

# ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РИСКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ<sup>1</sup>

В. И. Рыбаченков<sup>2</sup>

## Перспективы развития атомной энергетики

Официальная статистика свидетельствует, что за последние 35 лет атомная энергетика завоевала прочные позиции на мировом рынке как надежный, экономически привлекательный и экологически нейтральный источник выработки электроэнергии — по данным Агентства по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) в конце 2009 г. в мире функционировало 439 энергетических ядерных блоков общей мощностью 370 ГВт, вырабатывавших 14% от общего объема электричества. При этом доля электроэнергии производимой на АЭС в 16 странах составляла более 20%, в Ю.Корее — 40%, а во Франции — 75%.

Темпы развития атомной энергетики достигли своего максимума в начале 1980-х годов, что было обусловлено мировым нефтяным кризисом в связи с известным конфликтом 1973 г. на Ближнем Востоке (непревзойденный до сих пор рекорд: в 1985 г. введено 32 ГВт мощности). Под влиянием эйфории от достигнутых успехов некоторые тогдашние энтузиасты поторопились спрогнозировать, что к 2010 г. доля вырабатываемой АЭС электроэнергии превысит 80%.

Однако жизнь опрокинула эти прогнозы — имевшие место тяжелые ядерные аварии АЭС в Три Майл Айленд и Чернобыле серьезно затормозили развитие мировой атомной энергетики, потребовав времени для преодоления антиядерного синдрома и кардинального изменения подходов к обеспечению эксплуатационной безопасности атомных станций. Наиболее наглядно негативные последствия эти событий проявились в США, где с 1990 по 2010 г. не было построено ни одного ядерного энергетического реактора.

Тем не менее, в начале 2000-х годов интерес к развитию ядерной энергетики возрос, и в мире заговорили о ядерном ренессансе. К этому времени была завершена разработка усовершенствованных реакторов “Поколение III плюс”, обладающих многократно продублированными системами обеспечения безопасности и требующих меньшего вмешательства оператора в процессы управ-

---

<sup>1</sup> Текст лекции, прочитанной автором на международных курсах по ядерному нераспространению для профессорско-преподавательского состава ВУЗов Северо-Западного региона России (22-25 августа 2011 г., Санкт-Петербург, при коспонсорстве Росатома и Шведского Агенства по радиационной безопасности).

<sup>2</sup> Ведущий научный сотрудник Центра по изучению проблем разоружения, энергетики и экологии.

ления. В ряде стран были сформированы долгосрочные национальные планы развития атомной энергетики. Так Госкорпорация Росатом обнародовала в 2008 г. план сооружения 30 блоков в течение 20 ближайших лет. В свою очередь, в Комиссии по ядерному регулированию США в настоящее время находится около 30 заявок частных компаний на выдачу объединенных лицензий на сооружение и эксплуатацию ядерных блоков, большинство из которых должно быть удовлетворено в течение 1-2 лет. В июне с. г. Великобритания объявила о начале реализации планов по сооружению до 2050 г. АЭС общей мощностью 16 ГВт, а ОАЭ прорабатывают возможность строительства к 2030 г. двадцати ядерных энергетических блоков. Еще более активно действует Китай, который построил за последнее десятилетие 9 новых блоков (12 находятся в процессе сооружения).

Проявляют интерес к развитию атомной энергетики и другие страны – к 2010г. 61 государство обратилось за консультациями в МАГАТЭ в связи с намерением построить первую АЭС (в настоящее время ядерными энергетическими блоками обладают 34 страны). Следует отметить, что большинство из новичков все-таки увязывает использование мирного атома с необходимостью снижения энергетической зависимости от зарубежных поставок углеводородного топлива. Вместе с тем некоторые из них могут рассматривать национальную мирную атомную программу и как эвентуальный трамплин для перехода к созданию ядерного оружия в случае осложнения геополитической обстановки и принятия соответствующего политического решения. В частности, подобный разворот событий нельзя исключать для ряда стран Ближнего Востока, озабоченных возможной оружейной составляющей иранской ядерной программы. В повестке дня и еще один важный вопрос – острая необходимость разработки энергетических реакторов малой мощности (100 – 200 МВт), поскольку для большинства развивающихся стран мощность “тысячников” (1000 МВт) является избыточной и они вряд ли способны оплатить стоимость этого класса реакторов (4-5 млрд. долл.), которые к тому же не стыкуются с локальными сетями электропередачи, имеющими невысокую способность передачи электроэнергии.

