

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОСТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**В.С. Малышевский**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к курсу

**ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ**

для студентов физического факультета

**Часть 2**

**ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ**

**Ростов-на-Дону  
2003**

**Печатается по решению учебно-методической комиссии физического факультета РГУ**

**Протокол №                      от                      2003 г.**

**Автор: Малышевский В.С. - профессор кафедры общей физики**

## Топливные циклы в ядерной энергетике

Все способы производства топлива для ядерных реакторов, подготовки его к использованию и утилизации отработанного топлива вместе взятые и составляют то, что называют топливным циклом. Уже сам термин "топливный цикл" предполагает, что отработанное ядерное топливо может повторно использоваться на ядерных установках в свежих тепловыделяющих элементах после специальной обработки. **Таким образом, ядерный топливный цикл описывает путь, по которому топливо попадает в ядерный реактор, и по которому его покидает.**

В отличие от угля, урановую руду нельзя подавать непосредственно на электростанцию. Прежде она должна быть очищена, сконцентрирована и помещена в специальные топливные стержни. Рисунок 1 показывает так называемый "открытый топливный цикл" в ядерной энергетике, который используется сегодня в большинстве стран, на наиболее общих видах реакторов.

На урановых рудниках ядерное топливо добывается в виде концентрата окиси урана  $U_3O_8$ . Этот материал, порошок зеленого цвета, отправляется на дальнейшую переработку. Он имеет тот же самый изотопный состав, как и руда, в которой содержание U-235 не превышает 0.7 %. Остальная часть - это более тяжелый изотоп урана - U-238 (с небольшим содержанием U-234). Большинство реакторов, включая легко-водные реакторы (LWR), не могут работать на таком топливе (использовать необогащенный уран могут Канадские реакторы типа CANDU). Содержание изотопа U-235 должно быть увеличено, приблизительно, до 3.5 %. Этот процесс называют обогащением.

Обогащение - это процесс, использующий высокие современные технологии, который требует, чтобы уран был в газообразной форме. Самый простой способ достичь этого состоит в том, чтобы преобразовать окись урана в гексофторид урана ( $UF_6$ ), который находится в газообразном состоянии при температурах немногим более комнатных. Следовательно, первый адресат концентрата окиси урана - это завод, где происходит его преобразование в шестифтористый уран.

После этого  $UF_6$  попадает на обогатительный завод\*, на котором происходит увеличение концентрации расщепляющегося изотопа U-235. В этом процессе приблизительно 85 % естественного уранового топлива отбрасывается как "обедненный уран" или как "отходы" (главным образом U-238), которые закладываются на длительное хранение \*\*. Таким образом, после обогащения приблизительно 15 % от первоначального количества представляет собой обогащенный уран, содержащий, приблизительно, 3.5 % изотопа U-235.

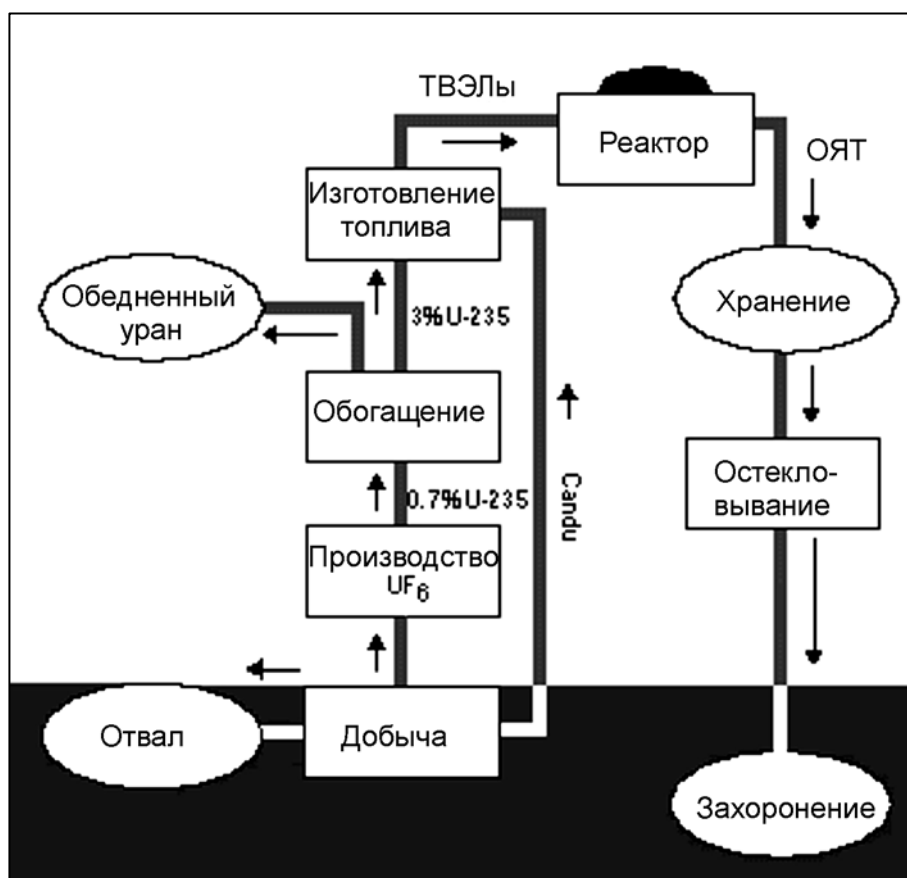
\*Большинство обогатительных технологий используют дорогой и энергоемкий процесс газовой диффузии. Новые заводы основаны на более эффективной технологии, использующей газовые центрифуги. Следующее поколение обогатительных заводов, возможно, будет использовать лазерные технологии.

\*\* Этот материал не может использоваться в существующих типах реакторов, его единственно возможное использование - в реакторах на быстрых нейтронах, или в качестве "разбавителя" оружейного урана. Он сохраняется в виде  $UF_6$  в специальных стальных цилиндрах, и содержание U-235 в нем не превышает 0.3 %.

Методы обогащения основаны на использовании малой разности в массах атомов U-235 и U-238. Большинство существующих установок используют процесс газообразной диффузии, при котором газообразный  $UF_6$  пропускается через длинный ряд мембранных барьеров, которые позволяют молекулам, содержащим U-235, преодолевать их быстрее чем, молекулам, содержащим U-238. Современные заводы используют высокооборотные центрифуги для разделения молекул, содержащих эти два изотопа.

Обогащенный уран далее поступает на завод по изготовлению тепловыделяющих элементов.  $UF_6$  преобразовывается в двуокись урана, керамический материал, и формируется в малые цилиндрические таблетки, приблизительно 2 см по высоте и 1.5 см в диаметре. Эти таблетки помещаются в специальные трубки, изготовленные из нержавеющей стали (или из сплава циркония), длиной, приблизительно, 4 метра и называются тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ). Трубки собирают в связки, площадью, приблизительно, 30 кв. см, которые и образуют, так называемые, реакторные топливные сборки. Топливные сборки такого типа используются практически во всех легко-водных реакторах. В реактор мощностью в 1000 МВт погружают, примерно, 75 тонн топлива в таких сборках.

**Рисунок 1. Открытый топливный цикл**



Канадские реакторы CANDU (CANadian Deuterium Uranium) хотя и имеют различные конструкции, но все они работают на естественном (то есть необогащенном) уране. Вместо одной большой емкости высокого давления, содержащей ядро реактора, они имеют большое количество (от 300 до 600) горизонтальных напорных труб, каждая из которых содержит топливо и теплоноситель в виде тяжелой воды. Напорные трубы проходят сквозь специальный корпус (так называемую "каландрию"), который наполнен тяжелой водой для управления параметрами реактора\*. Топливные сборки для реакторов CANDU имеют размеры 10 см в диаметре и 50 см в длину.

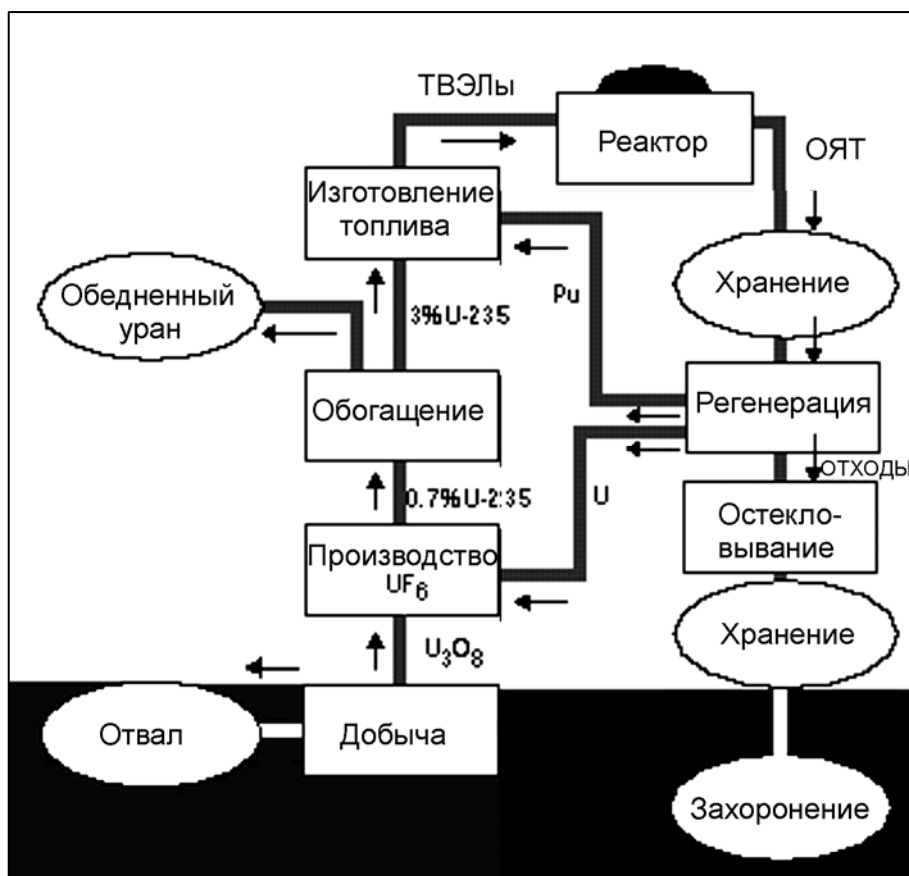
\* Тяжелая вода, или окись дейтерия, содержит дейтерий, который является изотопом водорода, и имеет один

Во всех типах действующих реакторов цепная реакция деления происходит в топливных стержнях. Быстрые нейтроны замедляются водой, тяжелой водой или графитовыми стержнями так, чтобы они могли инициировать реакцию расщепления. Скорость реакции регулируется введением в ядро реактора стержней, поглощающих нейтроны. Теплота, выделяющаяся при реакции деления, уносится теплоносителем, преобразовывается в пар, который в свою очередь используется для вращения турбины и производства электроэнергии.

