




ЯДЕРНЫЙ  
ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ -  
**ОТ РУДЫ К ОЯТ**



При реализации проекта используются средства государственной поддержки, выделенные в качестве гранта в соответствии с распоряжением Президента Российской Федерации от 30 июня 2007 года №367-рп.

Идея проекта: Фонд развития модульного обучения в Санкт-Петербурге (Проект Международной Организации Труда) – ПЕТЕРФОНД и Региональный центр общественной информации Росатома, функционирующий на базе НОУ ИДПО «АТОМПРОФ».



ЯДЕРНЫЙ  
ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ -  
**ОТ РУДЫ К ОЯТ**

## Введение

Сегодня, в условиях роста энергопотребления, повышения мировых цен на нефть и природный газ, сокращения собственного производства энергоресурсов для решения проблем, связанных с глобальным потеплением, ведущие страны мира всерьез задумываются о мерах по обеспечению своей энергетической и экологической безопасности. Атомная энергетика рассматривается многими странами как важная составляющая национальной безопасности и экономического развития.

Решение об активном развитии атомной энергетики приняла и Российская Федерация, имеющая огромный опыт не только в области эксплуатации атомных электростанций (АЭС), но и в сфере производства и переработки ядерного топлива. В конце 2006 г. Правительство РФ утвердило Федеральную целевую программу «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007-2010 годы и на перспективу до 2015 года», а 19 апреля 2007 года принят проект «Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики на период до 2020 года», который предусматривает масштабное строительство атомных станций в ближайшие 12 лет.

Атомная электростанция (как и любая другая) не может функционировать сама по себе, для её работы необходимы предприятия по добыче сырья и производству топлива. Кроме того, требует решения вопрос с образующимся на АЭС отработавшим ядерным топливом, которое в свою очередь нуждается в безопасной перевозке, хранении и переработке. Таким об-

разом, АЭС – это лишь одно из предприятий так называемого ядерного топливного цикла (ЯТЦ).

Россия является единственной страной в мире, которая реализует крупномасштабный ядерный топливный цикл в полном объеме. Остальные страны, обладающие ядерными технологиями, осуществляют отдельные этапы цикла, используя зарубежные технологии. К примеру, США, Франция и Великобритания закупают урановое сырье. Швеция, Испания, Германия и ряд других стран, кроме сырья, покупают еще и услуги по его обогащению. Российская Федерация не только реализует эти операции в полном объеме на своей территории, но и, например, продает ядерное топливо и услуги по обогащению урана другим странам. Ведущая роль нашей страны в мировой атомной энергетике была закреплена еще в 1950-х годах, когда в СССР появилась Первая в мире АЭС. И сегодня, в условиях мирового «ядерного ренессанса», колоссальный опыт России в ядерной сфере, новейшие технологии и установки, разработанные нашими учеными и внедренные на предприятиях ЯТЦ, вызывают повышенный интерес в мире.

Для детального знакомства с атомной промышленностью России этой брошюры, конечно, не хватит: мы остановимся только на основных этапах ядерного топливного цикла. Если же Ваш интерес не будет исчерпан приведенными сведениями, то рекомендуем обратиться к сети Интернет. Начните Ваше исследование атомного энергопромышленного комплекса России с сайта Государственной Корпорации по атомной энергии «Росатом» ([www.minatom.ru](http://www.minatom.ru)).

# Урановая руда

# 1

Не секрет, что атомные станции работают на уране. Но немногие знают, какой длинный путь проходит уран, прежде чем будет загружен в активную зону ядерного реактора.



Урановая руда

Как и любой другой химический элемент, **уран** присутствует в земной коре, входя в состав различных минералов. Их на сегодняшний день известно более 100, практический интерес представляют 12 из них, причем содержание урана в рудах колеблется от 0,1% и ниже (бедная руда) до 1% и выше (богатая руда). Основные месторождения урана сосредоточены в лидирующих по производству урана Канаде и Австралии. Наиболее перспективные месторождения урана вблизи границ нашей страны расположены в Казахстане, Узбекистане и на Украине. В России также имеются собственные месторождения (Читинская область, Якутия и др.), однако они лишь отчасти способны обеспечить развитие национальной атомной энергетики. Поэтому было заключено соглашение с Австралией о поставках урана, а также создано совместное предприятие с Казахстаном по добыче этого металла.