В целом же, с учетом вышеизложенных обстоятельств, а также принимая во внимание тот факт, что в ближайшие 30 лет закончится срок эксплуатации большинства ныне действующих реакторов, Агентство по атомной энергии ОЭСР сделало в 2010 г. достаточно сдержанный прогноз: в 2050 г. доля вырабатываемой АЭС электроэнергии при самом оптимистическом сценарии не превысит 20% от ее общего объема производства. События на АЭС Фукусима могут привести к корректировке этой цифры в сторону понижения, поскольку следствием внедрения дополнительных технических решений для повышения эксплуатационной безопасности действующих и вновь разрабатываемых ядерных блоков станет ощутимое повышение их стоимости, что неизбежно скажется на себестоимости производства электроэнергии.

## Ядерный топливный цикл (ЯТЦ) и его разновидности

Ядерный топливный цикл состоит из следующих ключевых этапов:

- **Добыча** урано-содержащей руды и ее горнорудное обогащение.

Содержание урана в руде колеблется от единиц процентов (месторождения в Австралии и Канаде) до долей процента (Россия, Казахстан), причем делящегося урана  $^{235}\text{U}$  в природном уране всего 0.7%, а остальное — это уран  $^{238}\text{U}$ , не поддерживающий цепную ядерную реакцию.

Конечный продукт этапа — порошок закиси-окиси урана  $\text{U}_3\text{O}_8$ , который фигурирует под названием “природный уран” в статистике производства урана отдельными странами. Его мировое годовое производство — порядка 53 тыс. тонн, причем основная доля приходится на Казахстан, Канаду, Австралию и Россию. Примечательно, что Иран не входит в число стран со значимыми запасами урана, что не стыкуется со стремлением этой страны обзавестись собственными обогатительными мощностями.

Стоимость 1 кг природного урана колеблется вокруг 100 долл.

- **Конверсия** природного урана и его **обогащение**.

В связи с тем, что обогащение урана технологически возможно только через его перевод в газообразную форму, на данном этапе осуществляется конверсия его окиси в шестифтористый уран и дальнейшее обогащение по урану  $^{235}\text{U}$  до уровня 3-5% (типичного для топлива современных атомных энергетических блоков) центрифужным или газодиффузионным методом. На сегодняшний день только во Франции и США продолжают работать громоздкие газодиффузионные производства, оставшиеся в наследство от оружейных ядерных программ 1950-х годов, однако, судя по всему, в течение ближайших 5-7 лет завершится повсеместный переход к компактной центрифужной технологии, потребляющей в 10 раз меньше электроэнергии.

- **Производство топлива**.

На основе порошка двуокиси урана осуществляется изготовление топливных таблеток и их размещение в трубках из циркониевого сплава (тепловыделяющих элементах — ТВЭЛх), а затем формирование из них топливных сборок. Для работы одного ядерного блока электрической мощностью 1 ГВт в течение года требуется около 200 тонн природного урана.

- **Сжигание топлива** в ядерном реакторе

На сегодняшний день преобладающим типом ядерных энергетических установок в мире являются водо-водяные реакторы на тепловых нейтронах, использующие воду в качестве теплоносителя и замедлителя (легководные реакторы — ЛВР). Реакторы на быстрых нейтронах, обладающие

способностью нарабатывать большие, чем сжигаемые в топливе объемы расщепляющихся материалов, и на которые 40 лет назад делалась ставка в связи с опасением нехватки урана, широкого распространения пока не получили — имеется только два таких действующих реактора в России и еще один строится. Основные причины сложившейся ситуации — их большая стоимость, обнаружившийся избыток урановых запасов (даже в случае удвоения имеющегося парка АЭС их должно хватить до конца нынешнего века), а также повышенные распространческие риски в связи с опасностью несанкционированного использования образующегося дополнительного расщепляющегося материала. По имеющимся экспертным оценкам, в ближайшие 20-30 лет, пока не будет разработано новое поколение безопасных и устойчивых к распространению реакторов, практически все вновь сооружаемые ядерные блоки будут легководными установками.

- **Промежуточное хранение** отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

После 3-4 лет облучения топливных сборок в активной зоне реактора они выгружаются из реактора и направляются в бассейны пристанционного хранения с целью их охлаждения и снижения радиоактивности. При этом ОЯТ содержит 0.8% урана 235, 1% плутония, 5% продуктов деления (цезий, стронций), остальное — уран 238.

- **Химическая переработка** ОЯТ либо его размещение в геологических формациях (в зависимости от типа принятого ядерного топливного цикла).