В легко-водном реакторе топливо остается в реакторе приблизительно в течение трех лет. Кроме теплоты, выделяемой при реакции расщепления U-235, реактор производит расщепляющийся плутоний (Pu-239), который накапливается в топливных элементах. По истечению примерно трех лет, содержание продуктов деления и других материалов, поглощающих нейтроны, возрастает настолько, что цепная реакция деления замедляется. Отработанные топливные сборки в этом случае удаляют и заменяют новыми. Приблизительно одну треть часть топлива заменяют каждый год. В реакторах типа CANDU заправка свежего топлива осуществляется примерно каждые 18 месяцев.

После удаления из реактора, отработанное ядерное топливо (**ОЯТ**) сохраняет радиоактивность и выделяет тепло. Поэтому в течение некоторого времени такое топливо

Рисунок 2. Закрытый топливный цикл



выдерживают в бассейнах под водой для отвода теплоты и защиты от ионизирующего излучения. Следующим шагом может быть переработка отработанного ядерного топлива

для закрытия топливного цикла (такие страны как Великобритания, Франция и Япония выбрали такой путь "закрытого топливного цикла"), или окончательное захоронение, как это делается в США, Канаде и Швеции, которые выбрали "открытый топливный цикл". Хранение отработанного ядерного топлива первоначально осуществляется непосредственно в реакторном отделении. Затем оно может быть перемещено в другое место, например, на специальные склады "сухого хранения".

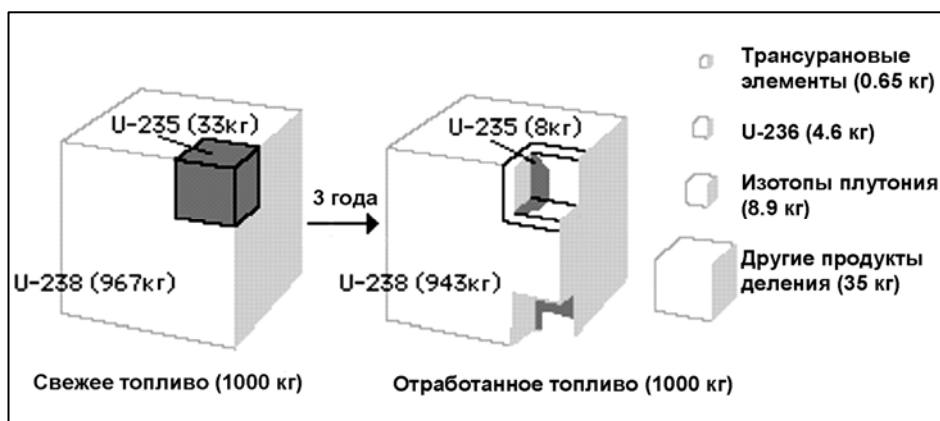
Более ранние поколения реакторов, например, все еще действующие в Великобритании, используют в качестве топлива металлический уран (а не его окись) и газовое охлаждение. В течение последних лет эти реакторы были модернизированы таким образом, чтобы выдержка топливных элементов в их бассейнах не осуществлялась слишком долго. Все это подробно иллюстрирует диаграмма "закрытого топливного цикла" на Рисунке 2. В закрытом топливном цикле для легко-водных реакторов топливо проходит точно такой же путь. Начиная с урановых рудников и заводов, уран проходит все стадии преобразования и обогащения для изготовления реакторного топлива.

После удаления топлива из реактора, топливные стержни проходят обработку на перерабатывающих заводах, где они дробятся и растворяются в кислоте. После специальной химической обработки из отработанного топлива выделяют два ценных продукта: плутоний и неиспользованный уран. Примерно 3% топлива при этом остается в качестве высокоактивных отходов. После битумирования (или остекловывания) эти высокорadioактивные материалы подлежат длительному захоронению.

Приблизительно 96 % урана, который используется в реакторе, остается в исчерпанном топливе (в реакторе расходуется не более 1% U-235). Оставшаяся часть топлива преобразуется в теплоту и радиоактивные продукты распада, а некоторая часть в плутоний и другие актиноиды (Рисунок 3). Следовательно, переработка отработанного ядерного топлива может иметь некоторые экономические выгоды при восстановлении неиспользованного урана и плутония, который был произведен в реакторе. Это уменьшает объем высокорadioактивных и опасных отходов, которые необходимо надлежащим образом хранить, что также имеет определенную экономическую целесообразность.

В отработанном ядерном топливе содержится примерно 1 % плутония. Это очень хорошее ядерное топливо, которое не нуждается ни в каком процессе обогащения, оно может быть смешано с обедненным ураном (так называемое смешанное оксидное топливо или МОХ-топливо) и поставляться в виде свежих топливных сборок для загрузки в реакторы. Его можно использовать для загрузки в будущие реакторы-размножители (см. ниже).

**Рисунок 3. Что происходит в легко-водном реакторе через три года?**



Восстановленный уран может возвращаться на дополнительное обогащение, или поставляться в виде свежего топлива для действующих реакторов. Закрытый топливный цикл, таким образом, является более эффективной системой максимального использования урана без его дополнительной добычи на рудниках (в энергетических единицах экономия составляет, примерно, 30 %) и именно поэтому промышленность сразу одобрила такой подход. Однако, подобные схемы переработки отработанного ядерного топлива не получили широкого распространения в значительной степени из-за довольно низких цен на уран (сегодняшние цены на уран находятся на уровне 1980 года).

Франция, Германия, Великобритания, Россия и Япония продолжают развитие технологий закрытого топливного цикла для окисных топлив, а в Европе более 35 реакторов способны частично использовать МОХ-топливо (от 20 до 50 %), содержащего до 7 % пригодного для реакторов плутония.

### **Добыча и 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\*.

\*В Австралии, например, уран добывается, главным образом, открытым способом, при котором карьеры имеют хорошую естественную вентиляцию. Урановая руда, добываемая на рудниках в Кентуре и Джабелуке содержит менее 0.5%  $U_3O_8$ . На подземном руднике "Олимпик Дам" урановая руда содержит менее 0.1%  $U_3O_8$ . Любая подземная урановая шахта вентилируется специальными мощными устройствами. Старые шахты Канады на Озерах (Клаф Лэйк, Ки Лэйк и Рабит Лэйк), также как и Мак Лэйк, которая начала работать в 1999 году, являются шахтами карьерного типа и также хорошо вентилируются. Недавно в Канаде начали эксплуатироваться три новые подземные шахты. Две из них, Мак Артур Ривер и Сигар Лэйк, содержат очень высококачественную руду и требуют специальных методов дистанционного управления для добычи урана. Несколько подземных месторождений имеется в Клаф Лэйк и Мак Клин Лэйк.

Руда (то есть земная порода, содержащая высокую концентрацию урана, достаточную для его экономичного выделения) специальным образом измельчается. Затем этот порошок обрабатывается раствором серной кислоты для растворения содержащегося в нем урана. Твердые частицы, остающиеся после растворения урана извлекают (экстрагируют), 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).

После экстракции из раствора (иногда для этого используют процессы ионного обмена, сопровождаемые осаждением), 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. 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 мЗв/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, находится 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 мЗв/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 мЗв/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.

Начиная с пятнадцатого столетия, многие шахтеры, которые работали на подземных шахтах, преждевременно погибали от таинственной болезни. В конце 1800-ых годов болезнь была диагностирована как рак легкого, но только в 1921 году газ радон был предположен в качестве ее возможной причины. Хотя это и было окончательно подтверждено в 1939 году, в период с 1946 по 1959 годы, многие подземные месторождения урана разрабатывались без соответствующих мер предосторожности. В начале 1960-ых годов был зарегистрирован рост раковых заболеваний среди курящих шахтеров. Причиной роста был тогда также признан газ радон и, что более важно, его



твердые дочерние продукты радиоактивного распада. Болезнь вызывалась накоплением дозы облучения от радона, полученной 10-15 годами ранее.

Слабо вентилируемые, пылеобразующие процессы добычи урана, которые вели к самому большому риску для здоровья, сегодня уже в прошлом. За последние 35 лет произошли существенные изменения в технологических процессах на предприятиях горнодобывающей промышленности, защищающих шахтеров от различных опасностей. Открытая же карьерная добыча урана фактически безопасна. Не имеется ни одного известного случая заболевания, вызванного облучением шахтеров, работающих на открытых урановых рудниках. Возможно, это частично объясняется отсутствием детальной информации относительно профессиональных заболеваний, связанных с работами на урановых рудниках в 1950-ых годах (ни одна страна не вела подобной статистики в то время).

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.

\* Приблизительно 95 % радиоактивности в руде с содержанием 0.3 %  $U_3O_8$  исходит от радиоактивного распада U-238 (см. Приложение), 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 U-238 и немного U-234 (и U-235) и радиоактивность снижается до 85% ее первоначального значения. После удаления большей части U-238, два короткоживущих продукта его распада (Th-234 и Pa-234) скоро исчезают и, по истечению нескольких месяцев, уровень радиоактивности снижается до 70% ее первоначального значения. Основным долгоживущим изотопом тогда становится Th-230 (период полураспада 77000 лет), который превращается в радий-226 с последующим распадом в радон-222.

Излучение радона, находящегося в отходах, в течение технологических процессов до момента их надежного захоронения может представлять опасность для окружающей среды. Однако, следует иметь ввиду, что радон присутствует в большинстве горных пород и, кроме локальных опасностей, упомянутых выше, общее региональное увеличение радиоактивности от горнодобывающих операций, связанных с радоном, очень мало.

