



Библиотека
Общественного совета
Госкорпорации «Росатом»



А.А. Акатов,
Ю.С. Коряковский

ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ: ПУТЬ УРАНА

АНО "Информационный центр атомной отрасли"

Москва

2012



Библиотечка
Общественного совета
Госкорпорации «Росатом»

УДК 621.039.1

ББК 31.4

А.А. Акатов, Ю.С. Коряковский

Ядерный топливный цикл: путь урана, М. : АНО «Информационный центр атомной отрасли», 2012. – 28 с.

Буклет посвящен вопросам производства, использования и переработки ядерного топлива.



www.osatom.ru

© АНО «Информационный центр атомной отрасли». 2012

© А.А. Акатов, Ю.С. Коряковский. 2012

Сегодня атомная энергетика рассматривается многими ведущими и активно развивающимися странами мира как важная составляющая национальной безопасности и экономического роста в условиях постоянного роста цен на энергоносители (нефть, газ, уголь и др.). Решение об активном развитии атомной энергетики приняла и Российская Федерация, имеющая огромный опыт не только в области эксплуатации атомных электростанций, но и в сфере производства и переработки ядерного топлива.

Естественно, что атомная электростанция (как и любая другая) не может работать сама по себе. Необходимы предприятия по добыче и фабрикации топлива. Кроме того, необходимо решать вопрос с образующимся отработавшим ядерным топливом, которое нуждается в безопасной перевозке, хранении и переработке. Таким образом, АЭС — это лишь одно из предприятий так называемого ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Россия является единственной страной в мире, которая реализует 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 зарубежным 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 Интернету. Начните Ваше исследование атомного энергопромышленного комплекса России с сайта Госкорпорации «Росатом» (www.rosatom.ru).

Но сначала — наш краткий обзор.

УРАНОВАЯ РУДА

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

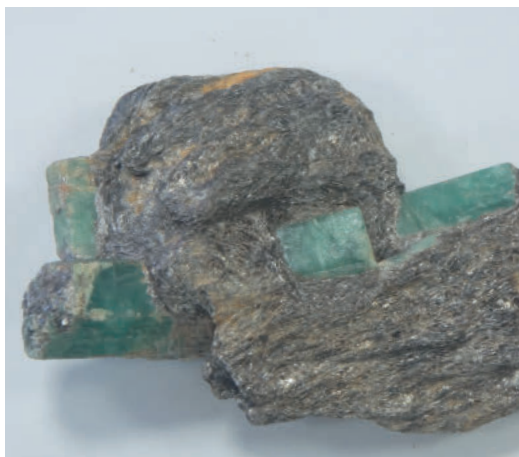
Как и любой другой химический элемент, уран присутствует в земной коре, входя в состав различных руд. Их на сегодняшний день известно около 100, практический интерес представляют 12 из них, причем содержание урана колеблется от 0,1% (бедная руда) до 1% и выше (богатая руда). Основные месторождения урана сосредоточены в лидирующей по производству урана Канаде, а также в Конго, США, Франции 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 наша страна заключила соглашение с Австралией о поставках урана, а также создала 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 каустоболиты (органическая порода).

Сами руды чаще всего залегают под землей, на большой глубине (порядка 1 км); практически



Уранинит с вкраплениями золота



Урановая руда



Раньше оксиды урана добавляли в стекло для придания ему окраски

все неглубокие рудные месторождения (150-350 м), допускающие карьерную разработку, уже использованы.

Итак, проблема поставлена: нам нужен уран, то есть его необходимо достать из-под земли и очистить от пустой породы. Как же это делают?

ДОБЫЧА РУДЫ

Уран добывают шахтным способом, если в крепких горных породах залегают достаточно выраженные рудные жилы. 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» (г. Краснокаменск, Читинской области).

Существует и более экологически чистый способ добычи урана. 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 отходов, 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» (Республика Бурятия) и «Далур» (Курганская область).



