукуевское; 26 – Безречное. Республика Саха–Якутия, Эльконский урановорудный район: 27 – Южное; 28 – Северное; 29 – Центральная зона; 30 – Весенняя зона; 31 – Агдинская зона; 32 – Пологая зона; 33 – Невская зона; 34

Для добычи и переработки урана вблизи разведанных месторождений построены горнодобывающие и перерабатывающие предприятия: Приаргунское производственное горно-

химическое объединение (г. Краснокаменск, Читинская обл., Россия), Восточный горно-перерабатывающий комбинат (г. Желтые воды, Украина), Прикаспийский горно-плавильный комбинат (Актау, Казахстан), Целинный горно-перерабатывающий комбинат (Степногорск, Казахстан), производственное объединение «Южнолиметалл» (Бишкек, Киргизия) Навоийский горно-плавильный комбинат (Навои, Узбекистан) и Восточный промкомбинат редких металлов (Чкаловск, Таджикистан). Кроме Приаргунского ПГХО на территории России добыча и переработка урановых и ториевых руд ранее велась Лермонтовским ПО «Алмаз» (Ставропольский край) и Новотроицким рудоуправлением.

По состоянию на 01.01.1999 г. государственным балансом запасов урана России учтены запасы 16 месторождений, из которых 15 сосредоточены в одном районе - Стрельцовском в Забайкалье (Читинская обл.) и пригодны под горный способ добычи. Долматовское месторождение с содержанием урана в руде 0,06%,, расположенное в Зауралье (Курганская обл.), пригодно для добычи способом скважинного подземного выщелачивания. В 1999 г. здесь введена в эксплуатацию опытно-промышленная установка подземного выщелачивания производительностью 50 т урана/год. Одно из лучших месторождений (Тулукуевское) с запасами богатых руд для открытой добычи практически отработано. В последние годы тенденция к погашению лучших запасов месторождений резко усилилась. Так, в 1998 погашались запасы со средним содержанием 0,419 %. Остающиеся в недрах запасы с таким содержанием составляют всего 54% от числящихся по балансу в качестве «активных».

Корпорация «ТВЭЛ» сегодня - единственная компания, которая добывает природный уран в России. Она включает три дочерних предприятия: это Приаргунское горно-химическое объединение в городе Краснокаменске Читинской области (добывает 3 тыс. тонн урана в год), ЗАО «Далур» в Курганской области и ОАО «Хиагда» в Бурятии. Два последних предприятия еще не вышли на проектные мощности, там еще идет строительство и одновременно разведка прилегающих месторождений. Планируется, что каждое из них должно добывать к 2012 году по 1 тыс. тонн урана в год.

Таким образом, в России пока существует единственное интенсивно разрабатываемое месторождение урана – Краснокаменский рудник в Забайкайлье (Читинская область). Среднее содержание урана в руде - 0,38 %, годовая производительность рудника - 2,5 тыс. т урана. При современном уровне добычи, запасы руды на этом месторождении создают 20-летнюю обеспеченность сырьем действующего уранодобывающего предприятия (АООТ «Приаргунское производственное горно-химическое объединение»). Здесь уран добывают шахтным способом. То есть в подземных рудниках на глубине до 800 метров добывают урановую руду, потом ее доставляют на завод и с помощью различных химических процессов извлекают уран, который дальше идет на переработку для получения топлива в той форме, в которой оно необходимо.

В Курганской области (Долматовское месторождение) и на Хиагдинском урановом месторождении Бурятии применяется подземное скважинное выщелачивание урана. В одну скважину закачиваются специальные кислотные растворы, которые выщелачивают уран, а через другую скважину все это с помощью насоса извлекается наверх. Затрат при таком способе гораздо меньше, чем при прокладывании шахты, и технология выщелачивания обеспечивает экологическую безопасность работ. В Бурятии сейчас объем добычи составляет 1,5 тыс. тонн уранового концентрата в год. Разведанные запасы месторождения рассчитаны на 50 лет. Содержание урана в 1 куб м. обогащенной руды достигает 100 мг. Себестоимость 1 кг обогащенной руды колеблется в пределах 20 долларов. Это в 2 раза ниже, чем на основном урановом руднике России в г. Краснокаменск Читинской области.

Замечание. В Канаде концентрация урана в рудах месторождений, отрабатываемых подземным способом, в 100 раз превосходит то, что находится в недрах Приаргунского комбината. Соответственно, чтобы получить такое же точно количество, нам надо добыть в 100 раз больше.

Сейчас готовится проект по освоению новых месторождений в Якутии. В России есть и очень крупные месторождения. Они были открыты и разведаны еще в 70-х годах прошлого века,

но потом были поставлены в резерв. Государственным балансом учтены запасы 38 урановых месторождений, относимых к забалансовым (т.е. разведанным, но не разрабатываемым). Среди последних выделяются запасы Эльконского и Ергенинского урановорудных районов, рассматриваемые как резервные. Так, в Эльконском районе в Республике Саха-Якутия запасы урана (более 200 тыс. т) количественно превосходят все балансовые запасы в стране, но из-за рядового качества руд они могут стать рентабельными только при высокой цене на уран. К перспективным регионам относится Онежский район (Карелия), где обнаружены запасы ванадиевой руды с содержанием урана, золота и платины; Витимский район (Сибирь) с разведанными запасами в 60 тыс. т при концентрации урана 0,054% в руде с сопутствующими скандием, редкоземельными элементами и лантаноидами;); Западно-Сибирский район (Малиновское месторождение с запасами 200 тыс. т урана), а также Енисейско-Забайкальский район и Дальневосточный рудоносный район, расположенный в прибрежной зоне Охотского моря.

Украинские урановые залежи считаются одними из богатейших. Месторождения этого элемента расположены в Кировоградской области: Ватутинское, Мичуринское, Желтореченское. Из стран СНГ наиболее перспективным является недавно построенный Киргизский Навоийский горно-металлургический комбинат (НГМК), который в 2001 г начал разработку крупного уранового месторождения. Переработку руды осуществляет завод в Учкудуке. В 2005 дало первую продукцию совместное казахско-киргизско-российское добывающее предприятие «Заречное», которое ещё находится на стадии строительства. На первом этапе (2003–2006 годы) СП «Заречное» будет производить до 500 тонн урана в год. Впоследствии его объемы возрастут до 700–800 тонн. При этом урановый концентрат, произведенный на нашем КГРК, будет поставляться в Россию. В Казахстане недавно начали добычу урана на рудниках Южный Моинкум, Акдала и Южный Карамурун. Уникальна по размерам запасов урана Чу-Сарысуйская ураново-рудная провинция в Южном Казахстане. Исключительная ценность этого района заключается еще и в том, что на месторождениях этой провинции возможно добывать уран бесшахтным способом методом подземного выщелачивания через буровые скважины.

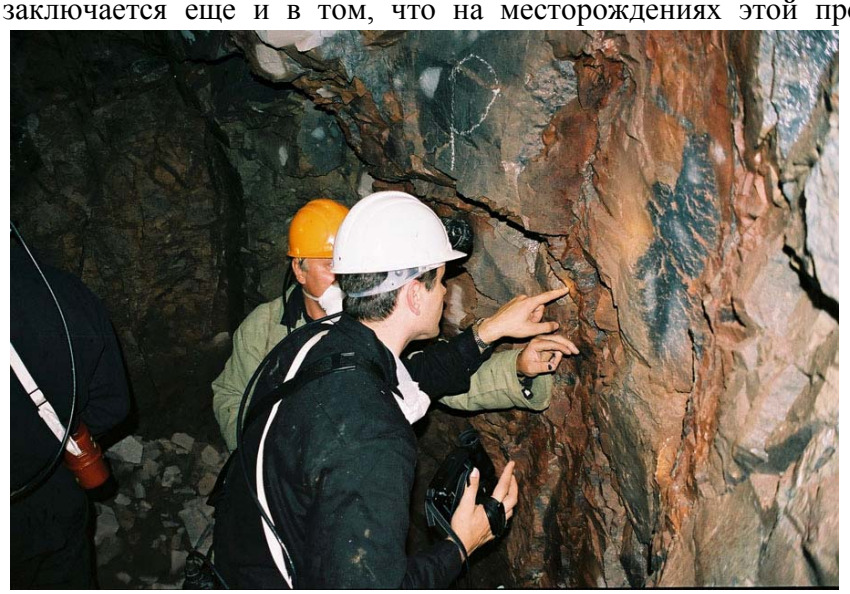


Рис.3. На урановом руднике

Напомним, что в России сейчас действует 29 ядерных реакторов на АЭС, которые потребляют более 4 тысяч тонн урана в год. Большая же часть урановых месторождений бывшего Союза осталась на территории Казахстана и Узбекистана. Дефицит урана в России восполняется за счет стратегических запасов этого сырья, сделанных еще в советское время, и за счёт добычи на Читинской шахте.

1.2 Переработка урановой руды.