Техническая вода, которая используется в технологических процессах, также содержит радий и другие металлы, присутствие которых было бы нежелательно во внешней среде. Эта вода хранится и испаряется таким образом, чтобы содержащиеся в ней металлы были безопасны, и не попадали в окружающую среду\*. Техническая вода никогда не сбрасывается в естественные стоки, а сохраняется и испаряется в специальных дамбах. Сток дождевых осадков, в соответствии с качеством содержащейся в них воды, осуществляется отдельно по специальным дренажным системам \*\*. Вода плохого качества сохраняется и обрабатывается.

\* Уровни содержания радионуклидов не должны превышать стандарты для питьевой воды.

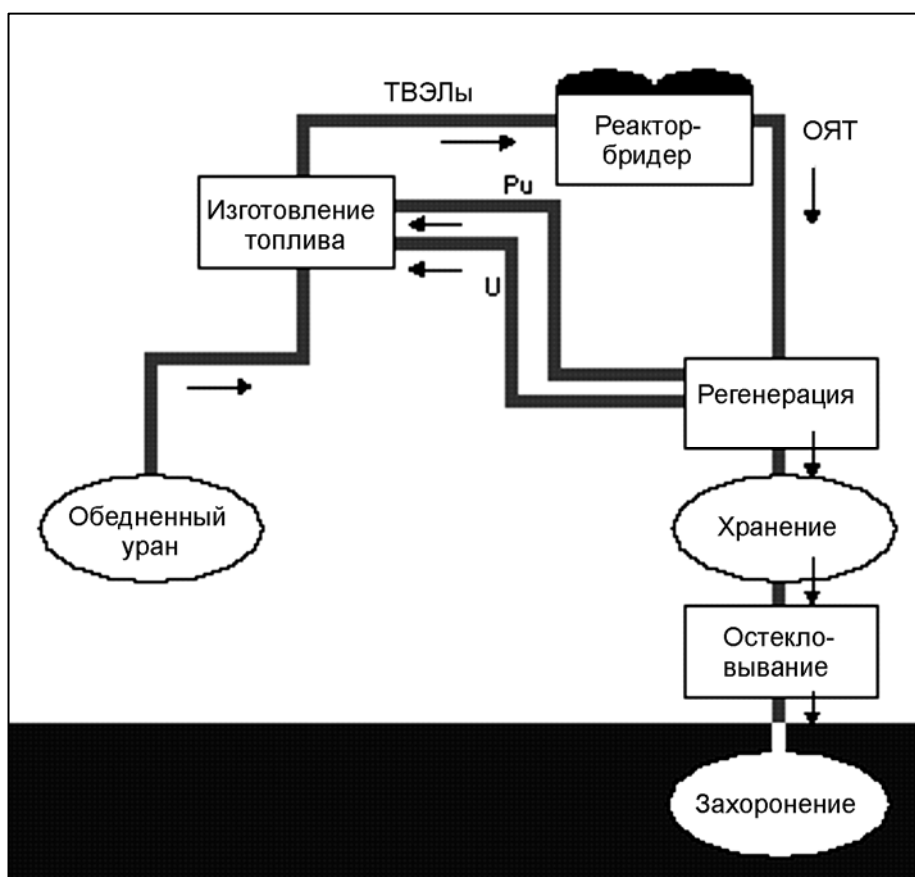
\*\* Металлические сульфиды в контакте с водой и воздухом в теплом климате имеют тенденцию вступать в реакцию, особенно в присутствии некоторых бактерий. Получающиеся при этом серная кислота и

## Реакторы на быстрых нейтронах

Реакторы на быстрых нейтронах используют технологию, которая отличается от рассмотренной выше. Такие реакторы производят энергию путем сжигания плутония при более полном использовании урана-238 в реакторных топливных сборках, вместо расщепляющегося изотопа U-235, применяемого в большинстве реакторов. Если такие реакторы используются для производства большого количества плутония (большего, чем они потребляют), их называют реакторами-размножителями на быстрых нейтронах (FBR). Многолетний интерес к таким реакторам был обусловлен их способностью производить большее количество топлива, чем они потребляют. Сегодня, из-за достаточно низких цен на уран и высвобождающихся больших запасов оружейного плутония, они, в основном, рассматриваются как потенциальные установки для сжигания ядерных отходов.

Несколько стран проводят научно-исследовательские работы по изучению и развитию реакторов на быстрых нейтронах. На сегодняшний день опыт эксплуатации таких установок насчитывает 290 реакторо-лет.

**Рисунок 4. Топливный цикл в реакторах на быстрых нейтронах**



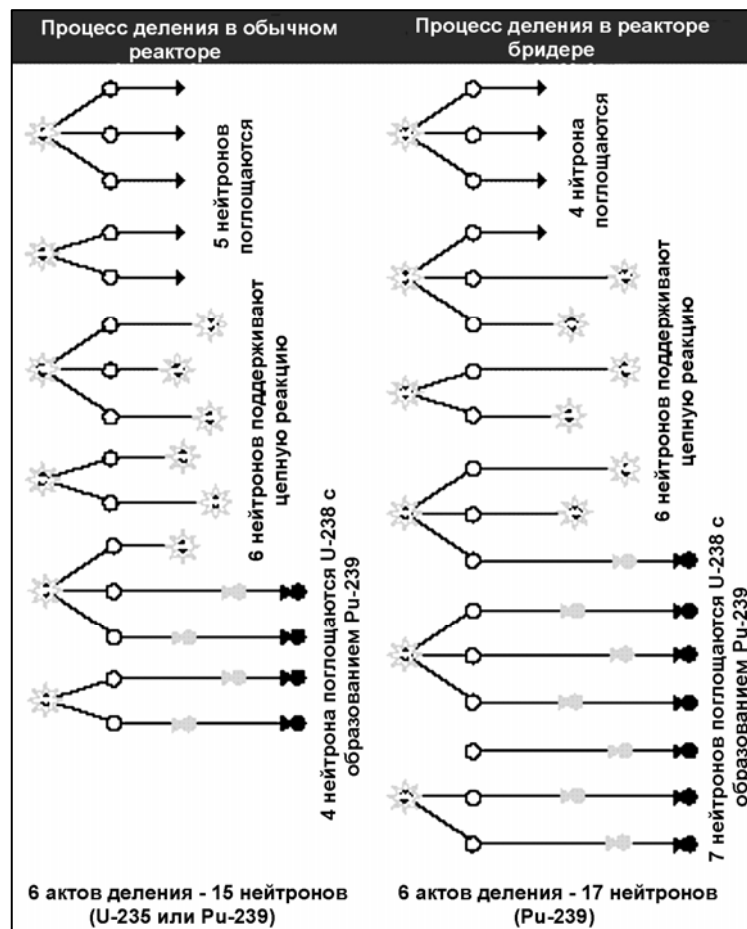
Как видно из диаграммы закрытого топливного цикла, обычные реакторы производят два "избыточных" материала: плутоний (появляется при поглощении нейтронов, и отделяется затем в процессе переработки) и обедненный уран (отделяется при обогащении). Плутоний используется в реакторах на быстрых нейтронах как основное топливо и в то же самое время плутоний образуется из обедненного (или естественного)

урана, в основном U-238, который окружает активную зону реактора в виде специальных "бланкет". Другими словами, реактор одновременно "сжигает" и "производит" плутоний\*, как это показано на Рисунке 5. В зависимости от конструкции реактора, произведенный расщепляющийся плутоний может использоваться либо в этом же реакторе, либо в будущих реакторах-размножителях, либо в обычных реакторах (см. Рисунок 4).

\* Как U-238 так и Pu-240 при поглощении нейтрона превращаются в расщепляющиеся Pu-239 и Pu-241, соответственно:  $n + U^{238}_{92} \Rightarrow U^{239}_{92} \Rightarrow (\text{бета-распад, 23 мин}) \Rightarrow Np^{239}_{93} \Rightarrow (\text{бета-распад, 2.3 дня}) \Rightarrow Pu^{239}_{94}$ .

Реакторы на быстрых нейтронах имеют высокую тепловую эффективность, обусловленную высокотемпературным режимом их эксплуатации. Охлаждение активной зоны осуществляется в них с помощью жидкого натрия. Хотя с химической точки зрения это довольно сложно, тем не менее, сделать это проще, чем использовать воду при очень высоком давлении. Эксперименты, проводимые в течение 19 лет на реакторе-размножителе в Великобритании (до его остановки в 1977 году), показали, что система охлаждения на основе жидкого металлического натрия менее чувствительна к отказам, чем системы, использующие воду очень высокого давления или пар (в легко-водных реакторах). Более современный эксплуатационный опыт других прототипов этих реакторов полностью подтвердил этот вывод.

**Рисунок 5. Реакции расщепления в обычном реакторе и реакторе на быстрых нейтронах**



***Реакторы-размножители на быстрых нейтронах имеют потенциальную возможность использовать фактически весь уран, произведенный горнодобывающей промышленностью.***

С помощью топливного цикла реакторов-бридеров приблизительно в 60 раз большее количество энергии можно извлечь из первоначально добытого урана по сравнению с "незамкнутым циклом" в обычных легко-водных реакторах. Такая чрезвычайно высокая эффективность делает реакторы-бридеры очень привлекательными для производства энергии. Однако, их высокая стоимость, с одной стороны, и распространенность дешевого урана, с другой, вряд ли будут способствовать их широкому внедрению в течении ближайших десятилетий, вплоть до 2050 года. По этой причине работы по проекту Европейского FBR (1450 МВт) были прекращены в 1994 году, хотя исследования на Французском FBR (Superphenix, 1250 МВт) продолжались в течении 1995-98 годов. Тем не менее, исследования продолжаются на Индийском FBRS в направлении использования в качестве топлива изотопов тория, а в Японии - на прототипе действующего FBR (Моңжу), который подключен к электрической сети в августе 1995 года (но затем был отключен из-за обнаруженной утечки натрия).

