



УДК 621.311.25:621.039.004

ТРЕБОВАНИЯ К АТОМНЫМ СТАНЦИЯМ XXI ВЕКА

**П.Н.Алексеев, А.Ю.Гагаринский, Н.Н.Пономарев-Степной,
В.А.Сидоренко**

РНИЦ - Курчатовский институт, г. Москва



Развитие энергетики в XXI в. будет подчиняться тенденции к более равномерному потреблению на душу населения и по регионам. Среди конкурирующих источников энергии - органических топлив, солнечной и ядерной энергии - принципиальные и положительные качества ядерной энергетики - практически неограниченные ресурсы топлива, его высокая энергоемкость, экологическая совместимость с возможностью высокой концентрации отходов - определяют развитие крупномасштабной ядерной энергетики. Признаки крупномасштабной энергетики - большая доля (десятки процентов) в производстве электроэнергии, разнообразные области (ЭЭ, теплоснабжение, технологии, транспорт) и среды применения (суша, океан, космос), расширение числа стран-пользователей, различные энергетические системы (централизованные, автономные), обязательное воспроизводство и повторное использование наработанного топлива - создают разнообразие требований к ядерно-энергетическим установкам будущего. Условиями развития такой ядерной энергетики являются ее экономическая эффективность, безопасность (реакторов и топливного цикла с отходами производства), достаточные характеристики воспроизводства ядерного горючего, гарантии нераспространения ядерного оружия. Преемственность в развитии ядерной энергетики диктует требования к реакторным системам ближней и дальней перспективы.

Приемлемый уровень безопасности тесно связан с масштабами энергетики и с областями применения ядерных энергоисточников, однако неизбежен прогресс в направлении снижения потенциальной опасности реакторных установок и удешевления защитных систем. При выборе новых направлений важна демонстрация новых качеств в решении задач атомной энергетики будущего.

В перспективе может существовать достаточное разнообразие реакторных технологий. В докладе обсуждаются формирующиеся требования к атомным станциям следующих этапов развития - по безопасности, экономичности, пользовательским качествам, топливоиспользованию - и ожидаемые этапы этого развития.

© П.Н.Алексеев, А.Ю.Гагаринский, Н.Н.Пономарев-Степной, В.А.Сидоренко, 1999

* Доклад на X Международной конференции Ядерного общества России (Обнинск, 28 июня-2 июля 1999 г.)

ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

ТЕНДЕНЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ XXI В

Тенденцией развития энергетики в XXI в. будет стремление к более равномерному потреблению энергии на душу населения и по регионам мира. Прогнозируется, что произойдет как минимум удвоение производства энергии к середине XXI в. Масштаб потребления энергии к середине XXI в. составит приблизительно 5×10^{20} Дж/год. Конечное потребление энергоресурсов оценивается следующим распределением по видам энергии: электроэнергия - около $1/4$; тепло, транспорт, технологии - около $3/4$.

В качестве основных конкурирующих первичных энергетических ресурсов энергии в XXI в. будут фигурировать органическое топливо (уголь, нефть, газ), ядерная энергия и солнечная энергия.

XXI В. - ЭТАП КРУПНОМАСШТАБНОЙ АТОМНОЙ 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.

Энергоресурсы. Сравнение запасов энергоресурсов с величиной потребляемой энергии показывает, что разведанные запасы органического топлива могут обеспечить энергопотребление в течение нескольких сотен лет. Однако, учитывая, что основная доля ресурсов органического топлива приходится на уголь, по мере уменьшения запасов нефти и газа уже в XXI в. предстоит структурная перестройка потребителей первичных ресурсов энергии с включением в них заметной доли угля, что потребует новых технологических решений.

Оценки запасов ядерного топлива в земной коре и в водах океанов даже при консервативных предположениях о возможном извлечении этих материалов показывают, что использование ядерной 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 величину ежегодно потребляемой человечеством энергии, а естественный синтез биомассы на порядки превышает эту величину.

