



Николай Пономарев-Степной

АРХИТЕКТУРА ГЛОБАЛЬНОЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: КЛЮЧ К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Судьба атомной энергетики сегодня широко обсуждается: станет ли она *локомотивом* энергетического развития или же соображения безопасности АЭС перевесят и атомный *ренессанс* будет остановлен?

ТРИ ТЕЗИСА

Прежде чем обратиться непосредственно к проблемам атомной энергетики, необходимо обозначить несколько ключевых тезисов, которые характеризуют понятие энергетической безопасности в экономических реалиях современного мира.

Тезис первый: даже в том случае, когда ресурсная база первичного энергоресурса значительна, этот ресурс не потребляется обществом, если его цена превышает некоторую долю в ВВП.

Ключевая информация, определяющая материальное развитие цивилизации, сосредоточена в динамической связке ВВП и потребления энергии. Современная экономика остро реагирует на величину затрат на первичные энергоресурсы. В начале 1980-х гг. и в 2008 г. доля затрат на энергетические нужды в ВВП превысила 10%, что совпало с кризисными явлениями в экономике. Структура современного общества и его экономики оказались не в состоянии выдержать высокие цены на энергию.

Тезис второй: удельное энергопотребление в развитых и развивающихся странах имеет тенденцию к выравниванию, что в условиях индустриального роста развивающихся стран приведет (и уже приводит) к необходимости увеличивать глобальную добычу первичных источников энергии.

Динамика изменения соотношения удельного потребления энергии в этих двух группах стран показывает, что в течение последнего полувека это различие устойчиво сокращается. Если в 1960-х гг. удельное потребление энергии в развитых и развивающихся странах раздичалось более чем в 20 раз, то к настоящему времени оно сократилось до 7 раз. Индустриализация развивающегося мира, непосредственно связанная с ростом потребления энергии, происходит существенно более высокими темпами в сравнении с развитыми странами. Этому процессу способствует то, что развитые страны направляют значительные инвестиции и внедряют свои технологии в промышленное производство развивающихся стран, где есть дешевая рабочая сила. Кроме того, стали более прозрачными границы для интеллектуального, технологического, материального общения. Возросли скорости и объемы распространения информации, технологий, продуктов. Выравнивание уровней удельного энергопотребления в развитых и развивающихся странах будет означать необходимость утроения добычи



З
И
Л
А
Н
А

первичных энергоресурсов. При сохранении существующих темпов экономического роста в развивающихся странах это займет десятилетие; при замедлении темпов роста продлится до 40 лет.

Тезис третий: решить проблему роста энергопотребления можно за счет наращивания различных видов энергоресурсов, в первую очередь возобновляемых источников и атомной энергии.

При росте спроса образуется область *неудовлетворенного спроса*, которую можно заполнить дополнительным наращиванием источников энергии: возобновляемых, гидроэнергетических ресурсов, угля и атомной энергии. Казалось бы, наиболее просто это сделать за счет увеличения добычи нефти и газа, однако все чаще возможности нефти рассматриваются как уже достигшие либо приближающиеся к уровню максимальной годовой добычи. Природный газ такая перспектива ожидает несколько позже, но восполнить за его счет нарастающий дефицит энергетических ресурсов, скорее всего, не удастся. Дело здесь не столько в отсутствии этих ресурсов, сколько в том, что их расширенная добыча потребует привлечения вложений для освоения месторождений в более сложных геологических и климатических условиях, а это приведет к росту цен на энергетическое сырье, и они потеряют свою привлекательность для экономики.

Исходя из этих трех тезисов в данной статье я рассмотрю потенциал атомной энергетики в обеспечении энергетической безопасности. Кроме того, будут рассмотрены препятствия для повышения роли атомной энергии и пути их преодоления.

РЕАЛЬНАЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РОЛЬ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Итак, мир испытывает серьезные трудности в связи с недостаточностью ресурсов органического топлива и их региональной неравномерностью. Есть очевидное решение — это возобновляемые источники: солнце, ветер, биомасса, энергия воды, приливов. Использование этих источников, вне всякого сомнения, будет постоянно нарастать. Однако значительная капиталоемкость этих технологий затрудняет достижение требуемых темпов развития.

Атомная энергия не относится к категории возобновляемого ресурса, но при сжигании U-235, содержащегося в естественном уране, имеется возможность воспроизводить новое ядерное топливо из U-238 или Th-232, объемы которых в сотни раз превышают ресурс U-235, сжигаемого в нынешних реакторах. Возможность воспроизводства нового топлива не только во много раз повышает эффективность использования уже добытого сырья, но и делает экономически выгодными более дорогие ресурсы. Способность воспроизводить топливо практически переводит атомную энергию в разряд неисчерпаемых источников энергии. Это уникальное свойство атомной энергии — воспроизводить топливо — является ключевым в оценках перспективы ее использования. Нынешняя атомная энергетика доказала свою способность эффективно производить электричество. Возможность производить водород с помощью высокотемпературных ядерных реакторов расширяет применение ядерной энергии в сферы, где дефицит органики ощущается в еще большей степени, чем в генерации электричества. Водород как энергоноситель и химический агент — ключ к промышленным технологиям, транспорту, коммунальному сектору¹.

Положительные особенности атомной энергетики, включая неограниченность топливного ресурса, широкие сферы использования, доступность, техническую подготовленность, а также снижение негативного влияния выбросов от сжигания органического топлива, стимулируют ее активное развитие.

