

С Т А Т Ь И

УДК 621.311.2:621.039.001.2

ТРЕБОВАНИЯ К АТОМНЫМ СТАНЦИЯМ XXI в.*

*Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Пономарев-Степной Н.Н., Сидоренко В.А.
(РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Тенденцией развития энергетики в XXI в. будет стремление к более равномерному потреблению энергии на душу населения, а также по регионам мира. Прогнозируется, что произойдет как минимум удвоение производства энергии к середине XXI в., потребление составит примерно $5 \cdot 10^{20}$ Дж/год. Потребление энергоресурсов оценивается следующим распределением по видам энергии: электроэнергия — около 1/4, тепло, транспорт, технология — около 3/4. В качестве основных конкурирующих первичных энергетических ресурсов будут органическое топливо (уголь, нефть, газ), атомная и солнечная энергия.

XXI в. — этап крупномасштабной ядерной энергетики. Динамика развития и долевое участие каждой энергетической технологии в балансе мирового производства энергии определяются в основном ресурсами топлива, экономическими показателями, воздействием на окружающую среду.

Разведанные запасы органического топлива могут обеспечить энергопотребление в течение нескольких сот лет. Однако с учетом того, что основная доля ресурсов органического топлива приходится на уголь, по мере уменьшения запасов нефти и газа потребуются структурная перестройка пользователей первичных ресурсов энергии с включением в них заметной доли угля, а это потребует новых технологических решений.

Оценки запасов ядерного топлива в земной коре и водах океанов даже при консервативных предположениях о возможном его извлечении показывают, что производство атомной энергии не встретит ресурсных ограничений на обозримый период времени. То же можно сказать и о принципиальной возможности использования солнечной энергии. Поток солнечной энергии в тысячи раз превосходит ежегодно потребляемую человечеством энергию, естественный синтез биомассы — во много раз.

Окружающая среда с теми или иными последствиями адаптируется к техногенному воздействию. При производстве энергии в окружающую среду возвращаются отходы и низкопотенциальное тепло. Одним из принципиальных ограничений наращивания производства энергии является тепловой предел, который возникнет вследствие нарушения теплового баланса Земли. Достижение этого предела выходит за XXI в.

В последние десятилетия активно изучается глобальное потепление климата, обусловленное парниковым эффектом. Оценивая возможность адаптации природы к наращиванию производства энергии, можно сказать, что окружающая среда не справляется с экологической нагрузкой от сжигания органического топлива из-за выбросов продуктов сгорания. Разработанная и реализуемая технология очистки продуктов сгорания от оксидов серы и азота позволила уменьшить опасность для окружающей среды этих вредных выбросов. Однако вызывает сомнение возможность приемлемого технического решения проблемы выброса углекислого газа. Этот фактор является одним из принципиальных ограничений наращивания производства энергии за счет сжигания органического топлива.

*Журнальный вариант доклада на 10-й ежегодной конференции Ядерного общества «От первой в мире АЭС к энергетике XXI века» (28 июня — 2 июля 1999 г., Обнинск).

Для ядерных источников характерна компактная форма отходов и технически обоснованная возможность концентрации и локализации радиоактивных продуктов сгорания. Суммарная масса радиоактивных отходов отличается от массы отходов при сжигании органического топлива в сотни тысяч раз. И это несомненное преимущество ядерной энергетики. Потенциальная экологическая опасность использования атомной энергии связана с образованием радиоактивных отходов. При работе реакторов изменяется баланс радиоактивных веществ. Одновременно протекают два противоположных процесса: уничтожение радиоактивных ядер, имеющих естественную радиоактивность, и образование новых. Возникающая радиоактивность не превышает по количеству распадов активность исходных элементов. Однако так как продукты деления являются короткоживущими изотопами, радиоактивность облученного топлива по количеству распадов в единицу времени превышает радиоактивность исходного ядерного сырья на протяжении нескольких тысяч лет. Это определяет требование экологической приемлемости ядерного топливного цикла: образующиеся радиоактивные отходы должны быть локализованы на всех стадиях в обозначенном временном интервале. Оценивая принципиальную возможность решения этой проблемы, важно отметить, что благодаря небольшому объему радиоактивные отходы могут быть локализованы в компактной форме, а необходимый масштаб времени локализации находится в освоенных человеком пределах.

Таким образом, ядерная энергетика при нормальной эксплуатации и гарантированной локализации радиоактивных отходов имеет несомненные экологические преимущества. Ее влияние на окружающую среду может быть ограничено только тепловым воздействием.

Информация о вкладе различных энергетических ресурсов в мировое производство энергии позволяет проследить динамику использования основных энергетических ресурсов: древесина, уголь, нефть, газ, атомная энергия. Доля каждой конкурирующей энергетической технологии может быть описана закономерностью, обусловленной действием большого числа причин, к которым относятся ресурсы энергоносителей, влияние на среду обитания, эффективность генерации и использования энергии, риск, удобство, экономические аргументы (цена, стоимость, эффективность инвестиций) и многое другое. Одним из мотивов сосуществования нескольких видов энергетической технологии в значимых долях является недопустимость для общества зависимости от монопольного влияния одной из них.

