

УДК 621.311.2 : 532

О.С. ГРИГОРЬЕВА

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков, Украина, e-mail: Olga\_Grigoreva@ukr.net*

### **ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ**

Розглянуто стан атомної промисловості у світі. Показано переваги використання уран-торієвого паливного циклу й недоліки сучасного уран-плутонієвого, а також переваги атомної енергетики в цілому перед іншими видами виробництва енергії. Показано стан атомної промисловості України й напрямки її розвитку.

The state of atomic industry is considered in the world. Advantages of the use of uran-torievogo of fuel cycle and lacks of modern uran-plutonievo, and also advantages of atomic energy, are rotined on the whole before other types of production of energy. The state of atomic industry of Ukraine and direction of its development is rotined.

В XXI веке к атомной энергетике предъявляются 5 основных требований: безопасность, утилизация плутония и недопущение его распространения, топливообеспечение, переработка и захоронение РАО, экономичность, конкурентоспособность.

Триединство качеств ядерной энергетике: огромный энергоресурсный (теплотворная способность ядерного топлива в 2–3 млн. раз больше, чем у традиционных видов), энергоэкономический (экономические показатели не зависят от места расположения) и энергоэкологический (отсутствие вредных выбросов) потенциалы, позволит выполнить эти основные требования.

В настоящее время атомная энергетика сохраняет свои позиции, как один из основных мировых источников энергии.

На атомную энергию приходится 6 % мирового топливно-энергетического баланса и 17 % производимой электрической энергии.

Атомная энергетика наработала уже более 10000 реакторо-лет, из них 7000 без крупных аварий после апреля 1986 года.

В 2006 году в 30 странах мира действовало более 442 энергоблоков, в стадии строительства находится около 35 энергоблоков. Мощность ядерно-энергетических источников может вырасти к 2020 году в два раза и к 2050 году в 4 раза. В ряде стран ядерная энергетика занимает доминирующее положение, вырабатывая свыше половины необходимой электроэнергии. К таким странам относится и Украина (52,1 %).

В мире существуют два вида ядерного топливного цикла (рис. 1): закрытый и открытый. В соответствии с ними есть два подхода к обращению с ОЯТ. При закрытом цикле ОЯТ поступает на переработку с извлечением урана, плутония и других ценных компонентов и возвращением их в ядерный цикл. При открытом цикле осуществляется, длительное хранение ОЯТ с его последующим захоронением без переработки.

Захоронение пока не производится ни в одной стране мира. С одной стороны, обоснование безопасности захоронения на десятки тысяч лет требует проведения масштабных исследовательских работ. Это детальные исследования геологической среды выбранного полигона для захоронения, надежности физических барьеров и т.д. С другой стороны, не все убеждены в целесообразности захоронения ОЯТ, предполагая, что через определенное время ОЯТ может быть выгодно переработано. По этой причине создаются долговременные хранилища, где ОЯТ будет находиться в

течение нескольких десятков лет до принятия решения об его окончательном захоронении или переработке.