Минералы, из которых добывают уран, всегда содержат такие элементы как радий и радон. Поэтому, хотя сам по себе уран слабо радиоактивен, добываемая руда потенциально опасна, особенно если это высококачественная руда. Радиационная опасность, связанная с сопутствующими элементами, характерна не только для ураносодержащих руд, но и для любой горнодобывающей промышленности. Часто уран добывается открытым способом, при котором

карьеры имеют хорошую естественную вентиляцию. Подземная урановая шахта вентилируется специальными мощными устройствами.

Конечными продуктами переработки рудного сырья являются чистые химические соединения, из которых получают металлический уран.

Урановые руды содержат обычно небольшое количество ураносодержащего минерала (0,05-0.5% U_3O_8), так что необходимы предварительное извлечение и обогащение. Механические методы обогащения (радиометрическая сортировка, разделение в тяжелых суспензиях, гравитация, флотация, электростатика) неприменимы для урана, в дело идут методы гидрометаллургии - выщелачивание - обычный первый шаг обработки руды (иногда ему предшествует отжиг).
В классическом способе кислотного выщелачивания руда первоначально спецтальным образом измельчается и обжигается для обезвоживания. При этом удаляются углеродсодержащие фракции, уран сульфатируется, восстановители, которые могут быть препятствием для выщелачивания, окисляются. Затем смесь обрабатывается серной или азотной кислотами, или смесью этих кислот. (Для руд, содержащих вторичные минералы, применяют выщелачивание растворами соды). Твердые частицы, остающиеся после растворения урана извлекают, и помещают на длительное хранение в специальные резервуары. Резервуары сконструированы таким образом, чтобы обеспечить надежное хранение этих материалов. Такие отходы содержат основную долю радиоактивных веществ, находящихся в руде (таких, например, как радий).

Уран переходит в сульфат уранила, радий и другие металлы в урановой смолке оседают в виде сульфатов. С добавлением едкого натра уран осаждается в виде диураната натрия $Na_2U_2O_7.6H_2O$ (часто уран осаждают в виде диураната аммония или гидроксида уранила).

При обработке руд и бедных концентратов растворы содержат лишь 0.5 - 2 г U в л. В этом случае для извлечения и концентрирования урана широко применяют сорбцию на ионообменных смолах, экстракцию органическими растворителями (для экстракции из сернокислых растворов используют алкилфосфорные кислоты, амины), или выпаривание. Во время экстракции растворителями урановая руда удаляется из щелока от выщелачивания подкисленной породы при помощи смеси растворителей, например раствора трибутилфосфата в керосине. В современных промышленных методах в качестве растворителей фигурируют алкил-фосфорные кислоты (например, ди(2-этилгексил)-фосфорная кислота) и вторичные и третичные алкиламины. Как общее правило, экстракция растворителями предпочитается ионообменным методам при содержании урана в растворе после кислотного выщелачивания более 1 грамма на литр. Однако оно неприменимо для восстановления урана из карбонатных растворов. Уран, удовлетворяющий условиям оружейной чистоты, обычно получают из диураната натрия через прохождение дополнительной очистки, используя трибутилфосфатный очистительный процесс. Первоначально, $Na_2U_2O_7.6H_2O$ растворяют в азотной кислоте для подготовки сырьевого раствора. Из него избирательно удаляется уран при разбавлении раствора трибутилфосфатом в керосине или иной подходящей углеводородной смесью. Наконец, уран переходит из трибутилфосфата в подкисленную воду для выделения высокоочищенного уранильного нитрата.

После извлечения из раствора, осадок, содержащий уран, имеет ярко желтую окраску ("yellowcake"). После высокотемпературной сушки окись урана (U_3O_8), теперь уже зеленого цвета, загружается в специальные емкости объемом до 200 литров. Высушенные или прокаленные осадки являются полупродуктами, служащими для получения чистых соединений урана (UF_4, U_3O_8 или UO_2).
Замечание. Мощность дозы облучения на расстоянии одного метра от такой емкости равна, приблизительно половине того, что человек получает во время полета на самолете. Все эти операции проводятся в соответствии с нормативами радиационной безопасности на предприятиях горнодобывающей промышленности. Эти правила и нормы устанавливают строгие стандарты по контролю за гамма-облучением, и возможным попаданием в организм радона и других радиоактивных материалов. Стандарты относятся как к персоналу предприятий, так и к населению. Доза 20 mЗв/год в течение более чем пяти лет является максимально допустимой для персонала предприятий, включая облучение радоном и других

радиоактивных веществ (в дополнение к естественному фону и исключая экспозицию при медицинской диагностике). Гамма-излучение исходит преимущественно от изотопов висмута и свинца. Газ радон выделяется из горных пород, в которых происходит распад радия. Вследствие спонтанного радиоактивного распада он переходит в дочерние изотопы радона, которые являются эффективными излучателями альфа-частиц. Радон находится в большинстве горных пород, и, как следствие этого, находятся и в воздухе, который все мы вдыхаем. При высоких концентрациях радон представляет опасность для здоровья, так как небольшой период полураспада означает, что альфа-распад может происходить внутри организма после его вдыхания, что, в конечном счете, может вызывать рак легкого. (Под "Радоном" обычно понимают изотоп Rn-222. Другой изотоп, Rn-220 (появляется вследствие распада тория и известен как "торон"), является распространенной составляющей многих минеральных песков). При добыче и производстве урана предпринимаются различные меры предосторожности для защиты здоровья персонала: Тщательно контролируется уровень запыленности, чтобы минимизировать попадание в организм гамма- или альфа-излучающих веществ. Пыль является главным источником радиоактивного облучения. Она обычно дает вклад в 4 mЗв/год в ежегодную дозу, получаемую персоналом. Ограничивается внешнее радиоактивное облучение персонала в шахтах, на заводах и местах размещения отходов. На практике уровень внешнего облучения от руды и отходов обычно настолько низок, что он практически не влияет на увеличение допустимой ежегодной дозы. Естественная вентиляция открытых месторождений уменьшает уровень экспозиции от радона и его дочерних изотопов. Уровень облучения от радона редко превышает один процент от уровня, допустимого для непрерывного облучения персонала. Подземные рудники оборудуются совершенными системами вентиляции для достижения того же уровня. На подземных рудниках средняя доза облучения составляет, приблизительно, 3 mЗв/год. Существуют строгие гигиенические нормы на работу персонала с концентратом окиси урана, поскольку он химически токсичен, подобно оксиду свинца. На практике предпринимаются предосторожности, защищающие органы дыхания от попадания токсинов, аналогичные тем, которые используются при работах на свинцовых плавильных печах.

К чистоте урана предъявляются весьма высокие требования. Так, содержание примесей элементов с большим сечением захвата нейтронов (B, Cd, Li, РЗЭ и др.) не должно превышать стотысячных и миллионных долей процента. Для очистки технические продукты обычно растворяют в азотной кислоте. Эффективным способом очистки является экстракция нитрата уранила органическими растворителями (трибутилфосфат, метилизобутилкетон). Из очищенных азотнокислых растворов кристаллизуют уранилнитрат $UO_2(NO_3)_2*6H_2O$ или осаждают пероксид UO_4*2H_2O, осторожной прокалкой (кальцинированием) которых получают UO_3. Последний восстанавливают водородом до UO_2, которую действием сухого HF при 430-600° переводят в UF_4 – основное исходное соединение для производства металла.

<u>Типичная методика выделения делящихся радионуклидов из урановой руды.</u> Уран обычно встречается в виде урановой соляной руды (окись урана) и карнолита (комплексное ураново-ванадиевое соединение). Обогащенную руду обрабатывают смесью азотной и серной кислот. Уран переходит в раствор в виде UO_2^{++}, а металлы, образующие нерастворимые сульфаты (Pb, Ba, Ra и др.), вместе с нерастворимыми в кислоте силикатами остаются в осадке. Добавляя к раствору избыток Na_2CO_3, получают основной раствор, в котором уран содержится в виде комплексного карбоната, а в осадок переходят элементы, образующие нерастворимые карбонаты, гидроокиси или основные карбонаты (Fe, Al, Cr, Zn и т.д.). Снова добавляя в раствор HNO_3 до кислой реакции, получают раствор уранил-нитрата с формулой для твердой соли $UO_2(NO_3)_2*6H_2O$, который растворим в диэтиловом эфире. Экстрагирование уранилнитрата с помощью этого растворителя дает исключительно чистый продукт, вполне пригодный для изготовления урана для ядерных реакторов. При прокаливании уранилнитрата получается окисьзакись U_3O_8. Эта окись может быть восстановлена до металла в бомбе с Al, Ca или Mg. Восстановление углеродом дает продукт, сильно загрязненный карбидом урана, а восстановление водородом дает UO_2. Этот оксид может быть превращен в UF_4 или UCl_4 путем обработки безводной HF или HCl при пониженных температурах. Тетрагалоиды восстановливают до металла натрием или кальцием. Галоидная соль KUF_5, получаемая из UF_4, дает очень чистый металл посредством электролиза.