В состав руд обычно входит уран в форме разнообразных оксидов или солей, а также вмещающая порода - это могут быть карбонаты, силикаты, сульфиды, оксиды железа или каолиниты (органическая порода). Сами руды чаще всего залегают под землей, на большой глубине (порядка 1 км); практически все неглубокие рудные месторождения (150-350 м), допускающие карьерную разработку, уже использованы.



Кристаллы уранинита



Урановая руда

# Добыча руды

# 2

Уран добывают шахтным способом, если в крепких горных породах залегают достаточно выраженные рудные жилы.



Добыча руды в карьере



Погрузка в урановом карьере



Комбайн в шахте ППГХО

В этом случае бурится глубокая шахта, и руда добывается с помощью специальных машин, после чего доставляется на поверхность в виде крупных кусков. В России такой способ добычи применяется на «Приаргунском производственном горно-химическом объединении» (ППГХО, г. Краснокаменск, Читинской области). В случае, если урановые руды залегают неглубоко, то организуется их карьерная добыча.

Существует и более экологически чистый способ добычи урана. Специалисты просверливают скважину, ведущую в центр рудного тела, и несколько скважин по его периферии, а затем через центральную скважину подают **раствор серной кислоты** под давлением. Раствор, проходя через рудное тело, **выщелачивает из него уран** (и некоторые другие вещества) и из боковых скважин откачивается раствор, обогащенный ураном. При этом не нарушается состояние окружающей среды на поверхности, поскольку отсутствуют наземные хранилища рудных отвалов, а серная кислота на глубинах порядка 1 км не способна причинить вреда даже подземным водам.

Подземное выщелачивание урана также используется в России на предприятиях «Хиагда» (г. Чита) и «Далур» (Курганская область).



Урановый концентрат

Для этого руду (особенно бедную) сначала сортируют по радиоактивности (чем больше радиоактивность, тем больше урана в руде), затем дробят, а измельченную руду подвергают выщелачиванию растворами серной или азотной кислоты или карбоната натрия. Проводят этот процесс в специальных устройствах – автоклавах – при высокой температуре и давлении. Уран и некоторые другие компоненты руды переходят в раствор, а пустая порода остается в осадке. Затем целевой металл из раствора осаждают химическими реагентами и, таким образом, получают практически **чистые порошкообразные соединения урана**.

Впоследствии этот порошок необходимо растворить еще раз, чтобы при помощи специальных химических методов окончательно очистить уран от примесей, которые не должны попасть в реактор. Такой процесс называется **аффинажем** и является обязательной стадией производства ядерного топлива. В результате аффинажа **уран переходит в форму оксидов** и других соединений, которые используются в дальнейшем для производства металлического урана и гексафторида урана.

Измельчитель руды

Ядерный топливный цикл – от руды к ОЯТ

## Выделение урана из руды

# 3

В случае шахтной добычи получают достаточно крупные куски урановой руды. Далее необходимо отделить соединения урана от пустой породы.



Обогатительная фабрика



# Обогащение урана 4

Полученные чистые оксиды урана фторируют (эта операция носит название конверсии) с целью получения гексафторида урана  $UF_6$  – легколетучего кристаллического вещества.



Топливные таблетки



Цех сухой конверсии на Машиностроительном заводе



Центрифуги

**Гексафторид урана** является одним из самых важных в атомной энергетике, ведь именно с его помощью осуществляют обогащение урана по делящемуся **изотопу**  $^{235}U$ . Дело в том, что в природной смеси его очень мало – всего 0,71%, а остальное –  $^{238}U$ , который пока нельзя использовать на большинстве атомных электростанций. И это означает, что мы должны повысить содержание  $^{235}U$  в топливе, чтобы оно могло "работать" в реакторе. Здесь нам помогает гексафторид урана, легко переходящий в газообразное состояние уже при  $53^{\circ}C$ . Если этот газ поместить в быстро вращающуюся **центрифугу**, то гексафторид более тяжелого изотопа ( $^{238}U$ ) будет по инерции «отжиматься» к стенке, а гексафторид легкого изотопа – концентрироваться в центре.