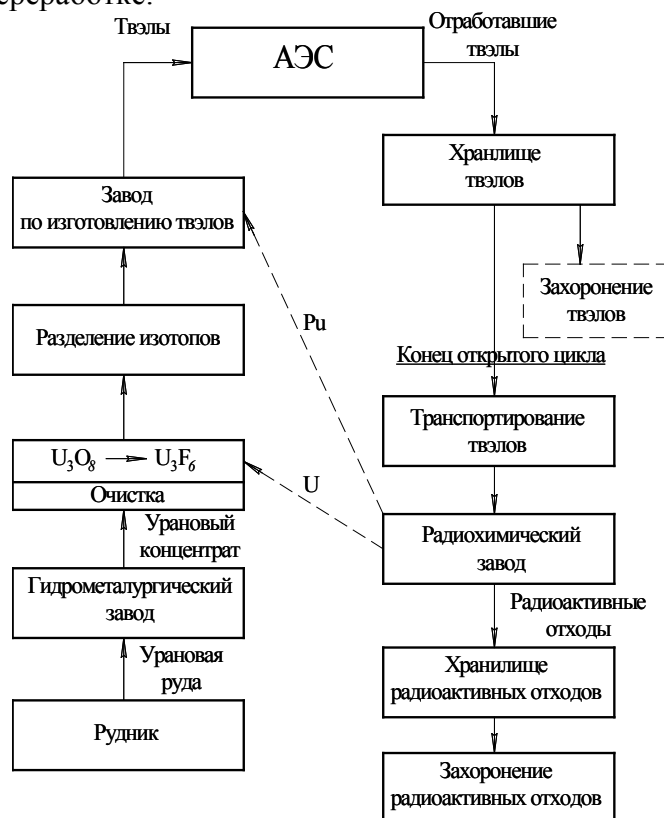


Рис. 1. Схема типичных открытого и замкнутого (с рециклом U и Pu) ЯТЦ для АЭС с реактором на тепловых нейтронах

В настоящее время основными ядерными изотопами, используемыми или предполагаемыми для широкого использования в ядерных энергетических установках (ЯЭУ), являются U-235, U-233, Pu-239, Th-232. Именно они и легли в основу классификации ядерных топливных циклов по изотопам, из них основными являются уран-плутониевый и уран-ториевый [1]. Первый основывается на реакциях деления урана-235 и синтеза делящегося плутония-239 из урана-238, а второй – на делении урана-233 (на старте используется уран-235) и синтезе делящегося изотопа урана-233 из тория-232 в реакциях с нейтронами:

В природном уране всего 0,7 % делящегося урана-235, дающего избыток нейтронов для цепной реакции. Если бы не возможности появления новых делящихся изотопов в приведенных выше реакциях, то большую ядерную энергетику из-за 0,7 % природного урана-235, который извлекается в процессе обогащения топлива, не стоило бы и начинать.

Урана на Земле немало (в земной коре его  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$  %). И хотя промышленных месторождений сравнительно немного, это не так уж и важно, поскольку можно строить реакторы-размножители, которые эффективно переводят неделящийся уран-238 в делящийся плутоний-239, и тогда может быть использован весь уран (а не только делящийся уран-235), которого хватит надолго. А там, на подходе будет термоядерная энергетика с практически неограниченным ресурсом.

По этой причине развитие ядерной энергетики пошло по линии уже освоенного оборонной промышленностью уран-плутониевого цикла с использованием простых и удобных в эксплуатации твердопливных реакторов с водяным охлаждением,

несмотря на то, что в 50–60-х годах были выполнены многообещающие заделы по уран-ториевому циклу.

Использование уран-плутониевого цикла в современных энергетических реакторах тянет за собой пока нерешенную проблему обращения с радиоактивными отходами [2]. Если не предусматривать расходов на обращение с ОЯТ, то стоимость ядерной электроэнергии может быть сопоставима со стоимостью энергии от сжигания органического топлива. Но бесконечно этого делать нельзя, и тогда расходам на производство энергии атомными станциями пойдет уже другой счет, поскольку придется выкладывать большие средства на обезвреживание отходов.

Самый трудный вопрос, что делать с актинидами (неделяющимися изотопами плутония, нептунием, америцием и кюрием), которые в больших количествах нарабатываются в современных энергетических реакторах уран-плутониевого цикла [3]. Они представляют самую большую опасность, поскольку чрезвычайно ядовиты, выделяют много энергии и долго живут. Захоранивать их с гарантией надежности на геологические времена (миллионы лет) практически невозможно, а трансмутировать очень дорого (нужно строить специальные реакторы или ускорители и периодически проводить дорогие химические переделы высокоактивных продуктов).

Наконец, запасы промышленных руд урана не бесконечны. Что касается Украины, то согласно последней информации (июнь 2006 г.) разведанных с невысокой ценой урановых руд хватит на 50 лет при том крайне расточительном расходовании его в существующих ЛВР-реакторах. Большие надежды возлагались в уран-плутониевом цикле на реакторы на быстрых нейтронах, которые, казалось бы, позволяют включить в энергетику почти весь уран, переводя его в плутоний-239. В этих же реакторах возможно дожигание актинидов. Стоимости сооружения такого типа реакторов прогнозировались не выше стоимости реакторов на тепловых нейтронах [1].