Для бедных руд (а в России сейчас руды достаточно бедные), обычно используют способ извлечения урана, основанный на ионно-обменной хроматографии. Однако применяемые реагенты весьма дороги, а побочные продукты загрязняют природную среду. Кроме того, эффективность метода падает по мере уменьшения содержания урана в руде. Использование микроорганизмов может уменьшить расходы вдвое, так как бактерии сами «поставляют» реагенты, и разработка даже бедных руд становится оправданной. Для извлечения урана из руды ее необходимо поместить в отвал над слоем непроницаемых пород и опрыскать водным раствором сульфида железа, содержащим популяции сульфидредуцирующих бактерий Thiobacillus ferrooxidans. В процессе жизнедеятельности микроорганизмов образуется железистый сульфат-реагент, который окисляет четырехвалентный уран, превращая его в пятивалентный. Полученное соединение растворяют в кислоте. Радиоактивный элемент извлекают путем концентрирования и очистки методом осаждения и ионного обмена.

Метод бактериальной гидрометаллургии испытан канадскими учеными, которые при возобновлении добычи урана на шахте в Станроке, где запасы руд считались полностью исчерпанными, использовали железобактерии вида Thiobacillus ferrooxidans. Такие бактерии населяют шахтные хвосты (скопления отходов отработанной урановой руды) и откачанные из-под земли кислотные воды. Питаются они серой, разлагая сульфидные минералы. В итоге нерастворимые соединения урана, слагающие руды, становятся растворимыми, и последующее извлечение металла значительно облегчается.

Замечание. При производстве обогащенного урана для обычных реакторов одновременно производится приблизительно в семь раз большее количество обедненного урана. Если же уран обогащают до 93 % содержания ^{235}U (для военных целей), то при этом производится приблизительно в 200 раз большее количество обедненного урана. Все это, учитывая очень большое количество всего урана, которое когда-либо добывалось, является очень ценным сырьем и потенциальным топливом для ядерных установок.

После завершения технологических процессов экстракции урана на предприятиях горнодобывающей промышленности практически весь радиоактивный радий, торий и актиний содержится в отвалах и, следовательно, уровни излучения и испускания радона из таких отходов будут, по всей вероятности, существенны. Однако, маловероятно, что кто-либо построит жилище на вершине отвальных пород и получит повышенную дозу облучения, лежащую за пределами международных норм. Тем не менее, отходы должны быть закрыты достаточным количеством грунта, чтобы уровни гамма-излучения не превышали уровня естественного фона. В этом случае возможно и покрытие этих мест растительностью.

Замечание. Примерно 95% радиоактивности в руде с содержанием 0.3 % U_3O_8 исходит от радиоактивного распада ^{238}U, достигающей, приблизительно, 450 кБк/кг. Этот ряд имеет 14 радиоактивных долгоживущих изотопов и, таким образом, каждый из них дает, приблизительно, 32 кБк/кг (независимо от массового соотношения). После обработки из руды удаляется ^{238}U и немного ^{234}U (и ^{235}U) и радиоактивность снижается до 85% ее первоначального значения. После удаления большей части ^{238}U, два короткоживущих продукта его распада (^{234}Th и ^{234}Pa) скоро исчезают и, по истечению нескольких месяцев, уровень радиоактивности снижается до 70% ее первоначального значения. Основным долгоживущим изотопом тогда становится ^{230}Th (период полураспада 77000 лет), который превращается в ^{226}Ra с последующим распадом в 222Rn.

2. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО УРАНА

Металлический уран получают восстановлением урановых галогенидов (обычно тетрафторида урана) магнием в экзотермической реакции в «бомбе» - герметичном контейнере, обычно стальном, общая методика известна как «термитный процесс». Реакции в «бомбе» протекают при температурах, превышающих 1300°C. Прочный стальной корпус необходим, чтобы выдержать высокое давление внутри него. «Бомба» заряжается гранулами UF_4 и в избытке засыпается тонко диспергированным магнием и нагревается до 500-700°C, с этого момента начинается саморазогревающаяся реакция. Теплоты реакции достаточно для расплавления начинки “бомбы”, состоящей из металлического урана и шлака - фторида магния, MF_2. Этот самый шлак отделяется и всплывет вверх. Когда "бомба" охлаждается, получается слиток металлического

урана, который, несмотря на содержание в нем водорода, самый качественный из коммерчески доступных и хорошо подходит для топлива АЭС.

Металл получается и при восстановлении оксидов урана кальцием, алюминием или углеродом при высоких температурах; или электролизом KUF_5 или UF_4, растворенных в расплаве $CaCl_2$ и NaCl. Уран высокой чистоты можно получить термическим разложением галогенидов урана на поверхности тонкой нити. При завершении процесса обогащения урана, обычно в отходах остается 0.25-0.4% ^{235}U, так как извлекать этот изотоп до конца экономически невыгодно (дешевле закупать большее количество сырья). В США остаточное содержание ^{235}U в сырье после производства возросло с 0.2531% в 1963 до 0.30% в 70-х, по причине снижения стоимости природного урана.

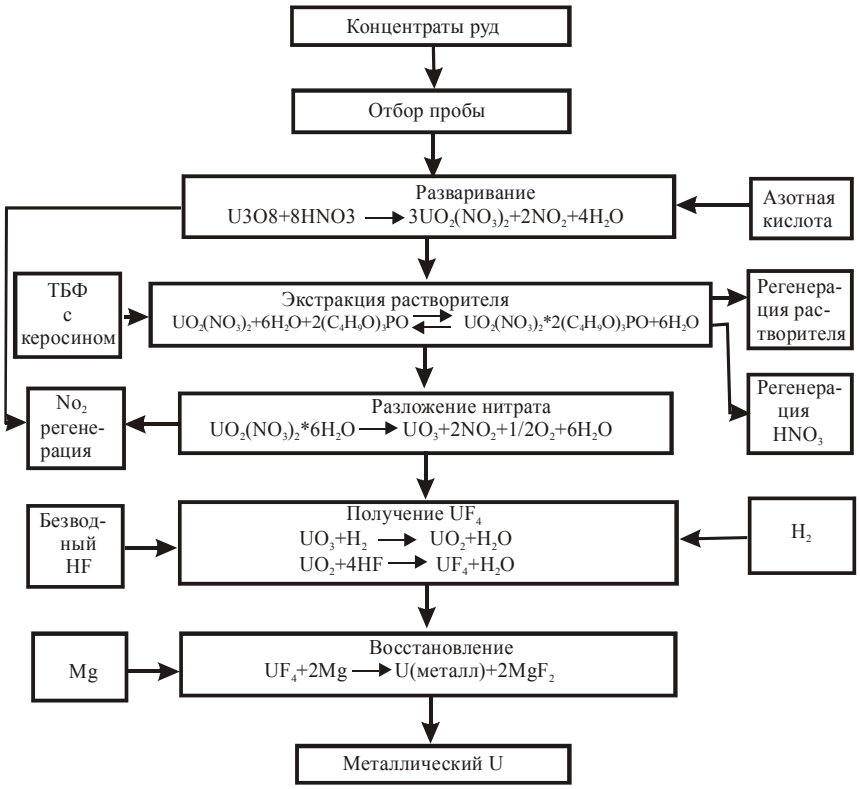


Рис.6 Общая схема производства металлического урана.

Восстановленные слитки переплавляют в вакууме и отливают заготовки необходимой формы, которые затем подвергают обработке давлением. Общая схема производства металлического урана дана на **Рис. 3**.

Уран служит основным горючим в ядерных реакторах. В военных реакторах преимущественно используют металлический уран, легированный или нелегированный. Однако в энергетических типах реакторов применяют горючее в форме твердых соединений (например, UO_2, карбиды или нитриды урана), а также водных растворов соединений урана или жидкого сплава урана в другом металле.

Рис.4. Общая схема производства металлического урана

3. ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА.

3.1 Гексафторид урана

Для целей ядерной энергетики и ядерного военного комплекса требуется уран-235, который способен поддерживать цепную реакцию деления. Его концентрация в природном уране низка — в среднем 0,7 %. Поэтому требуется обогащение природного урана до 2,4—25 % для энергетических ядерных реакторов и более высокое обогащение для военных целей. Обязательна операция доочистки урана (аффинаж) для превращения его в ядерно-чистый материал, который преобразуется затем в гексафторид урана (UF_6). Уран чистят от бора, кадмия, гафния, являющихся нейтрон поглощающими элементами, а также от редкоземельных элементов (гадолиний, европий и самарий). Аффинаж состоит в экстракционной очистке урана трибутилфосфатом после растворения уранового концентрата в азотной кислоте.

Гексафторид урана по совокупности свойств является наиболее подходящим химическим соединением для изотопного обогащения. Технология фторирования в вертикальном плазменном реакторе включает производство чистого фтора, измельчение тетрафторида (UF_4) или оксида урана до состояния порошка с последующим его сжиганием в факеле фтора. Затем производится

фильтрация гексафторида урана и его конденсация в системе холодных ловушек. Предприятия России по преобразованию оксида урана в гексафторид расположены в Верхнем Нейвинске (Свердловская обл.) и Ангарске (Иркутская обл.). Их совокупная производительность 20 - 30 тыс. т гексафторида урана в год.