Российский реактор на быстрых нейтронах BN-600 был введен в эксплуатацию в 1980 году и имеет лучшие эксплуатационные показатели среди всех действующих в России энергоблоков. Реактор BN-350 эксплуатируется в Казахстане уже почти 25 лет и приблизительно половина его ресурса используется для опреснения воды. Россия планирует построить несколько реакторов на быстрых нейтронах для утилизации запасов оружейного плутония. Во всем мире сегодня работают приблизительно 20 реакторов на быстрых нейтронах, а некоторые из них - начиная с 1950-ых годов.

### Реакторы-размножители на быстрых нейтронах

Страна	Реактор	МВт (электрическая)	МВт (тепловая)	Срок эксплуатации
США	EBR 1	0.2		1951-63
	EBR 2	20		1963-94
	Fermi 1	66		1963-72
	SEFOR	20		1969-72
	Fast Flux Test Facility		400	1980-94
Англия	Dounreay DFR	15		1959-77
	Dounreay PFR	270		1974-94
Франция	Rapsodie		40	1966-82
	Phenix *	250		1973- н.в.
	Superphenix 1	1240		1985-98
Германия	KNK-2	21		1977-91
Индия	FBTR		40	1985- н.в.
Япония	Joyo		100	1978- н.в.
	Моңжу	246		1994-96
Казахстан	BN-350*	135		1972-99
Россия	BR-5		5	1959-71
	BR-10		10	1971- н.в.
	BOR-60	12		1969- н.в.
	BN-600*	600		1980- н.в.

\*Блок находится в промышленной эксплуатации

## Ториевый цикл

Реакторы на ториевом топливном цикле подобны реакторам на быстрых нейтронах. В реакторах этого типа естественный торий-232 при поглощении нейтронов превращается в делящийся изотоп урана (уран-233). Этот изотоп, участвуя в цепной реакции деления, выделяет теплоту и избыточные нейтроны, которые преобразовывают еще большее количество тория в U-233. Такая технология привлекательна тем, что, во-первых, позволяет избежать производства плутония, во-вторых, в качестве топлива используется довольно распространенный торий, а, в-третьих, эффективность использования топлива может быть близка к эффективности реакторов на быстрых нейтронах. Однако, количество расщепляющегося урана-233, производимого в такой установке, не совсем достаточно, чтобы поддерживать цепную реакцию деления. Поэтому, хотя интерес к таким проектам не затухает вот уже на протяжении последних 30 лет, тем не менее до их промышленного применения пока еще далеко.

Отличие между обычным реактором на тепловых нейтронах и реактором на быстрых нейтронах состоит в большем количестве нейтронов, производимых в последнем (17 вместо 15 после 6 актов расщепления). Это позволяет при желании производить большее количество ядерного топлива, чем используется. В обычном реакторе имеется примерно четыре нейтрона для размножения Pu-239, а в реакторе на быстрых нейтронах их уже семь. Точные значения этих чисел зависят от конкретных конструкций реакторов и режима их работы.

## Ядерные "отходы"

*Один из наиболее острых и волнующих сегодня общественность аспектов ядерного топливного цикла - это вопросы размещения и хранения радиоактивных отходов.* Наиболее трудный из них - это вопрос о высокоуровневых отходах, в работе с которыми имеются два различных стратегических подхода: первый заключается в переработке исчерпанного топлива с целью отделения высокоуровневых отходов с их последующим остекловыванием (или битумированием) и захоронением, а второй заключается в прямом захоронении исчерпанных тепловыделяющих элементов вместе с содержащимися в них высокоуровневыми отходами. **Основные ядерные отходы остаются надежно "запертыми" в керамическом топливе для ядерных реакторов.**

При "сжигании" ядерного топлива в реакторных установках образуются продукты деления, такие как изотопы бария, стронция, цезия, иода, криптона и ксенона (Ba, Sr, Cs, I, Kr, и Xe). Многие из образующихся изотопов накапливаются в пределах самого топлива. Они высоко радиоактивны, и соответственно, недолговечны. Тогда как эти изотопы формируются из расщепляющейся части топлива, изотопы плутония Pu-239, Pu-240 и Pu-241 \*, а также и некоторые изотопы других трансурановых элементов, формируются из атомов U-238 в активной зоне ядерного реактора при поглощении ими нейтронов и последующим бета-распаде. Все эти изотопы радиоактивны и кроме расщепляющегося плутония, который "сжигается", остаются в исчерпанном топливе, когда его удаляют из реактора. Большинство трансурановых изотопов формирует долгоживущую часть высокоуровневых отходов.

\*Это тот самый Pu-241, который распадаясь, превращается в Америций -241, используемый в бытовых детекторах задымления помещений.

Хотя предприятия ядерного топливного цикла и производят различные отходы,

они, тем не менее, не являются промышленными "выбросами" в традиционном понимании этого слова. Их надежное хранение и размещение обеспечивает безопасность. Фактически, ядерная энергетика - единственная отрасль промышленности, которая берет полную ответственность за все свои отходы и полностью оплачивает расходы по их содержанию и утилизации. Кроме того, методы экспертного контроля, развитые в отношении отходов на гражданских ядерных объектах, теперь начинают применяться и к военной промышленности, которая действительно представляет реальную угрозу окружающей среде в некоторых частях мира.

**Радиоактивные отходы включают в себя разновидность различных материалов, требующих различных подходов по их содержанию и хранению для предохранения людей и окружающей среды.** Они обычно классифицируются как отходы низкого уровня, промежуточного уровня и высокого уровня, в соответствии с количеством и типом радиоактивности, содержащейся в них.

Другим фактором в работе с отходами является время, в течение которого они остаются опасными. Это время зависит от видов радиоактивных изотопов, содержащихся в них, и характеризуется периодом полураспада этих изотопов. Период полураспада - это время, в течение которого данный радиоактивный изотоп теряет половину своей активности. После четырех периодов полураспада уровень активности снижается в 16 раз, а после восьми - в 256 раз.

Различные радиоактивные изотопы имеют периоды полураспада от долей секунды до миллионов лет. Радиоактивность уменьшается со временем вследствие распада изотопов и превращения их в стабильные, не радиоактивные элементы. Скорость распада изотопов обратно пропорциональна их периоду полураспада; чем меньше период полураспада, тем быстрее данные изотопы распадаются. Следовательно, чем выше уровень радиоактивности в некотором количестве материала, тем большее количество короткоживущих изотопов в нем содержится.

Три основных принципа используются в работе с радиоактивными отходами:

- "Концентрировать и изолировать"
- "Разбавлять и рассеивать"
- "Выдерживать и расщеплять".

Два первых принципа используются в работе и с нерадиоактивными отходами. Отходы концентрируются и изолируются, или (в очень малых количествах) разбавляются до приемлемых уровней и затем рассеиваются в окружающей среде. Принцип "выдерживать и расщеплять" относится только к радиоактивным отходам и означает, что отходы хранят в течение определенного времени, в течение которого их радиоактивность уменьшается благодаря естественному распаду изотопов.

**В гражданском ядерном топливном цикле основное внимание уделяется высокоуровневым отходам, содержащим продукты деления и трансураниевые элементы, которые образуются в процессе работы ядерного реактора.**

**Высокоуровневые отходы** содержатся непосредственно в отработанном ядерном топливе или в продуктах его переработки. Так или иначе, их количество не слишком велико - ежегодно приблизительно 25-30 тонн исчерпанного топлива (или три кубометра остеклованных отходов) образуется в результате эксплуатации типичного легко-водного ядерного реактора мощностью 1000 МВт. Такое количество может быть эффективно и

экономно изолировано. Уровень радиоактивности таких отходов быстро уменьшается (см. Рисунки 6,7). Например, отработанные топливные элементы, извлеченные из легководного реактора, настолько радиоактивны, что испускают несколько сотен киловатт тепловой энергии, но год спустя это излучение уменьшается до пяти киловатт, а после пяти лет - всего один киловатт. Через 40 лет уровень радиоактивности в них падает, примерно, в тысячу раз.

После специальной переработки отработанного топлива, примерно 3% высокоуровневых отходов находятся в жидком состоянии и содержат "золу" от сгоревшего урана. Это высоко радиоактивные долгоживущие продукты деления урана и некоторые тяжелые элементы. Они производят значительное количество теплоты и требуют специального охлаждения. Такие отходы остекловывают специальными составами в небольшие капсулы, закладывают на промежуточное хранение с последующим долгосрочным размещением глубоко под землей. Такие принципы обращения с радиоактивными отходами приняты в Великобритании, Франции, Германии и Японии.

С другой стороны, если отработанное реакторное топливо не подвергается обработке, то все высоко радиоактивные изотопы остаются в нем. В этом случае с топливными элементами обращаются как с высокоуровневыми отходами. Такой прямой подход к работе с отработанным ядерным топливом принят в США и Швеции. Многие страны, включая Канаду, придерживаются различных концепций, выбирая между переработкой и прямым долгосрочным хранением отработанного ядерного топлива.

Высокоуровневые отходы составляют только 3 % от всех радиоактивных отходов во всем мире, но они содержат до 95 % всей радиоактивности, содержащейся в них.

Наряду с высокоуровневыми отходами ядерной энергетики, работа с радиоактивными материалами приводит к возникновению **отходов низкого уровня** (средства очистки оборудования, перчатки, специальная одежда, инструменты и т.д.). Такие отходы хотя и не представляют особой опасности, но требуют более тщательного обращения, чем обычный мусор. Отходы низкого уровня поступают также из медицинских учреждений, научно-исследовательских лабораторий и промышленности. Они могут быть сожжены. Но обычно их размещают в специальных хранилищах под землей. В любом случае, из них сначала выделяют все высоко токсичные материалы и включают в высокоуровневые отходы, что обеспечивает безопасность и эффективность работы с такими, относительно безвредными, материалами. Многие страны имеют хранилища для размещения отходов низкого уровня. Отходы низкого уровня имеют, примерно, такой же уровень радиоактивности, как и низкосортная урановая руда, а их количество, образующееся каждый год, почти в пятьдесят раз больше, чем количество высокоуровневых отходов. Во всем мире они составляют 90 % от всех радиоактивных отходов, но имеют лишь 1 % радиоактивности.