Сейчас общая установленная мощность всех АЭС около 370 ГВт, а из крупных энергетических реакторов на быстрых нейтронах работает сейчас только один – БН-600 в России (Суперфеникс во Франции и Мондзю в Японии остановлены из-за нескольких опасных ситуаций, которые возникали при их эксплуатации). Варианты предлагаемых быстрых реакторов, особенно без использования воспроизводящей плутоний стенки, делает бесперспективным развитие ядерной энергетики. Именно этим и обусловлено резкое замедление роста числа АЭС [1].

Все указанные проблемы в принципе решаются при переходе на уран-ториевый топливный цикл в безтвэльных реакторах. Если коротко, то такой реактор имеет низкий запас реактивности (обусловленный возможностью непрерывной дозированной добавки топлива, а также его очисткой от осколочных элементов-поглотителей нейтронов в ходе эксплуатации контура) и отрицательный температурный коэффициент реактивности, что полностью обеспечивает ядерную безопасность. Далее в ходе функционирования уран-ториевого реактора, наряду с синтезом урана-233, сразу по нескольким каналам идет синтез небольших количеств урана-232.

За время эксплуатации уран-ториевого реактора в нем нарабатывается в 105 раз меньше изотопов трансурановых элементов, чем в аналогичном по мощности уран-плутониевом реакторе. Это обстоятельство переводит проблему обращения с радиоактивными отходами уже в практическую плоскость, поскольку для малых количеств трансурановых элементов организация их трансмутации не будет разорительной.

Кроме того, в схемах ЖСР и ГЖБР [4–6] реализуется непрерывная очистка расплава от основных осколочных элементов-поглотителей нейтронов, а выделяемые осколки (газообразные и твердые) прямо в ходе эксплуатации реактора разделяются на

фракции, удобные для организации последующего хранения или захоронения тут же. За исключением наиболее значимых долгоживущих осколочных изотопов иода-129 и технеция-99, хранение остальных осколков (до их распада) должно длиться не более 1000 лет. Достижение надежной изоляции РАО на такой срок представляется уже достаточно реалистичным. Так, вес осколочных продуктов реактора тепловой мощностью 300 МВт при кампании 50 лет составит примерно 5,5 т, а при средней плотности 2,7 т/м<sup>3</sup> они займут объем примерно 2,0 м<sup>3</sup>, и легко могут быть размещены по соседству с собственно реактором.

Наконец, запасов тория в природе, пригодных для промышленной добычи, гораздо больше, чем запасов урана (например, монацитовые пески с содержанием тория от 3 до 10 %, образующие большие залежи).

Эти запасы тория способны обеспечить выработку тепловой энергии, достаточной для эксплуатации атомных станций суммарной электрической мощностью около 1000 ГВт в течение 1000 лет.

Следует отметить, что рабочие кампании ЖСР и ГЖБР предполагаются гораздо более длительными, чем кампании реакторов на твердом топливе – до 50 и более лет [1, 4, 5]. Для восполнения сгорающего урана-233 в солевой расплав ЖСР будут периодически добавляться порции тетрафторида тория-232, а в расплав свинца ГЖБР металлического тория-232, которые практически при коэффициенте воспроизводства в этих реакторах близких к 1, превратившись в уран-233, сгорают, не требуя какой либо переработки ОЯТ с его извлечением из реактора. Эта особенность атомных станций делает их практически независимыми от процедур оперативной доставки топлива, что кардинально повышает энергетическую безопасность регионов их размещения.

В ГИ ВНИПИЭТ в 90-х годах прошлого века были выполнены изыскания по сопоставлению экономической эффективности уран-ториевого и уран-плутониевого топливных циклов, которые убедительно свидетельствуют о больших преимуществах первого из них.

Из сказанного вытекает, что по совокупности ключевых параметров уран-ториевый топливный цикл, в отличие от уран-плутониевого цикла, в принципе может удовлетворить потребности человечества в «чистой» энергии на современном этапе его развития, поскольку вписывается в указанные выше главные ограничения. Поэтому задача практического воплощения этого цикла в жизнь достойна стать научной и инженерной целью отрасли на ближайшую перспективу [1, 4, 5].

Следует отметить, что в такого типа реакторах могут использоваться в стартовой загрузке не только уран-235, но и плутоний (причём, даже из ЛВР и с малыми актинидами) ибо за 50 лет кампании от них не останется и следов.