В промышленных масштабах производство гексафторида урана помимо России осуществляют в США, Великобритании, Франции и Канаде. Мощность заводов превышает потребность в производимой ими продукции (используется приблизительно 85% мощности). Производственная мощность предприятий России достаточна не только для удовлетворения внутренних потребностей, но и поставки значительного объема продукции на экспорт.

Разделительная способность обогатительного завода измеряется в единицах массы переработанного вещества (МПП) за единицу времени, например МПП-кг/год или МПП-тонн/год. Выход обогащенного продукта с предприятия заданной мощности зависит от концентрации нужного изотопа во входной породе, выходных отходах и конечном продукте. Исходное содержание полезного изотопа определено природным его содержанием. Зато два остальных параметра можно изменять. Если уменьшить степень извлечения изотопа из исходного вещества, можно увеличить скорость его выхода, но платой за это будет увеличение требуемой массы сырья. Это подчиняется отношению:

$$P = \frac{U}{V(N_P) + \frac{N_P - N_F}{N_F - N_W} V(N_W) - (1 + \frac{N_P - N_F}{N_F - N_W}) \cdot V(N_F)}$$

где P - выход продукта, U - разделительная способность, N_P, N_F, N_W - молярные концентрации изотопа в конечном продукте, сырье и отходах. $V(N_P)$, $V(N_W)$, $V(N_F)$ разделительные потенциальные функции для каждой концентрации. Они определяются как:

$$V(N) = (2N - 1)\ln(\frac{N}{1 - N})$$

Принимая остаточную концентрацию в 0.25%, завод с производительностью 3100 МПП-кг/год произведет 15 кг 90% U-235 ежегодно из натурального урана. Если взять в качестве сырья трехпроцентный U-235 (топливо для АЭС) и концентрацию 0.7% в отходах производства, тогда достаточно мощности 886 МПП-кг/год для того же выхода.

3.2 Методы разделения изотопов

3.2.1 Разделение изотопов

Чаще всего разделение изотопов на отдельные изотопы сводится к выделению из смеси одного из изотопных веществ или просто к концентрированию этого вещества в смеси. Примером может служить извлечение ^{6}Li, ^{235}U, D. **Разделение изотопов** всегда сопряжено со значительными трудностями, т.к. изотопы, представляющие собой незначительно отличающиеся по массе вариации одного элемента, химически ведут себя практически одинаково. Все же скорость прохождения некоторых реакций отличается в зависимости от изотопа элемента, кроме того, можно использовать различие в их физических свойствах, например, в массе. Для разделения изотопов используют различия физических или химических свойств веществ, обусловленные различием в их изотопном составе.

Методы разделения изотопов основаны на различиях в свойствах изотопов и их соединений, связанных с различием масс их атомов (изотопные эффекты). Для большинства элементов относительная разность масс изотопов весьма мала, малы и изотопные эффекты. Этим определяется сложность задачи.

Эффективность разделения изотопов характеризуется коэффициентом разделения α. Для смеси двух изотопов

$$\alpha = \frac{\frac{C'}{1 - C'}}{\frac{C''}{1 - C''}}$$

где C' и (1 — C') — относительные содержания лёгкого и тяжёлого изотопов в обогащенной смеси, а C'' и (1 — C'') — в первичной смеси. Для большинства методов α лишь немного больше

единицы, поэтому для получения высокой изотопной концентрации единичную операцию разделения изотопов приходится многократно повторять. Только при электромагнитном разделении α составляет 10—1000 за 1 цикл разделения. Выбор метода разделения изотопов зависит от свойств разделяемого вещества, требуемой степени разделения, необходимого количества изотопов, экономичности процесса (при значительном масштабе производства изотопов) и т. п.

Под изотопными эффектами понимают не идентичность изотопов данного элемента, обусловленную различием масс изотопных атомов (атомных весов). Изотопные эффекты проявляются в различии любых свойств изотопов, кроме радиоактивных.

В соответствии с используемым изотопным эффектом существуют различные методы разделения изотопов: газовая диффузия (различия в коэффициентах диффузии), жидкостная термодиффузия (различие коэффициентов термодиффузии), ректификация или дистилляция (различие давлений пара), химический обмен (неравномерное распределение изотопов при изотопическом обменном равновесии), кинетический метод (различие констант скоростей химических реакций), газовое центрифугирование (различие плотностей), электромагнитный метод (различие удельных зарядов ионов), AVLIS (испарение с использованием лазера) и электролиз.

В связи с потребностью для нужд ядерной энергетики больших количеств таких изотопов, как дейтерий ^{235}U, многие методы разделения изотопов получили промышленное использование: метод диффузии – для выделения ^{235}U с применением газообразного UF_6, методы ректификации, химического обмена и электролиза для выделения дейтерия. Промышленное значение имеет разделение изотопов лития.

Однократная операция разделения изотопов приводит лишь к небольшому обогащению разделяемой смеси по требуемому изотопу, что связано с малыми значениями изотопных эффектов. Поэтому для полного выделения или значительного концентрирования одного из изотопных веществ операцию разделения многократно повторяют в ступенчатом разделительном каскаде. Ступень каскада представляет собой один или несколько параллельно соединенных разделительных аппаратов; ступени соединены между собой последовательно. Поскольку исходное содержание выделяемого изотопного вещества обычно мало, то поток исходной смеси, проходящей через каскад, очень велик по сравнению с количеством получаемого продукта.

Поток исходной смеси подается на первую ступень каскада. В результате операции разделения он разбивается на два потока: обедненный – удаляемый из каскада, и обогащенный – подаваемый на 2-ю ступень. На 2-й ступени обогащенный поток вторично подвергается разделению: обогащенный поток 2-й ступени поступает на 3-ю, а ее обедненный поток возвращается на предыдущую (1-ю) и т.д. С последней ступени каскада отбирается готовый продукт с требуемой концентрацией заданного изотопа. Поток смеси, протекающий по каскаду от предыдущих ступеней к последующим, называется прямым, или обогащаемым, а протекающий в обратном направлении – возвратным, или обедняемым.

Замечание. На производительность подобной каскадной системы влияют две причины: степень обогащения на каждой из ступеней и потери искомого изотопа в отходном потоке. Поясним второй фактор. На каждой из стадий обогащения поток разделяется на две части - обогащенную и обедненную нужным изотопом. Поскольку степень обогащения чрезвычайно низка, суммарная масса изотопа в отработанной породе может легко превысить его массу в обогащенной части. Для исключения такой потери ценного сырья обедненный поток каждой последующей ступени попадает снова на вход предыдущей. Исходный материал не поступает на первую стадию каскада. Он вводится в систему сразу на некоторую, n-ю ступень. Благодаря этому с первой ступени выводиться в утиль сильно обедненный по основному изотопу материал.

Количество произведенного обогащенного материала зависит от желаемой степени обогащения и обеднения выходных потоков. Если исходное вещество имеется в большом количестве и дешево, то производительность каскада можно увеличить за счет отбрасывания вместе с отходами и

большого количества неизвлеченного полезного элемента (пример - производство дейтерия из обычной воды). При необходимости достигается большая степень извлечения изотопа из материала-сырца (например, при обогащении урана или плутония).

Выбор метода разделения изотопов зависит от величины лежащего в его основе изотопного эффекта, определяющего значение коэффициента разделения, а также от экономических показателей: затрата энергии, стоимость аппараты, производительность, надежность и др. В **Табл.3** на примере трех видов изотопов проведено сравнение методов разделения изотопов для водорода, углерода и урана.

Табл. 3 Эффективности различных методов разделения водорода, углерода и урана:

Метод разделения	H/D	C-12/13	U-235/238
Химическое обогащение	1.2-3	1.02	1.0015
Дистилляция	1.05-1.6	1.01	-
Газовая диффузия	1.2	1.03	1.00429
Центрифугирование (250 м/с)	1.01	1.01	1.026
Центрифугирование (600 м/с)	-	-	1.233
Электролиз	7	-	-

3.2.2 Изотопные эффекты

Изотопные эффекты *– неидентичность свойств изотопов данного элемента, обусловленная различием масс изотопных атомов (атомных весов).*

Изотопные эффекты проявляются в различии любых свойств изотопов, кроме радиоактивных. Однако поскольку для изотопов большинства элементов (за исключением наиболее лёгких) относительное различие в атомных весах изотопов невелико, то изотопный эффект для этих элементов выражены весьма слабо. Даже для лёгких элементов второго периода Периодической системы (Li-Ne) относительные различия в атомных весах изотопов не превышают 35%; для третьего периода (Na-Ar) они не превышают 20%, для четвёртого (K-Kr) и пятого (Rb-Xe) периодов – 15%; для более тяжёлых элементов они всегда менее 10%. Лишь для элементов первого периода (H – He) относительные различия в атомов весьма велики – для водорода максимальное различие достигает 200%, а для гелия – 100%.