Отходы промежуточного уровня главным образом возникают в ядерной промышленности. Они более радиоактивны и их изолируют от людей перед обработкой и размещением на хранение. Обычно они включают в себя различные смолы, химические осадки, компоненты реакторного оборудования и загрязненные материалы от реакторов, снимаемых с эксплуатации. Обычно, такие отходы битумируются для дальнейшего размещения в специальных хранилищах. Короткоживущие отходы (главным образом, различные компоненты реакторного оборудования) хранят в заглубленных хранилищах, но долгоживущие отходы (от переработки ядерного топлива) размещают глубоко под землей. Во всем мире отходы промежуточного уровня составляют 7 % от всех радиоактивных отходов и имеет 4 % радиоактивности.

## Переработка отработанного топлива

*Необходимость переработки исчерпанного ядерного топлива вызывается с одной стороны возможностью регенерирования неиспользованного урана и плутония в отработанных тепловыделяющих элементах, а с другой - возможностью уменьшения количества высокоуровневых радиоактивных отходов.*

Переработка предотвращает излишний расход ценных ресурсов, потому что в своем большинстве отработанное топливо содержит до 1% делящегося изотопа U-235 и несколько меньшее количество плутония. Переработка позволяет повторять ядерный цикл в свежих тепловыделяющих элементах, сохраняя, таким образом, приблизительно, до 30 % естественного урана. Такое смешанное оксидное топливо - важный ресурс. Выделяемые при этом высокоуровневые отходы, преобразованные в компактные, устойчивые, неразрушимые твердые капсулы, более удобны для дальнейшего хранения, чем объемистые отработанные тепловыделяющие элементы.

На сегодняшний день более 75000 тонн отработанного ядерного топлива от гражданских энергетических реакторов уже подвергнуто повторной обработке, а ежегодный объем переработки составляет, примерно, 5000 тонн.

### Объемы переработки ядерного топлива в мире

Топливо легко-водных реакторов:	Франция, Ла Гаага	1600 тонн в год
	Великобритания, Селфилд	850
	Россия, Челябинск (Маяк)	400
	Япония	90
	<i>Всего</i>	<i>2940</i>
Другое ядерное топливо:	Великобритания, Селфилд	1500
	Франция, Марсель	400
	Индия	200
	<i>Всего</i>	<i>2100</i>
<b>Всего</b>		<b>5040</b>

Отработанные топливные сборки, удаленные из реактора, очень радиоактивны и выделяют тепло. Поэтому их помещают в большие резервуары, наполненные водой ("бассейны выдержки"), которая охлаждает их, а более чем трех метровый слой воды поглощает опасное излучение. В таком состоянии они остаются (непосредственно в реакторном отделении или на перерабатывающем заводе) в течение нескольких лет, пока уровень радиоактивности значительно уменьшится. Для большинства видов ядерного топлива, его переработка начинается, приблизительно, через пять лет после выгрузки из реактора.

Обычный легко-водный реактор мощностью 1000 МВт производит ежегодно, приблизительно, до 25 тонн исчерпанного топлива. После предварительного охлаждения оно может транспортироваться в специальных защитных контейнерах, которые вмещают лишь несколько (пять- шесть) тонн отработанного топлива, но сами весят до 100 тонн. Транспортировка отработанного топлива и других высокоуровневых отходов достаточно жестко регламентируется.

Переработка отработанного оксидного топлива начинается с растворения тепловыделяющих элементов в азотной кислоте. После этого производят химическое разделение урана и плутония. Pu и U могут быть возвращены к началу топливного цикла - уран на конверсионный завод для дообогащения, а плутоний непосредственно на



предприятия по изготовлению топлива. Остающаяся жидкость после удаления Pu и U представляет собой высокоуровневые отходы, содержащие, примерно, 3 % исчерпанного топлива. Радиоактивность этих отходов высока, и они продолжают производить много теплоты.

Активная переработка ядерного топлива началась примерно с 1940-ых годов, главным образом для регенерирования плутония для военных целей. В Великобритании, металлические тепловыделяющие элементы от коммерческих реакторов первого поколения с газовым охлаждением были повторно обработаны в Селфилде приблизительно 40 лет назад. За это время завод, перерабатывающий 1500 тонн в год, был значительно усовершенствован для поддержания должного уровня безопасности, гигиены и других регламентирующих стандартов. С 1969 по 1973 год на заводе также повторно обрабатывалось оксидное топливо на специально выделенном и модифицированном для этой цели участке. Новый завод по переработке оксидного топлива (THORP) мощностью 1200 тонн в год был построен в 1994 году.

В США по техническим и политическим причинам ни один завод в настоящее время работает. В свое время в этой стране были построены три завода по переработке исчерпанного оксидного топлива ядерных реакторов: первый завод мощностью 300 тонн в год был построен в Вест Уилле (штат Нью-Йорк), и успешно эксплуатировался с 1966 по 1972 год. Однако, все возрастающие регламентирующие требования и нормы сделали возможность модернизации завода экономически нецелесообразной, и завод был закрыт. Второй завод мощностью 300 тонн в год, основанный на использовании новых технологий, был сооружен в Моррисе (штате Иллинойс), работал некоторое время в "пилотном" режиме но не сумел выйти на промышленный уровень. Строительство третьего завода мощностью 1500 тонн в год в Барнуэлле (штат Южная Каролина) было прекращено в связи с изменениями в политике правительства США, исключающей с целью нераспространения ядерного оружия всякую гражданскую переработку отработанного ядерного топлива. Всего, начиная с 1940 года, США имеют эксплуатационный опыт работы по переработке отработанного топлива на правительственных оборонных предприятиях, насчитывающий более 250 заводов-лет.

Во Франции один завод мощностью 400 тонн в год по переработке металлического топлива от реакторов с газовым охлаждением работает в Марселе. В Ла Гааге с 1976 года производится переработка оксидного топлива, и в настоящее время здесь эксплуатируется два завода мощностью по 800 тонн в год. Индия имеет завод по переработке оксидного топлива с производительностью 100 тонн в год в Тарапуре, а также аналогичные заводы в Кальпакаме и Тромбе. Япония строит большой завод в Рокакошо, хотя большая часть исчерпанного топлива, повторно обрабатывается в Европе (что составляет всего 100 тонн в год). Россия имеет завод по переработке оксидного топлива в Челябинске мощностью 400 тонн в год.

После переработки восстановленный уран дообогащается и отправляется на предприятие по изготовлению свежего реакторного топлива. Плутоний же должен пройти технологический цикл по изготовлению смешанного оксидного топлива (МОХ-топлива) на специальном заводе, который часто интегрируется с перерабатывающим предприятием. Во Франции, например, для того чтобы избежать создания неиспользуемых запасов плутония, выход продукции перерабатывающего предприятия строго скоординирован с загрузкой мощностей завода по изготовлению МОХ-топлива. Если плутоний хранится в течение нескольких лет, то увеличивающийся в нем уровень содержания изотопа Америция-241 (используемого в бытовых датчиках задымления помещений), создаст трудности при производстве МОХ-топлива из-за повышения уровня гамма излучения.

### Объем производства смешанного оксидного топлива (т/год)

Год:	1998	2005
Бельгия и Франция	175	195
Япония	10	100
Россия	-	60
Великобритания	8	120
Всего для легко-водных реакторов	193	475

Новые заводы, предусмотренные к вводу в строй к 2005 году, находятся в стадии строительства. По прогнозам МАГАТЭ их мощность к 2005 году составит от 430 до 610 тонн в год.

### Высокоуровневые отходы после переработки

Несмотря на малые количества, высокоуровневая отходы, возникающие после переработки отработанного ядерного топлива, требуют большой осторожности в обращении, размещении и хранении, так как они содержат продукты деления и некоторые трансурановые элементы, активно испускающие альфа, бета и гамма-излучение, а также выделяющие много теплоты. Теплота выделяется, главным образом, от продуктов деления. Такие материалы обычно называют как "ядерные отходы".

Если учесть, что потребляемая мощность электроэнергии, произведенной на атомных электростанциях, в расчете на одного человека составляет, примерно, один киловатт (для жителей Западной Европы), то на каждого из нас ежегодно приходится, примерно, по 20 мл высокоуровневых отходов от переработки. После остекловывания или битумирования это количество занимает объем не более одного кубического сантиметра.

Следует отметить, что отходы от военных программ продолжают доминировать в таких странах как США и Россия на протяжении многих десятилетий, независимо от темпов развития гражданской ядерной энергетики. Это "наследство", возникшее с начала 1940-ых годов и приведшее к загрязнению поверхностных слоев земли, утечек из резервуаров для хранения и дорогостоящим мерам по реабилитации загрязненных территорий, создало проблемы тем странам, которые его и произвели.

Жидкие отходы, произведенные на перерабатывающих заводах, временно хранятся в охлаждаемых, многостенных резервуарах из нержавеющей стали, внутри железобетонных защитных корпусов. Их необходимо затем преобразовать в компактные, химически инертные твердые частицы перед окончательным захоронением. Достигается это с помощью процедуры, которая называется остекловывание. Использование, так называемого, Австралийского "синтетического камня" (**синрок**) является наилучшим способом для изоляции отходов, но это, однако, пока не получило широкого применения в гражданской ядерной энергетике.

Технологии на гражданских заводах по остекловыванию основаны на "кальцинировании" отходов (выпаривании до получения сухого порошка) с последующим перемешиванием в боросиликате. Расплавленная стеклянная масса, смешанная с сухими отходами, помещается в большие резервуары, изготовленные из нержавеющей стали и вмещающие до 400 кг продукта. Крышка резервуара надежно приваривается. Ежегодные отходы от эксплуатации одного реактора мощностью 1000 МВт содержатся в 5 тоннах такой стеклянной массы (это приблизительно двенадцать резервуаров высотой 1.3 метра каждый и диаметром 0.4 метра). В Великобритании, например, они хранятся в бункерах глубоко под землей в вертикальном положении. Описанные технологические процессы были разработаны и проверены на опытных заводах в 1960-ых годах. К 1966 году

несколько тонн высокоуровневых отходов от повторно обработанного топлива были остеклованы в Великобритании в Хоруилле, однако исследования были тогда приостановлены как неприоритетные из-за недостаточного количества высокоуровневых отходов. Высокотемпературные испытания остеклованной массы показали, что она остается нерастворимой даже в случае физического разрушения стекла. Подобные результаты были получены и на Французских предприятиях по остекловыванию отходов между 1969 и 1972 годами.

