

Между двух огней

Нобелевский лауреат Бертон Рихтер обсуждает перспективы и проблемы ядерной энергии

Ядерная энергия переживает возрождение, движимое двумя весьма слабо связанными между собой потребностями: во-первых, потребностью в гораздо большем количестве энергии для поддержания экономического роста во всем мире; и, во-вторых, потребностью в смягчении последствий глобального потепления, вызываемого образованием парниковых газов при сжигании органического топлива.

При современном наборе видов топлива рост экономики увеличивает выбросы; повышенные выбросы приводят к изменению климата; изменение климата, в конечном счете, нанесет ущерб экономике. Ядерная энергия предлагает выход из этого замкнутого круга.

Все многочисленные прогнозы энергетического спроса в 21 веке дают примерно один и тот же ответ. Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), например, прогнозирует в своем сценарии средних темпов роста увеличение спроса на первичную энергию в два раза к середине столетия и еще почти в два раза к концу этого столетия. Согласно прогнозам, к 2030 году развивающиеся страны обгонят промышленно развитые по использованию первичной энергии. Китай обгонит Соединенные Штаты как самый большой в мире потребитель энергии, а экономический рост в Китае и Индии уже выше, чем предполагается согласно сценарию МИПСА.

Ограниченность предложений двух из трех видов органического топлива уже очевидна. Взлетели цены на нефть. Спрос на нее растет средними годовыми темпами приблизительно 1.5 млн. баррелей в день, требуя для того, чтобы не отставать от растущего спроса, ввода каждые десять лет новых мощностей, соответствующих объемам производства в Саудовской Аравии.

Имеются большие запасы природного газа, но существуют ограничения, связанные с его транспортировкой. Цены на природный газ также выросли и сейчас находятся на беспрецедентном уровне 9-10 долл. за млн. БТЕ.

Единственным имеющимся в изобилии ископаемым топливом является уголь. Однако с ним связаны серьезные проблемы загрязнения, а для решения экологических проблем требуются дорогостоящие технологические

решения с крупномасштабными экономическими последствиями.

Озабоченность в отношении глобального потепления возрастает, и даже правительство Соединенных Штатов, наконец, заявило, что такая проблема существует. Согласно прогнозу Межправительственной группы по климатическим изменениям (МГКИ), в случае нормального развития событий к концу столетия произойдет увеличение концентрации двуокиси углерода в атмосфере до 750 частей на миллион с последующим глобальным повышением температуры на 2°-5 С, менее выраженным на экваторе и более – на полюсах.

Конечно же, мы сможем адаптироваться к этому повышению, если оно окажется не самым большим из всех возможных и будет плавным. Если же оно станет значительным и будет сопровождаться климатическими неустойчивостями, то экономические и социальные разрушения окажутся весьма тяжелыми.

Сейчас слишком поздно предотвращать определенное глобальное потепление, но для ограничения этого эффекта требуется отход от использования топлива на основе углерода. Проблема глобального потепления заставила видных защитников окружающей среды переосмыслить свою оппозицию ядерной энергетике. Вопрос, требующий решения, заключается в том, с каким злом они предпочли бы сосуществовать - с глобальным потеплением или ядерной энергией?

В частности, в защиту ядерной энергии выступил Джеймс Лавлок (защитник окружающей среды и автор популярной Гайя-гипотезы). Когда векторы личного экономического и личного экологического интереса совпадают, может начаться движение в их направлении. Сейчас оба они указывают на потребность в крупномасштабной безуглеродной энергетике. Ядерная энергия – одно из возможных решений.

Хотя ядерный вариант не может быть полным решением, он может стать его важной частью, если удастся убедить население в том, что он безопасен, что возможно безопасное захоронение ядерных отходов и что при обширном расширении не произойдет значительного возрастания риска распространения оружия.

Потенциал роста ядерной энергетики

Приблизительно 440 реакторов во всем мире обеспечивают производство 16% мировой электроэнергии. Приблизительно 350 из них находятся в ОЭСР (Организации экономического сотрудничества и развития), поставляя 24% потребляемой электроэнергии. Страной с наибольшей долей электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, является Франция - 78 %. Защитнику окружающей среды Франция должна представляться в качестве образца для всего мира. В этой стране показатель интенсивности выбросов двуокиси углерода (CO₂ на единицу ВВП) является самым низким в мире. Если бы интенсивность выбросов CO₂ во всем мире снизилась до уровня во Франции, выбросы CO₂ сократились бы вполтину, а глобальное потепление значительно замедлилось бы.