Неодинаковые атомные веса изотопов обусловливают определённые различия таких свойств изотопных соединений, как плотность, вязкость, показатель преломления, коэффициент диффузии, удельный заряд ионов и др. При этом отношение плотностей изотопных соединений достаточно точно совпадает с отношением их молекулярных весов, а удельные заряды изотопных ионов обратнопропорциональны их молекулярным весам. Кроме того, различие масс изотопных атомов вызывает изменение уровней поступательной, вращательной и колебательной энергии молекул при их изотопном замещении, что приводит к различию колебательно-вращательных спектров изотопных соединений.

Изменение энергетических уровней при изотопном замещении, в свою очередь, вызывает изменение термодинамических свойств, таких как теплоёмкость, теплопроводность, теплоты испарения и плавления, давление насыщенного пара и др. Так, например, отношение давлений пара H_2 и D_2 составляет 2,448 при – 251,1^o; отношение давлений пара H_2O и D_2O составляет 1,148 при 20° и 1,052 при 100°; соответствующее отношение для $H_2{}^{16}O$ и $H_2{}^{18}O$ составляет 1,009 при 23° и 1,003 при 100°.

Что касается химических свойств изотопных соединений, то остаются в основном неизменными, т.к. масса атома не влияет на его электронную конфигурацию, определяющую химические свойства. Однако термодинамическая неравноценность изотопных соединений приводит к неравномерному распределению изотопов при равновесии изотопного обмена (термодинамический изотопный эффект), а также к преимущественной адсорбции одной из изотопных форм на сорбенте. Кроме того, термодинамическая неравноценность исходных изотопных соединений в сочетании с аналогичной неравноценностью переходных состояний (активных комплексов) при химических реакциях изотопных соединений обусловливает различие

в скоростях протекания этих реакций (кинетический изотопный обмен). Поскольку термодинамический и кинетический эффекты зависят от различий колебательно-вращательных и поступательных энергетических уровней изотопных молекул, то, исходя из данных колебательного спектра этих молекул, можно рассчитать изотопные эффекты статистическими методами. Термодинамические изотопные эффекты, выраженные отклонениями от единицы коэффициента равновесного распределения изотопов, для изотопного обмена водорода в случае трития и протия могут максимально достигать при 20° 16-18-кратного значения, а в случае дейтерия и протия – 8-9-кратного значения; для изотопного обмена других лёгких элементов – таких, как литий, бор, углерод, азот, хлор, эти отклонения редко превышают 10%, а в случае более тяжёлых элементов они обычно не превышают 1%.

Кинетические изотопные эффекты, выражающиеся отношением констант скоростей химических реакций для различных изотопных соединений, в случае изотопов водорода также могут быть очень велики. Так, например, отношение констант скоростей синтеза бромистого водорода и бромистого дейтерия равно 5. Для изотопов всех других элементов отклонения этого отношения от единицы никогда не превышают 50%.

В основе использования изотопов в качестве меченных атомов лежит их химическая и физико-химическая идентичность. Фактически же всегда имеют место различия в свойствах изотопов, характеризуемые значениями изотопных эффектов. Таким образом, знание изотопных эффектов позволяет вносить поправки на различие свойств изотопов при их использовании в качестве меченых атомов. Очевидно, что учёт соответствующих поправок имеет существенное значение при работе лишь с изотопами лёгких элементов и особенно водорода.

Различия в свойствах изотопов позволяют разделять изотопы и определять их содержание в изотопных смесях. Любой способ разделения изотопов, а также количественный анализ стабильных изотопов основаны на наличии изотопных эффектов (при этом метод разделения тем эффективнее, чем больше соответствующий изотопный эффект). Так, например, ректификационный метод разделения основан на различии в давлениях пара изотопных соединений. В основе метода центрифугирования лежит различие плотностей. Диффузионный метод предполагает различие коэффициентов диффузии. Методы разделения с использованием реакций изотопного обмена основаны на термодинамическом изотопном эффекте. Имеются методы разделения изотопов, основанные на изотопном кинетическом эффекте, как, например, широко распространённый электролитический метод получения тяжёлой воды.

3.3.3 Газовая диффузия.

Диффузия газов через пористые перегородки при пониженном давлении является одним из важнейших методов разделения тяжелых, а также многих легких изотопов. Метод газовой диффузии использует различие в скоростях движения различных по массе молекул газа. Понятно, что он будет подходить только для веществ, находящихся в газообразном состоянии.

Газообразное соединение разделяемого элемента при достаточно низких давлениях ~ 0,1 *н/м*^{2} (~10^{-3} *мм рт. ст.*) «прокачивается» через пористую перегородку, содержащую до 10^6 отверстий на 1 *см*^{2}**.** Лёгкие молекулы проникают через перегородку быстрее тяжёлых, так как скорости молекул обратно пропорциональны квадратному корню из их молекулярного веса. В результате газ обогащается лёгкой компонентой по одну сторону перегородки и тяжёлой — по другую.

Поясним принцип действия метода газовой диффузии (см. **Рис.5**).

При различных скоростях движения молекул, если заставить их двигаться через тонкую трубочку, более быстрые и легкие из них обгонят более тяжелые. Для этого трубка должна быть настолько тонка, чтобы молекулы двигались по ней поодиночке. Таким образом, ключевой момент здесь - изготовление пористых мембран для разделения. Они должны не допускать утечек, выдерживать избыточное давление. Поскольку легкий изотоп диффундирует быстрее, чем тяжелый, то газ, прошедший через пористую перегородку, обогащается легким изотопом. Для некоторых легких элементов степень разделения может быть достаточно велика, но для урана - только 1.00429 (выходной поток каждой ступени обогащается в 1.00429 раза). Поэтому

газодиффузионные обогатительные предприятия - циклопические по размерам, состоящие из тысяч ступеней обогащения.

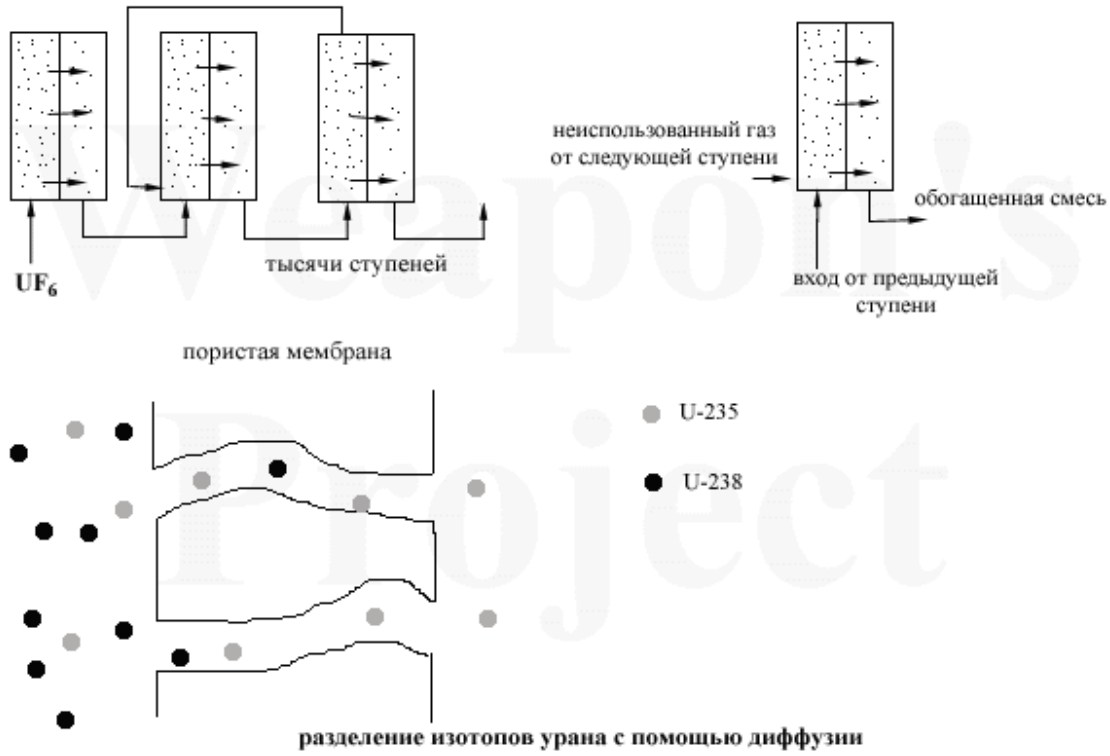


Рис. 5 Схема метода газовой диффузии

Исходя из обратно пропорциональной зависимости квадрата средней скорости теплового движения молекул от их массы, можно показать, что максимальный коэффициент разделения изотопных молекул при их диффузии через пористые перегородки определяется выражением

$$\alpha = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}},$$

где M_1 и M_2 – молекулярные веса легкой и тяжелой изотопных молекул.

Этот метод разделения изотопов дает малые коэффициенты разделения, но легко позволяет провести каскадирование. Таким образом, в общем можно получить большой коэффициент разделения.