Одним из принципиальных положений этих зависимостей является вывод об инерционности внедрения новой энергетической технологии в производстве энергии. Это обусловлено не столько техническими проблемами, сколько значительной емкостью капитальной составляющей энергетического производства и допустимыми из соображений риска темпами инвестиций. Время выхода той или иной технологии на лидирующие позиции в производстве энергии составляет более 100 лет. Природный газ будет занимать лидирующие позиции в производстве энергии в первой половине XXI в., однако истощение дешевых месторождений приведет к снижению его использования и необходимости введения в энергетику еще одного мощного энергетического ресурса.

Атомная энергия обладает неоспоримыми положительными качествами. Это неограниченные ресурсы топлива, высокая энергоемкость, возможность высокой концентрации отходов энергетического производства, а также экологическая совместимость. Наличие апробированной в энергетике ядерной технологии, доказанная экономическая конкурентоспособность и техническая безопасность делают атомную энергию фаворитом в обеспечении значительной доли производства энергии ко времени очередной смены энергоносителя. Таким образом, XXI в. это век становления крупномасштабной ядерной энергетики. Увеличение доли атомной энергии в производстве энергии не может произойти в короткий срок в силу инерционности развития производства. Поэтому длительное время будут сосуществовать несколько видов технологии, которые будут вносить значительный вклад в производство энергии.

Прогнозируя значительную долю атомной энергии в производстве энергии, необходимо сформулировать признаки крупномасштабной энергетики.

Доля атомной энергии в производстве энергии будет составлять более 10%, что при нынешних 3% означает увеличение в несколько раз. Признавая, что наиболее освоенной и технически удобной областью использования атомной энергии является производство электроэнергии, можно прогнозировать, что наращивание будет происходить в первую очередь за счет доли атомной энергии в производстве электрической энергии и достигнет нескольких десятков процентов в сравнении с нынешними 15%.

Наряду с наращиванием использования атомной энергии для производства электричества потребуются осваивать и другие области применения атомной энергии, такие, как бытовое и промышленное теплоснабжение, технологические процессы, транспорт. Внедрение атомной энергии на транспорте будет осуществляться в виде ядерных энергетических установок для морских судов, а также, возможно, в виде искусственного топлива, которое можно производить, используя атомную энергию в технологических процессах. Будет расширяться среда применения ядерных установок, охватывая не только традиционную сушу, но и океан, в перспективе и космос.

Основной рост производства энергии в следующем столетии будет происходить в развивающихся странах, поэтому неизбежно расширение числа стран, использующих атомную энергию. Это главным образом страны Азии, Южной Америки, Африки. Внедрение атомной энергии в странах и регионах, в которых отсутствуют мощные энергетические сети, потребует ядерных установок средней и малой мощности. Таким образом, потребуются создавать ядерные установки большой и средней мощности в составе единых энергетических сетей, а также установки малой мощности для работы в автономном режиме.

Особенности крупномасштабной ядерной энергетики, такие, как увеличение объемов и областей применения атомной энергии, расширение стран, использующих ядерные установки, характеризуют качественное изменение и делают необходимым уточнить условия и требования, которые должны быть обязательными для системы и ее отдельных элементов.

Образующиеся при функционировании ядерной энергетики радиоактивные отходы должны быть надежно локализованы в интервале времени, когда их радиоактивность превышает исходную сырьевых материалов. Надежная локализация радиоактивности — это последовательная реализация глубокоэшелонированной защиты, которая включает систему технологических барьеров, ограничивающих распространение радионуклидов, мероприятия по предотвращению аварийных нарушений барьеров и снижению аварийных последствий.

Крупномасштабная ядерная энергетика требует демонстрации нового, более высокого уровня безопасности, который должен быть воспринят обществом. Это требование относится ко всем элементам топливного цикла: атомная станция, реактор, отработавшее ядерное топливо, хранение, транспортировка, переработка, захоронение.

Современные атомные станции демонстрируют приемлемый уровень безопасности, опираясь на опыт эксплуатации и реализуя дополнительные мероприятия по повышению безопасности с учетом уроков аварий. Безопасность остальных элементов ядерного топливного цикла и в первую очередь производств по переработке отработавшего ядерного топлива и обращению с радиоактивными отходами обоснована в меньшей степени, что вызывает нарекания общественности. Требуется приложить серьезные усилия в области как фундаментальных и прикладных исследований, так и разработок и технологической реализации, чтобы достичь в этих звеньях эквивалентного уровня безопасности.

Для перспективной ядерной энергетики цель уменьшения исходной опасности атомного объекта (в первую очередь ядерно-энергетической установки) становится центральной. Это достигается оптимальным выбором его конструкции, наличием необходимого комплекса свойств и характеристик. В системе средств и способов безопасности на первый план будет выдвигаться максимальное использование и развитие свойств внутренней защищенности.