Прогнозы роста в ядерной энергетике неточны из-за неопределенности затрат и влияния трех упомянутых ранее потенциальных проблем: безопасности, захоронения отходов и риска распространения.

Безопасность: Спроектировано новое поколение легководных реакторов, отличающееся от старого простотой в эксплуатации и обслуживании и снабженное дополнительными пассивными системами безопасности.

При наличии мощной системы регулирования и инспекций безопасность ядерных систем может быть гарантирована. В отсутствие такой системы риски возрастают. Никакой отрасли промышленности не может быть доверено регулирование собственной деятельности, если последствия аварии распространяются за рамки границ ущерба только этой отрасли промышленности.

Обработка отработавшего топлива: При раздельном рассмотрении трех главных элементов отработавшего топлива, как представляется, проблем возникать не должно.

С ураном, который составляет наибольшую часть отработавшего топлива, трудностей не возникает. Его радиоактивность низка и не создает проблем; он содержит больше U-235, чем природная руда, и поэтому может быть исходным материалом для обогащения, или даже может быть возвращен в рудники, из которых он был добыт.

Нет научных или инженерно-технических трудностей с осколками деления – следующим наиболее широко представленным составным элементом. В подавляющем большинстве случаев осколки деления требуют хранения в течение всего лишь нескольких сотен лет.

Нет проблем с созданием надежной защитной оболочки, имеющей требуемый срок службы. (Если древние египтяне смогли построить пирамиды, простоявшие 6 000 лет, то мы должны уметь строить, по крайней мере, не хуже их.)

Проблемы в области отработавшего топлива связаны главным образом с последним 1% его количества, представляющим собой плутоний и младшие актиниды, нептуний, америций и кюрий. Токсичность некоторых элементов этой смеси высока, а периоды полураспада велики.

Существуют два общих способа защиты населения от этого материала: изоляция материала от биосферы на сотни тысяч лет или уничтожение путем бомбардировки нейтронами.

Изоляция лежит в основе принципа “однократной” системы для ядерного топлива, поддерживаемой Соединенными Штатами по причинам предотвращения распространения оружия. Я не считаю, что однократная система может работать в мире со значительно расширенной программой ядерной энергетики.

Ее проблемами являются общественное признание, которое я оставляю политическим деятелям, и технические ограничения. Первая техническая проблема заключается в тепловыделении на протяжении начальных приблизительно 1 500 лет хранения, ограничивающем плотность материала, который может быть помещен в хранилище. С первоначальным тепловыделением от осколков деления справиться не трудно. Главным источником тепла в течение первых приблизительно 1 000 лет является распад плутония-241 с образованием америция-241, который далее распадается, превращаясь в нептуний-237. Емкость хранилища задают ограничения допустимого подъема температуры горной породы хранилища при воздействии этого источника.

Второй технической проблемой является большая длительность излучения. Здесь та же самая цепочка распада с превращением плутония в америций и затем в нептуний приводит к максимальному накоплению долгоживущего компонента, требуя изоляции от биосферы на сотни тысяч лет.

На примере США, если долю ядерной энергетики планируется сохранить на прогнозируемом уровне 20% от потребностей США в электроэнергии до конца столетия, то для хранения отработавшего топлива по однократному сценарию потребуется девять хранилищ такой же емкости, как хранилище Юкка Маунтин. Если суммарная мощность реакторов в США в соответствии с прогнозом в исследовании Массачусетского технологического института (МТИ) возрастет к середине столетия до 300 ГВт (эл.), то каждые шесть-семь лет США должны будут открывать новое хранилище такой же емкости, как хранилище Юкка Маунтин. Это будет настоящей проблемой, так как мы не смогли открыть даже первое хранилище. В мире более широкого применения ядерной энергетики однократный цикл не сможет удовлетворить потребности.

Альтернативой однократной системе является система переработки, в которой производятся разделение основных компонентов с соответствующей обработкой каждого из них и выполнением определенных специфических операций по обработке компонента, создающего долгосрочные риски. Наиболее развитой является система переработки во Франции. Во Франции производят смешанное оксидное топливо, или МОХ, выделяя плутоний (Pu) из отработавшего топлива и смешивая его с соответствующим количеством урана (U). Остающийся неиспользованным уран поступает на установку по обогащению.