Однако наряду с перечисленными достоинствами атомной энергии, которые стимулируют наращивание ее использования для удовлетворения растущих энергетических потребностей стран мира, общественность озабочена ее потенциальной опасностью. Атомная энергия ассоциируется у людей с опасностью ее примене-

ния как оружия и с радиационной опасностью даже при мирном использовании. У населения планеты продолжает вызывать беспокойство возможность переключения ядерных технологий и ядерных материалов гражданской атомной энергетики на создание ядерного оружия. Риск несанкционированного переключения повышается при расширении круга стран, использующих атомную энергетику, особенно если на территории этих стран будут создаваться установки с наиболее чувствительными с точки зрения риска распространения технологиями: обогащение урана и переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Радиационная опасность атомной энергии проявилась в ряде аварий и при мирном ее использовании. Распространение радиоактивности при тяжелых авариях с разрушением реакторов, как показали аварии Чернобыля и Фукусимы, выходит за пределы АЭС и за границы страны, где работали эти атомные станции, что демонстрирует глобальный характер радиационной опасности атомной энергетики.

Взвешивая *за и против*, многие страны, в том числе не знакомые ранее с ядерными технологиями, заявляют в МАГАТЭ о намерении включиться в мирное использование атомной энергии². Расширение масштабов использования атомной энергии ставит перед международным сообществом задачу разработки такой структуры глобальной гражданской атомной энергетики, которая обеспечит максимально эффективное, устойчивое использование ее энергетических возможностей на благо людей и гарантирует безопасность ее применения.

Термин *безопасность атомной энергетики* в данном случае понимается в широком смысле и включает ядерную и радиационную безопасность, гарантии нераспространения, физическую защиту, контроль и учет ядерных и радиоактивных материалов. Это требование относится ко всем звеньям структуры атомной энергетики, как к АЭС, так и к производствам ядерного топливного цикла (ЯТЦ), и должно выполняться на всех этапах жизненного цикла ядерных установок и ядерных материалов — *от колыбели до могилы* (КдМ).

Очевидно, что решить эту задачу можно только совместными усилиями международного сообщества. Атомная энергетика — явление глобальное. Безопасность атомной энергетики выше национальных границ. Невозможно решать проблемы разработки ядерных технологий и обеспечения их безопасности изолированно, в отдельно взятой стране. В совокупности топливный цикл от добычи сырья до изоляции отходов экономически не доступен каждому пользователю реакторов, поэтому ставится вопрос о разработке *архитектуры глобальной атомной энергетики*.

При разработке структуры глобальной атомной энергетики тесно пересекаются две линии. Это техническая линия, то есть техническое совершенствование объектов атомной энергетики, и организационная линия — правовая и организационная база для определения поведения, которое ожидается от всех участников развития глобальной гражданской атомной энергетики³. Ниже я рассмотрю две эти линии, а также сферы, в которых организационные и технические составляющие неразрывно связаны.

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Ядерный топливный цикл

В международном ядерном сообществе продолжается дискуссия о топливном цикле атомной энергетики: открытый или замкнутый ЯТЦ?

Основным положением сторонников *открытого цикла* является запрет на извлечение плутония из ОЯТ и на его повторное использование в ядерных реакторах, что, по их мнению, решает проблему нераспространения. Однако при развитии атомной энергетики по модели открытого ЯТЦ возникают проблемы, связанные с ограниченностью ресурсов дешевого природного урана, с хранением постоянно увеличиваю-



щегося объема ОЯТ, с наращиванием производства обогащенного урана. Так, при суммарной электрической мощности ~2000 ГВт (эл.) в 2050 г. годовая добыча урана должна быть более чем 300 тыс. т, потребление урана до 2050 г. составит более 10 млн т, мощность разделительного производства возрастет до ~450 млн е.р.р. в год, а для хранения ОЯТ необходимо построить около десятка хранилищ типа Юкка Маунтин. Величины, характеризующие годовую производительность, увеличиваются в сравнении с нынешним уровнем пропорционально мощности атомных станций. Вводимые в эксплуатацию реакторы должны быть обеспечены топливом на весь срок службы, который в настоящее время составляет до 60 лет.

Учитывая все это, а также дальнейшее наращивание ядерных мощностей, объемы требуемых ресурсов дешевого урана выходят за рамки разумных оценок. Это ставит атомную энергетику в позицию нынешней органической энергетики, дальнейшее развитие которой ограничивается ресурсами топлива. Что касается хранилищ ОЯТ, то известно, какие трудности испытали США в связи со строительством и вводом в эксплуатацию хранилища ОЯТ в Юкка Маунтин объемом ~70 тыс. т, в результате приняв решение о прекращении его разработки.

Наконец, необходимое для развития атомной энергетики с открытым циклом наращивание производства по обогащению урана находится в противоречии с исходным аргументом сторонников открытого цикла о главенстве проблемы нераспространения при выборе линии развития атомной энергетики будущего. Понимая эти проблемы, в США разрабатывают концепцию *модифицированного открытого цикла*, которая предусматривает переработку использованного топлива и частичную сепарацию продуктов переработки для повышения эффективности использования топлива⁴.