Итак, в XXI в. человечество не встретится с недостатками энергоресурсов, но ему предстоит решать проблему очередной смены энергетической технологии.

Экологические пределы. Окружающая среда с теми или иными последствиями адаптируется к техногенным воздействиям.

При производстве энергии в окружающую среду возвращаются отходы и низкопотенциальное тепло. Одним из принципиальных ограничений наращивания мощности производства энергии является тепловой предел, который возникнет из-за нарушения теплового баланса Земли. Достижение этого предела выходит за XXI в.

В последние десятилетия активно изучается глобальное потепление климата. Это потепление связывается с парниковым эффектом. Одной из компонент так называемых парниковых газов является углекислый газ. Оценивая возможность адаптации природы к наращиванию производства энергии, мы видим, что окружающая среда не справляется с экологической нагрузкой от сжигания органического топлива из-за выбросов продуктов сгорания. Разработанные и реализуемые технологии очистки продуктов сгорания от окислов серы и азота позволили уменьшить опасность для окружающей среды этих вредных выбросов. Однако вызывает



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

сомнение возможность приемлемого технического решения проблемы выброса CO_2 . Этот фактор является одним из принципиальных ограничений наращивания производства энергии за счет сжигания органического топлива.

Для ядерных источников характерна компактная форма отходов и технически обоснованная возможность концентрации и локализации радиоактивных продуктов сгорания. Суммарная масса ядерных отходов отличается от массы отходов при сжигании органического топлива в сотни тысяч раз. И это несомненное преимущество ядерной энергии. Потенциальная экологическая опасность использования ядерной энергии связана с образованием радиоактивности. В процессе работы реакторов изменяется баланс радиоактивных веществ. Одновременно протекают два противоположных процесса: уничтожение радиоактивных ядер, имеющих естественную радиоактивность, и образование новых радиоактивных ядер. Возникающая радиоактивность не превышает по количеству распадов активность исходных элементов. Однако, т.к. 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 реакторного топливного цикла: образующаяся радиоактивность должна быть локализована на всех стадиях в обозначенном выше временном интервале. Оценивая принципиальную возможность решения этой проблемы, важно подчеркнуть, что благодаря небольшим объемам радиоактивных отходов могут быть локализованы в компактной форме, а необходимый масштаб времени локализации найдется в освоенных человечеством пределах.

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

Динамика развития энергетических технологий. Информация о вкладе различных энергетических ресурсов в мировое производство энергии позволяет проследить динамику использования основных энергетических ресурсов: древесины, уголь, нефть, газ, ядерная энергия. Конкурирующие энергетические технологии ведут себя таким образом, что доля каждой технологии может быть описана закономерностью, подчиняющейся логистике.

Такая закономерность объясняется действием большого количества 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 энергетических технологий в значимых долях является недопустимость для общества зависимости от монопольного влияния одной из технологий.

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. Масштаб времени для выхода той или иной технологии на лидирующие позиции в производстве энергии составляет более ста лет. Природный газ будет занимать лидирующие позиции в

ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

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.

Ядерная энергия обладает рядом неоспоримых положительных качеств. Это практически неограниченные ресурсы топлива, высокая энергоемкость, возможность высокой концентрации отходов энергетического производства и возможность обеспечить хорошую экологическую совместимость.

Наличие апробированных в энергетике ядерных технологий, доказанная экономическая конкурентоспособность и техническая безопасность делают атомную энергию фаворитом в обеспечении значительной доли производства энергии ко времени очередной смены энергоносителя в XXI в. Таким образом, XXI в. – это век становления крупномасштабной ядерной энергетики. Увеличение доли атомной энергетики в производстве энергии не может произойти в короткий срок в силу инерционности развития производства энергии. Поэтому достаточно длительное время будут сосуществовать несколько технологий, которые вносят значительный вклад в производство энергии.