Карьер, в котором добывали урановую руду



В урановой шахте



Для выщелачивания урана из руды - и на земле, и под землей - используются растворы серной кислоты

ВЫДЕЛЕНИЕ УРАНА ИЗ РУДЫ

В случае шахтной добычи мы получили достаточно крупные куски урановой руды. И теперь нам необходимо отделить соединения урана от пустой породы. 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 в ходе выщелачивания переходит в раствор, а пустая порода остается в осадке. Затем целевой металл из раствора осаждают химическими реагентами и, таким образом, получают практически чистые соединения урана.

Однако впоследствии этот порошок необходимо растворить еще раз, чтобы при помощи специальных химических методов окончательно очистить уран от примесей, которые не должны попасть в реактор. Этот процесс называется аффинажем и является обязательной стадией производства ядерного топлива. В результате аффинажа уран переходит в форму оксидов.

Все эти операции производятся по месту добычи руды.



Работа с растворами урана



Для измельчения руды используют шаровые мельницы



Желтый кек (закись-окись урана) направляют на дальнейшую переработку

ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА

Полученные чистые оксиды урана фторируют (эта операция носит название конверсии) с целью получения гексафторида урана UF_6 – легколетучего кристаллического вещества. Это соединение 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 наших атомных электростанций (АЭС). 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 более тяжелый изотоп (^{238}U) будет по инерции «отжиматься» к стенке, а легкий – концентрироваться в центре.

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

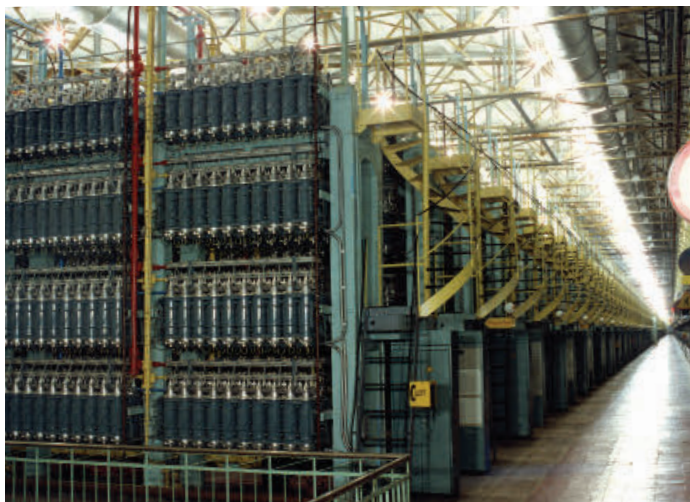
Обогащенный уран (содержащий 2,6 – 4,8% ^{235}U) переводят в форму чистого диоксида UO_2 .



Промплощадка комбината по обогащению урана (Ангарский электролизный химический комбинат)



Емкость
с гексафторидом урана



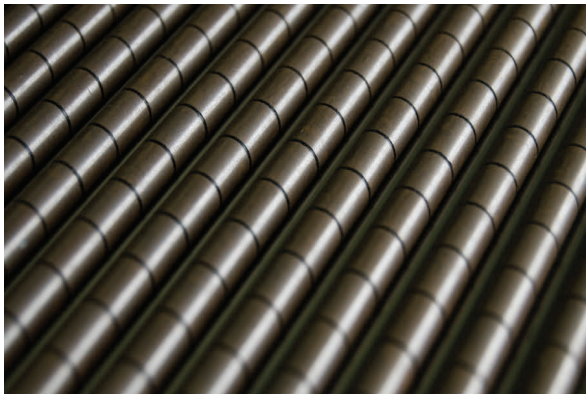
Каскад центрифуг для обогащения урана

ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК (ТВС)