В снижении исходной опасности объекта — база уменьшения стоимости защитных средств и всей станции и устранения возможности аварий со значительными радиационными последствиями (тяжелых аварий).

К свойствам внутренней защищенности можно отнести такие группы технических свойств, решений и др., как:

максимально возможное устранение и снижение опасных факторов — уменьшение запаса реактивности, снижение давления, температуры, химической активности (или соответствующего выбора) теплоносителя, выбор соответствующих материалов, условий их работы, запасов в эксплуатационных условиях и др.;

отрицательные обратные связи при отклонении процессов от нормы, нейтрализующие аварийные процессы;

использование естественных и саморегулируемых процессов, исключающих возможность аварийных отказов, повреждений и др. или уменьшающих их последствия;

максимально возможная инерционность процессов, повышающая эффективность преодоления опасного развития событий и создающая дополнительные резервы времени для эффективного вмешательства оператора в процесс.

Аналогичным образом совершенствуются (повышается эффективность и надежность, удешевляются) средства управления авариями:

максимальное применение пассивных технических средств, т.е. средств, не требующих источников энергии или вспомогательных (инициирующих) механических устройств;

максимальное использование естественных процессов, самосрабатывающих устройств прямого действия и др. (непосредственно по режимному параметру или состоянию процесса и т.д.).

Одним из принципиальных компонентов безопасности является необходимый уровень культуры безопасности в звеньях государственного и технического управления, а также сфере производства. Увеличение числа стран, использующих атомную энергию, и особенно из числа развивающихся делает эту проблему актуальной.

Одним из основных аргументов конкурентоспособности ядерной энергетики XXI в. является неограниченность топливных ресурсов, обусловленная возможностью воспроизводства нового ядерного топлива: плутония и ^{233}U . Ныне действующие реакторы используют в лучшем случае около 1% добываемого урана. В этих условиях экономически присмлемые запасы урана могут обеспечить топливом ядерную энергетику нынешнего масштаба менее чем на 100 лет. Топливная база широкомасштабной ядерной энергетики должна быть основана на воспроизводстве и повторном использовании делящихся ядерных материалов. Замкнутый топливный цикл является обязательным условием крупномасштабной ядерной энергетики XXI в.

Такие признаки крупномасштабной ядерной энергетики, как увеличение объемов, расширение областей применения, числа стран, могут сказаться на риске распространения делящихся материалов, и необходимо выполнить значительные работы, направленные на повышение гарантий нераспространения. Должны быть разработаны и внедрены организационные и технические меры, технологические барьеры на пути несанкционированного распространения делящихся материалов, которые защищают ядерные материалы на уровне риска их доступности из источников естественного происхождения.

Требование снижения риска распространения будет влиять на отбор технологических решений во всех звеньях топливного цикла крупномасштабной ядерной энергетики, направляя их на уменьшение накопления пригодных для оружия ядерных материалов и использование конструктивных схем, затрудняющих выведение ядерных материалов из цикла.

Нераспространение ядерных материалов и технологии будет требовать постоянного внимания, учитывая научно-технические успехи в области информационных систем, системы распространения знаний, повышение уровня знаний и в области технологии получения опасных ядерных материалов. В связи с этим работы по снижению риска распространения должны включать:

совершенствование технических средств, в том числе средств первой и второй линии защиты, контроля ядерных материалов, дистанционный мониторинг;

разработку и внедрение новых видов технологии, которые снижают объем циркуляции и внутреннюю защиту ядерных материалов.

Экономические показатели будут играть решающую роль в выборе того или иного источника энергии в конкретной ситуации. Набор компонентов стоимости производства электроэнергии должен включать стоимость не только непосредственной генерации электричества, но и компенсации воздействия на окружающую среду. При этом важно учитывать воздействие на человека и окружающую среду при нормальных условиях работы и возникновении аварийных ситуаций с приемлемым показателем риска для всего топливного цикла. Среди энергетических источников разного типа только ядерная энергетика способна замкнуть затраты на компенсацию воздействия на окружающую среду. Это обусловлено высокой энергоемкостью ядерного топлива и соответственно компактной формой отходов. Органические источники энергии не способны к замыканию затрат по выбросу углекислого газа. Дополнительная составляющая так называемой социальной стоимости, которая учитывает воздействие каждой технологии на человека и окружающую среду, даже без учета воздействия углекислого газа более значима для органического топлива и особенно угля.

В силу большой емкости капитальной составляющей и длительности окупаемости энергетическое производство относится к разряду естественных монополий, что затрудняет действие рыночных механизмов в этой сфере. Поэтому наряду с экономическими аргументами при выборе той или иной энергетической технологии необходима политическая воля и настрой общества.