Если разница в молекулярных массах очень мала, то необходимо повторение этого процесса тысячи раз. Количество операций разделения *n* определяется соотношением:

$$q = \alpha^n,$$

где *q* — необходимая степень разделения. На этом методе основана работа гигантских газодиффузионных заводов для получения ^{235}U из газообразного UF_6 ($\alpha \sim 1{,}0043$). Для получения необходимой концентрации ^{235}U требуется около 4000 единичных операций разделения**.**

Диффузионный разделительный каскад состоит из многих ячеек (ступеней). Каждая ячейка – камера разделена на две части пористой перегородкой, по одну сторону которой нагнетается насосом газообразная изотопная смесь. Размер пор – порядка длины свободного пробега данных молекул при используемом давлении. Часть смеси проходит через перегородку и при этом обогащается легким компонентом, т.к. скорость его диффузии больше. Из одной части камеры выводится обогащенный поток, из другой – обедненный. Оба потока поступают на соответствующие ступени каскада для дальнейшего разделения. Используется также диффузия разделяемой смеси в каком-либо постороннем газе (или лучше в паре), который легко потом

отделить от смеси конденсацией. Смесь подается в струю пара, и часть ее с большим содержанием легкого компонента диффундирует против потока пара.

3.2.4 Диффузия в потоке пара (противопоточная масс-диффузия)

Разделение изотопов происходит в цилиндрическом сосуде (колонне), перегороженном вдоль оси диафрагмой, содержащей около 10^3 отверстий на 1 *см*^{2}**.** Газообразная изотопная смесь движется навстречу потоку вспомогательного пара. Вследствие градиента (перепада) концентрации газа и пара в поперечном сечении цилиндра и большего коэффициента диффузии для лёгких молекул происходит обогащение лёгким изотопом части газа, прошедшего сквозь поток пара в левую часть цилиндра. Обогащённая часть выводится из верхнего конца цилиндра вместе с основным потоком пара, а оставшаяся в правой половине часть газа движется вдоль диафрагмы и отводится из аппарата. Пар, проникший в правую часть, конденсируется. На разделительных установках, состоящих из нескольких десятков последовательно соединённых диффузионных колонок с испаряющейся жидкостью (ртуть, ксилол и др.), разделяются в лабораторных масштабах (до 1 *кг*) изотопы неона, аргона, углерода, криптона, серы.

3.2.5 Термодиффузия

В этом случае опять же, используется различие в скоростях движения молекул. Более легкие из них при существовании разницы температуры имеют свойство оказываться в более нагретой области. Коэффициент разделения зависит от отношения разницы массы изотопов к общей массе и больший для легких элементов. Термодиффузионный процесс проводят в пустотелых колоннах с охлаждаемыми стенками и с раскаленной проволокой, протянутой в центре вдоль колонны. Такая колонна в зависимости от ее высоты равноценна многим последовательно соединенным ступеням. Прямой и возвратный потоки в колонне обеспечиваются естественными конвекционными токами (вдоль раскаленной проволоки ток направлен вверх, а вдоль стенок – вниз). Между потоками в каждом поперечном сечении протекают термодиффузионные процессы, последовательное наложение которых приводит к накоплению тяжелого изотопа внизу колонны, а более легкого – наверху. Несмотря на свою простоту, в этом методе требуются большие энергозатраты для создания и поддержания нагрева. Поэтому широко не применяется.

Обычно термодиффузионная разделительная колонка состоит из двух коаксиально расположенных труб, в которых поддерживаются различные температуры Разделяемая смесь вводится между ними. Перепад температур ΔT между поверхностями труб создаёт диффузионный поток, что приводит к появлению разности концентрации изотопов в поперечном сечении колонки. Одновременно перепад температур приводит к возникновению конвективных вертикальных потоков газа. Вследствие этого более лёгкие изотопы накапливаются у горячей поверхности внутренней трубы и движутся вверх. Коэффициент разделения

$$\alpha = 1 + \gamma \frac{\Delta T}{T}$$

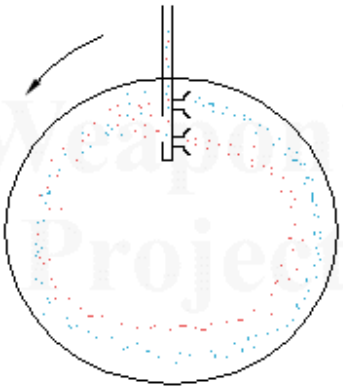
где γ — постоянная термодиффузии, зависящая от относительной разности масс изотопов, а $T = (T_1 + T_2)/2$. Термодиффузионный метод позволяет разделять изотопы как в газообразной, так и в жидкой фазе. Возможный ассортимент разделяемых изотопов шире, чем при разделении методом газовой диффузии или диффузии в потоке пара. Однако для жидкой фазы α мало. Метод удобен при разделении изотопов в лабораторных условиях вследствие простоты, отсутствия вакуумных насосов и т. д.

Этим методом был получен He с содержанием 0,2% ^{3}He (в природной смеси $1{,}5 \cdot 10^{-5}$%), изотопы ^{18}O, ^{15}N, ^{13}C, ^{20}Ne, ^{22}Ne, ^{35}Cl, ^{84}Kr, ^{86}Kr с концентрацией > 99,5%. Термодиффузия использовалась в промышленном масштабе в США для предварительного обогащения ^{235}U перед окончательным разделением его на электромагнитной установке. Термодиффузионный завод состоял из 2142 колонн высотой 15 *м*.

3.2.6 Газовое центрифугирование

Впервые эта технология была разработана в Германии, во время второй мировой, но промышленно нигде не применялась до начала 60-х. Разделение осуществляется за счет различия центробежных сил, действующих на молекулы разных масс. (**Рис.6**). В центрифуге, вращающейся с большой окружной скоростью (100 *м/сек*), более тяжёлые молекулы под действием центробежных сил концентрируются у периферии, а лёгкие молекулы — у ротора центрифуги. Поток пара во внешней части с тяжёлым изотопом направлен вниз, а во внутренней с лёгким изотопом — вверх. Соединение нескольких центрифуг в каскад обеспечивает необходимое обогащение изотопов.

Большое преимущество центрифугирования состоит в зависимости коэффициента разделения от абсолютной разницы в массе, а не от отношения масс. Центрифуга одинаково хорошо работает и с легкими и с тяжелыми элементами. Поэтому центрифугирование пригодно для разделения изотопов и тяжёлых элементов. Степень разделения пропорциональна квадрату отношения скорости вращения к скорости молекул в газе. Отсюда очень желательно как можно быстрее раскрутить центрифугу. Типичные линейные скорости вращающихся роторов 250-350 м/с, и до 600 м/с в усовершенствованных центрифугах. Типичный коэффициент сепарации - 1.01 - 1.1.



Применяется противоточная газовая центрифуга, в которой смесь циркулирует, двигаясь вверх, вдоль оси вращения в центральной части, и вниз – по периферии. Такая центрифуга – аппарат колоночного типа с многократным повторением элементарного разделительного эффекта (в каждом поперечном сечении) вдоль направления прямого и возвратного потоков.

Рис.6 Схема метода газового центрифугирования

Центрифугирование использовано для разделения изотопов углерода (в виде CCl_4), криптона, ксенона и урана (в виде UF_6).

По сравнению с газодиффузионными установками этот метод имеет уменьшенное энергопотребление, большую легкость в наращивании мощности. Недостаток метода – низкая производительность центрифуг и необходимость обеспечения очень больших угловых скоростей (порядка 60000 об/мин). В настоящее время газовое центрифугирование - основной метод разделения изотопов.

3.2.7 Электромагнитное разделение.

Метод электромагнитного разделения основан на различном действии магнитного поля на заряженные частицы различной массы. По сути дела такие установки, называемые калютронами, являются огромными масс-спектрометрами. Ионы разделяемых веществ, двигаясь в сильном магнитном поле, закручиваются с радиусами, пропорциональными их массам и попадают в приемники, где и накапливаются (**Рис.6**).

Рис.7 Схема метода электромагнитного разделения

Вещество, изотопы которого требуется разделить, помещается в тигель ионного источника, испаряется и ионизуется. Ионы вытягиваются из ионизационной камеры сильным электрическим полем, формируются в ионный пучок и попадают в вакуумную разделительную камеру, помещенную в магнитное поле *H*, направленное перпендикулярно движению ионов. Под действием магнитного поля ионы движутся по окружностям с радиусами кривизны, пропорциональными корню квадратному из отношения массы иона *M* к его заряду *e*. Вследствие

этого радиусы траектории тяжёлых и лёгких ионов отличаются друг от друга. Это позволяет собирать ионы различных изотопов в приёмники, расположенные в фокальной плоскости установки.

Этот метод позволяет разделять любые комбинации изотопов, обладает очень высокой степенью разделения. Обычно достаточно двух проходов для получения степени обогащения выше 80% из бедного вещества (с исходным содержанием желаемого изотопа менее 1%).
Производительность электромагнитных установок определяется значением ионного тока и эффективностью улавливания ионов. На больших установках ионный ток колеблется от десятков до сотен *ма*, что даёт возможность получать до нескольких граммов изотопов в сутки (суммарно по всем изотопам). В лабораторных сепараторах производительность в 10 - 100 раз ниже.