Осколки деления и младшие актиниды подвергаются остекловыванию с целью последующего размещения в хранилище. Срок службы стекла, используемого для остекловывания, составляет в глине предложенного французского хранилища многие сотни тысяч лет.

МОХ-топливо плюс остекловывание решает часть проблемы, но не всю ее. Следующий вопрос - что сделать с отработавшим МОХ-топливом. План состоит в том, чтобы хранить это топливо без переработки до тех пор, пока не будут коммерчески внедрены реакторы быстрого спектра. В таких реакторах быстрого спектра сжигается

смесь плутония и урана-238, и могут, в принципе, сжигаться также все младшие актиниды.

Можно создать своего рода непрерывную программу рециркуляции, в которой плутоний из отработавшего МОХ-топлива используется для запуска системы быстрого спектра; отработавшее топливо из системы быстрого спектра подвергается переработке; весь плутоний и младшие актиниды возвращаются в свежее топливо и т.д. В принципе, в хранилище попадают только осколки деления, и в течение нескольких сотен лет необходимо обеспечивать хранение только их. Идея выглядит привлекательной, но для того, чтобы осуществить подобную систему на практике, требуется большой объем работы.

Предотвращение распространения: Предотвращение распространения ядерного оружия является важной целью международного сообщества. Достижение этой цели становится более сложным в мире с сильно расширенной ядерно-энергетической программой, в которой участвует много стран. Возможности для переключения материала, пригодного для использования в оружии, существуют как на начальной стадии ядерного топливного цикла - стадии обогащения U-235, так и на конечной стадии ядерного топливного цикла – стадии обработки и переработки отработавшего топлива. Чем больше мест, где проводятся эти работы, тем труднее осуществлять соответствующий контроль.

Тайные программы разработок оружия осуществлялись как на начальной, так и на конечной стадии топливного цикла. Пакистан и Южная Африка, которые добровольно отказались от своего оружия в рамках контролируемой со стороны МАГАТЭ программы, производили свое оружие на начальной стадии топливного цикла. Ливия двигалась в том же направлении до тех пор, пока недавно не прекратила свои попытки.

Существует неопределенность в отношении намерений Ирана. Индия, Израиль и Северная Корея получали свой оружейный материал на конечной стадии топливного цикла, используя для производства необходимого плутония реакторы с тяжеловодным замедлителем.

Уровень сложности технического оснащения в этих странах был различен: от весьма низкого до весьма высокого, и все же всем им удалось добиться успеха. Научные знания, необходимые для создания ядерного оружия, общедоступны, а технологией, как представляется, не так уж трудно овладеть путем разработки собственными силами или незаконного приобретения.

Всем должно быть ясно, что единственным способом ограничить распространение, осуществляемое национальными государствами, является заключение имеющих обязательную силу международных соглашений, включающих эффективные инспекции в качестве сдерживающего средства, а также применение эффективных санкций в тех случаях, когда это сдерживающее средство не приносит результатов.

Мы, научно-техническое сообщество, можем предоставить дипломатам улучшенные инструментальные средства, позволяющие упростить мониторинг в рамках соглашений и сделать его не столь откровенно интрузивным. Эти технические гарантии являются основой систем, используемых для выявления на наиболее ранней возможной стадии усилий, направленных на распространение. Они должны обеспечивать раскрытие хищений и переключения материала, пригодного для использования в оружии, а также выявление тайных

установок, которые могли бы использоваться для производства материалов, пригодных для использования в оружии.

В последнее время разработка передовых технических гарантий не подкреплялась серьезным финансированием. Необходимо осуществить координированную на международном уровне программу по их разработке. Устойчивость с точки зрения нераспространения и технологии контроля должны стать существенной частью проектов всех новых реакторов, заводов по обогащению, установок по переработке и объектов по изготовлению топлива.

Существуют еще не внедренные технологии, которые могут в реальные сроки дать результаты в критических важных областях. Нет необходимости в долгом ожидании для того, чтобы установить, сохраняется ли количество урана-235 на заводе по обогащению в рамках объявленных пределов. Одним из вновь рассматриваемых вопросов является относительная устойчивость с точки зрения нераспространения однократного ядерного топливного цикла по сравнению с устойчивостью различных стратегий переработки.