Поскольку в ЖСР и в ГЖБР отсутствуют матрица и оболочка ТВЭЛа, используемые в качестве привычных барьеров для удержания осколочной активности топливных загрузок ЛВР, их роль выполняют дополнительные защитные выгородки и ограждения. Для гарантий их полной сохранности при различного рода отказах, а главное – при внешних экстремальных природных и техногенных воздействиях (землетрясениях, атаках любых современных самолетов, взрывах ВВ у границ станции и т.п.) целесообразно атомные блоки размещать в подземном пространстве, под защитой природного массива [7].

Вовлечение тория в ядерную энергетику в варианте без твердотопливной загрузки-выгрузки активных зон позволит обеспечить страну на столетия экологически чистыми источниками энергии.

Что касается ядерной энергетики Украины на данный момент, то она является важной составляющей общего топливно-энергетического комплекса и занимает

ведущие позиции в электрообеспечении страны. В настоящее время в Украине на четырех АЭС действуют тринадцать ВВЭР-1000 и два ВВЭР-440 ядерных энергоблоков с общей установленной мощностью 13835 МВт. Был создан концерн «Укратомпром».

Украина является одной из немногих стран мира, в которой возможно создание ядерного цикла. Схема возможных составляющих ядерно-топливного цикла Украины представлена на рис. 2.

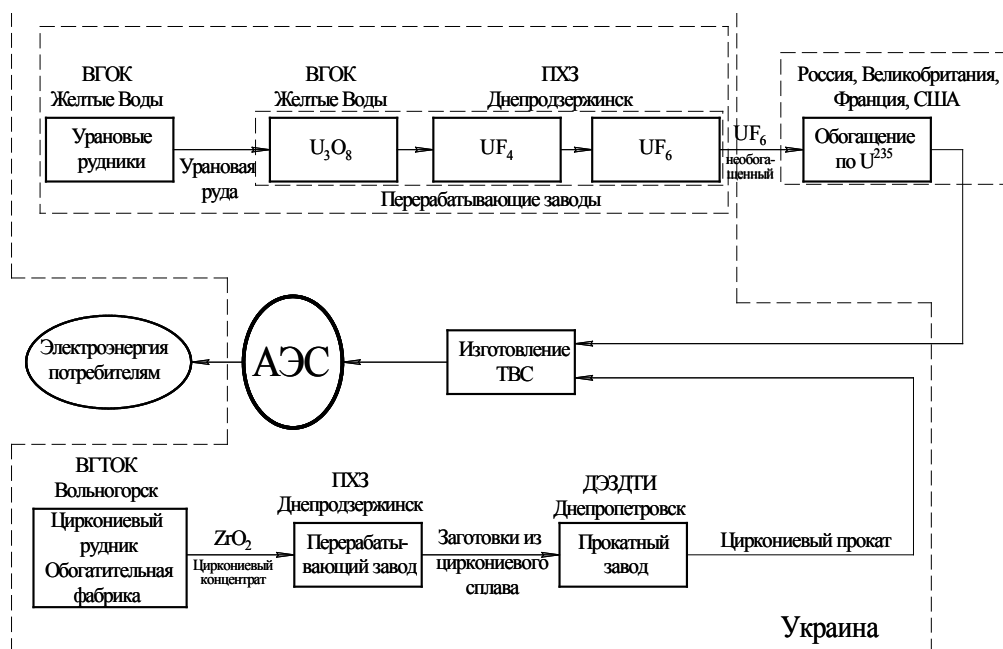


Рис. 2. Схема возможных составляющих ЯТЦ Украины

В который входят «Энергоатом», ВостГОК, «Дирекция Новокопчанского месторождения урановых руд» (Кировоградская область), «Смолы» (Днепропетровская область), «Украинский научно-исследовательский и проектно-разведывательный институт промышленной технологии» (Желтые Воды, Днепропетровская область) и «Днепропетровский завод прецизионных труб». ВостГОК в Желтых Водах сейчас производит около 800 т. урана в год. При условии закупки нового оборудования, комбинат сможет нарастить мощности до 3 тыс. т. в год. Кроме того, Украина способна производить около тысячи тонн циркониевого концентрата.