Ядерный энергетический комплекс. В хозяйственной деятельности общества ядерный энергетический комплекс использует добываемые из земли сырьевые материалы, производит полезную продукцию: энергию и изотопы и возвращает в окружающую среду отходы. Для выполнения этих функций ядерный комплекс должен иметь такие звенья, как добыча и переработка топливного сырья, изготовление топлива, реакторы, переработка отработавшего ядерного топлива, захоронение отходов. Реализация широкомасштабной ядерной энергетики требует существенного развития таких звеньев, как реакторы для расширенного воспроизводства ядерного топлива, радиохимическое производство для переработки отработавшего топлива, производство для повторного использования ядерных материалов и захоронения отходов. Многие звенья этой структуры в развивающейся ядерной энергетике являются продолжением существующего комплекса, включая его научную, техническую, промышленную и сырьевую базу. Все это создает условия для вхождения в масштабную ядерную энергетику XXI в.

Реакторы ядерной энергетики XXI в. В крупномасштабной ядерной энергетике будут присутствовать реакторы различного типа. Одним из возможных вариантов является их классификация по функциональной принадлежности: производство энергии, расширенное воспроизводство топлива, производство изотопов и выжигание актиноидов.

Основное назначение реакторов — производство энергии. В решение этой задачи будут вовлечены тепловые и быстрые реакторы всех функциональных направлений.

Разнообразие признаков и условий крупномасштабной ядерной энергетики определяет необходимость наряду с совершенствованием проектов ныне действующих реакторов проводить поиск и разработку реакторов нового поколения. Предпочтение при выборе направлений новых разработок должны иметь предложения, которые вносят новое качество в решение проблем ядерной энергетики будущего. Невозможно предложить на перспективу единственный проект, который бы наилучшим образом решил все задачи, стоящие перед ядерной энергетикой. В перспективе будет функционировать десяток типов реакторов, каждый из которых может наилучшим образом решать ту или иную задачу крупномасштабной энергетики. В то же время основные

требования — экономичность, безопасность и гарантии нераспространения в каждом проекте и топливном цикле должны выполняться неукоснительно.

Тенденцией развития энергетических реакторов будет продолжение линии на их использование для производства электричества. Будет продолжено строительство реакторов большой и средней мощности, хорошо зарекомендовавших себя на предыдущих этапах. Наряду с этим будут реализовываться линии в направлении дальнейшего увеличения мощности и в направлении реакторов малой мощности. Масштабы российских энергосистем европейской части и требование конкурентоспособности с ТЭЦ на органическом топливе обосновывают тенденцию увеличения единичной мощности блока, нацеленность на мировой рынок делает необходимым иметь для отечественного и зарубежного применения проект энергоблока, не уступающий западным по мощности и другим показателям.

Сегодняшний и прогнозируемый с учетом восточно-европейской и азиатско-тихоокеанской составляющих развития ядерной энергетики вклад легководных реакторов в мировой ядерный парк с неизбежностью, диктуемой экономикой, оставляет их в мировой ядерной энергетике нового века.

В области электрогенерирующих мощностей значительное место займут реакторы-размножители в характерном для них диапазоне большой мощности.

Требование снижения воздействия на окружающую среду приводит к необходимости повышения эффективности генерации электрической энергии. Удовлетворению этого требования будет способствовать разработка реакторов, охлаждаемых расплавленным металлом, и высокотемпературных гелиевых реакторов.

Объективно начавшийся процесс расширения сферы использования атомной энергии (когенерация тепла и электричества, источники бытового тепла, промышленное теплоснабжение) позволяет прогнозировать его развитие в новом веке. Внедрение атомной энергии в промышленное теплоснабжение и особенно в энергоснабжение технологических процессов стимулирует разработки проектов высокотемпературных реакторов и как наиболее совершенных проектов высокотемпературных гелиевых. Целесообразно довести до реализации и освоить станции теплоснабжения высокой безопасности как альтернативу в оптимальном решении задачи снабжения теплом крупных регионов. Наличие труднодоступных регионов с низкой плотностью населения делает оправданным использование автономных ядерных источников малой мощности для тепло- и электроснабжения. В наибольшей степени требованиям автономных энергоисточников удовлетворяют АТЭЦ с реакторами на естественной циркуляции с максимальным использованием пассивных средств защиты и расхолаживания. На основе необслуживаемых морских установок предлагается разработать автономные тепло-электроцентрали и опреснительные центры малой мощности повышенной безопасности. Технической базой проектов таких реакторов является транспортная ядерная энергетика.

Транспортная ядерная энергетика продемонстрировала свои возможности в экономике России. Будет продолжаться развитие судового атомного реакторостроения для транспортных целей, а также создания плавучих атомных станций. Плавучие атомные станции могут быть использованы для производства энергии и опреснения воды. В отдаленной перспективе представляет интерес использование технологии атомного подводного флота для освоения морской добычи и транспортировки нефти и газа. Такие системы могут иметь значение в отдаленном будущем и для морской добычи урана.

Дальнейшее освоение космоса с созданием больших долговременных орбитальных станций, космических технологических комплексов, больших информационных и навигационных систем, реализация экспедиций к планетам Солнечной системы неминуемо потребуют ядерных источников, вырабатывающих электроэнергию или тягу или и то и другое. Нельзя исключить в далекой перспективе возможность размещения мощных ядерных источников в космосе для энергоснабжения Земли.