Международной группой экспертов был проведен для министерства энергетики США анализ, документально отраженный в ее докладе “Оценка топлива легководных реакторов по характеристикам устойчивости с точки зрения нераспространения”, выпущенном в ноябре 2004 года. Разработанная в рамках этого анализа методология позволяет определить уровень риска для каждого этапа ядерного топливного цикла, а затем просуммировать риски во времени.

Все однократные варианты и варианты, предусматривающие переработку, характеризуются примерно одинаковым уровнем риска. Повышенный риск на этапе, где в сценариях переработки имеется плутоний, уравнивается пониженным риском переключения во время обогащения, где требуется меньшее обогащение, и повышенным радиационным барьером после второго сжигания и повышенной трудностью изготовления оружия из материалов все более низкого качества.

Эти уровни не следует истолковывать как точные измерения. В действительности они лишь показывают, что для здравомыслящих людей однократный цикл не очень сильно отличается от варианта с переработкой.

Генеральный директор МАГАТЭ ЭльБарадей и президент США Джордж Буш предложили начать серьезное изучение интернационализации ядерного топливного цикла. В сценарии интернационализации имеются страны, где происходят обогащение и переработка. В их число входят страны-поставщики. Остальные страны являются пользователями. Страны-поставщики изготавливают ядерное топливо и забирают возвращаемое отработавшее топливо для переработки, разделяя его на компоненты, подлежащие захоронению и подлежащие повторному использованию в свежем топливе.

В случае успешного осуществления такой схемы страны-пользователи, особенно небольшие, получают огромные выгоды. Им не нужно будет строить установки по обогащению и заниматься обработкой или захоронением отработавшего топлива.

Ни один из этих видов деятельности не является экономически выгодным в малых масштабах, и к тому же, в небольших странах может не иметься площадок для хранилищ с подходящими геологическими условиями.

В обмен на эти выгоды страны-пользователи будут отказываться от потенциального доступа к пригодному для использования в оружии материалу как на начальной, так и на конечной стадиях топливного цикла.

Для того чтобы схема работала, необходимо создать международный режим, предоставляющий странам-пользователям гарантируемый доступ к требуемому им топливу. Это будет нелегкой задачей и потребует географически и политически разнообразного набора стран-поставщиков.

Задача снижения риска распространения на конечной стадии топливного цикла будет даже еще более сложной. Чрезвычайно важно добиваться этого, поскольку мы видели на примере Северной Кореи, как быстро страна может “разорвать” международное соглашение и разработать оружие, если имеется материал. Северная Корея в короткие сроки вышла из Договора о нераспространении ядерного оружия, выслала инспекторов МАГАТЭ и осуществляла переработку отработавшего топлива своего реактора в Йонбене, приобретая таким образом плутоний, необходимый для изготовления бомбы в самое короткое время.

Страны-поставщики, которые должны забирать обратно отработавшее топливо для обработки, вряд ли будут делать это, если не будет решена проблема захоронения отходов. В мире со значительно расширенной ядерно-энергетической программой будут производиться огромные объемы отработавшего топлива. Согласно вышеупомянутым прогнозам, при мощности атомных станций более тераватта (электрической) будет образовываться свыше 20 000 тонн отработавшего топлива в год.