В 2007 году в Украине началась реализация трех масштабных программ по развитию «Укратомэнергопрома». Для этого планируется выделение средств на развитие уранового производства. В частности, запланировано реконструировать ВостГОК и основать в его составе Новокопчанский горно-обогатительный комбинат для добычи урановой руды. Запланировано также строительство завода по обогащению ядерного топлива. Запланировано выделить 980 млн. грн. на запуск производства циркониевой губки, циркониевых пресованных труб и ядерно-чистого циркония.

У нас нет альтернативы атомной энергетике. И в будущем она будет составлять 60–70 % украинской электроэнергии

Украина должна учитывать общемировые тенденции развития атомной энергетики, а также то, что стать крупным игроком на рынке самостоятельно невозможно. Крупнейшая российская генерирующая компания «Росэнергоатом» и

НАЭК «Энергоатом» (Украина) 26 января 2007 года подписали соглашение о сотрудничестве на 2007 год.

При этом Украина входит в десятку стран-лидеров по запасам урана. По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) запасы Украины оцениваются в 95,7 тыс. тонн (в Кировоградской области – более чем 62 тыс. тонн). По мнению аналитиков, в мире в течение 20 лет будет построено 100 АЭС. Причем атомная энергетика не отличается от других отраслей, здесь тоже наблюдаются тенденции к укрупнению. Корпорация Hitachi Ltd. достигла соглашения с General Electric Co. о заключении альянса, целью которого является расширение влияния на мировом рынке атомной энергетике. А федеральное агентство по атомной энергии (Росатом) и итальянская компания «Энел С.п.А.» подписали 4 марта 2007 года меморандум о намерениях по развитию энергетического сектора и атомной генерации.

Сейчас топливо для украинских АЭС поставляет российская корпорация «ТВЭЛ», но как альтернатива, на 3-м энергоблоке Южноукраинской АЭС проводятся исследования по эксплуатации 6 ТВС производства американской Westinghouse.

Украинская экономика стремительно растет, соответственно растут потребности промышленности и домохозяйств в электроэнергии. Развитие атомной энергетике – вот будущее Украины, ведь альтернативные источники электроэнергии могут обеспечить не более 20 %, а природный газ (равно как и уран) будет только дорожать.

#### Литература

1. Карелин А.И. Проблемы и перспективы развития ядерной энергетике // Радиохимия. – 1996. – Т. 38, Вып. 4. – С. 289-299.
2. Никипелов Б. Естественная безопасность при обращении с РАО / Б. Никипелов, В. Иванов, В. Величкин и др. // Бюлл. ЦОИ. – 2001. – № 1. – с 28-36.
3. Герасимов А.С. Атомная энергетике без плутониевых отходов / А.С. Герасимов, Т.С. Зарецкая, Г.В. Киселев, А.П. Рудик. – М.: ИТЭФ, 1990. – 8 с. – (Препринт ИТЭФ-90-74).
4. Новиков В.М. Жидкосольевые ЯЭУ. Перспективы и проблемы / В.М. Новиков, В.В. Игнатъев, В.И. Федулов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 157 с.
5. Зродников А.В. Модульный быстрый реактор малой мощности со свинцово-висмутовым теплоносителем для многоцелевого применения СВБР-75/100 / А.В. Зродников, Г.И. Тошинский, О.Г. Григорьев и др. // Атомная энергике. – 2004. – Т. 97, Вып. 2. – С. 91-96.
6. Ломидзе В.Л., Филиппов Е.А. Гомогенный быстрый реактор – хранилище. Решение по заявке 2004108230/06(009180) с приоритетом 23.03.2004 г.
7. Петров Э.Л., Хазов Б.С. Подземное пространство для атомных станций. Проблемы радиационной безопасности // Труды ГНЦ РФ ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1993. – 31 с.
8. Неклюдов И.М., Красноуцкий В.С. О научно-технической поддержке ядерно-энергетического комплекса Украины/ Ядерні та радіаційні технології. – 2006. – Т. 6, № 1–2. – С. 15-24.
9. Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 года, одобренная Распоряжением КМУ от 15.03.2006 г. № 145-р.
10. Белая книга ядерной энергетике / Под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001. – 270 с.

© Григорьева О.С., 2008