Остекловывание высокоуровневых радиоактивных отходов впервые получило индустриальные масштабы во Франции с 1978 года. Сегодня такие работы проводятся на пяти предприятиях в Бельгии, Франции и Великобритании с производительностью до 1000 тонн остеклованных отходов в год.

В 1996 году два подобных завода были открыты в США. Один, в Вест Уилле (штат Нью-Йорк), должен обрабатывать 2.2 миллиона литров высокоуровневых отходов от гражданских ядерных реакторов, накопившихся от переработанного ядерного топлива за 25 лет их работы, а другой - в Саванна Ривер, предназначен для остекловывания большого количества военных ядерных отходов.

Остеклованные отходы хранят в течение некоторого времени перед окончательным долговременным размещением, позволяя уменьшиться радиоактивности и выделяемой теплоте. Вообще говоря, чем дольше такой материал будет выдержан перед захоронением, тем меньше проблем с ним будет потом. В зависимости от используемых методов размещения, интервал между выгрузкой топлива из реактора и окончательным захоронением остеклованных отходов может составлять 50 лет.

Обработка таких материалов требует обязательного использования специальных мер, гарантирующих безопасность персонала. Как и во всех производствах, где присутствует гамма-излучение, самый простой и дешевый способ предохранения - это дистанция (увеличение расстояния до источника излучения в десять раз уменьшает экспозиционную дозу до одного процента).

Для транспортировки высокоуровневых отходов (или отработанных топливных сборок) используются специальные прочные контейнеры. Они разработаны таким образом, что выдерживают все возможные аварийные ситуации, сохраняют свою целостность и защищают от радиоактивного излучения. Высокие требования, предъявляемые к конструкциям таких контейнеров, делают практически невозможным их повреждение даже с использованием взрывчатых веществ и поэтому они совершенно непривлекательны для попыток террористического нападения.

## **Размещение и хранение отработанного топлива**

Принцип прямого захоронения отработанного ядерного топлива принят в США и Швеции, хотя в последнем случае предполагается его регенерация в будущем. С 1988 года Швеция имеет действующее централизованное хранилище для отработанного ядерного топлива (CLAB) емкостью 5000 тонн. Отработанное топливо отправляется на это хранилище после, примерно, их годичного хранения в реакторах в бассейнах выдержки.

В CLAB для охлаждения и защиты от ионизирующих излучений отработанное топливо будет храниться под водой в течение, примерно, сорока лет. К 2020 году это хранилище будет полностью заполнено, и к этому времени должно быть готово новое хранилище для окончательного захоронения, хотя уже сегодня строятся и несколько больше емкости.

В то время как выделенные высокоактивные отходы остекловывают для придания им физической устойчивости к разрушению, отработанное топливо, предназначенное для

прямого размещения и хранения, всегда изготавливается в очень устойчивой керамической форме  $UO_2$ . При непосредственной работе с отработанным ядерным топливом или извлекаемыми из него отходами, важная роль принадлежит степени их охлаждения и радиоактивного распада. Спустя сорок лет после выгрузки топлива из реактора, в нем остается менее одной тысячной доли начального уровня радиоактивности, и с таким материалом намного легче обращаться (см. Рисунок 6). Эта особенность отличает отходы атомной промышленности от химических отходов, которые всегда остаются опасными. Чем более длительному сроку хранения подвергаются отходы атомной промышленности, тем менее опасными они становятся, и тем более проще их подвергать последующей обработке.

**Рисунок 6. Уменьшение уровня радиоактивности продуктов деления в одной тонне отработанного ядерного топлива PWR реактора**



В США, например, все отработанное топливо хранится в месте расположения реактора и в настоящее время это является частью топливного цикла. В дальнейшем отработанное топливо перемещают из бассейнов выдержки или сухих хранилищ на государственные склады промежуточного хранения. Здесь отработанное топливо ожидает своего окончательного захоронения.

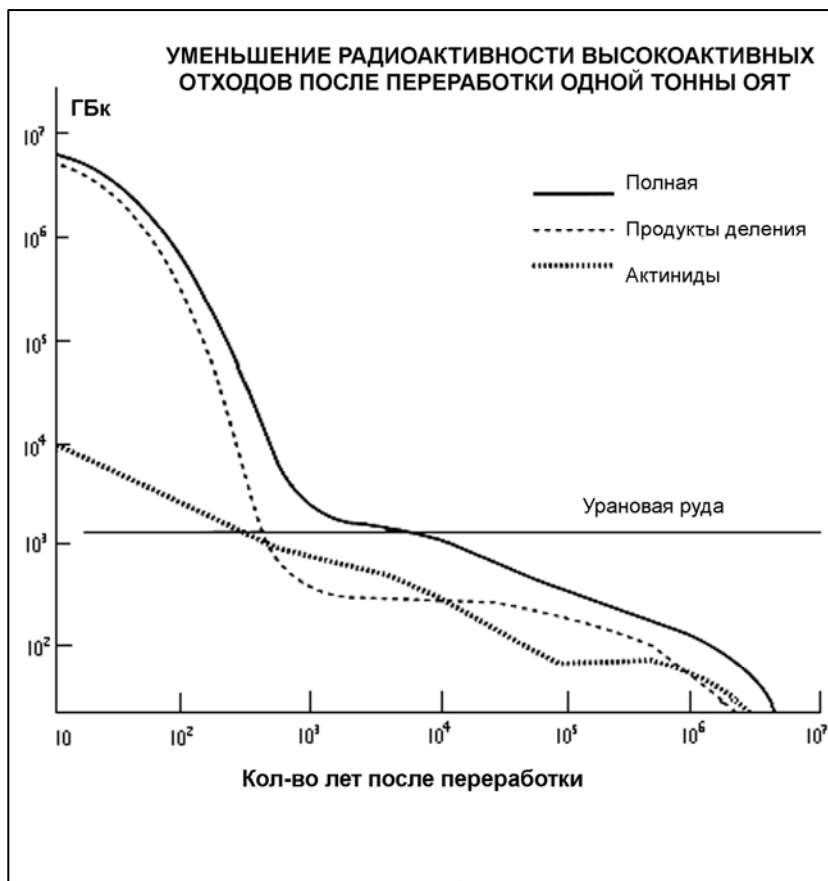
### **Размещение и хранение остеклованных отходов**

Независимо от того остеклованы ли высокоактивные отходы после переработки или они находятся в отработанных топливных сборках, с ними, в конечном счете, необходимо распорядиться самым безопасным образом. В дополнение к концепциям безопасности, применяемым к ядерному топливному циклу, это означает, что после

захоронения отходы не должны подвергаться каким-либо дополнительным процедурам. Хотя конечное размещение высокоактивных отходов не будет производиться еще в течение нескольких ближайших лет, но все приготовления уже сделаны с учетом природных условий хранения и количества таких отходов.

Комитет по управлению радиоактивными отходами при Агентстве по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) указал принципы геологического размещения радиоактивных отходов исходя из экологических и этических перспектив. При этом особенно подчеркивались интересы последующих поколений. В 1995 году Комитет установил *"что геологическая стратегия размещения отходов должна разрабатываться и осуществляться с учетом фундаментальных этических и экологических аспектов"*, и состоит в том, чтобы:

**Рисунок 7. Радиоактивность высокоактивных отходов, выделенных из одной тонны ядерного топлива для PWR реактора (приведено сравнение с активностью того количества руды, из которого эта тонна топлива была получена)**



*... "сбалансировано учитывая экологические и этические принципы, продолжать разработку геологических хранилищ для долгоживущих радиоактивных отходов, которые должны быть изолированы от биосферы в течение более нескольких сот лет", и ... постепенная "реализация схем геологического размещения отходов давала возможность их адаптации, в свете научного прогресса и развития социальной терпимости, в течение нескольких десятилетий, и не исключала бы возможности применения иных технологий, которые могли бы появиться на более поздних стадиях".*

Конечное размещение высокоактивных отходов должно осуществляться с очень высокими гарантиями безопасности. Вопрос в том, насколько мы можем быть уверены в долговременной безопасности, до того как это не предпринято в больших масштабах? Очевидно, что высокий уровень доверия может быть достигнут на основе продолжения тщательных научных и проектных исследований, которые осуществляются в настоящее время. Решаемые задачи при этом не являются ни очень большими, ни исключительно сложными.

***Во-первых, выделенные радиоактивные отходы (или отработанное ядерное топливо) находятся в устойчивой и нерастворимой форме. Во-вторых, они помещаются в массивные сосуды, изготовленные из нержавеющей стали, или коррозионно-стойкие резервуары (например, стальные или медные). В-третьих, они геологически изолируются.***

Степень опасности иллюстрируется на Рисунке 7 (подобная картина имеет место и для отработанного ядерного топлива). Из приведенных данных можно сделать два важных вывода. Первый состоит в том, что степень радиационной опасности уменьшается в тысячу раз за период времени от 10 до 1000 лет, с относительно небольшим последующим изменением. Это связано с тем, что почти все короткоживущие продукты деления распадаются за это время до незначительных концентраций.

Их концентрация становится меньше малых количеств очень тяжелых "трансурановых" элементов типа америция и нептуния, которые имеют намного большие периоды полураспада. Хотя промежуток времени в тысячу лет достаточно велик с точки зрения человеческой жизни, тем не менее, размещение таких материалов должно осуществляться в устойчивых геологических формированиях, где геологическое время становится более значимым фактором. Даже время, необходимое для распада плутония, мало по сравнению с геологическими масштабами времени.

Второй важный вывод, который следует из Рисунка 7, состоит в том, что относительная радиоактивность отходов по прошествию 1000 лет является почти такой же, как и активность соответствующего количества урановой руды. При этом, токсичные компоненты урановой руды, выходя на поверхность земли, попадают в человеческий организм через пищевые цепочки. Остеклованные же отходы, которые хранятся глубоко под землей (до километра ниже уровня моря), в устойчивых геологических образованиях, не имеют никакого мыслимого шанса попасть в организм человека. Это, однако, не означает, что поверхностные залежи урана опасны, поскольку количества, которые попадают в наш организм, очень малы.