В случае наиболее распространенного на сегодняшний день открытого ЯТЦ отработавшее ядерное топливо не перерабатывается и после промежуточной выдержки в пристанционных бассейнах направляется на сухое хранение в специальные хранилища или хранилища расположенные при АЭС (как это происходит в США), которое может длиться десятилетиями. После длительного хранения ОЯТ предполагается направлять на окончательное захоронение.

При частично закрытом ЯТЦ (принят во Франции и Японии) осуществляется химическая переработка (репроцессинг) ОЯТ с выделением урана и плутония, которые далее используются для изготовления смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) топлива, сжигаемого в модифицированных легководных реакторах (по соображениям эксплуатационной безопасности загрузка МОКС-топлива идет только в 1/3 активной зоны). Переработка отработавшего МОКС-топлива считается технологически слишком сложной и поэтому нерентабельной, и не проводится. При закрытом ЯТЦ, который пока не реализован ни в одной стране, предполагается совместное выделение урана, плутония и других долгоживущих высокоактивных трансурановых элементов (америций, нептуний, кюрий) для их последующего сжигания в комплексном топливе ре-

актора на быстрых нейтронах, причем его отработавшее топливо может рециклироваться многократно.

### **Этапы ЯТЦ, уязвимые с точки зрения распространения**

Поскольку ключевым и самым трудоемким процессом при создании ядерных взрывных устройств является производство оружейных расщепляющихся материалов, наибольший распространенческий риск несут те звенья ядерного топливного цикла, которые могут предоставить потенциальным пролиферантам возможность наработки высокообогащенного урана (ВОУ) или выделения плутония под прикрытием реализации мирной атомной программы. Очевидно, что речь здесь идет прежде всего об этапах обогащения урана и химической переработки топлива с выделением плутония. Наиболее яркий пример в этом плане — создание Индией в начале 1970-х годов ядерной бомбы на основе плутония, выделенного с использованием легально полученной из США соответствующей технологии из отработавшего ядерного топлива исследовательского тяжеловодного реактора, приобретенного у Канады.

Специфика технологии **обогащения урана** заключается в том, что она может использоваться как в целях наработки низкообогащенного урана для АЭС, так и для производства оружейного ВОУ, причем переход от первого ко второму осуществляется достаточно легко без обременительных затрат. Дело в том, что разделение изотопов урана является резко выраженным нелинейным процессом при котором преобладающая работа приходится на начальный этап обогащения — наработка оружейного урана из урана 3-4% обогащения требует примерно в два раза меньше единиц разделительных работ (ЕРР), нежели при наработке оружейного урана из природного сырья.

Имеется три сценария незадекларированного использования центрифужной технологии для наработки урана оружейного качества:

- **Прямой путь** за счет сооружения специально предназначенных для наработки ВОУ обогатительных каскадов, как это имело место в Пакистане и Ливии.
- **Перестройка** под ВОУ обогатительных каскадов, первоначально предназначенных для производства НОУ. Подобный вариант эвентуально возможен в Иране.
- **Ответвление** от штатного каскада наработки НОУ для АЭС, позволяющее организовать дополнительное обогащение до уровня ВОУ. Такое сравнительно небольшое изменение в технологической схеме обогатительного завода не требует серьезных материальных затрат и может быть осуществлено в короткие сроки и в отсутствие инспекторов МАГАТЭ. Не исключено, что по этому пути могут пойти иранцы.

Примечательно, что любой из перечисленных сценариев может быть реализован скрытно, поскольку современный центрифужный цех, в отличие от громоздкого газодиффузионного завода, достаточно компактен и мобилен.

На сегодняшний день обогащение урана осуществляется в 11 странах, причем наибольшим потенциалом обладают Россия (около 25 млн. ЕРР), международный концерн ЮРЕНКО, объединяющий Великобританию, Германию и Нидерланды (15 млн. ЕРР), Франция (10 млн. ЕРР), США (5 млн. ЕРР) и КНР (2 млн. ЕРР). К этому клубу в недалеком будущем могут присоединиться Аргентина, Канада и Австралия. Имея хорошую “нераспространенческую историю”, эти государства не вызывают озабоченности международного сообщества, чего не скажешь о некоторых других странах, таких как, например, Иран, который не только не выполняет требований СБ ООН о приостановке связанной с обогащением урана деятельности, но даже усугубил ситуацию, начав в 2006 г. сооружение разделительного завода в г. Кум и оповестив об этом МАГАТЭ лишь в 2009 г.

Неоднозначность ситуации, сложившейся вокруг иранской ядерной программы, заключается в том, что будучи членом ДНЯО, Иран, в соответствии со статьей IV Договора, формально не имеет ограничений на освоение технологий обогащения урана. Проблема, однако, в том, что, настаивая на неотъемлемом праве доступа к благам мирного атома, Тегеран не выполняет обязательств в рамках Соглашения с МАГАТЭ о всеобъемлющих гарантиях, то есть не обеспечивает транспарентность своей ядерной программы.