Крупномасштабная ядерная энергетика не может быть реализована только на ^{235}U . Подпитка делящимся компонентом естественного урана, постоянно вовлекаемого в топливный цикл, будет недостаточна для функционирования всей совокупности реакторов. Воспроизводство делящихся материалов является одним из основных признаков ядерной энергетики будущего. Эта функция будет реализовываться реакторами-размножителями. Основной функцией этих реакторов является расширенное воспроизводство топлива, необходимого для снабжения топливом всей ядерной энергетики. Таким образом, в будущей энергетике будут сосуществовать реакторы-размножители ядерного топлива и реакторы, потребляющие топливо. Их количественное соотношение будет определяться нейтронным балансом всей структуры ядерной энергетики и уровнем воспроизводства топлива в реакторах. Поиск оптимальных решений и разработка реакторов-размножителей являются существенными компонентами работ по реакторам нового поколения. Исследования и разработки предыдущего этапа убеждают в возможности решения этой задачи в первой половине XXI в., не уходя далеко от уже освоенной технологии. Наряду с совершенствованием натриевых быстрых реакторов существует возможность разработки быстрых реакторов с тяжелым металлическим теплоносителем с использованием опыта создания транспортных реакторов, быстрых реакторов, охлаждаемых гелием, с использованием опыта разработки тепловых высокотемпературных гелиевых реакторов и быстрых реакторов, охлаждаемых водяным паром, с учетом опыта кипящих реакторов. В этих реакторах-размножителях для повышения свойств воспроизводства топлива может быть использовано топливо на основе нитридов урана и плутония. Эти идеи, альтернативные отработанной концепции натриевого реактора-размножителя, должны доказать свою реализуемость с характеристиками, которые анонсируются на базе сегодняшнего уровня знаний.

Реакторы-размножители, имеющие большую мощность блока, будут использоваться для создания базовой электрической нагрузки. Неизбежна их тесная связь с технологическим комплексом переработки топлива. Эти соображения, а также требования нераспространения делящихся материалов привязывают их к ограниченному числу стран с крупными электросетями.

Наряду с производством энергии будет расширяться использование реакторов для наработки радиоактивных изотопов для медицинского, технического и энергетического применения. Медицинские цели — это диагностика заболеваний, а также лечение. Техническое применение — это главным образом диагностика, а также применение радиоактивных изотопов для автономных источников энергии.

Изотопы нарабатываются в специальных реакторах. По мере развития и внедрения радиохимической переработки топлива будет увеличиваться возможность извлечения при переработке все большего количества и номенклатуры полезных радиоактивных изотопов. Таким образом, можно прогнозировать развитие двух линий наработки радиоактивных изотопов: создание специализированных реакторов и выделение полезных радиоактивных изотопов в процессе переработки топлива.

Количество актиноидов в равновесном цикле зависит от типа и соотношения тепловых и быстрых реакторов. Положительный нейтронный баланс системы реакторов ядерной энергетики при необходимости может обеспечить не только расширенное воспроизводство ядерного топлива, но и выжигание наиболее опасных радионуклидов. Для этих целей может быть разработан специальный тепловой реактор. Другой возможностью может быть реактор, работающий в подкритическом режиме в комбинации с внешним источником нейтронов. Внешний источник нейтронов будет потреблять часть генерируемой в системе электрической энергии. Соотношение числа реакторов разного назначения зависит от совершенства их характеристик, областей использования, степени развития ядерной энергетики и обращения с радиоактивными отходами. Для установившегося развития широкомасштабной ядерной энергетики приближенная оценка соотношения мощностей тепловых/быстрых/тепловых реакторов для выжигания актиноидов имеет вид 0,6/0,3/0,1.

Топливный цикл. Стратегия замкнутого цикла снижает потребности в добыче исходного топлива и делает оправданным вовлечение в ядерную энергетику запасов более дорогого естественного сырья. Замкнутый топливный цикл, включающий переработку отработавшего ядерного топлива, извлечение и повторное использование ядерных материалов, является необходимым условием крупномасштабной ядерной энергетики XXI в.

В установившемся режиме развития ядерной энергетики затраты на все компоненты топливного цикла от добычи топлива до захоронения должны покрываться за счет производимой продукции. Переработка отработавшего топлива реакторов-размножителей, в которых воспроизводится ядерное топливо, является обязательным условием крупномасштабной энергетики. Вопрос об отработавшем ядерном топливе реакторов других типов, функционирующих в структуре ядерной энергетики, будет решаться на основе сопоставления затрат на переработку, обращение с отходами и доходов от использования выделенных при переработке ядерных материалов с затратами на захоронение отработавшего топлива. Часть отработавшего ядерного топлива, переработка которого окажется экономически неэффективной, минует стадию переработки и будет предназначена для захоронения. В настоящее время недостаточно данных для точного ответа на этот вопрос. Развитие технологии переработки и захоронения может изменить решения нынешнего времени. По этой причине в настоящее время в некоторых странах реализуется временное хранение отработавшего ядерного топлива. Это решение предусматривает создание хранилищ, которые рассчитаны на длительное хранение, в процессе которого можно будет контролировать поведение отработавшего ядерного топлива и вернуться к решению вопроса о переработке или захоронении на последующих этапах. Такой подход получил определение как контролируемое обратимое хранилище. При захоронении отработавшего ядерного топлива необходимо учитывать требования нераспространения делящихся материалов.