ПРИЗНАКИ КРУПНОМАСШТАБНОСТИ АЭ

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

Доля атомной энергии в производстве энергии будет составлять более десятка процентов, что при нынешней величине около трех процентов означает увеличение в несколько раз. Признавая, что наиболее освоенной и технически наиболее удобной областью использования ядерной энергии является производство электроэнергии, можно прогнозировать, что наращивание ядерной энергетики будет происходить в первую очередь за счет доли атомной энергии в производстве электрической энергии и достигнет нескольких десятков процентов в сравнении с нынешними полутора десятками процентов.

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

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



НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ И ЧЕРТЫ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АЭ

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

Безопасность. Образующаяся при функционировании атомной энергетики радиоактивность должна быть надежно локализована в интервале времени, когда ее уровень превышает радиоактивность исходных сырьевых материалов. Надежная локализация радиоактивности - это последовательная реализация концепции глубокоэшелонированной защиты, включающей систему технологических барьеров, ограничивающих распространение радиоактивности, мероприятия по предотвращению аварийных нарушений барьеров и мероприятия по 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, его 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 имевших место аварий. Безопасность остальных элементов ядерного топливного цикла и, в первую очередь, производств по переработке отработавшего ядерного топлива и по обращению с радиоактивными отходами обоснована в меньшей степени, что вызывает нарекания общественности. Требуется приложить серьезные усилия, как в области фундаментальных и прикладных исследований, так и в области разработок и технологических реализаций, 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 обеспечения 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 т.п.:

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



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

- эффективные отрицательные обратные связи при отклонении процессов от нормы, обеспечивающие самогашение аварийных процессов;
- использование естественных и саморегулируемых процессов, исключающих возможность аварийных отказов, повреждений или уменьшающих их последствия;
- максимально возможное повышение инерционности процессов, повышающее эффективность преодоления опасного развития событий и создающее дополнительные резервы времени для эффективного вмешательства оператора в процесс.

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

- максимальное использование пассивных технических средств, т.е. средств, не требующих источников энергии или вспомогательных (инициирующих) механических устройств;
- максимальное использование естественных процессов, самосрабатывающих устройств прямого действия (непосредственно по режимному параметру или состоянию процесса и т.д.).

Одной из принципиальных компонент безопасности является необходимый уровень культуры безопасности в звеньях государственного и технического управления, а также в сфере производства. Расширение круга стран, использующих атомную энергетику, и, особенно, из числа развивающихся стран, делает эту проблему актуальной.

Воспроизводство ядерного топлива (Pu и U-233). Одним из основных аргументов конкурентоспособности ядерной энергетики XXI в. является практическая неограниченность топливных ресурсов, обусловленная возможностью воспроизводства нового ядерного топлива: плутония и урана-233. Ныне действующие реакторы используют в лучшем случае около 1% добываемого урана. В этих условиях имеющиеся экономически приемлемые 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.

Гарантии нераспространения. Такие признаки крупномасштабной ядерной энергетики как увеличение объемов, расширение областей применения, расширение круга стран могут сказаться на риске распространения и необходимо выполнить значительный круг работ, направленных на повышение гарантий нераспространения. Должны быть разработаны и внедрены организационные и технические меры, технологические барьеры на пути несанкционированного распространения ядерных делящихся материалов, которые обеспечивают защиту ядерных материалов на уровне риска доступности ядерных материалов 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.



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

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

- совершенствование технических средств и, в том числе, средств первой и второй линии защиты, контроля ядерных материалов, дистанционный мониторинг;
- разработку и внедрение новых технологий, которые обеспечивают снижение объемов циркуляции и внутреннюю защищенность ядерных материалов.

Экономическая конкурентоспособность. Решающую роль в выборе того или иного источника энергии в конкретной ситуации будут играть экономические показатели. Набор компонент стоимости производства электричества должен включать не только стоимости непосредственной генерации электричества, но и стоимость компенсации воздействия на окружающую среду. При этом важно учитывать это воздействие на человека и окружающую среду при нормальных условиях работы и при 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 CO_2 . Дополнительная составляющая так называемой "социальной" стоимости, которая учитывает воздействие каждой технологии на человека и окружающую среду, даже без учета воздействия CO_2 , более значима для органического топлива и, особенно, для 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 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 ядерные отходы. Для выполнения этих функций ядерный комплекс должен иметь следующие звенья: 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 производство для 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.

ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

РЕАКТОРЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ XXI В.

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

Производство энергии. Основное назначение реакторов - это производство энергии. В решение этой задачи будут вовлечены реакторы на тепловых и быстрых нейтронах всех функциональных направлений.

Разнообразие признаков и условий существования крупномасштабной атомной энергетике 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 решении проблем ядерной энергетике 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 энергетике. В то же время основные требования: экономичность, безопасность и гарантии нераспространения - в каждом проекте и топливном цикле должны удовлетворяться 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, а нацеленность на мировой рынок делает необходимым иметь для российского и зарубежного применения российский проект энергоблока, не уступающий западным проектам по мощности и другим показателям.

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

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

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 ядерной энергии (когенерация тепла и электричества, источники бытового тепла, промышленное теплоснабжение), позволяет прогнозировать развитие этого процесса в новом веке.

Внедрение атомной энергии в промышленное теплоснабжение и, особенно, в энергоснабжение технологических процессов стимулирует разработки проектов высокотемпературных реакторов и как наиболее продвинутых проектов высокотемпературных гелиевых реакторов.



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

Целесообразно довести до реализации и освоить станции теплоснабжения высокой безопасности (АСТ) как альтернативу в оптимальном решении задачи обеспечения 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 полностью автономные теплоэлектроцентрали и опреснительные центры малой мощности повышенной безопасности. Технической базой проектов таких реакторов является судовая атомная энергетика.

Судовая атомная энергетика продемонстрировала свои возможности в экономике России. Будет продолжаться развитие судового атомного реакторного строения для транспортных целей, а также для создания плавучих атомных станций. Плавучие атомные станции могут быть использованы для производства энергии и опресненной воды. В более далекой перспективе представляет интерес использование технологий атомного подводного флота для освоения морской добычи и транспорта 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 использования 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.

Воспроизводство ядерного топлива. Крупномасштабная атомная энергетика не может быть реализована на использовании только урана-235. Подпитка делящейся компонентой из естественного урана, постоянно вовлекаемого в топливный цикл, будет недостаточна для функционирования всей совокупности разнообразных реакторов атомной энергетике. Воспроизводство делящихся материалов является одним из основных признаков атомной энергетике будущего. Эта функция будет реализовываться реакторами-размножителями. Основной функцией этих реакторов является расширенное воспроизводство топлива, необходимо для обеспечения топливом всей структуры атомной энергетике. Таким образом, в будущей энергетике будут сосуществовать реакторы - размножители ядерного топлива и реакторы, потребляющие топливо. Их количественное соотношение в крупномасштабной атомной энергетике мира будет определяться нейтронным балансом всей структуры атомной энергетике и уровнем воспроизводства топлива в реакторах. Поиск оптимальных решений и разработка реакторов-размножителей является существенной компонентой 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 освоенных технологий. Наряду с совершенствованием натриевых быстрых реакторов существует возможность разработки быстрых реакторов с тяжелым металлическим теплоносителем с использованием опыта разработки судовых реакторов, быстрых реакторов, охлаждаемых гелием, с использованием опыта разработки тепловых



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

высокотемпературных гелиевых реакторов и быстрых реакторов, охлаждаемых водяным паром, с использованием опыта кипящих реакторов. В этих реакторах-размножителях с целью повышения свойств воспроизводства топлива может быть использовано топливо на основе нитридов урана и плутония. Эти идеи, альтернативные отработанной концепции натриевого бридера, должны доказать свою реализуемость с характеристиками, которые анонсируются на базе сегодняшнего уровня знаний.

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

Производство изотопов и сжигание актинидов. Наряду с использованием реакторов для производства энергии будет расширяться их использование для наработки радиоактивных изотопов, необходимых для медицинского, технического и энергетического применения. Медицинские цели - это диагностика различного типа заболеваний, а также их лечение. Технические применения - это, главным образом, диагностика, а также применение радиоактивных изотопов для автономных источников энергии.