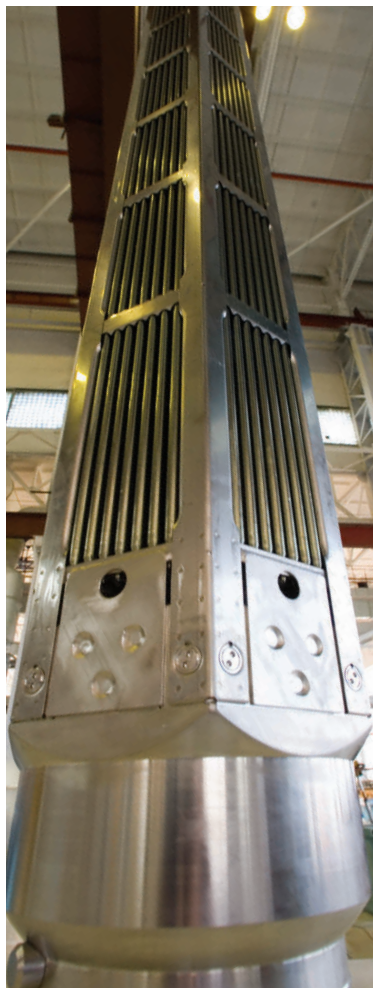
Обогащенный уран в форме UO_2 при помощи методов порошковой металлургии прессуют в таблетки диаметром порядка 1 см и толщиной 1-1,5 см. Затем эти таблетки помещают внутрь тонкостенной трубки, выполненной из циркония (чрезвычайно стойкого к воздействию высоких температур и агрессивных сред материала), содержащего порядка 1% ниобия. Длина такой трубки, называемой твэлом (тепловыделяющим элементом), составляет несколько метров (для современных реакторов ВВЭР - 3,5 м). Топлива в ней – более 1,5 кг. Затем несколько твэлов конструктивно объединяются в тепловыделяющую сборку. Производством ТВС в России занимаются: «Машиностроительный завод» (г. Электросталь, Московской области) и «Новосибирский завод химконцентратов» (г. Новосибирск). Цирконий для изготовления твэлов производят на «Чепецком механическом заводе» (г. Глазов, Удмуртская республика) – единственном в России и одном из трех крупнейших мировых производителей изделий из циркония и его сплавов.



Производство циркония



Ряды таблеток ядерного топлива



Тепловыделяющая сборка

ТОПЛИВО В РЕАКТОРЕ

Наконец, топливо попадает в реактор, где и «работает» несколько лет (для современных реакторов ВВЭР этот срок составляет 3 года и называется топливной кампанией). 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 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). Нельзя, однако, проводить прямые аналогии с человеческой пенсией: как мы с Вами позже увидим, уран из ОЯТ может снова вернуться в реактор и будет «работать» повторно.

ОЯТ имеет высокую степень радиоактивности, и поэтому все операции с ним проводятся при помощи автоматизированных систем, без участия человека.

В России на сегодняшний день работают 10 АЭС (33 энергоблока), которые ежегодно вырабатывают около 172 млрд. кВт·ч электроэнергии и производят всего около 850 т ОЯТ/год.



В реакторах атомного ледокола тоже используется ядерное топливо



Балаковская АЭС



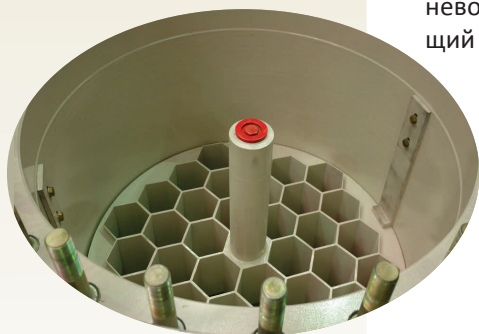
Блочный щит управления АЭС

ПЕРЕВОЗКА ОЯТ

После выдержки в бассейнах топливо перевозят на «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск Красноярского края), где его хранят и планируют перерабатывать.

Поскольку ОЯТ имеет высокую степень 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 (транспортный контейнер), увеличивающие уровень безопасности перевозок. На всем пути вагон отслеживается со спутника, а также охраняется на земле.

За всю 30-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 85 т – нереально.