Обращение с радиоактивными отходами, образовавшимися при работе реакторов и переработке отработавшего ядерного топлива, с конечной целью их безопасного захоронения является основной незакрытой проблемой ядерной энергетики. Имеющиеся в настоящее время технические решения концентрации отходов и дальнейшего их преобразования в керамические формы или стекло могут обеспечить захоронение радиоактивных отходов в стабильных геологических структурах, однако требуется еще значительная работа по доказательству устойчивости к внешним воздействиям и безопасности предлагаемых к длительному захоронению форм отходов.

Решения о структуре и компонентах топливного цикла в промышленно развитых странах и тем более странах — членах ядерного клуба принимаются ими самостоятельно на основе главным образом экономических и политических соображений.

При развитии ядерной энергетики и в том числе при расширении числа стран, использующих ядерные реакторы, возникает вопрос об организации в этих странах работ по обращению с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами. Очевидно, что, как и в случае традиционной энергетики, между странами будет разделение работ по составляющим топливного цикла. Две особенности ядерного цикла: радиационная опасность технологии топливного цикла и риск распространения делящихся материалов будут ограничивать внедрение технологии топливного цикла.

Распространение технологии переработки отработавшего ядерного топлива увеличивает риск распространения делящихся ядерных материалов, что необходимо учитывать при расширении числа стран, использующих технологию переработки топлива. Ограниченное распространение технологии переработки вне промышленно развитых стран обусловлено также ее сложностью и радиационной опасностью. Экономическая эффективность производства по переработке отработавшего ядерного топлива проявляется только при больших масштабах, что требует консолидации стран, развивающих эту технологию. В этом случае возникает вопрос о процедуре и условиях передачи отработавшего ядерного топлива из одной страны в другую для хранения и переработки.

Особое значение при этом имеет обращение с радиоактивными отходами и другими ядерными материалами, полученными в результате переработки. Могут быть реализованы разные варианты — захоронение радиоактивных отходов в стране, ведущей переработку поставленного ей отработавшего ядерного топлива, или возврат отходов в страну, эксплуатирующую АЭС. Первый путь, как правило, вызывает негативное отношение общественности страны или региона, которые взяли на себя переработку топлива. Кроме того, должны быть решены правовые проблемы. Второй путь должен предусматривать гарантии страны, ведущей переработку топлива, в отношении выполненных ею работ по подготовке радиоактивных отходов к длительному хранению или захоронению.

Производство обогащенного урана, являясь уникальной технологией, в настоящее время развито только в странах ядерного клуба. Сохранит ли мировое сообщество, основываясь на соображениях нераспространения, это ограничение и на последующее время?

Начальный период XXI в. наряду с традиционными операциями в топливном цикле будет характеризоваться решением задачи использования в реакторах высвобождающихся излишков ядерных оружейных материалов — высокообогащенного урана и плутония. Энергетический потенциал оружейного плутония расширяет топливную базу ядерной энергетики. При использовании оружейного плутония будет освоена технология смешанного уран-плутониевого топлива, а также накоплен необходимый для будущей ядерной энергетики опыт решения экологических проблем и процедур контроля, учета и защиты. Энергетическое сжигание высвобождаемого оружейного плутония может быть осуществлено в виде смешанного уран-плутониевого оксидного топлива в действующих и строящихся отечественных быстрых и тепловых реакторах. По мере реализации проектов перспективных тепловых реакторов (ГТ-МГР) и быстрых реакторов-размножителей возможно их включение в энергетическое использование избыточного оружейного плутония. Для сжигания смешанного топлива из оружейного плутония могут использоваться на коммерческой основе энергетические реакторы за рубежом. Выбор конкретных решений будет определяться экономическими условиями реализации программы с учетом стратегии развития ядерной энергетики.

Природные ресурсы тория, превышающие ресурсы урана, и его невысокая стоимость создают дополнительные возможности неограниченного по ресурсным соображениям развития ядерной энергетики. Вовлечение тория в топливный цикл не только расширит топливную базу, но и облегчит решение проблемы захоронения радиоактивных отходов. В последнее время наряду с указанными преимуществами изучается возможность использования тория в действующих или разрабатываемых реакторах для улучшения ситуации, связанной с нераспространением делящихся материалов.

Нерешенные проблемы обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом вызывают в обществе негативное отношение к развитию ядерной энергетики. Принципиальная решаемость этих проблем не вызывает сомнения, однако достижение практических технических решений сдерживается недостаточными вложениями и трудностью практических доказательств надежности длительного захоронения отходов. Осознание обществом необходимости и приемлемости ядерной энергетики произойдет лишь после решения проблем ядерного топливного цикла, связанных с выбором и обоснованием технологии обращения с радиоактивными отходами. Наряду с разработкой традиционной технологии изоляции и захоронения радиоактивных отходов для трансурановых нуклидов будет проводиться поиск способов их вовлечения в топливный цикл в целях трансмутации.