Наработка этого разнообразного набора изотопов осуществляется 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. Это создание специализированных реакторов и выделение полезных радиоактивных изотопов в процессе переработки топлива.

Количество актинидов 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, а и выжигание наиболее опасных радиоактивных отходов. Для этих целей может быть разработан специальный тепловой реактор-выжигатель. 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 количества реакторов разного назначения зависит от совершенства их характеристик, областей использования, степени развитости ядерной энергетики и состояния решения проблемы обращения с радиоактивными отходами. Для установившегося развития широкомасштабной ядерной энергетики приближенная оценка соотношения мощностей ТРЭ/БРР/ТРВ 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.



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

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 ядерного топлива для реакторов-размножителей, в которых осуществляется воспроизводство ядерного топлива, 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 ядерного топлива. Часть отработавшего ядерного топлива, переработка которой окажется экономически не эффективной, минует стадию переработки и предназначена для захоронения. В настоящее время не достаточно данных для точного ответа на этот вопрос. Развитие технологий переработки и захоронения может изменить решения нынешнего времени. По этой причине в настоящее время в ряде стран реализуется решение о временном хранении 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 захоронению на последующих этапах. Такой подход получил определение как контролируемое обратимое хранилище. При решении вопроса захоронения отработавшего ядерного топлива необходимо учитывать требования нераспространения.

Обращение с радиоактивными отходами, образовавшимися при работе реакторов и переработке отработавшего ядерного топлива, с конечной целью их безопасного захоронения является основной не закрытой 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, в 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, как и в случае традиционной энергетики, между странами будет происходить разделение работ по составляющим топливного цикла. Две особенности ядерного цикла: радиационная опасность технологий топливного цикла и риск распространения будут ограничивать распространение технологий топливного цикла.

Распространение технологии переработки отработавшего ядерного топлива увеличивает риск распространения делящихся ядерных материалов, что необходимо учитывать при расширении круга стран, использующих технологии переработки топлива. Ограниченное распространение технологии переработки вне про-



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

мысленно развитых стран обусловлено также ее сложностью и радиационной опасностью. Экономическая эффективность производства по переработке отработавшего ядерного топлива проявляется только при достаточно 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 вопрос об обращении с радиоактивными отходами и другими ядерными материалами, полученными в результате переработки. Могут быть реализованы разные варианты. Это - захоронение радиоактивных отходов в стране, ведущей переработку поставленного ей отработавшего ядерного топлива, или возврат этих 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 общество, 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. Использование энергетического потенциала оружейного плутония расширяет топливную базу атомной энергетики. При использовании оружейного плутония будет освоена технология смешанного уран-плутониевого топлива, а также будет накоплен необходимый для будущей атомной 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 (МОКС) - топлива в действующих и строящихся российских реакторах: на быстрых нейтронах БН и на тепловых нейтронах ВВЭР. По мере реализации проектов перспективных тепловых реакторов (МГР-ГТ) и реакторов-размножителей на быстрых нейтронах возможно их включение в энергетическое использование избыточного оружейного плутония. Для сжигания МОКС - топлива из плутония оружейного происхождения могут использоваться на коммерческой основе энергетические реакторы за рубежом. Выбор конкретных решений будет определяться экономическими условиями реализации программы с учетом стратегии развития атомной энергетики.

Природные ресурсы тория, превышающие ресурсы урана, и его невысокая стоимость создают дополнительные возможности неограниченного по ресурсным соображениям развития атомной энергетики. Вовлечение тория в топливный цикл не только расширит топливную базу, а и облегчит решение проблемы захоронения радиоактивных отходов. В последнее время наряду с указанными преимуществами тория изучается возможность его использования в действующих или разрабатываемых реакторах с целью улучшения решения проблемы нераспространения.