**Транспортный
упаковочный комплект
для перевозки ОЯТ**

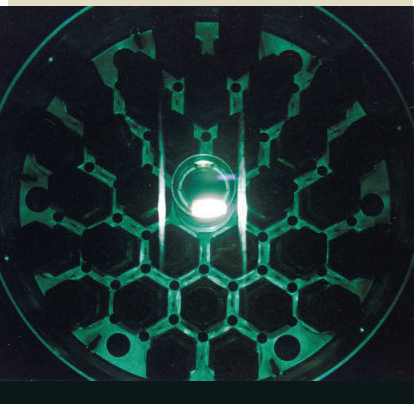


ОЯТ можно перевозить и на специальных судах (Россита)

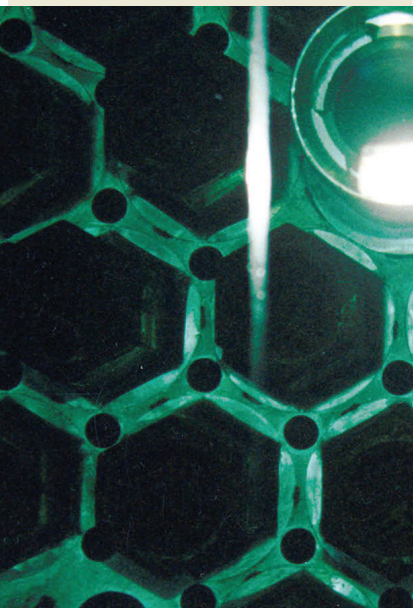


Спецвагон для перевозки ОЯТ

ХРАНЕНИЕ ОЯТ



ОЯТ под слоем воды
в бассейне выдержки



После доставки ОЯТ в конечный пункт назначения его снова помещают в хранилище – для дальнейшего снижения уровня радиоактивности и тепловыделения. 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, заполненный водой и закрытый плитой, в котором располагается ОЯТ, а может быть и сухим, в котором охлаждение осуществляется при помощи естественной циркуляции воздуха (строительство первой очереди хранилища такого типа уже завершено на «Горно-химическом комбинате»). Все «мокрые» хранилища ОЯТ в России – это железобетонные конструкции, облицованные нержавеющей сталью. Топливо в них хранится либо на дне бассейна, или 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), обеспечивается целостность ТВЭЛОВ.

Хранилища ОЯТ располагаются на закрытых охраняемых территориях.



Сухое хранилище ОЯТ на Горно-химическом комбинате



Зал мокрого хранилища ОЯТ на ГХК

ПЕРЕРАБОТКА ОЯТ



Фасад
опытно-демонстрационного
центра переработки
ОЯТ (ГХК)

Как уже говорилось, 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.

С этой целью ТВС разрезают на части и растворяют содержащееся в них топливо, которое затем проходит обработку с применением методов экстракции. В ходе процесса переработки ОЯТ происходит разделение изотопов урана и плутония, а также выделение ценных компонентов, пригодных для дальнейшего использования.

Естественно, что все операции проводятся автоматически и с помощью манипуляторов, а люди, управляющие процессом, отделены от топлива мощной стеной, обеспечивающей необходимую защиту. Они могут следить за операциями при помощи специальных камер или через толстые окна, изготовленные из свинцового стекла.

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



Работа с ОЯТ ведется только за защитой с помощью манипуляторов



Центральный пульт управления переработкой ОЯТ

РЕГЕНЕРИРОВАННЫЙ УРАН



Таблетки ядерного топлива
(диоксид урана)

Остался всего один вопрос: для чего мы выделяли уран и плутоний из ОЯТ? 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}U . Если же мы научимся использовать ^{238}U — то наша энерговооруженность возрастет примерно в 100 раз, то есть топлива хватит почти на десять тысяч лет. Подобные исследования ведутся в мире довольно давно, но только в России длительно и успешно эксплуатируется блок, способный «сжигать» ^{238}U (блок БН-600 Белоярской АЭС). 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).