Состояние ядерной энергетики и ближний прогноз. Начальный этап наращивания ядерных мощностей в энергетике продемонстрировал высокие темпы роста. Реализованные темпы роста превышали характерные для традиционных закономерностей развития энерготехнологии. Это отличие объясняется тем, что ядерная энергетика использовала военный научно-технический и промышленный потенциал.

Увеличение масштабов ядерной энергетики и расширение круга пользователей привело к дисбалансу имеющегося и необходимого научно-технического и промышленного потенциала. Не во всех направлениях, необходимых для сбалансированного развития гражданской ядерной энергетики, опыт и технология ядерного оружейного комплекса оказались достаточными. В первую очередь это относится к обращению с радиоактивными отходами и эксплуатационной безопасности. Эти причины сказались на снижении конкурентоспособности ядерной энергетики по сравнению с подешевевшим органическим топливом и предопределили замедление темпов развития ядерной энергетики. Аварии на предприятиях ядерного комплекса сказались на негативном отношении общества к ядерной энергетике.

Прогнозы МАГАТЭ на 15—20 лет показывают стагнацию ядерных мощностей промышленно развитых стран Европы и Америки. В условиях незавершенности перестройки экономики прогноз развития ядерной энергетики России имеет значительную неопределенность. Оценки развития мощностей России с учетом вывода из эксплуатации выработавших ресурс блоков АЭС и сооружения реакторов нового поколения охватывают варианты от снижения до некоторого роста мощности к 2010 г.

На этом фоне прогнозируется бурное развитие ядерной энергетики в странах азиатского региона. Наряду с наращиванием ядерных мощностей в азиатских странах, уже имеющих АЭС, следующий этап будет характеризоваться расширением числа стран, использующих атомную энергию: это страны азиатского региона, Ближнего Востока, Африки, Южной Америки.

Все это при стабилизации развития ядерной энергетики в ближайшие годы в промышленно развитых странах делает острой конкурентную борьбу на ядерном рынке. Россия, которая ранее распространяла свое ядерное присутствие в основном благодаря политическим аргументам, ныне должна предпринять существенные усилия для создания конкурентоспособного реакторного блока АЭС. Это является одним из принципиальных условий сохранения и поддержания ядерного потенциала страны. Определяющими показателями будут безопасность, экономическая привлекательность, надежность партнера.

Итак, нынешнее состояние ядерной энергетики характеризуется широким диапазоном прогнозов ее развития на предстоящем этапе. В отдаленной перспективе ядерная энергетика с высокой вероятностью будет играть значительную роль в обеспечении человечества энергией. Задачей сегодняшнего дня является поиск, выбор и обоснование пути от состояния неопределенности к широкомасштабной ядерной энергетике отдаленного будущего.

Пути развития ядерной энергетики. Мировое сообщество не имеет однозначного выбора пути движения к широкомасштабной ядерной энергетике. Каждая страна определяется самостоятельно, соотносясь с экономическими, социальными и политическими условиями. Существенно то, что доминирующими при принятии решений в большинстве случаев являются политические мотивы, хотя известно, что политические позиции изменяются значительно быстрее процесса становления энергетической технологии. В некоторых промышленно развитых странах приняты решения о сворачивании работ по ядерной энергетике до прекращения работы АЭС и снятия с эксплуатации. Один из примеров — позиция нынешнего правительства Германии. Реализация этих решений потребует значительных вложений на вывод из эксплуатации атомных объектов и компенсацию энергетических мощностей. При необходимости разворачивания работ по ядерной энергетике в дальнейшем естественно потребуется восстановление утрачиваемого потенциала с соответствующими экономическими издержками. Приблизительно к таким же экономическим последствиям может привести реализация предложений некоторых российских специалистов, которые основываются на отрицании предыдущего опыта реализованных проектов реакторов и топливного цикла и быстрой реализации революционных проектов новых реакторов. Этот путь, как и предыдущий, фактически сводится к прекращению освоенных направлений и необходи-

мости значительных экономических вложений для реализации новых еще не доказанных направлений. Целесообразным является путь эволюционного совершенствования зарекомендовавших себя реализованных проектов ядерного комплекса и создания ядерной технологии нового поколения с учетом опыта предыдущих этапов.

Преемственность. Важный элемент стратегии развития ядерной энергетики XXI в. — преемственность. Важно отметить основные аспекты преемственности:

непрерывность процесса разработок и реализации. Новая технологическая линия должна развиваться параллельно с активным существованием предыдущей линии, использованием ее положительного опыта и развитием новых элементов, отсутствующих на предыдущей линии;

последовательное развитие общей концепции безопасности ядерной технологии, которая совершенствуется, основываясь на предшествующем опыте, и, реализуясь в определенных технических решениях, повышает эффективность достижения целей безопасности в соответствии с растущими требованиями развивающейся по масштабам и разнообразию технологического применения ядерной энергетики;

прямая технологическая преемственность. Технические направления, аккумулировавшие огромные средства, научный и технологический потенциал и создавшие промышленную базу, должны давать максимальную отдачу и решать экономические задачи возможно долгое время.