Замыкание ЯТЦ обеспечит топливом ядерную энергетику любого масштаба, не выходя за пределы ресурсов дешевого природного урана; оно нацелено на решение проблемы обращения с радиоактивными отходами. Способность быстрых реакторов воспроизводить ядерное топливо в большем количестве, чем сжигается, позволяет не только обеспечить топливом самих себя, но и дает дополнительный ресурс топлива для вновь вводимых реакторов и подпитки действующих тепловых реакторов. Эта особенность реализуется при замыкании ЯТЦ, включающего переработку ОЯТ и использование выделяемых при этом топливных материалов и минорных актинидов для производства нового топлива. Образующиеся при переработке ОЯТ радиоактивные отходы, имеющие существенно меньший объем в сравнении с ОЯТ, после дополнительных операций подлежат окончательной изоляции. Для начальной загрузки быстрых реакторов будет использоваться плутоний, накопленный в ОЯТ тепловых реакторов. Его количества достаточно для наращивания не только мощностей быстрых реакторов в требуемом объеме, но и частично он может использоваться для подпитки тепловых реакторов⁵. С этой целью опережающим темпом необходимо разрабатывать и внедрять технологии переработки ОЯТ сначала тепловых реакторов, а затем и быстрых реакторов с использованием плутония в виде смешанного топлива в улучшенных тепловых реакторах и быстрых реакторах с расширенным воспроизводством. Одним из важных требований к замыканию топливного цикла, определяющим темпы возврата реакторного плутония для производства нового топлива, является время замыкания топливного цикла, которое желательно не должно превышать трех лет. Мощность предприятий по переработке облученного топлива составит в 2050 г. примерно 50 тыс. т в год, а количество рециклируемого плутония — 1500 т в год.

Ядерные реакторы

В настоящее время в атомной энергетике основное место занимают тепловые легководные реакторы, которые используются для централизованной выработки электроэнергии. В перспективе реакторы на тепловых нейтронах будут использоваться не только для получения электроэнергии, но и для энергоснабжения про-

мышленных технологий и коммунального сектора, для опреснения воды и производства водорода. Потребуется широкий диапазон единичных мощностей: малые и средние — автономные и региональные потребители, большие — централизованные сети. Необходимо будет обеспечить работу энергоблоков в режиме регулирования нагрузки. Тепловые реакторы должны улучшить использование топлива ($KB \sim 0,9$) и должны быть рассчитаны на сжигание топлива разного типа (U, Pu, Th). Для удовлетворения перечисленных требований наряду с разработкой усовершенствованных легководных реакторов будут разработаны высокотемпературные газовые реакторы, а также реакторы других типов. Технологические инновации потребуются для повышения уровня безопасности и для снижения риска тяжелых аварий. Это относится как к реакторным системам, так и к используемому в них топливу.

Архитектура развивающейся крупномасштабной глобальной атомной энергетики с замкнутым топливным циклом обязана включить реакторы на быстрых нейтронах (БР), предназначенные для базового производства энергии и расширенного воспроизводства топлива (Pu, U-233) с замыканием топливного цикла по U, Pu и минорным актинидам. Двойное назначение быстрых реакторов определяет оптимальный уровень мощности блока — около 1 ГВт (эл.) и работу в базовом режиме⁶. Расширенное воспроизводство топлива в быстром реакторе характеризуется коэффициентом воспроизводства (KB), который может иметь значение вплоть до $KB = 2,0$ ⁷. Выбор типа быстрого реактора — теплоноситель, тип топлива — и соответствующей величины KB определяется темпами развития атомной энергетики, наличием ресурса природного урана, соотношением быстрых и тепловых реакторов в структуре атомной энергетики, уровнем безопасности и, в конечном счете, экономикой. По нынешним оценкам развития глобальной ядерной энергетики и ее структуры, быстрые реакторы должны иметь $KB = (1,2-1,5)$. Прорабатывается идея включить пристанционный ядерный топливный цикл в состав АЭС. Воспроизводство топлива быстрыми реакторами и соединение их с пристанционным замыканием топливного цикла вносят ограничение на экспорт этой технологии. Использование быстрых реакторов без расширенного воспроизводства и при начальной загрузке обогащенным ураном ограничивает темпы развития атомной энергетики доступными ресурсами природного урана; кроме того, потребуется наращивание производства обогащения урана⁸.



ТЕХНИКА ПЛЮС МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕЖИМ

Ядерное нераспространение

Чтобы меры и действия, нацеленные на снижение риска распространения, не носили случайный и *догоняющий* характер, следует проводить постоянные исследования существующих и потенциальных угроз режиму нераспространения в условиях широкомасштабного развития атомной энергетики. Базой таких исследований должен быть системный анализ развития атомной энергетики с выявлением и оценкой факторов, влияющих на риск распространения. К таким факторам прежде всего относятся:

- рост числа стран, использующих атомную энергию;
- рост числа АЭС;
- замыкание ЯТЦ, включая переработку ОЯТ и рецикл ЯМ;
- рост числа предприятий топливного цикла, включая обогатительные производства;
- увеличение объемов оборота и транспортных потоков ядерных материалов;
- использование быстрых реакторов с воспроизводством топлива;
- увеличение объемов радиоактивных отходов.

Такой системный анализ должен лечь в основу подготовки рекомендаций по конкретным мероприятиям укрепления режима нераспространения. Очевидно, что такие рекомендации будут вырабатываться на основе компромисса, то есть путем сопоставления выгоды, получаемой от наращивания ядерных мощностей для решения задач энергетической безопасности, и того ущерба, который может быть нанесен обществу, если не принять меры по повышению устойчивости ядерной энергетической системы к распространению. Для повышения надежности рекомендаций необходимо иметь инструмент, позволяющий проводить сравнительную количественную оценку риска распространения при реализации тех или иных решений.

В настоящее время при выработке решений по проблеме нераспространения установилась практика использования качественных критериев, выработанных в период 40-летней давности при имевшем место тогда уровне развития ядерных технологий, их стоимости и доступности, а также при существовавшей в то время системе международных отношений. Развитие ядерных технологий, рост их доступности как за счет относительного снижения их стоимости на постоянно развивающемся международном рынке, так и из-за снижения уровня их секретности коренным образом изменило ситуацию. Появление и развитие некоторых ядерных технологий, например внедрение центрифуг в производство обогащенного урана, имели революционное влияние на соотношение рисков распространения, связанных с использованием различных технологий.