Большинство стран, имеющих собственные ядерные программы, осуществляют активную работу, нацеленную на поиск и исследование соответствующих мест для размещения отходов. Цель этой работы состоит в том, чтобы найти такие места размещения, которые имели бы множество барьеров до среды обитания человека. Некоторые из барьеров, как естественные, так и искусственные, состоят в следующем:

- Нерастворимая форма отходов (стекло, "синрок").
- Герметичное хранение в коррозионно-стойких емкостях.
- Бетонирование отходов для исключения воздействия на них грунтовых вод и возможных разрушений при подвижках земной коры.
- Размещение глубоко под землей (на глубине более 500 метров) в стабильных геологических структурах.

Для возможного размещения отходов широко изучаются два типа геологических

пород - твердые кристаллические скальные породы и залежи каменной соли. Такие места имеются в нескольких странах, и в настоящее время осуществляется их детальная оценка. Большинство подходов предполагают использование обычной горнодобывающей техники для строительства соответствующих подземных шахт. Они должны иметь достаточно площади для размещения резервуаров в отделенных друг от друга полостях на различных уровнях или каким-либо иным способом. Задачи, которые решаются для выполнения такой работы, по существу технические. Существующая техника в горнодобывающей промышленности, методы инженерного проектирования вместе с контролем температурных режимов и напряжений грунта, обеспечивают выполнение подобных работ с очень высоким качеством, обеспечивающим требуемый уровень безопасности. Кроме того, инженерные и организационные задачи обеспечения эффективной изоляции опасных материалов не являются новыми.

Вопрос геологической стабильности земных пород очень важен для обеспечения долгосрочной целостности хранилища отходов. На земном шаре имеется множество геологических структур, которые устойчивы уже на протяжении более 4,5 миллиардов лет, и вероятность существенных смещений пород в течение периода хранения (а это более тысячи лет) в таких местах близка к нулю.

Хотя и предполагается, что глубокое геологическое размещение отходов атомной промышленности будет постоянным, тем не менее, при возникновении необходимости их восстановления и использования будущими поколениями нет принципиальных проблем для того, чтобы сделать это возможным.

Уместно сравнить токсичность отходов атомной промышленности с ядовитыми отходами и газами, возникающими на современных индустриальных предприятиях каждый день. Мышьяк, например, обычно распределяется в окружающей среде в составе гербицидов и в обработанной древесине. В отличие от отходов атомной промышленности он имеет бесконечный срок токсичности. Далее, барий и хлор, который достаточно широко используется. Учитывая их реальные количества, можно утверждать, что они представляют гораздо большую опасность, чем отходы атомной промышленности.

Хотя сегодня каждая страна ответственна за хранение и переработку своих собственных отходов всех видов, тем не менее, рассматривается возможность создания международного хранилища отходов атомной промышленности. В заключении можно с очевидностью отметить, что безопасное хранение радиоактивных отходов - это существующая норма, что технологии хранения хорошо разработаны, что затраты приемлемы и что полномасштабная демонстрация этого вскоре будет возможна в нескольких странах.

### **Природный аналог ядерного реактора в Окло**

Хотя высокоактивные отходы современной ядерной энергетики еще не хранились настолько долго, чтобы наблюдать результаты такого хранения, этот процесс фактически уже происходил в естественных условиях, по крайней мере, в одном месте на земном шаре. В местечке Окло в Габоне (на западе Африки), около двух миллиардов лет назад, по крайней мере, 17 естественных ядерных реакторов начали работать в богатой залежами урановой руды местности. Каждый из них имел, приблизительно, по 20 кВт тепловой мощности. В то время концентрация U-235 в естественном уране составляла, примерно, 3.7 % (вместо 0.7 % сегодня)\*.

\*U-235 распадается намного быстрее чем U-238, период полураспада которого, примерно, такой же, как и возраст нашей планеты.

Естественные цепные реакции, которые начались спонтанно благодаря присутствию воды, действующей как замедлитель, продолжались, приблизительно, два миллиона лет пока, наконец, не затухли. В течение этого времени в руде образовалось, приблизительно, 5.4 тонн продуктов деления, а также 1.5 тонны плутония вместе с другими трансурановыми элементами.

Радиоактивные продукты деления давно распались и превратились в стабильные элементы, а детальное изучение их количества и локализации показало, что имелось небольшое перемещение радиоактивных отходов, как в процессе, так и после прекращения ядерных реакций. Плутоний же и другие трансурановые элементы остались неподвижны. Это примечательно ввиду того, что грунтовые воды имели полный доступ к продуктам деления, а сами они не находились в химически инертной форме (т.е., говоря современным языком, не были остеклованы). Таким образом, продукты деления не перемещаются свободно в земной поверхности, даже в присутствии воды, из-за их адсорбции в глиняных породах.

Таким образом, единственное известное "испытание" подземного хранилища отходов атомной промышленности в Окло оказалось успешным, несмотря на неблагоприятные характеристики этого места. Хотя глинистые почвы и играют важную роль в удержании отходов, такое затопленное, с песчаной структурой грунта место, даже не рассматривалось бы для размещения на нем современного хранилища каких-либо токсичных и, тем более, ядерных отходов.

Однако, пример Окло побудил ученых более детально изучать поведение двуокиси урана в грунтовых водах вместе с другими химическими элементами, присутствующими в руде (которые не подвергаются расщеплению). Эти исследования помогут в оценке длительной безопасности хранилищ для высокоактивных отходов.

## **Ядерные материалы**

Наибольшее беспокойство с точки зрения увеличения запасов ядерного оружия возникает при непосредственном анализе материалов, с которыми обращаются предприятия ядерного топливного цикла. Это может быть, например, плутоний, содержащийся в отработанном ядерном топливе, которое каждый год заменяется на свежее в ядерных реакторах. Заметим, что для создания атомной бомбы достаточно лишь нескольких килограммов плутония. Более того, практически в каждом государстве имеется достаточное количество природных запасов урана для создания ядерного оружия.

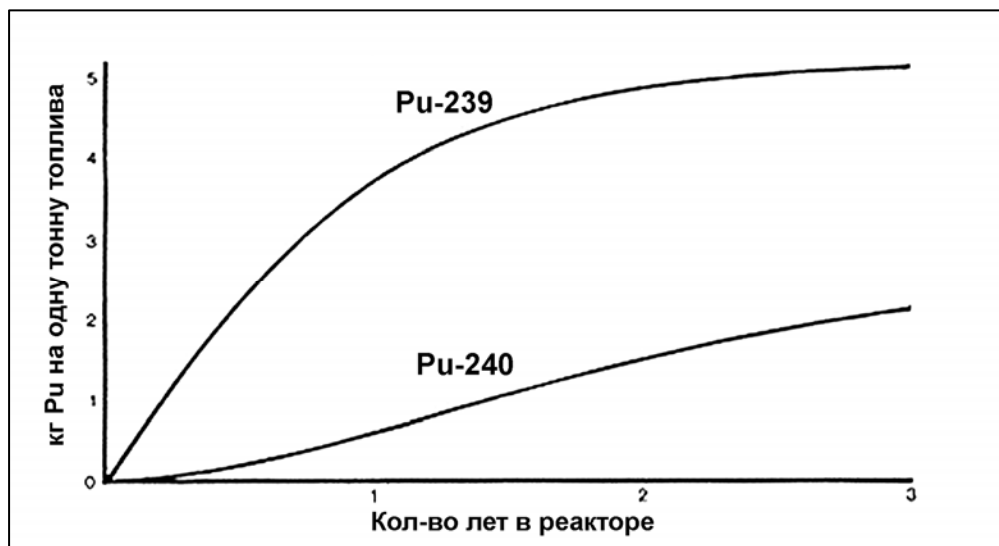
Плутоний - это вещество с многообразными свойствами, зависящими от источника его происхождения. Он существует в виде различных изотопов, таких как Pu-238, Pu-239, Pu-240, и Pu-241. Только изотопы Pu-239 и Pu-241 могут подвергаться реакции ядерного расщепления в реакторах. Плутоний -239 сам по себе является превосходным ядерным топливом и используется для создания ядерного оружия, поскольку имеет достаточно малую критическую массу и низкий коэффициент самопроизвольного распада. Поэтому плутоний -239 часто называют "оружейным плутонием". Он использовался в бомбе, сброшенной на город Нагасаки в 1945 году, и применяется в современном ядерном оружии.

Пригодный для использования в реакторах плутоний производится практически на всех ядерных реакторах и содержится в отработанном ядерном топливе, из которого он может быть выделен после специальной обработки. Этот плутоний не является в чистом виде оружейным. Он содержит до 40 % более тяжелых изотопов плутония (обычно это Pu-



240), которые накапливаются в топливных элементах в течение длительного времени (см. Рисунок 8).

**Рисунок 8. Накопление Pu-239 и Pu-240 в топливных элементах легко-водного реактора в течение 3 лет**



Данное обстоятельство практически не влияет на повторное использование плутония в смешанном оксидном топливе для реакторов (МОХ- топливо), но серьезно ограничивает его пригодность для создания ядерного оружия. Вследствие самопроизвольного распада Pu-240, только очень малое содержание этого материала может быть доступно для создания оружия. Конструкция ядерных устройств военного назначения, основанных использовании плутония, пригодного для использования в обычных реакторах, была бы ненадежна, трудна в изготовлении, и пока на практике не реализована. Однако, концепция международной ядерной безопасности предполагает, что оба вида плутония могут использоваться для создания оружия. Это является основанием для всеобщего запрета переработки и разделения любого плутония из отработанного ядерного топлива.