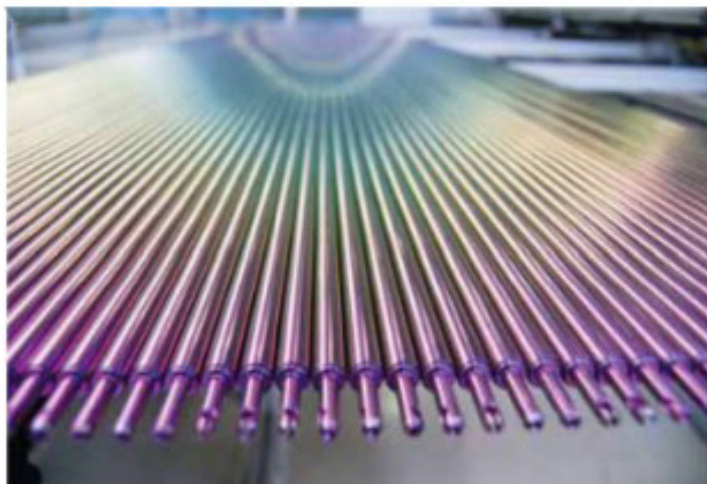
Подобные операции в России проводятся на «Уральском электрохимическом комбинате» (г. Новоуральск, Свердловской области), «Сибирском химическом комбинате» (ЗАО Северск, Томской области), «Ангарском электролизном химическом комбинате» (г. Ангарск, Иркутской области) и «Электрохимическом заводе» (г. Зеленогорск, Красноярского края). Количество центрифуг на таких заводах составляет многие десятки тысяч.

**Обогащенный уран** (содержащий 2,6 – 4,8%  $^{235}U$ ) переводят в форму чистого **диоксида  $UO_2$**  из которого методами порошковой металлургии прессуют топливные таблетки.



## Производство тепловыделяющих сборок (ТВС)

5



Комплекс электронно-лучевой сварки



Циркониевое производство на ЧМЗ



Стенд сварки каркаса ТВС

**Обогащенный уран** в форме  $UO_2$  при помощи методов порошковой металлургии прессуют в таблетки диаметром порядка 1 см и толщиной 1-1,5 см. Затем эти таблетки помещают внутрь тонкостенной трубки, выполненной из циркония (чрезвычайно стойкого к воздействию высоких температур и агрессивных сред материала), содержащего порядка 1% ниобия. Длина такой трубки, называемой **ТВЭЛОМ** (тепловыделяющим элементом), может составлять несколько метров (для современных реакторов ВВЭР - 3,5 м). Топлива в ней – более 1,5 кг. Затем несколько ТВЭЛОВ конструктивно объединяются в тепловыделяющую сборку (ТВС).

Производством ТВС в России занимаются «Машиностроительный завод» (г. Электросталь, Московской области) и «Новосибирский завод химконцентратов» (г. Новосибирск). Порошок диоксида урана ядерного керамического сорта для прессования таблеток изготавливают на «Химико-металлургическом заводе» (г. Красноярск, Красноярский край). Цирконий для изготовления ТВЭЛОВ производят на «Чепецком механическом заводе» (г. Глазов, Удмуртская республика) - единственном в России и одном из трех крупнейших производителей изделий из циркония и его сплавов в мире.

# Топливо в реакторе 6

Наконец, топливо попадает в реактор, где и «работает» несколько лет (для современных реакторов ВВЭР этот срок составляет 3 года и более, и называется топливной кампанией).



Загрузка топлива на АЭС Духованы, Чехия



АЭС, г.Тимелин, Чехия

В течение этого периода в топливе происходит ядерная реакция деления и выделяется тепло. Вода, циркулирующая через активную зону реактора (т.е. омывающая твэлы), нагревается до высокой температуры и контактирует в парогенераторе с водой второго контура, которая, в свою очередь, испаряется. Пар направляется на турбогенераторную установку и вращает ее – так происходит выработка электричества на АЭС.

В ходе «работы» топлива в таблетках диоксида урана накапливается плутоний и высокоактивные продукты деления, многие из которых являются ценными продуктами. По истечении кампании топливо выгружают из реактора в бассейн выдержки, заполненный водой, где оно постепенно остывает в течение 3-5 лет. Сразу после извлечения из реактора топливо как бы «выходит на пенсию» и получает наименование – отработавшее ядерное топливо (ОЯТ). Уран из ОЯТ может снова вернуться в реактор и будет «работать» повторно. ОЯТ имеет чрезвычайно высокую радиоактивность, и поэтому, все операции с ним проводятся при помощи автоматизированных систем, без участия человека.

В России на сегодняшний день эксплуатируются 10 АЭС (31 энергоблок), которые ежегодно вырабатывают около 158 млрд. кВт·ч электроэнергии и производят всего около 850 т ОЯТ.