Некоторое время назад был предложен метод количественной оценки риска, основанный на статистической обработке экспертных оценок⁹. Этот метод позволил на примере сравнения рисков скрытного создания оружейного ядерного устройства при несанкционированном переключении ядерных материалов различного типа предсказать уязвимые места в существующем механизме обеспечения режима нераспространения. Пример использования такого количественного подхода для сравнительной оценки риска распространения при использовании различных исходных материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Риск распространения для различных исходных ядерных материалов

Исходный материал	Время Тн–Тв То	Цена Fn–Fv Fo	Скрытность Sn–Sv So	Безопасность Dn–Dv Do	Доступность An–Av Ao	Риск распространения Ro5–R95 Ro
НОУ	1,5–3 2,1	3–15 6,1	10–50 24	0,5–1 0,7	10–100 39	8,16–185 53,3
ВОУ	1	1	1	1	1	1
Реакторный плутоний	3–10 5,2	8–60 19	0,2–0,9 0,46	0,2–0,9 0,46	0,1–5 1,25	0,00014–0,0139 0,0028
Оружейный плутоний	1,5–4 2,4	2–20 5,1	0,2–0,9 0,46	0,5–0,9 0,68	0,1–0,5 0,24	0,00095–0,0217 0,0062

Время Т: длительность периода создания некоторого арсенала ядерных взрывных устройств; увеличение длительности периода ведет к снижению риска.

Цена F: стоимость создания арсенала, включая вложения во все компоненты технологической цепочки по созданию ядерных взрывных устройств из исходного материала и включая стоимость исходного материала; увеличение стоимости создания арсенала ведет к снижению риска.

Скрытность S: скрытность создания арсенала; увеличение скрытности ведет к увеличению риска.

Безопасность D: технологическая безопасность работ по созданию арсенала; увеличение безопасности ведет к увеличению риска.

Доступность A: доступность исходного материала; увеличение доступности исходного материала ведет к увеличению риска.

Риск распространения R содержит значения математических ожиданий R_i и оценивается соотношением:

$$R = (1/T) \cdot (1/F) \cdot S \cdot D \cdot A$$

Созданный в результате такого проекта инструмент количественного анализа риска возможно и необходимо было бы использовать для подготовки институциональных решений, нацеленных на решение проблем нераспространения ядерного оружия, материалов и технологий на новом этапе развития ядерной энергетики, а также для сравнения по признаку риска распространения инновационных проектов ядерных реакторов и топливного цикла.

Требуется проведение значительной работы с использованием количественного анализа риска для оценок и оптимизации различных институциональных решений, предлагаемых для предстоящего этапа широкомасштабного развития атомной энергетики. К таким работам в первую очередь относятся:

- разработка концепции международных центров ЯТЦ, нацеленных на снижение риска распространения путем выполнения под международным контролем операций в наиболее уязвимых с точки зрения распространения звеньях топливного цикла: обогащение урана, банк НОУ, производство и поставка топлива, хранение ОЯТ, переработка ОЯТ, рецикл топлива;
- внедрение в практику международного регулирования и контроля глобального дистанционного мониторинга ядерных материалов на всех этапах заявленной ядерной деятельности. Обязательное использование такого инструмента для мониторинга количества и перемещения делящихся и радиоактивных веществ должно быть нацелено на предотвращение наработки и несанкционированного использования ядерных материалов, включая оценку обнаружения возможного хищения, в том числе при их транспортировке;
- внедрение в практику правила обязательной поставки в составе ядерных объектов (АЭС, ЯТЦ и др.) компьютеризированных систем, обеспечивающих режим нераспространения (контроль и учет, физическая защита и т.д.);
- регулирование распространения знаний в области ядерных технологий в сфере чувствительной информации.

Таким же или схожим образом должны рассматриваться задачи в сфере инновационных проектов ядерных реакторов и технологий топливного цикла с целью выработки рекомендаций по системе критериев оценки ядерных технологий с позиций снижения риска распространения.

Исследования в этих направлениях, нацеленные на разработку новых подходов к обеспечению гарантий нераспространения ядерного оружия, материалов и технологий являются таким же необходимым компонентом обоснования безопасного развития крупномасштабной атомной энергетики, как и работы по повышению ее ядерной и радиационной безопасности.

Ядерная и радиационная безопасность

Тяжелая авария на АЭС *Фукусима-1* еще раз подтвердила, что принципиальным условием развития атомной энергетики при любом стечении обстоятельств



являются гарантии безопасности. Катастрофическая последовательность событий (землетрясение, цунами, потеря систем отвода остаточного тепла, перегрев и разрушение топлива, образование и взрывы водорода, разрушение защитных барьеров) привела к тяжелой аварии высшей категории с распространением радиоактивности далеко за пределы АЭС.

После аварии на АЭС *Фукусима* идет обсуждение широкого круга вопросов, включая необходимость нововведений не только в области нераспространения, но и в сфере ядерной и радиационной безопасности. Обсуждаются предложения о создании новых структур, развития инновационных методов управления, обязательных международных стандартов.

Необходим детальный анализ всех аспектов аварии и разработка мероприятий и в технической составляющей, и в нормативно-правовой сфере по предотвращению таких событий для всех действующих и создаваемых объектов атомной энергетики. Это требует открытости процесса оценки и проверки безопасности АЭС. Атомная энергетика — явление глобальное, и требования безопасности также должны носить глобальный характер. Оценка надежности и безопасности АЭС должна проводиться при участии экспертов разных стран и международных организаций. Такое взаимодействие относится и к согласованию требований оценки безопасности АЭС, и к процедурам проверок.