Нерешенные проблемы обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом вызывают в обществе негативное отношение к развитию



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

ядерной энергетики. Принципиальная решаемость этих проблем не вызывает сомнения, однако достижение практических технических решений сдерживается недостаточными вложениями и трудностью практических доказательств надежности длительного захоронения ядерных отходов. Осознание обществом необходимости и приемлемости атомной энергетики произойдет лишь после решения проблем ядерного топливного цикла, связанных с выбором и обоснованием технологии обращения с радиоактивными отходами. Наряду с разработкой традиционных технологий изоляции и захоронения радиоактивных отходов для трансурановых нуклидов будет проводиться поиск способов вовлечения их в топливный цикл с целью трансмутации.

СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И БЛИЖНИЙ ПРОГНОЗ

Начальный этап наращивания ядерных мощностей в энергетике продемонстрировал высокие темпы роста. Реализованные темпы роста превышали темпы, характерные для традиционных закономерностей развития энерготехнологии. Это отличие объясняется тем, что гражданская ядерная энергетика использовала научно-технический и промышленный потенциал, который был создан при выполнении программ ядерного оружия.

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 технологии ядерного оружейного комплекса оказались достаточными. В первую очередь это относится к проблеме обращения с радиоактивными отходами и к проблеме эксплуатационной безопасности. Последняя проблема возникла из-за расширения круга операторов АЭС. Эти причины сказались на снижении конкурентоспособности ядерной энергетики по сравнению с подешевевшим органическим топливом и предопределили замедление темпов развития атомной энергетики. Имевшие место аварии на предприятиях ядерного комплекса сказались на негативном отношении общества к ядерной энергетике.

Прогнозы МАГАТЭ на 15-20 лет вперед показывают стагнацию атомных мощностей промышленно развитых стран Европы и Америки. В условиях незавершенности перестройки экономики прогноз развития атомной энергетики России имеет значительную неопределенность. Оценки развития атомных мощностей России с учетом вывода из эксплуатации оканчивающих срок службы блоков АЭС и сооружения реакторов нового поколения охватывают варианты от падения до некоторого роста мощности к 2010 г.

На этом фоне прогнозируется бурное развитие атомной энергетики в странах азиатского региона. Наряду с наращиванием ядерных мощностей в азиатских странах, уже имеющих АЭС, следующий этап будет характеризоваться расширением круга стран, использующих атомную энергетику. 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 яв-

ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

ляется 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, сообразуясь с экономическими, социальными и политическими условиями. Существенно то, что доминирующими при принятии решений в большинстве случаев являются политические мотивы, хотя известно, что изменение политических позиций происходит более быстро, чем процесс становления энергетических технологий. В ряде промышленно развитых стран приняты решения о сворачивании работ по ядерной энергетике вплоть до прекращения работ АЭС и снятия их с эксплуатации. Один из примеров - это 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 атомной энергетике в дальнейшем, естественно, потребуются 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 так же, как и предыдущий фактически сводится к прекращению освоенных направлений и необходимости значительных экономических вложений для реализации новых, еще не доказанных направлений.

Наиболее целесообразным является путь эволюционного совершенствования зарекомендовавших себя реализованных проектов ядерного комплекса и создания ядерных технологий нового поколения, базируясь на опыте предыдущих этапов.

ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ

Важный элемент стратегии развития ядерной энергетики XXI в. - преемственность. Важно подчеркнуть 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 предыдущих линиях.
- 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 технологических применений атомной энергетики.



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

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, или 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, учитывая 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, промышленных технологиях 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 урана -233;
- решение проблемы безопасного обращения с радиоактивными отходами, включая создание на первых этапах контролируемых обратимых хранилищ отработавшего ядерного топлива;
- создание эффективного реактора -размножителя;
- создание ядерных энергетических установок малой энергетики для удаленных районов;
- создание новых разновидностей реакторов для теплоснабжения, технологий, транспортательных установок, опреснительных систем, работающих в базовом и маневренном режимах.

Развитие работ крупномасштабной ядерной энергетики возможно только при обеспечении безопасного и экономичного функционирования действующего пар-

ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

ка ядерных установок и решения проблем продления ресурса и снятия с эксплуатации блоков, выработавших свой ресурс.