Электромагнитный метод характеризуется высоким α и возможностью одновременного разделения всех изотопов данного элемента. Обычно на больших промышленных установках для одной ступени разделения а ~ 10—100, в лабораторных — в 10—100 раз выше. В большинстве случаев при разделении электромагнитным методом достаточно одной ступени, редко производится повторное разделение предварительно обогащенных изотопных материалов для получения изотопов особо высокой частоты. Основной недостаток метода - относительно низкая производительность, высокие эксплуатационные затраты, значительные потери разделяемого вещества.

Электромагнитное разделение плохо приспособлено для промышленного производства: большая часть веществ осаждается внутри калютрона, так что его приходится периодически останавливать на обслуживание. Остальные недостатки - большое энергопотребление, сложность и дороговизна технического обслуживания, низкая производительность. Основная сфера применения метода - получение небольших количеств чистых изотопов для лабораторного применения. Они используются для получения радиоактивных изотопов, необходимых для ядерной спектроскопии, для изучения взаимодействия ионов с твёрдым телом (при ионном внедрении и для других целей).

Электромагнитный метод впервые позволил получить килограммовые количества ^{235}U. Электромагнитный завод в Ок-Ридже (США) имел 5184 разделительные камеры — «калютроны». Вследствие высокой универсальности и гибкости электромагнитные установки используются для разделения изотопов ~ 50 элементов периодической системы в количествах от *мг* до сотен *г* и являются основным источником обеспечения изотопами научно-исследовательских работ и некоторых практических применений изотопов

3.2.8 Химическое обогащение

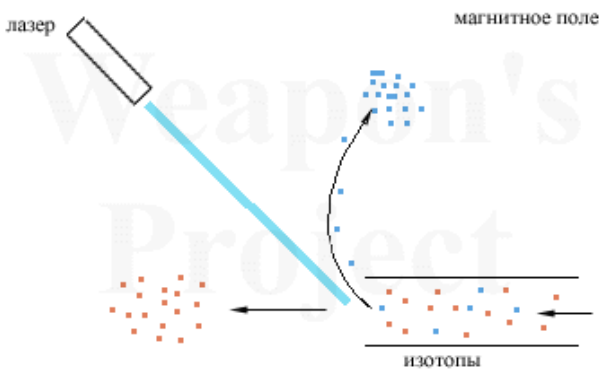
Химическое обогащение использует разницу в скорости протекания химических реакций с различными изотопами. Лучше всего оно работает при разделении легких элементов, где разница значительна. В промышленном производстве применяются реакции, идущие с двумя реактивами, находящимися в различных фазах (газ/жидкость, жидкость/твердое вещество, несмешивающиеся жидкости). Это позволяет легко разделять обогащенный и обедненный потоки. Используя дополнительно разницу температур между фазами, достигается дополнительный рост коэффициента разделения. На сегодня химическое разделение - самая энергосберегающая технология получения тяжелой воды. Кроме производства дейтерия, оно применяется для извлечения Li-6. Во Франции и Японии разрабатывались методы химического обогащения урана, так и не дошедшие до промышленного освоения.

3.2.9 Аэродинамическая сепарация

Этот способ можно рассматривать как вариант центрифугирования, но вместо закручивания газа в центрифуге, он завихряется при выходе из специальной форсунки, куда подается под большим давлением. Эта технология использовалась ЮАР и Германией.

3.2.10 AVLIS (испарение с использованием лазера).

Различные изотопы поглощают свет с немного различной длиной волны. При помощи точно настроенного лазера можно избирательно ионизировать атомы какого-то определенного изотопа. Получившиеся ионы можно легко отделить, допустим, магнитным полем (**Рис.8**). Такая технология имеет чрезвычайную эффективность, однако в промышленных масштабах пока не применяется.



лазерное разделение изотопов

Рис.8. Схема метода лазерного испарения

3.2.11 Дистилляция

Дистилляция (фракционная перегонка) использует различие в скорости испарения различных по массе изотопов. Чем меньше масса атома - тем быстрее будет испаряться этот изотоп. Лучше всего это работает опять же, на легких элементах. Дистилляция успешно применяется для производства тяжелой воды.

Поскольку, как правило, изотопы имеют различные давления насыщенного пара, например p_1 и p_2, и различные точки кипения, то возможно разделение изотопов путём фракционной перегонки. Используются фракционирующие колонны с большим числом ступеней разделения; α зависит от отношения p_1/p_2 и его значение уменьшается с ростом молекулярной массы и температуры. Поэтому процесс наиболее эффективен при низких температурах. Дистилляция использовалась при получении изотопов лёгких элементов — ^{10}B, ^{11}B, ^{18}O, ^{15}N, ^{13}C, а в промышленном масштабе для получения сотен тонн тяжёлой воды в год.

3.2.12 Электролиз

При электролизе воды или водных растворов электролитов выделяющийся на катоде водород содержит меньшее количество дейтерия, чем исходная вода. В результате в электролизёре растет концентрация дейтерия. Метод применялся в промышленных масштабах для получения тяжёлой воды. Разделение других изотопов лёгких элементов (лития, калия) электролизом их хлористых солей производится только в лабораторных количествах. Этот самый эффективный метод получения дейтерия (коэффициент разделения более 7) требует такого количества энергии, что по экономическим соображениям, если он и задействуется, то на поздних стадиях очистки.

3.2.13 Изотопный обмен

Изотопный обмен *– реакция, единственным результатом которой является перераспределение изотопов какого-либо элемента между реагирующими веществами.*

При изотопном обмене вещества сохраняют неизменным свой элементный состав и переходят лишь из одних изотопных форм в другие. Такие реакции могут протекать также между различными изотопными формами одного и того же вещества. Возможности проведения реакций изотопного обмена весьма различны: они могут протекать в гомогенных условиях (между растворённым веществом и растворителем, между реагирующими веществами в нейтральном растворителе, в смеси газов и т.п.), а также в гетерогенных условиях (между твёрдым и жидким веществом и нерастворимым газом, между газами на поверхности твёрдого катализатора и т.д.).

Равновесие изотопного обмена характеризуют коэффициентом распределения изотопов и константой равновесия реакции. Коэффициентом равновесия называется величина, показывающая, во сколько раз отношение равновесных концентраций изотопов в одном из реагирующих компонентов больше соответствующего отношения в другом. Константа равновесия представляет собой отношение равновесных концентраций конечных и начальных изотопных форм реагирующих компонентов.

Специфическая особенность реакций изотопного обмена, отличающая их от обычных (элементных) химических реакций, состоит в том, что концентрации реагирующих компонентов остаются неизменными, а изменяется лишь их изотопный состав. Эта особенность приводит к тому, что эти реакции, независимо от их истинного механизма, практически могут быть описаны кинетическим уравнением первого порядка.

Изотопный обмен протекает по различным механизмам, причём встречаются все механизмы, присущие элементным химическим реакциям, и, сверх того, механизмы, не имеющие прямых аналогов в обычной химии. Изотопный обмен может быть одно-, двух- и многостадийным, гомогенным и гетергенным. В основе его могут лежать переходы электронов, ионов, атомов, групп атомов и целых молекул. В качестве промежуточных стадий реакций изотопного обмена могут наблюдаться диссоциация молекул на заряженные или незаряженные частицы, ассоциации отдельных частиц, внутримолекулярные перегруппировки атомов. Кроме того, изотопный обмен для каждого данного элемента имеет свои характерные черты.

Изотопный обмен широко применяют в различных исследовательских и препаративных работах, а также в промышленности. Им пользуются для разделения природных стабильных изотопов химическими методами, основанными на неравномерном равновесном распределении изотопов между веществами. Например, для концентрирования дейтерия при промышленном получении тяжёлой воды применяются реакция изотопного обмена:

$$HDS + H_2O \underset{\rightarrow}{\overset{\rightarrow}{}} H_2S + HDO \text{ и}$$

$$HD + H_2O \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} H_2 + HDO$$

Для концентрирования ^{6}Li используется реакция:

$$\left(^6Li\right)^+ + {}^7LiZ \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} \left(^7Li\right)^+ + {}^6LiZ$$

(реакция проводится на цеолите), Z – цеолитовый радикал.

Применение нескольких ступеней позволяет получать высокое обогащение водорода, азота, серы, кислорода, углерода, лития отдельными изотопами.

--*

Помимо перечисленных, существует ряд других методов, применение которых носит ограниченный характер или находится в стадии исследований или технических усовершенствований. К ним относятся: получение ^{3}He, основанное на явлении сверхтекучести ^{4}He; разделение посредством диффузии в сверхзвуковой струе газа, расширяющейся в пространстве с пониженным давлением; хроматографическое разделение, основанное на различии в скоростях адсорбции изотопов; биологические способы разделения.

Методы разделения изотопов имеют особенности, определяющие области их наиболее эффективного применения. При разделении изотопов лёгких элементов с массовыми числами около 40 экономически более выгодны и эффективны дистилляция, изотопный обмен и электролиз. Для разделения изотопов тяжёлых элементов применяются диффузионный метод, центрифугирование и электромагнитное разделение. Однако газовая диффузия и центрифугирование могут быть использованы, если имеются газообразные соединения элементов. Поскольку таких соединений мало, реальные возможности этих методов пока ограничены. Термодиффузия позволяет разделять изотопы как в газообразном, так и в жидком состоянии, но при разделении изотопов в жидкой фазе α мало. Электромагнитный метод обладает большим α, но имеет малую производительность и применяется главным образом при ограниченных масштабах производства изотопов.