Международный режим ядерной безопасности, сформированный на основе Конвенции по ядерной безопасности и других соглашений, построен на согласии государств добровольно следовать его рекомендациям. В то же время даже незначительные отказы и пренебрежение признанными нормами поведения наносят непоправимый удар по всем. Необходимы дальнейшее совершенствование и ужесточение этого режима. Необходимы единые стандарты, необходимые средства принуждения к тем, кто игнорирует принципы ядерной безопасности.

Прежде всего надо удостовериться, что существующая сегодня атомная энергетика безопасна. С этой целью проводятся стресс-тесты на действующих АЭС на предмет устойчивости к воздействию экстремальных природных условий, включая потери внешних источников энергоснабжения, поглотителя тепла и т. д. Однако стресс-тесты — это не разовое мероприятие. Безопасность АЭС должна обеспечиваться и подтверждаться постоянно. Такая работа должна выполняться в международном формате, с тем чтобы совместно совершенствовать методики и критерии стресс-тестов и обмениваться их результатами. Эти работы должны проводиться максимально открыто, чтобы обеспечить необходимое доверие. Этому могут способствовать международные центры экспертизы, которые будут участвовать в проведении анализа безопасности и в случае необходимости оказывать помощь и поддержку операторам.

Особая тема — оказание содействия странам, только приступающим к развитию атомной энергетики. Необходимо разработать требования к странам, намеренным встать на путь развития атомной энергетики. Условием приобщения к программам развития ядерной энергетики является наличие соответствующей инфраструктуры, создания систем лицензирования и надзора за безопасностью и разработки четкой нормативно-правовой базы. Особое значение приобретает подготовка кадров для атомной энергетики в странах, вступающих на путь ее создания¹⁰. В России создается Международный центр подготовки национальных специалистов, включая операторов АЭС. Работа по повышению безопасности АЭС за счет технических усовершенствований должна проводиться постоянно.

Образование водорода — уязвимое место энергетических реакторов, использующих воду в качестве теплоносителя и цирконий в оболочке топлива. Водород образовался не только на ФЭС *Фукусима*, но и при авариях на Три-Майл-Айленд и Чернобыле. Водород — это реальная и серьезная угроза. Поиск мер по предотвращению этого процесса или, по крайней мере, по снижению тяжести его

последствий — давнишняя задача, но очередное предупреждение *Фукусимы* настоятельно требует конкретных ответов на это вызов. В ближайшем будущем необходимы будут работы по повышению надежности систем отвода тепла, а также меры по подавлению детонации и горения водорода. Но кроме этого, в среднесрочной перспективе для действующих и сооружаемых легководных реакторов необходимо разработать топливо с повышенной устойчивостью при взаимодействии с водяным паром в аварийных ситуациях.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Доступ к надежным и дешевым источникам энергии, таким как атомная энергия, является критически важным условием национального развития развивающихся стран. Ожидается, что все большее количество стран примет решение о продолжении реализации или начале программ ядерной энергетики. Возникает вопрос о том, какое место будут занимать страны и регионы в архитектуре глобальной атомной энергетики.

Вопрос о собственной структуре ядерно-энергетического комплекса решается каждой страной самостоятельно. Ряд развивающихся стран, таких как Китай, Индия и другие, в этом отношении уже определились, и их программы включают в достаточной полноте и ядерные реакторы, и топливный цикл. В то же время многие страны, которые изъявляют намерение приобрести к мирному использованию атомной энергии, должны определиться, какая часть ядерно-технологического комплекса реализуется внутри страны и каким образом и кем обеспечивается полный набор услуг, необходимых для функционирования атомной энергетики. Разработка, создание и эксплуатация собственного ЯТЦ может оказаться непосильным бременем для отдельной страны. В настоящее время тенденции к интеграции присутствуют в той или иной степени на всех стадиях ЯТЦ, начиная с добычи природного урана. Такие высокотехнологичные составляющие ядерного топливного цикла, как обогащение урана, изготовление топлива, переработка ОЯТ и производство смешанного уран-плутониевого топлива, освоены сравнительно небольшим числом стран. Но *клуб ядерных стран* расширяется. Все это, а также озабоченность нераспространением делящихся материалов создает предпосылки для поиска путей решения этой проблемы.

Один из продвинутых вариантов — это организации крупномасштабных международных центров ЯТЦ. Международные центры ЯТЦ нацелены помочь развивающимся странам использовать ядерную энергию в мирных целях, решая проблемы экономичности, безопасности, нераспространения. Основными функциями таких центров могут быть банк и производство ядерного топлива, хранение и переработка ОЯТ, ядерные энерготехнологические центры воспроизводства топлива, выжигания актинидов, лизинг ядерного топлива, лизинг ЯЭУ и даже ядерные энерготехнологическими установками для производства водорода, который может быть распределен внешним потребителям для удовлетворения их энергетических потребностей.

Что касается глобальной системы услуг в области ЯТЦ, следует учесть не только то, что здесь пересекаются коммерческие и государственные интересы, но и то, что эта система сегодня состоит из двух секторов промышленности, относящихся к различным стадиям топливного цикла. Головная часть ЯТЦ достаточно хорошо развита на мировом рынке и включает поставки урана, конверсию и обогащение, а также изготовление топлива для различных типов АЭС. В этих отраслях имеются производственные мощности, которые превышают текущие потребности.