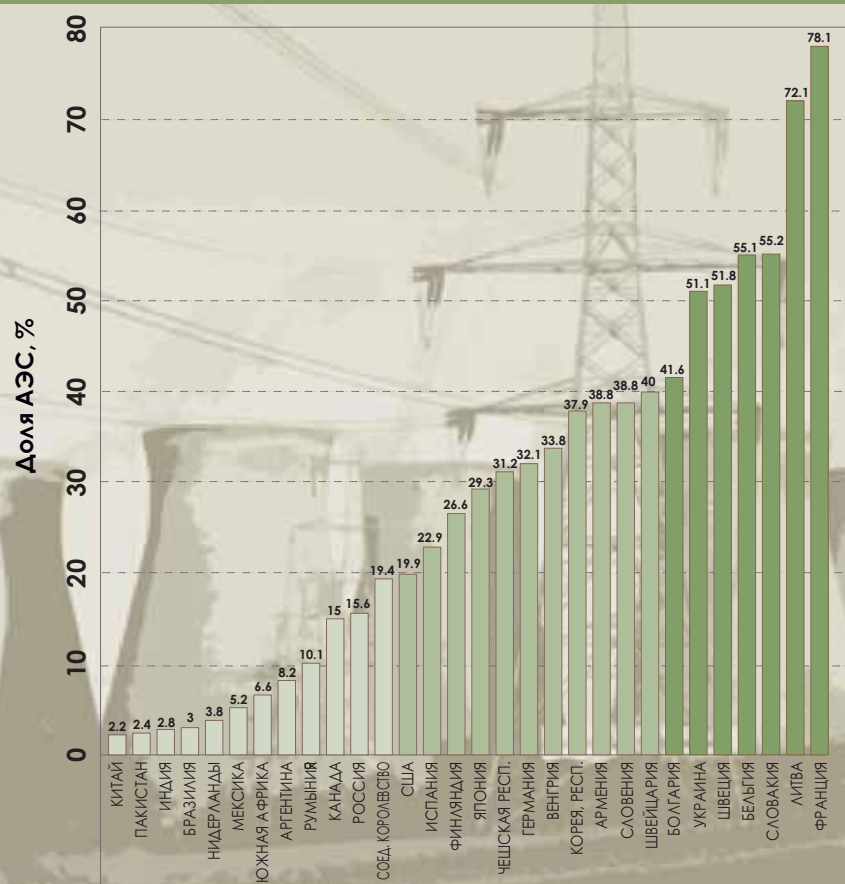
Это отработавшее топливо содержит приблизительно 200 тонн плутония и младших актинидов и 800 тонн осколков деления. При незамкнутом топливном цикле с такими количествами невозможно справиться, если каждые два или три года не строить новое хранилище масштабов “Юкка Маунтин”. Функционирование этого сценария может обеспечивать переработка с непрерывным рециклированием в реакторах на быстрых нейтронах. Только осколки деления необходимо направлять в хранилище и выдерживать в нем в течение нескольких сотен лет, а не нескольких сотен тысяч лет.

Подводя итоги, можно сказать, что ядерная энергия является важным компонентом стратегии обеспечения мира энергетическими ресурсами, необходимыми ему для экономического развития, при одновременном снижении потребления органического топлива с присущими ему выбросами парниковых газов. Для того чтобы изменения были крупномасштабными, потребуются новые достижения в области как физических, так и политических аспектов науки и техники.

Работая над физическими аспектами, мы можем разрабатывать все более улучшенные и безопасные реакторы, более эффективные способы захоронения отработавшего топлива и усовершенствованную технологию гарантий. Наилучшим образом этого можно добиться в международном контексте, с тем чтобы совместно нести затраты и прийти к международному техническому консенсусу в отношении того, что должно быть сделано. Страны более охотно согласятся

ДОЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ВЫРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Во всем мире, 2004



Источник: МАГАТЭ

с результатами таких разработок в том случае, если они будут принимать в них участие.

В то время как физические разработки могут наилучшим образом быть выполнены в международном контексте, политические аспекты научно-технической области могут быть разрешены только на международном уровне. МАГАТЭ, по-видимому, является наилучшим местом для начала работы, и уже сделаны первые небольшие шаги. Я с интересом ожидаю более крупных шагов в обоих указанных направлениях в будущем.

Бертон Рихтер работает на факультете Стэнфордского центра линейных ускорителей (SLAC) Стэнфордского университета, а в 1984-99 годах был директором SLAC. В 1976 году ему совместно с Сэмюэлем Ч. Тингом была присуждена Нобелевская премия в области физики “за изыскательскую работу по открытию тяжелой элементарной частицы нового типа”. Адрес электронной почты: brichter@slac.stanford.edu

Настоящая статья представляет собой адаптированный вариант программного доклада автора на Научном форуме МАГАТЭ в сентябре 2005 года. Дополнительную информацию можно получить на веб-сайте МАГАТЭ по адресу: www.iaea.org. Графики и таблицы, сопровождавшие его программный доклад, можно найти по адресу: www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2005/SF_Presentations05/Session1/BRichter_IAEA_Session_1.pdf