В связи с прогнозируемым расширением стран, нацеленных на атомную энергетику, необходимо обеспечить конкурентоспособность России на ядерном рынке, повышая экспортный потенциал ее ядерного комплекса для устойчивого присутствия на мировом рынке технологий, 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 технологий снятия с эксплуатации;
- создание и освоение нового поколения блоков на базе развитых технологий;
- 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 освоенных технологий.

до 2030 г .

- поддержание безопасной и экономичной эксплуатации действующего парка ядерных установок, снятие с эксплуатации блоков, выработавших ресурс;
- создание парка АС различного назначения на новых реакторных технологиях
- создание и освоение демонстрационных блоков, разработка серийных АС и создание головных блоков;
- освоение элементов замкнутого топливного цикла для крупномасштабной атомной энергетики, включая неводные методы переработки ОЯТ и захоронение отходов.

до 2050 г.

- внедрение серийных блоков новых поколений;
- реализация замкнутого топливного цикла, включая захоронение отходов.

Поступила в редакцию 08.06.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.311.25:621.039.004

Requirements to XXI Century NPPs \ P.N.Alekseev, A.Yu.Gagarinski, N.N.Ponomarev-Stepnoi, V.A.Sidorenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 16 pages.

Power development in the XXI century would follow the trend to more uniform consumption per capita and per region. Among the competing energy sources - fossil fuels, sun and nuclear energy - the principal advantages of nuclear power - almost unlimited fuel resources. Its high energy capacity, ecological compatibility with a possibility of high wastes' concentration - determine the large-scale nuclear power development. The signs of large-scale power - large rate (dozens of percent) in electricity production, diverse areas (electricity, heat supply, technologies, transport) and media of application (land, ocean, space), extension of number of user countries, diversified power systems (centralized, autonomous), obligatory reproduction and reuse of produced fuel - create various requirements to nuclear power installations of the future. Economic efficiency, safety (of reactors and fuel cycle with waste), proper characteristics of nuclear fuel reproduction, guarantees of nuclear arms' nonproliferation are the conditions of such nuclear power development.

Succession in nuclear power development dictates the requirements to the reactor systems of close and long-term perspective.

The acceptable safety level is closely connected with the power scale and with the fields of nuclear energy sources' applications. However, the progress in the direction of reduction of potential hazard from nuclear installations and of protection systems' cheapening is inevitable. While choosing the new directions, the demonstration of new qualities in solving the tasks of future nuclear power would be important.

In the perspective, a variety of reactor technologies could exist. The report discusses the forming requirements to nuclear power plants of the following development stages - in the fields of safety, economy, user characteristics, fuel utilization - and the expected stages of this development.

УДК 621.039.566

Calculation of the Strength of NPP' Failed Pipelines with the Real Elements Method \ V.M.Markotchev, Yu.V.Shamraev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 4 illustrations. - References, 5 titles.

The new method - real elements method (MeReEl) - for calculation of the strength of structural elements containing defects and inhomogeneities is considered. The method is based on replacement of structural elements by equivalent rod system and use of experimental diagrams of deformation of samples with different degree of failure. The analysis of limiting condition is founded on the deformation criterion of the most failed rod. The algorithm of calculation of a segment of the pipeline containing nonthrough circumferential defect and loaded by bending moment and axial force is given. Using MeReEl computer code, an analysis of the strength of primary circuit pipeline (Di-500) containing nonthrough circumferential cracks in various locations in the cross section is made. Critical sizes for pipeline cracks and influence of the crack centre deflection from the force plane on the strength of the cross section are estimated.

УДК 621.039.7

Main Trends of Intermediate- and Low-Level Radioactive Waste Management in Russia \ S.D. Gavrilov, V.A. Kremnev, A.A. Grudakov, S.A. Dmitriyev, A.A. Resnik, L.P. Khamyanov, S.L. El'yash; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 4 pages. - References, 4 titles.