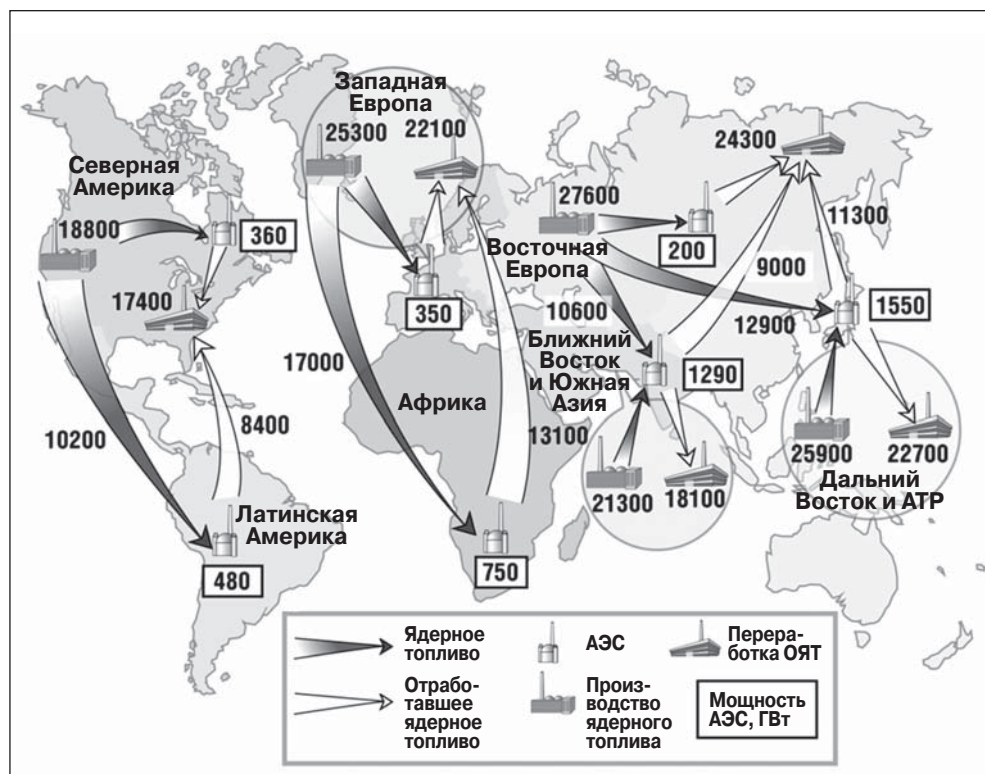
Совершенно другая картина существует в замыкающей части ЯТЦ. В этой части не сформировано пока рынка услуг ни по обращению с ОЯТ, ни по его переработке, в том числе по обращению с ядерными отходами. Существующие технологии переработки были разработаны в 1950-е — начале 1960-х гг. Ключевой вопрос в том,



что страны, обладающие этими технологиями, не намерены оставлять на своей территории ядерные отходы после переработки ОЯТ, полученного из других стран. Считается, что ядерные отходы должны быть возвращены в страну происхождения ОЯТ. Экономика операций по переработке ОЯТ и МОХ топливу остается неясной. В то же время понятно, что без замыкания ЯТЦ на базе новых технологий у глобальной атомной энергетики нет будущего.

Чтобы ощутить картину будущей атомной энергетики мира, были выполнены оценки развития региональных ядерно-энергетических систем на перспективу¹¹. В качестве одного из вариантов развития региональных ядерно-энергетических систем принято предположение, что создаваемые в странах ядерные генерирующие мощности способны способствовать сокращению разрыва в энергопотреблении на душу населения между развитыми странами и остальным миром. Предполагалось, что выравнивание душевого энергопотребления происходит исключительно за счет ядерной энергии на уровне ~4000 кВт-часов в год — принятом ООН значении среднемирового *достаточного* электропотребления. Рассмотрен сценарий размещения производств ядерного топливного цикла (обогащение, фабрикация топлива и его переработка) только в странах и регионах их сегодняшнего размещения (США, Западная Европа, Россия, Япония, Индия, Китай). Естественно, экономические и политические мотивы могут привести к другим сценариям. Полученные в этих оценках количественные показатели ядерных мощностей, производств ЯТЦ и потоки ядерных и радиоактивных материалов дают информацию для подготовки организационной базы и разработки концепций международных центров ЯТЦ. Пример оценки характеристик основных элементов международного топливного цикла приведен на рис. 1.

Рис. 1. Производство и трансрегиональные потоки свежего и облученного ядерного топлива в 2100 г. Модель сокращения разрыва¹²



Оценки, приведенные на рис. 1, показали, что масштабы производств ЯТЦ (до 100 000 т в год) и транспортных потоков (до 50 000 т в год) находятся на технически приемлемом уровне (для мощности АС ~5000 ГВт (эл.)).

Масштабные и структурные изменения в развивающейся глобальной атомной энергетике, естественно, могут привести к снижению уровня ядерной и радиационной безопасности, к большей доступности ядерных материалов и повышению риска распространения ядерных технологий и материалов¹³. Понятно, что необходимо подготовить и обсудить новые подходы и внедрить дополнительные меры, обеспечивающие снижение риска или, по крайней мере, сохранение его на нынешнем уровне. Очевидно, что эти меры необходимо разрабатывать и применять во всех сферах, обеспечивающих режим безопасности и нераспространения: политической, институциональной, технической.

Обеспечение режима

В решении проблемы безопасного развития атомной энергетике должны быть задействованы как государственные, так и частные структуры. Чтобы найти такие решения, необходимо учитывать и синтезировать отличающиеся интересы всех игроков в ядерной сфере: правительства, населения, неправительственных и частных организаций. Должны быть найдены пути, как объединять эти интересы для решения текущих и грядущих вопросов развития ядерной энергетике.

Этим проблемам международное сообщество уделяет внимание как в рамках международных организаций, так и при сотрудничестве на двусторонней основе. Эти вопросы частично обсуждались на конференции МАГАТЭ по ядерной безопасности в июне 2011 г. Общее видение картины развития ядерных энергетических систем рассматривается в рамках задачи Глобальной архитектуры инновационных ядерно-энергетических систем (GAINS) и международного проекта МАГАТЭ по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО).