Интерес для потенциальных пролиферантов может представить и этап ЯТЦ, связанный с **химической переработкой** отработавшего ядерного топлива, поскольку только здесь открывается прямой доступ к выделенному плутонию, который по своим качествам хоть и не годится для производства классического ядерного боезаряда (для него требуется оружейный плутоний с содержанием 239-го изотопа свыше 90%), но вполне может быть использован для изготовления примитивного взрывного ядерного устройства уменьшенной мощности.

Как показали расчеты экспертов Принстонского университета, повышенное содержание в “гражданском” плутонии 240-го изотопа (порядка 25% от общей массы плутония) с характерным спонтанным нейтронным излучением, способным запустить цепную ядерную реакцию не в оптимальное время, приведет к снижению номинальной мощности взрывного устройства примерно в 20 раз. Применительно к сброшенной на Нагасаки плутониевой бомбе мощностью 20 кт, это означало бы уменьшение силы взрыва до 1 кт, последствия которого все равно остались бы катастрофическими (радиус полного разрушения объектов – порядка 0.7 км).

Вместе с тем, в сравнении с рисками распространения, связанными с обогащением урана, ситуация вокруг репроцессинга ОЯТ представляется более обнадеживающей. Дело в том, что в последнее десятилетие практически все обладающие АЭС государства отказались от переработки ОЯТ, направляя его в сухие пристанционные хранилища по причине десятикратной разницы стоимости в пользу последнего варианта. При этом не продлевались контракты на репроцессинг с Францией, Великобританией и Россией, которые наряду с Япони-

ей остались эксклюзивными обладателями крупных заводов по химпереработке ОЯТ ядерных энергетических реакторов.

Еще один положительный момент: в связи с тем, что сооружение подобных мощностей связано с огромными затратами (стоимость японского завода в Рокашо-Мура составила свыше 10 млрд. долл.), мала вероятность того, что какой-либо пролиферант пойдет столь дорогим путем ради получения сомнительной выгоды.

### **Международные инструменты уменьшения рисков распространения**

Краеугольным камнем укрепления режима ядерного нераспространения является **Договор о нераспространении ядерного оружия** и разработанная в его рамках система гарантий МАГАТЭ (документ INFCIRC – 153), которая обеспечивает контроль за непереключением значимых количеств расщепляющихся материалов на немирные цели. В число контролируемых объектов входят, кроме прочего, заводы по обогащению урана и установки по химпереработке ОЯТ. Эффективность системы существенно повысилась с принятием в 1997 г. Дополнительного протокола к соглашению с МАГАТЭ о гарантиях (запоздалая реакция на обнаружение в Ираке, после войны в Заливе 1991 г., значительного объема незаявленной ядерной деятельности), который серьезно расширил доступ Агентства к ядерным объектам и их проектной документации, а также ввел в действие новые инструментальные методы мониторинга окружающей среды, такие, как забор образцов почвы и воды для регистрации остаточных количеств делящихся материалов.

Ключевую роль в пресечении нелегального экспорта ядерных материалов, оборудования и технологий играет созданная по инициативе Канады и США в 1975 г. (после инцидента с наработкой оружейного плутония в Индии) **Группа Ядерных Поставщиков (ГЯП)**, объединяющая 46 государств-экспортеров указанной номенклатуры товаров. В соответствии с принятыми в 1992 г. руководящими принципами ГЯП критерием ядерных поставок является наличие у страны – получателя соглашения о полноохватных гарантиях с МАГАТЭ.

С учетом выявленной в начале 2000-х годов сети пакистанца А.К. Хана, осуществлявшей нелегальную передачу в ряд стран оборудования и технологической документации на заводы по обогащению урана, ГЯП одобрила в 2011 г. новые, более жесткие руководящие принципы экспорта технологий и оборудования, имеющих отношение к разделению изотопов урана и репроцессингу ОЯТ. В этот документ включены следующие критерии для стран-реципиентов :

- членство в ДНЯО и соблюдение обязательств по соглашению с МАГАТЭ о полноохватных гарантиях;
- наличие национальной системы экспортного контроля, отвечающей требованиям резолюции 1540 СБ ООН;
- наличие вступившего в силу Дополнительного протокола.