# Перевозка ОЯТ

7



Судно для перевозки ОЯТ

После выдержки в бассейнах топливо железнодорожным транспортом перевозят на Производственное объединение «Маяк» (г. Озёрск, Челябинская область) или «Горно-химический комбинат» (г. Железнодорожск, Красноярского края), где его хранят или перерабатывают. Кроме того, ОЯТ может перевозиться морским и автомобильным транспортом.

Поскольку ОЯТ чрезвычайно опасно в отношении высокой радиоактивности, то его перед перевозкой помещают в специальные **транспортные упаковочные комплекты (ТУК)**, которые способны выдержать падение с высоты 10 м, падение на штырь, воздействие высокой температуры и затопление - без разгерметизации. Упаковочные комплекты очень надежны, но, тем не менее, для перевозки их по железной дороге разработаны специальные вагоны марки ТК, увеличивающие уровень безопасности перевозок. На всем пути вагон отслеживается со спутника, а также тщательно охраняется.

За всю 25-летнюю историю перевозок ОЯТ по железным дорогам России не произошло ни одной аварии со спецвагонами. Для террористов подобные перевозки также не имеют никакого интереса: взорвать вагон так, чтобы произошел выход радиоактивности, практически невозможно, а украсть контейнер с топливом, имеющий массу порядка 80-100 т – нереально.



Контейнер для перевозки ОЯТ ТУК120

# Хранение ОЯТ

# 8

После доставки ОЯТ в конечный пункт назначения его снова помещают в хранилище - для дальнейшего снижения уровня радиоактивности и тепловыделения.



Разгрузка ОЯТ с железнодорожной платформы

Это необходимый этап работы с топливом перед его отправкой на переработку, поскольку меньший уровень радиоактивности означает более высокую безопасность переработки ОЯТ.

Хранилище может представлять собой бассейн («мокрое хранилище»), заполненный водой и закрытый плитами, в котором располагается ОЯТ, а может быть и «сухим», в котором охлаждение осуществляется при помощи естественной циркуляции воздуха или охлаждающего газа (строительство хранилища такого типа завершается сейчас на «Горно-химическом комбинате», около г. Красноярск).

Все «мокрые» хранилища ОЯТ в России - это железобетонные конструкции, облицованные нержавеющей сталью. Топливо в них хранится либо на дне бассейна, либо подвешено на металлическом перекрытии. Сухое хранение отработанного ядерного топлива - альтернатива «мокрой» технологии, но не исключает предварительную выдержку топлива в воде для уменьшения уровня радиоактивности и снижения тепловыделения. При сухом хранении отсутствует охлаждающая вода, что исключает протечки радиоактивной воды, улучшаются условия хранения (поскольку вода является более агрессивной средой хранения по сравнению с воздухом и инертными газами), обеспечивающие целостность твэлов.

# Переработка ОЯТ

9

Как уже отмечалось, в ОЯТ содержится плутоний и некоторые другие, ценные для медицины, науки и производства, компоненты. Их необходимо извлечь из топлива, отделив попутно продукты деления (они переводятся в категорию радиоактивных отходов), а очищенный уран можно вернуть в цикл, изготовив из него свежее ядерное топливо.

Для переработки топлива ТВС разрезают на части и растворяют содержащееся в них топливо, которое затем проходит обработку с применением методов экстракции. В ходе процесса переработки ОЯТ от него отделяются продукты деления, выделяются ценные компоненты, а также происходит разделение урана и плутония.

В процессе переработки ОЯТ все операции проводятся автоматически или с помощью манипуляторов, а люди, управляющие процессом, отделены от топлива мощной стеной, обеспечивающей необходимую защиту. Контроль над операциями происходит с помощью специальных видеокамер или через толстые окна, изготовленные из свинцового стекла.

Переработка ОЯТ АЭС в нашей стране производится на предприятии «Маяк». Сейчас строится второй завод (РТ-2) на «Горно-химическом комбинате» (ГХК). По всей видимости, развитие атомной энергетики в России потребует строительства еще нескольких подобных заводов, которые будут обеспечивать потребности отрасли в переработке ОЯТ.

Производственное помещение ГХК



Общий вид «мокрого» хранилища ОЯТ



# Регенерированный уран

# 10

Остался всего один вопрос: для чего мы выделяли уран и плутоний из ОЯТ?