## Плутоний

**Образование:**  $U-238 + \text{нейтрон} \Rightarrow U-239 \Rightarrow Np-239 \Rightarrow Pu-239$

( Бета-распады U-239 и Np-239: период полураспада 23.5 минута и 2.35 дней, соответственно)

$Pu-239 + \text{нейтрон} \Rightarrow Pu-240$

$Pu-240 + \text{нейтрон} \Rightarrow Pu-241$

В среднем, одно из четырех поглощений нейтрона ядром Pu-239 приводит к образованию Pu-240. Изотопы Pu-241 и Pu-242 формируются при последующих процессах поглощения нейтронов в ядерном топливе. Изотоп Pu-239, содержащийся в облученном топливе в ядерном реакторе, выгорает также быстро, как и накапливается, а Pu-240 накапливается устойчиво. Очень малое количество Pu-238 формируются при поглощении нейтронов ядрами U-235.

**Количество:** Обычный реактор мощностью 1000 МВт производит приблизительно 250 кг плутония (в основном Pu-239) каждый год. Эти продукты содержатся в

высокоактивном отработанном ядерном топливе если оно повторно не обработано. Количество Pu-240 увеличивается с течением времени, пока тепловыделяющие элементы остаются в реакторе (см. Рисунок 8). Pu-240 не расщепляется в реакторе на тепловых нейтронах, но может стать расщепляющимся Pu-241 при дальнейшем поглощении нейтронов. (Pu-240 расщепляется в реакторах на быстрых нейтронах).

**Радиоактивность:** При распаде Pu-239 испускает альфа-частицы, и превращается в U-235. Период полураспада Pu-239 24390 лет, поэтому он имеет довольно низкий уровень радиоактивности. Pu-240 испускает при распаде альфа-частицы, и превращается в U-236 (другой неделяющийся изотоп урана). Его период полураспада - 6600 лет, поэтому он имеет более высокий уровень радиоактивности, чем Pu-239. Изотоп U-236 также испускает нейтроны при спонтанном распаде и превращается в Pu-238 с периодом полураспада 86 лет. Для обеспечения защиты от альфа-радиоактивности производится герметизация плутония от внешних контактов в специальных контейнерах.

**Использование:** Тепло, выделяющееся при радиоактивном распаде Pu-238 (0.56 Вт/г), позволяет использовать его как источник энергии в термо-электрических генераторах для кардиостимуляторов, космических спутников, навигационных маяков, и т.д. Энергия таких плутониевых источников дала, например, возможность космическому спутнику "Вояджер" посылать на Землю в течение длительного времени изображения планет. Pu-240 также может использоваться для решения подобных задач. В мирных целях изотоп Pu-239 используется в качестве топлива для ядерных реакторов. Изотоп Pu-241 (период полураспада 13 лет) после бета-распада превращается в Америций-241, который используется в качестве наполнителя в большинстве детекторов задымления.

Тип	Состав	Происхождение	Использование
Пригодный для использования в реакторах	55-60% Pu-239, более 19% Pu-240, примерно 30% нерасщепляющихся изотопов	Содержится в количестве, примерно, 1% в составе отработанного ядерного топлива в обычных гражданских реакторах	Как составная часть (5-7%) смешанного оксидного топлива (МОХ-топливо) для обычных реакторов. Как топливо для реакторов на быстрых нейтронах.
Оружейный	Pu-239 с содержанием менее 7% Pu-240	Производится на специальных реакторах военного назначения.	Для создания ядерного оружия. Может перерабатываться в топливо для реакторов на быстрых нейтронах или в МОХ-топливо

Следует отметить, что ядерный реактор, который использует смешанное МОХ-топливо, не является производителем плутония, а тот, который и появляется в топливе, еще менее пригоден для производства оружия, чем находящийся в свежем МОХ-топливе.

Коммерческий плутоний поэтому менее пригоден для военных целей, чем плутоний, произведенный на специальных реакторах, разработанных для производства Pu-239. Тем не менее, появление новых лазерных технологий обогащения делает возможным обогащение коммерческого плутония до уровня оружейного. Следовательно, меры международной ядерной безопасности должны быть направлены и на контроль за увеличением количества пригодного только для гражданских реакторов плутония. (Обычные методы обогащения не могут использоваться для разделения изотопов Pu-239 от Pu-240, так как массы атомов практически равны).

Топливный цикл в реакторах бридерах, основанный на использовании плутония, имеет некоторые особенности, которые могут способствовать его использованию в решении проблемы нераспространения ядерного оружия. С другой стороны, топливный цикл в обычных реакторах на тепловых нейтронах дает более высокий выход плутония. Это означает, что в обозримом будущем реакторы на быстрых нейтронах могли бы

использоваться как "установки для сжигания отходов", понижающих общее количество плутония, образующегося в отработанном ядерном топливе.

Существуют и другие ядерные материалы, которые могут использоваться для создания оружия, это - изотопы урана. Наиболее известный из них - это уран-235, материал, из которого была изготовлена бомба, сброшенная на город Хиросиму в 1945 году. Этот материал может производиться путем обогащения естественного урана на обогатительных заводах, но не до 3 - 4 %, как это требуется для топлива легко-водных реакторов, а до 93 % и выше по содержанию U-235.

Другой изотоп урана, пригодный для производства ядерного оружия, это - U-233. Этот материал накапливается в ядерном топливе при поглощении нейтронов торием -232, аналогично образованию Pu-239 из U-238. Однако, использование ториевых реакторов не продвинулось дальше экспериментальных исследований, а U-233 пока не рассматривается в контексте расширения ядерных вооружений.

Хотя все вышеупомянутые материалы и могут использоваться для производства взрывчатых веществ, они, тем не менее, не являются широко доступными для практического использования, а международные усилия делают их еще менее доступными.

### **Использование оружейного урана и плутония для производства электроэнергии**

По иронии судьбы международные усилия, направленные на ядерное разоружение, привели к некоторым серьезным проблемам безопасности в мире. Демонтаж ядерных боеголовок, в соответствии с соглашением о разоружении между США и Россией, привел к накоплению ядерных оружейных материалов (плутония и высокообогащенного урана). После распада Советского Союза возникли опасения возможного расхищения, контрабанды или незаконной торговли такими материалами, в результате чего они могли бы попасть в руки террористов или государств, уклоняющихся от выполнения режима нераспространения ядерного оружия. Ненадежный контроль оборота ядерных материалов внутри некоторых государств, размер их ядерных программ, и несоответствующая международным стандартам защита ядерных объектов - вот некоторые обстоятельства, которые могут способствовать попаданию ядерных технологий и материалов в преступные руки.

Совместные усилия многих государств в начале 1990-ых годов способствовали значительному усилению физической защиты таких материалов. Требования локализации и изоляции ядерных оружейных материалов (особенно плутония), которые более не требуются для военных целей, стали приоритетными для международного сообщества. МАГАТЭ использует и политические методы в контроле над использованием запасов оружейного плутония. Большие усилия предпринимаются в предохранении его от хищений, диверсий и в определении наиболее подходящих мест для его размещения\*.

\* Количество производимого пригодного для реакторов плутония из отработанного топлива в обычных гражданских реакторах, а это почти 100 тонн в год, значительно превышает количество оружейного плутония.

Перспектива использования оружейного плутония (содержащего более 93% Pu-239) в смешанном оксидном топливе (МОХ) для гражданских реакторов привлекает сегодня всеобщее внимание. Было бы вполне разумно производить МОХ-топливо с использованием смеси оружейного и пригодного для гражданских реакторов плутония. Это был бы, пожалуй, единственный способ его эффективной утилизации, который

постоянно бы удалял оружейный плутоний из оборота. В настоящее время прилагаются большие усилия по разработке такого "плутониевого цикла", а так называемый "Саммит восьмерки", в который входят страны Большой семерки и Россия, постоянно проводят консультации по этому вопросу.

*После трех десятилетий озабоченности возможностью использования в сфере вооружений урана, предназначенного для коммерческой ядерной энергетики, мы теперь становимся свидетелями того, как оружейный уран направляется на сугубо мирные цели для производства электроэнергии.*

### Список рекомендуемой литературы

1. **Uranium 1999: Resources, Production and Demand.** ("Red Book"), Joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Paris 2000, ISBN 92-64-17198-3
2. **Nuclear Power, Nuclear Fuel Cycle and Waste Management:** status and trends. Part C of IAEA Yearbook; International Atomic Energy Agency, Vienna 1994, ISBN 92-0-102494-0
3. **Radioactive Waste Management in Perspective.** OECD Nuclear Energy Agency, Paris 1996, ISBN 92-64 14692-X
4. **The Future of Nuclear Power.** Geoffrey Greenhalgh Graham and Trotman, London 1988, ISBN 0-86010-987-9
5. **Бейлин В.А., Боровик А.С., Малышевский В.С., Янчевский С.Н.** Ростовская атомная. Несекретные материалы. Ростов-на-Дону, Ростиздат.- 2001, 110 стр.
6. **Бейлин В.А., Боровик А.С., Малышевский В.С.** Радиация, жизнь, разум. Ростов-на-Дону, Ростиздат.- 2001, 112 стр.
7. **Преображенская Л.Б., Зарубин В.А., Никандорова А.В.** Популярно о ядерной энергетике. Москва. ИздатАТ - 1993, 48 стр.
8. **Международные оценки последствия аварии на Чернобыльской АЭС.** Отчет Научного комитета по действию атомной радиации ООН - 2000. Специальное приложение к журналу "Медицинская радиология и радиационная безопасность" - 2001, 29 стр
9. **Яворовский З.** Реалистическая оценка воздействия аварии на Чернобыльской АЭС на здоровье людей. Атомная энергия, том 86, вып. 2, 1999, стр. 140-150.
10. **Головченко П.К., Жарков А.В., Кормушкин Ю.П., Мустафинов Э.Н., Поваров В.П., Терещенко А.Б.** Оценка воздействия Ростовской АЭС на окружающую среду. Основные положения. Ростов-на-Дону, 1992, 88 стр.
11. **Внуков В.С., Рязанов Б.Г.** Проблемы и опыт обеспечения ядерной безопасности при хранении отработавшего топлива АЭС. Атомная энергия, том 91, вып. 4, 2001, стр. 263-272
12. **Атомная отрасль России. События. Взгляд в будущее.** М., Издат., 1998, 336 стр.
13. **Петросянц А.М.** Ядерная энергетика. М. Наука, 1981, 187 стр.