Понимая значимость этих задач, Россия ведет конкретные работы по их решению. Исходя из того что обогащение урана является одним из чувствительных звеньев ЯТЦ с точки зрения распространения, в Ангарске (Россия) создан и функционирует Международный центр по обогащению урана (МЦОУ). Новый подход состоит в коммерческом предложении странам-новичкам поставок электроэнергии от АЭС, построенных в этих странах по принципу «строю, владею, эксплуатирую». Такой подход зафиксирован в соглашении России с Турцией о сооружении АЭС Аккую. В поиске решений обеспечения устойчивого глобального развития гражданской ядерной энергетике Россия проводит совместные работы на двусторонней основе. Так, в рамках направления «Разработка структуры гражданской ядерной энергетике», которое разрабатывается совместно с США, анализируются ключевые вопросы реализации взаимодополняющих концепций создания международных центров топливного цикла (МЦТЦ) и топливных услуг КдМ. Проводимые исследования предлагается координировать с МАГАТЭ и другими международными организациями для дальнейшей разработки рассматриваемых концепций и подготовки более широкого их рассмотрения.

Внедрение ядерной энергетике в странах, которые исторически не подготовлены к обращению с ядерной технологией (ядерная безопасность и гарантии нераспространения), будет осуществляться с помощью стран, владеющих ядерными технологиями. При этом необходимо разработать и обеспечить ряд условий поставки, которые помогли бы обеспечить ядерную и радиационную безопасность и гарантии нераспространения при использовании ядерных установок. Среди этих условий должны быть проработаны:

- поставки АЭС с полным обеспечением экспортерами ядерных услуг (МЦЯТЦ, КдМ): поставки свежего топлива, возврат облученного топлива, удаление с площадки АЭС РАО, снятие с эксплуатации;



- системы международного контроля как условие поставки: объектами такого контроля должны быть все звенья АЭС и ЯТЦ, включая ядерные материалы, РВ и РАО в странах — экспортерах и получателях;
- инструменты физической защиты и непрерывного контроля как обязательный элемент поставки;
- унифицированные компьютерные системы учета и контроля ЯМ, РВ и РАО в сочетании с постоянным дистанционным мониторингом и детектированием РУ, ЯМ, РВ, РАО.

Все эти вопросы должны решаться в рамках международного сотрудничества. Это сотрудничество включает не только техническую составляющую, но и создание правовой и организационной базы для определения линии поведения, которое ожидается от всех участников устойчивого развития глобальной гражданской атомной энергетики, мониторинга такого поведения и обеспечения надлежащего уровня компетентности и возможностей всех заинтересованных участников. Усилия должны быть направлены на разработку аспектов государственного/частного взаимодействия при решении проблемы безопасного, в широком смысле, устойчивого развития ядерной энергетики не только в сфере глобальной системы услуг в области ЯТЦ, но и в других составляющих ядерно-энергетического комплекса.

Выводы

Итак, многое делается, но предстоит еще многое сделать на пути разработки условий обеспечения устойчивого глобального развития гражданской атомной энергетики с необходимым уровнем ядерной и радиационной безопасности, экологической приемлемости и решающей проблему нераспространения.

Для успешного развития атомной энергетики и обеспечения (хотя бы частично) роста энергопотребления в глобальных масштабах, необходимо помнить о стратегических задачах применительно к этой отрасли.

Первое. При сегодняшних оценках ограниченных ресурсов урана для реализации умеренного, а тем более агрессивного сценария ядерно-энергетического развития, необходима многокомпонентная структура ядерно-энергетической системы с расширенным воспроизводством топлива, замкнутым топливным циклом, тепловыми и быстрыми реакторами различных типов. Архитектура развивающейся глобальной атомной энергетики с замкнутым топливным циклом обязана включить БР, предназначенные для базового производства энергии и расширенного воспроизводства топлива (Pu, U-233) с замыканием топливного цикла по U, Pu и минорным актинидам.

Второе. Для повышения надежности рекомендаций в области ядерного нераспространения необходимо иметь инструмент, позволяющий проводить сравнительную количественную оценку риска распространения при реализации тех или иных решений. На основе количественного и качественного анализа должны быть разработаны следующие меры противодействия ядерному распространению: разработка концепции международных центров ЯТЦ, нацеленных на снижение риска распространения путем выполнения под международным контролем операций в наиболее уязвимых звеньях топливного цикла; внедрение глобального дистанционного мониторинга ядерных материалов на всех этапах заявленной ядерной деятельности; внедрение в практику правила обязательной поставки в составе ядерных объектов компьютеризированных систем, обеспечивающих режим нераспространения (контроль и учет, физическая защита и т.д.); регулирование распространения знаний в области ядерных технологий в сфере чувствительной информации.

ЛИСТАЯ СТАРЫЕ СТРАНИЦЫ




МОХАМЕД ЭЛЬБАРАДЕЙ: Мы стремимся обеспечить широкое понимание преимущества ядерной энергии с точки зрения экологии перед другими видами энергетических источников, при этом важно, чтобы подобные сравнения источников энергии были беспристрастными и сбалансированными. [...] Мы полны решимости обеспечить то, чтобы ядерная энергия и в будущем оставалась жизнеспособным источником производства энергии для тех государств, которые предпочитают ее использовать. Тем не менее также очевидно, что мнения международного сообщества, равно как и государств-членов МАГАТЭ, относительно преимуществ ядерной энергии расходятся.