Изготовление порошка диоксида урана. Стадия 1



Изготовление порошка диоксида урана. Стадия 2

Ответ чрезвычайно прост – уран возвращается в ядерный топливный цикл в виде свежего топлива. Ведь после переработки уран теряет основную часть своей радиоактивности, становится практически безопасным и, значит, можно повторить (уже с его участием) все вышеописанные операции. Это вполне разумно, учитывая ограниченность запасов урана в России и на планете. По экспертным оценкам, разведанных руд урана хватит на 75-85 лет работы мировой атомной энергетики с учетом современных темпов ее роста.

Стоит ли беспокоиться о нехватке урана? Конечно, нет. Вспомните, что мы используем только  $^{235}\text{U}$ . Если же мы научимся использовать  $^{238}\text{U}$  – то наша энерговооруженность возрастет примерно в 100 раз, т.е. топлива хватит на 7500-8500 лет. Подобные исследования ведутся в мире довольно давно, но только в России длительно и успешно эксплуатируется реакторный блок, способный «сжигать»  $^{238}\text{U}$  (блок БН-600 Белоярской АЭС). Кроме того, в качестве топлива может использоваться  $^{232}\text{Th}$ , запасы которого превышают запасы урана в 3-5 раз. Так что проблем с топливом у нас не будет.

Что касается плутония, то его также можно использовать в качестве топлива, смешав оксид плутония с оксидом урана. Такое топливо применяется и носит название МОХ-топлива (сокращение от mixed-oxides, смешанные оксиды).

## Заключение

В завершение нашего краткого обзора хотелось бы еще раз остановиться на важной мысли: Россия – уникальная страна, полностью реализующая крупномасштабный ядерный топливный цикл. Причиной этому является не только богатство нашей страны природными ресурсами, но и колоссальный интеллектуальный потенциал нации, позволивший в кратчайшие сроки создать сложнейший, наукоемкий, высокотехнологичный производственный комплекс, именуемый атомной отраслью. Предыдущие поколения оставили нам ценное наследие, хороший задел для будущего развития, и только при соответствующем управлении и совершенствовании он обеспечит экономический рост России в будущем. И, возможно, именно Вам предстоит решать эту задачу.

Мы надеемся, что наша брошюра заинтересовала Вас и позволила ощутить масштабы текущей и предстоящей работы по развитию атомного энергопромышленного комплекса России. Это развитие потребует скоординированных усилий огромного количества самых разных специалистов: ученых, инженеров, конструкторов и технологов – математиков, физиков, химиков и биологов, материаловедов и строителей, металлургов, экономистов и менеджеров. Трудно перечислить все профессии, необходимые атомной отрасли. И если Вас не оставило равнодушным даже это краткое описание, то, может быть, именно Ваших умений и талантов не хватает для нового рывка в области мирного использования энергии атома.

Полезные ссылки:

Госкорпорация по атомной энергии «Росатом» [www.minatom.ru](http://www.minatom.ru)

Система контроля радиационной обстановки на предприятиях Росатома [www.russianatom.ru](http://www.russianatom.ru)

Корпорация «ТВЭЛ» (добыча урановой руды и производство топлива) [www.tvel.ru](http://www.tvel.ru)

Ангарский электролизный химический комбинат (обогащение урана) [www.aecc.ru](http://www.aecc.ru)

ОАО «Концерн «Энергоатом» (российские атомные электростанции) [www.rosenergoatom.ru](http://www.rosenergoatom.ru)

Производственное объединение «Маяк» (хранение и переработка ОЯТ) [www.po-mayak.ru](http://www.po-mayak.ru)

Региональный центр общественной информации (РЦОИ) Росатома на Северо-Западе

[www.atomprof.spb.ru](http://www.atomprof.spb.ru)

Автор-составитель – А.А. Акатов.

Дизайн – А.В. Буга.

Фотографии предоставлены - Корпорация «ТВЭЛ» ([www.tvel.ru](http://www.tvel.ru))

Свои предложения, замечания и пожелания направляйте, пожалуйста,  
в Фонд развития модульного обучения в Санкт-Петербурге (Проект Международной  
Организации Труда) – **ПЕТЕРФОНД** по тел.: (812) 394-51-70 и в

Региональный центр общественной информации Росатома по тел.: (812) 394-77-71

Адрес: 197348, Санкт-Петербург, ул. Аэродромная, д. 4, офис 308 А.