Для обеспечения научно-исследовательских работ и практических применений изотопов в России создан Государственный фонд стабильных изотопов, обладающий запасом изотопов почти всех элементов. Регулярно производится разделение значительных количеств дейтерия ^{10}B, ^{13}C,

^{15}N, $^{18}0$, ^{22}Ne и других изотопов. Организован также выпуск различных химических препаратов, меченых стабильными изотопами.

3.3 Разделение изотопов урана

Для разделения урана в используются следующие технологии: электромагнитное разделение, газовая диффузия, жидкостная термодиффузия, газовое центрифугирование, аэродинамическая сепарация. Определенного внимания заслуживают следующие, пока промышленно неприменяемые методы: испарение с использованием лазера и химическое разделение

Электромагнитный метод основан на том, что два иона, имеющие одну и ту же энергию, но различные массы, фокусируются в разных точках плоскости, если они проходят через однородное магнитное поле, перпендикулярное их траектории. Помещая источник ионов в центр однородного магнитного поля так, чтобы использовать несколько ионных лучей в разных направлениях можно добиться эффективного использования большого магнита. Коллекторы располагаются таким образом, что они пересекают каждый луч и собирают по отдельности два главных изотопа ^{235}U и ^{238}U с довольно большой степенью чистоты. Метод дает в одной установке большое разделение. Коэффициент разделения приближается к 100%, но производительность одной установки невелика. Общая производительность может быть увеличена за счет увеличения концентрации ^{235}U в исходном продукте.

Это была исторически первая техника, способная к производству оружейного урана. Она использовалась в электромагнитном сепараторе Y-12 в Ок-Ридже во время второй мировой войны. Двух этапов разделения достаточно для обогащения урана до 80-90%. Два остальных метода, доступных в то время - газовая диффузия, жидкостная термодиффузия - применялись для начального обогащения урана и увеличения выхода электромагнитного сепаратора по отношению к сырью из природного урана. Весь использованный в хиросимской бомбе уран произведен по этой технологии. В связи с высокими накладными расходами Y-12 был закрыт в 1946 году. В более позднее время только Ирак пытался промышленно использовать этот метод в своей атомной программе.

Газовая диффузия. Первая практически применяемая в промышленных масштабах технология разделения ^{238}U и ^{235}U. В основу метода положено различие скоростей теплового движения молекул изотопных веществ. Единственное соединение урана, обладающее свойствами, необходимыми для осуществления газовой диффузии, является гексафторид урана UF_6. Давление насыщенных паров этого соединения достигает атмосферы при 56°C.

Несмотря на требование наличия для сильного обогащения тысяч ступеней, по затратам это более выгодный метод, чем электромагнитное разделение. Газодиффузионные предприятия по обогащению ^{235}U огромны и имеют большую производственную мощность. Главная трудность - создание надежных газодиффузионных барьеров, способных противостоять коррозийному действию UF_6. Есть два основных типа таких барьеров: тонкие пористые мембраны и барьеры, собранные из отдельных трубочек. Мембраны представляют собой пленки с образованными травлением порами. Например, азотная кислота протравливает сплав 40/60 Au/Ag (Ag/Zn); либо электролитическим травлением алюминиевой фольги можно получить хрупкую алюминиевую мембрану. Составные барьеры собираются из маленьких дискретных элементов, упакованных в относительно толстую пористую перегородку. Технология изготовления диффузионных барьеров продолжает оставаться засекреченной во всех странах, разработавших ее. Построенное во время второй мировой войны производство К-25 в Ок-Ридже состояло из 3024 ступеней обогащения и продолжало функционировать до конца 1970-х. Разработка подходящего материала для барьеров оказалась сложным делом, что вызвало некоторую задержку с вводом в строй предприятия после войны, хотя даже частично законченный завод внес вклад в накопление ^{235}U для атомной бомбы «Малыш» (Little Boy), сброшенной на Хиросиму. В то время барьеры изготавливались из спеченного никелевого порошка, попытки создать многообещающие мембраны из электролитически вытравленного алюминия провалились. К-25 изначально содержал 162000 м^2

мембранной поверхности. Это предприятие, с расширениями, произвело большую часть всего урана для армии США в шестидесятых. С усовершенствованием газодиффузионных барьеров производительность завода возросла в 23 раза. Диффузионное производство потребляет гораздо меньше электроэнергии по сравнению с электромагнитным, но ее расход все равно остается достаточно большим. В 1981 году, после модернизации, оно имело удельную потребляемую мощность на уровне 2370 кВт-ч/МПП-кг. Несмотря на то, что уран низкого обогащения - ценное сырье для производства высокообогащенного урана, газодиффузионные установки низкого обогащения невозможно легко переделать для производства урана высокого обогащения. Высокое обогащение требует много меньших по размеру ступеней, из-за резкого снижения коэффициента обогащения и проблем с критичностью (накопление критической массы урана) у больших по размеру блоков. Огромные размеры обогатительной системы ведут к длительному времени заполнения ее материалом (обогащаемым веществом), до начала выхода продукта. Обычно это время установления равновесия составляет 1-3 месяца. Технология газовой диффузии широко использовалась во множестве стран, даже Аргентина создала действующее обогатительное предприятие для своей тайной оружейной программы (в настоящее время прекращенной). В 1979 году более 98% всего урана производилось с использованием этого процесса. К середине 1980-х эта доля сократилась до 95% с освоением метода центрифугирования.

Жидкостная термодиффузия, т.е. явление изменения диффузионного равновесия газа при наличии перепада температур, также широко используется в практике разделения изотопов. Термодиффузионное разделение изотопов урана происходит в жидком UF_6, находящемся под большим давлением между двумя поверхностями – горячей и холодной. Благодаря разности масс изотопов урана и сложным межмолекулярным силам, происходит разделение изотопов.

Жидкостная термодиффузия оказалась первой технологией, на которой были получены существенные количества низкообогащенного урана. Она применялась в США во время Манхэттенского проекта для увеличения КПД сепаратора Y-12. Это самый простой из всех методов разделения, но предельная степень обогащения по ^{235}U всего ~1% (завод S-50 в Ок-Ридже производил 0.85-0.89% урана-235 в конечном продукте). Серьезным недостатком этого метода является большое потребление энергии.

Газовое центрифугирование. Доминирующий способ разделения изотопов для новых производств, хотя уже существующие мощности - по большей части газодиффузионные. Каждая центрифуга обеспечивает гораздо больший коэффициент разделения, чем одна газовая ступень. Требуется много меньше ступеней, всего около тысячи, правда стоимость каждой центрифуги гораздо выше. Газовое центрифугирование требует ~1/10 часть энергии, требующейся газовой диффузии (его энергопотребление 100-250 кВт-ч/МПП-кг) и обеспечивает более легкое наращивание масштаба производства. Из развивающихся ядерных стран этой достаточно сложной технологией владеют Пакистан и Индия.

Аэродинамическая сепарация. Аэродинамическое разделение разработано в ЮАР (процесс UCOR, использующий вихревые трубки с давлением 6 бар) и Германии (используются искривленные сопла, работающие с давлением 0.25-0.5 бар). Единственная страна, применявшая этот метод на практике - ЮАР, где было произведено 400 кг оружейного урана на предприятии в Валиндабе, закрытом в конце восьмидесятых. Коэффициент разделения ~1.015, энергозатраты ~3300 кВт-ч/МПП-кг.

Испарение с использованием лазера. AVLIS (atomic vapor laser isotope separation). Технология так и не была воплощена в производстве, разрабатывалась в США в течении 1970-80-х гг. и отмерла вследствие общего переизбытка разделяющих мощностей и сокращении арсенала.

Химическое разделение. Химическое разделение урана разрабатывалось в Японии и Франции, но, как и AVLIS, никогда не использовалось. Французский метод Chemex использует противоток в высокой колонне двух несмешиваемых жидкостей, каждая содержащая растворенный уран. Японский метод Asahi использует реакцию обмена между водным раствором и мелкоизмельченной смолой, через которую медленно просачивается раствор. Оба способа

нуждаются в катализаторах для ускорение процесса концентрации. Процесс Chemex нуждается в электричестве на уровне 600 кВт-ч/МПП-кг. Ирак разрабатывал эту технологию (в виде смешанного производства Chemex/Asahi) для обогащения U-235 до 6-8% и последующем дообогащением в калютроне.

Приблизительные энергетические эффективности указанных методов по отношению к газовой диффузии: менее 0.01 - AVLIS (если доведена до промышленного употребления), 0.10-0.04 - газовое центрифугирование, 0.30 - химическое разделение, 1.00 - газовая диффузия, 1.50 - аэродинамическая сепарация. Высокие значения дают электромагнитное разделение и жидкостная термодиффузия