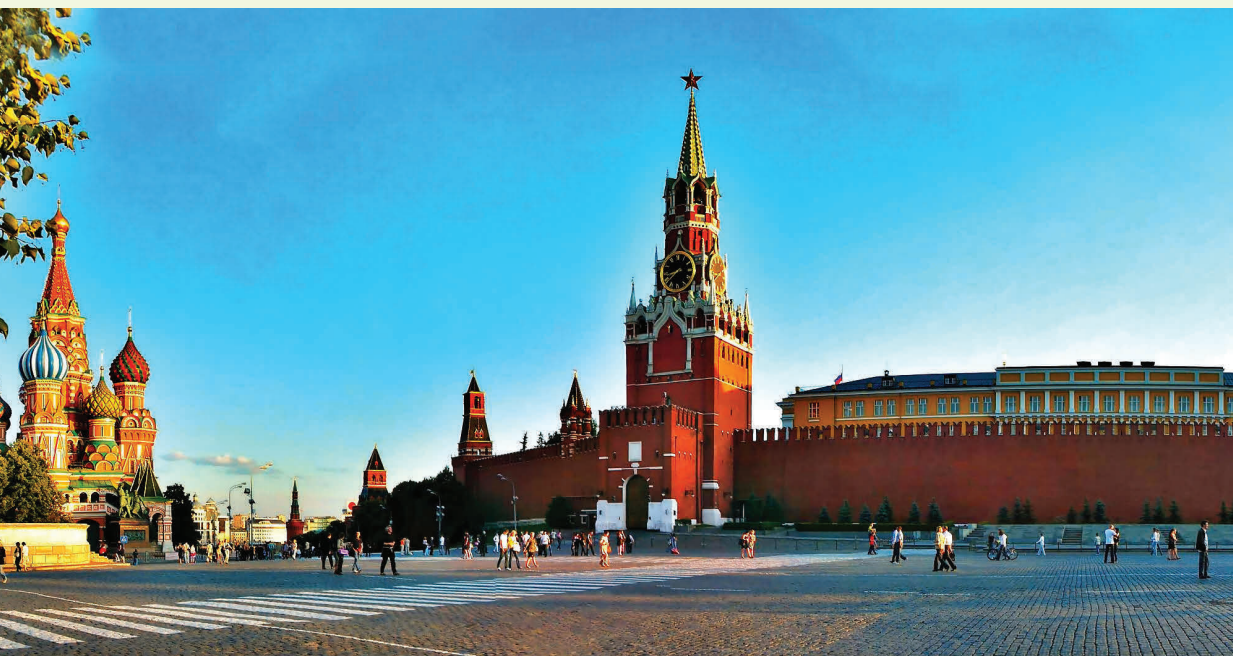
Изготовление порошка диоксида уран



Цех производства топливных таблеток на НЗХК

З А К Л Ю Ч Е Н И Е

В завершение нашего краткого обзора хотелось бы еще раз остановиться на важной мысли: Россия – уникальная страна, полностью реализующая 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. Предыдущие поколения оставили нам ценное наследство, 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 приведенные сведения заинтересовали вас и позволили 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.







Интернет - ссылки

Госкорпорация «Росатом»	www.rosatom.ru
Система контроля радиационной обстановки на предприятиях Росатома	www.russianatom.ru
Урановый холдинг «АРМЗ» – ОАО «Атомредметзолото» (добыча урановой руды, производство соединений урана)	www.armz.ru
Топливная компания Росатома – ОАО «ТВЭЛ» (обогащение урана, разработка, производство и реализация ядерного топлива)	www.tvcl.ru
ОАО «Концерн Росэнергоатом» (российские атомные электростанции)	www.rosenergoatom.ru
ФГУП «Производственное объединение «Маяк» (обращение с ОЯТ)	www.po-mayak.ru
ФГУП «Горно-химический комбинат» (обращение с ОЯТ)	www.sibghk.ru