В целях дальнейшего повышения устойчивости ядерного топливного цикла к рискам распространения в последние годы в МАГАТЭ была выдвинута идея интернационализации его наиболее чувствительных звеньев, особенно этапа обогащения урана (так называемый “многосторонний подход”). Конечная цель — поставить ЯТЦ под международный контроль таким образом, чтобы, с одной стороны, исключить возможность скрытной наработки оружейных расщепляющихся материалов, а с другой, — обеспечить гарантированные поставки ядерного топлива заинтересованным странам.

Указанная идея была конкретизирована в выдвинутой Президентом России В. Путиным инициативе о формировании глобальной инфраструктуры в области атомной энергетики для обеспечения равного доступа всех стран к мирному использованию атомной энергии при строгом соблюдении режима ядерного нераспространения. В ее развитие в 2007 г. в России был создан и зарегистрирован в Ангарске как юридическое лицо Международный Центр Обогащения Урана (МЦОУ). Основоположники Центра — Россия и Казахстан, затем в число его акционеров вошли Армения и Украина.

В марте 2010 г. в Вене было подписано соглашение между правительством РФ и МАГАТЭ о создании на территории России физического запаса НОУ и его поставках государствам-членам Агентства. Во исполнение указанной договоренности на территории Ангарского электролизного химического комбината была подготовлена площадка для склада НОУ, где размещено 120 тонн гексафторида урана, что достаточно для производства ядерного топлива, необходимого для полной загрузки активной зоны двух реакторов мощностью 1 ГВт типа российского ВВЭР-1000.

В соответствии с договоренностью с МАГАТЭ низкообогащенный уран из гарантийного запаса будет поставляться по запросу гендиректора Агентства в страны, поставка ядерного топлива в которые прекращена по политическим мотивам. Таким образом, обеспечив гарантии МАГАТЭ на бесперебойное снабжение АЭС ядерным топливом, международное сообщество предоставляет возможность странам, начинающим свой путь в атомной энергетике, не сооружать собственные обогатительные мощности, потенциально пригодные для наработки ВОУ. Страна – член МАГАТЭ, причем не обязательно акционер МЦОУ, отказавшись от освоения технологии обогащения, сможет избежать значительных затрат на проектирование и сооружение обогатительного завода. При этом принципиально важно, что государство – реципиент может в любой момент принять иное решение, а участие в МЦОУ не наносит ущерба его суверенитету.

## **Заключение**

Как показывает проведенный обзор, международному сообществу в целом пока удается парировать риски распространения, присущие ядерному топливному циклу атомной энергетики. Вместе с тем, приходится признать, что принимае-



мые в этом плане дополнительные меры работают не на опережение, а идут вслед за событиями.

Примеры тому — создание Группы ядерных поставщиков, как реакция на производство оружейного плутония в Индии и последовавшее за этим проведение ядерного испытания; разработка Дополнительного протокола к соглашению о гарантиях с МАГАТЭ после обнаружения незаявленной ядерной деятельности в Ираке; принятие в ГЯП ужесточенных руководящих принципов экспорта оборудования и технологий уранообогащения и переработки отработавшего ядерного топлива как следствие разоблачения сети А.К. Хана.

В связи с изменяющейся ситуацией, когда все большее число стран выражает намерение приступить к развитию атомной энергетики, требуются новые подходы к укреплению режима ядерного нераспространения. Речь идет не о разработке вызывающих отторжение многих стран запретительных мер, а о предложении “новичкам” набора стимулов экономического и политического характера (расширение практики создания международных банков ядерного топлива или переход основных поставщиков ядерных реакторов к лизингу топлива с возвратом ОЯТ стране – поставщику), которые способствовали бы принятию добровольных решений об отказе от создания собственных мощностей по обогащению урана и переработке ОЯТ. Требуется также ускорить разработку устойчивых к распространению ядерных реакторов и ядерных топливных циклов, в том числе в рамках Международного форума “Поколение IV”.

### **Использованная литература**

1. А. Павлов, «Центрифужное обогащение и проблемы ядерного нераспространения», *Ядерный Клуб*, №2, 3, 2010.
2. F. Hippel, Editor, “The uncertain future of nuclear energy”. A research report of the International panel on fissile materials, September, 2010.
3. “The future of the nuclear fuel cycle.” An interdisciplinary MIT study, 2011.
4. M. Peters, “The future of nuclear industry”. FAS Public interest report, Spring, 2011.
5. A. Diakov, “The nuclear renaissance and preventing the spread of enrichment and reprocessing technologies – a view from Russia.” *Daedalus*, Winter, 2010.
6. M. Schneider, “Nuclear industry status report.” *Bulletin of the atomic scientists*, July-August, 2011.

*11 сентября 2011 г.*