Следует выделить один немаловажный аспект, который связан с внедрением в практику принципиально новых подходов, существенно меняющих конструкцию или структуру систем ядерной установки. Принцип использования апробированных решений подразумевает реализацию достаточно представительной формы такой апробации. Это в зависимости от характера и масштаба нового технического шага может быть и представительное научное исследование либо стендовое испытание изделия, либо ресурсное испытание в условиях объекта, либо степень новизны может требовать создания и эксплуатации установки (станции)-прототипа, призванного выявить скрытые проблемы нового решения и обосновать надежный переход к серии. И, наконец, новые технологические решения в ядерной энергетике, учитывающие требования безопасности и надежности, могут быть представительно апробированы только в международном ядерном сообществе.

Стратегия развития ядерной энергетики России. Долгосрочная стратегия развития ядерной энергетики России, исходя из прогнозов развития энергетики мира в XXI в., определяет в качестве генеральной цели создание крупномасштабной ядерной энергетики, участвующей в обеспечении энергетических потребностей общества в электроэнергетике, теплоснабжении, промышленной технологии и на транспорте.

При реализации стратегии подлежат неукоснительному выполнению требования к широкомасштабной энергетике: экономическая конкурентоспособность, повышение безопасности, снижение риска распространения ядерных материалов, расширенное воспроизводство топлива. Для достижения поставленной цели стратегия предусматривает развитие ядерного комплекса на базе максимального использования накопленного на предыдущих этапах технологического опыта для создания установок нового поколения, наилучшим образом удовлетворяющих требованиям ядерной энергетики будущего. Наиболее важными задачами являются:

создание замкнутого топливного цикла с расширенным воспроизводством и повторным использованием плутония и ^{233}U ;

безопасное обращение с радиоактивными отходами, включая создание на первых этапах контролируемых обратимых хранилищ отработавшего ядерного топлива;

создание эффективного реактора-размножителя, ядерных энергетических установок малой энергетики для удаленных районов, новых разновидностей реакторов для теплоснабжения, технологии, транспортабельных установок, опреснительных систем, работающих в базовом и маневренном режимах.

Развитие работ крупномасштабной ядерной энергетики возможно только при безопасном и экономичном функционировании действующего парка ядерных установок и решении проблем, связанных с продлением ресурса и снятием с эксплуатации блоков, выработавших ресурс.

В связи с прогнозируемым расширением числа стран, нацеленных на ядерную энергетику, необходимо обеспечить конкурентоспособность России на ядерном рынке, повышая экспортный потенциал ее ядерного комплекса для устойчивого присутствия на мировом рынке технологии, оборудования, ядерных материалов для реакторов и станций нового поколения с улучшенными экономическими показателями и повышенным уровнем безопасности.

Основные этапы стратегии до 2010 г.:

обеспечение функционирования и развития действующего парка ядерных установок, продление ресурса, подготовка технологии снятия с эксплуатации;

создание и освоение нового поколения блоков на базе развитой технологии;

поиск и разработка альтернативных реакторных систем на тепловых и быстрых нейтронах;

подготовка и освоение использования оружейного плутония;

разработка элементов замкнутого топливного цикла;

создание контролируемого обратимого хранилища отработавшего ядерного топлива;

экспорт АЭС, реакторов и топлива на базе освоенной технологии.

До 2030 г.:

поддержание безопасной и экономичной эксплуатации действующего парка ядерных установок, снятие с эксплуатации блоков, выработавших ресурс;

создание парка АС различного назначения на новой реакторной технологии — создание и освоение демонстрационных блоков, разработка серийных АС и создание головных блоков;

освоение элементов замкнутого топливного цикла для крупномасштабной ядерной энергетики, включая неводные методы переработки отработавшего топлива и захоронение отходов.

До 2050 г.:

внедрение серийных блоков новых поколений;

реализация замкнутого топливного цикла, включая захоронение отходов.

Поступила в Редакцию 21.04.99

УДК 621.311.25:621.039.51.14

ПРОДЛЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

Ковалевич О.М. (НТЦ ЯРБ)

Продление срока эксплуатации действующих атомных станций является предметом внимания многих стран. Причиной этого является возможность увеличить на 20—40% выработку электроэнергии на установленных мощностях без больших дополнительных капитальных вложений. Для некоторых стран это есть способ обойти запрет под давлением общественности на строительство новых атомных станций.

Не осталась в стороне от этого процесса и Россия, трудное финансовое положение которой требует искать возможности избежать сооружения замещающих мощностей вместо подлежащих выводу из эксплуатации с 2001 по 2006 г. шести блоков первого поколения (четыре блока ВВЭР-440/230 и двух блоков РБМК-1000). В случае успеха продление срока службы может быть распространено на последующие блоки.