В роль Агентства не входит навязывание ядерной энергетики или любой другой ядерной технологии государствам, которые не стремятся к этому. [...] Мы, однако, стремимся к более активному диалогу по ядерным проблемам с руководителями в правительствах, неправительственными организациями и широкой общественностью, поскольку считаем, что посредством повышения уровня информированности относительно преимуществ ядерных технологий [...] мы можем повысить эффективность коллективного поиска решений некоторых из проблем, стоящих перед нашей планетой.

Режим ядерного нераспространения переживает трудные времена.
Ядерный Контроль. № 1, Весна 2004. С. 15.



Третье. Масштабные и структурные изменения в развивающейся глобальной атомной энергетике могут привести к снижению уровня ядерной и радиационной безопасности, большей доступности ядерных материалов и повышению риска распространения ядерных технологий и материалов¹⁴. Необходимо подготовить и обсудить новые подходы в рамках международного режима ядерной безопасности, сформированного на основе Конвенции по ядерной безопасности и других соглашений. Необходимо дальнейшее совершенствование (и ужесточение) этого режима с использованием политических, институциональных и технических мер. Постоянно на многосторонней основе должна вестись работа по повышению безопасности АЭС за счет технических усовершенствований.

Четвертое. При разработке структуры глобальной ядерной энергетики связка потребитель–поставщик должна получить более четкую организационно-правовую базу. Необходимо выявить интересы потребителей энергии и возможности поставщиков обеспечить эти запросы. Со стороны потребителей предвидятся принципиальное увеличение запросов на объемы ядерных мощностей и их широкое распределение по многим странам мира. Расширяются требования потребителей к уровню мощности (в дополнение блокам большой мощности возникает потребность в блоках малой и средней мощности), автономности источников энергии, виду вырабатываемой энергии и к ее использованию для различных нужд. Каждый потребитель, приобретая источник энергии, будет нуждаться в поставках топлива, в услугах по обращению с ОЯТ и РАО, в услугах по снятию блока с эксплуатации, в подготовке квалифицированного эксплуатационного персонала и персонала управления, контроля и регулирования. Поставщики должны обеспечить весь спектр необходимых потребителю услуг, гарантируя при этом качество, своевременность и ответственность за предоставленные продукты и услуги. 

Примечания

¹ Александров А. П., Пономарев-Степной Н. Н. Атомная энергетика и технический прогресс. *Атомной энергетике — 20 лет*. М.: Атомиздат, 1974.

Пономарев-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика. *Атомная энергия*. 2004. Т. 96. Вып. 6. С. 411–426.

² Выступление генерального директора Госкорпорации *Росатом* С. В. Кириенко на пленарном заседании 55-й сессии Генеральной конференции МАГАТЭ. 2011.

³ Гагаринский А. Ю., Игнатьев В. В., Пономарев-Степной Н. Н., Субботин С. А., Цибульский В. Ф. Роль ядерной энергетики в структуре мирового энергетического производства XXI в. *Атомная энергия*. 2005. Т. 99. Вып. 5. С. 323–335.

Пономарев-Степной Н. Н. Роль ядерной и атомно-водородной энергетики в структуре мирового энергетического производства XXI века. *Вести в электроэнергетике*. 2005. № 1. С. 7–12.

Пономарев-Степной Н. Н. Атомная энергетика и ее будущее. Доклад, Научная сессия Общего собрания РАН «Энергетика России: проблемы и перспективы». 2005, 20–21 декабря.

Ядерная энергия: экспертные оценки развития. Курчатовский институт 1949–2008. М., 2008.

⁴ DOE Fuel Cycle Research and Development Program. Carter «Buzz» Savage. Plutonium Futures. *The Science*. 2010, 21 September.

⁵ Пономарев-Степной Н. Н., Цибульский В. Ф. Оценка эффективности использования смешанного уран-плутониевого топлива в ВВЭР. *Атомная энергия*. 2007, ноябрь. Т. 103. Вып. 5. С. 275–277.

⁶ Пономарев-Степной Н. Н., Цибульский В. Ф. К выбору мощности БН для российской атомной энергетике. *Атомная энергия*. 2007, август. Т. 103. Вып. 2. С. 83–89.

⁷ Боболович В. Н., Пономарев-Степной Н. Н., Фейнберг С. М. и др. Быстрые реакторы-размножители с гелиевым теплоносителем. Доклад на 11-м симпозиуме стран СЭВ по быстрым реакторам. Обнинск, 1973.

⁸ Пономарев-Степной Н. Н. О возможностях и путях осуществления инициативы президента Российской Федерации. *Ядерный Контроль*. 2001. № 2. С. 43.

⁹ Sukhoruchkin V., Ponomarev-Stepnoi N., Rumjantsev A., Shmelev V., Toevs J., Wagner R. Jr. A New Look at Metrics for Proliferation Resistance. INMM 41th Annual Meeting, 2000, July 16–20. New Orleans, Louisiana USA.

¹⁰ Мурогов В. М., Пономарев-Степной Н. Н., Артисюк В. В., Каландарашвили А. Г., Коровин Ю. А., Воропаев А. И. International Initiative of IAEA: From Innovative Nuclear Technologies to the Global Role of Nuclear Education. Международные инициативы МАГАТЭ: от инновационных ядерных технологий — к роли ядерного образования. *Atom for peace: An international journal*. 2006. Vol 1. № 2/3.

¹¹ Гагаринский А. Ю. и др. Цит. соч.

¹² Е. П. Велихов и др. Россия в мировой энергетике XXI века. М., 2006.

¹³ Иванов В. Б., Каграманян В. С., Полушкин А. К., Пономарев-Степной Н. Н., Убеев А. В., Чебесков А. Н. Ядерный ренессанс: Российская специфика и глобальный контекст? *Индекс Безопасности*. 2008. № 2 (85).

¹⁴ Иванов В. Б. и др. Цит. соч.