

СТАТЬИ

УДК 621.039.526

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ*

Асмолов В.Г. (Концерн «Росэнергоатом»),

Зродников А.В. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского), Солонин М.И. (Концерн «Твэл»)

В среде физиков-ядерщиков с самого начала работ по мирному использованию атомной энергии (1948—1949 гг.) существовало понимание того, что масштабное и долгосрочное обеспечение энергетических потребностей человечества станет возможным лишь при освоении технологий, расширенно воспроизводящих ядерное топливо. Уже тогда наши гениальные предшественники и учителя наряду с вопросами получения энергии из «расщепляемого» ^{235}U изучали возможности преобразования «нерасщепляемых» ^{238}U и ^{232}Th в расщепляемые ^{239}Pu и ^{233}U . Тогда же были сформулированы и физические принципы быстрых реакторов, позволяющих технологически реализовать идею расширенного воспроизводства топлива.

Тем не менее после пуска первой в мире АЭС (1954 г., Обнинск) основное развитие ядерной энергетики в нашей стране, как и в других ядерных странах, пошло по самому очевидному в тех условиях малозатратному пути использования уже имевшихся точных знаний и промышленного опыта — она стала развиваться на основе технологий, разрабатывавшихся в рамках сугубо военных программ. И теперь ее основу составляют обогатительные технологии топливообеспечения и тепловые реакторы на ^{235}U в открытом ядерном топливном цикле с накоплением отработавшего ядерного топлива.

Одновременно с этим в нашей стране и других промышленно развитых странах все эти годы велись научные исследования по совершенствованию существующих и разработке новых перспективных технологий ядерной энергетики, включая технологии замкнутого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами [1]. Сегодня, когда после спада интерес к ядерной энергетике в мире возрос до небывалого уровня,

практические результаты этих исследований открывают новые перспективы в решении обостряющихся мировых энергетических проблем.

В ядерной энергетике время, требуемое для разработки и промышленного освоения новой технологии, соизмеримо с длительностью полного жизненного цикла ключевых объектов этой технологии и, как правило, составляет несколько десятилетий. С учетом последнего обстоятельства при дальнейшем анализе путей развития ядерной энергетики используем методологический подход, базирующийся на следующих принципах:

комплексность, предполагающая, что требования к разработке ключевых технологических элементов (процессов и установок топливообеспечения, генерации энергии, обращения с отходами и др.) вырабатываются на основе оптимизации параметров действующей ядерной энергетики в ее эволюционном развитии как системы в целом с учетом научно-технических, экологических, экономических и политических (нераспространение) аспектов;

стадийность, подразумевающая, что минимизация экономических и технологических рисков обеспечивается последовательным прохождением нескольких этапов разработки и освоения (уровней готовности) новой энерготехнологии и ее ключевых элементов: 1) концептуальные НИР в обоснование физических принципов, 2) НИОКР в обоснование принципиальных технических решений, 3) опытно-промышленная демонстрация, 4) коммерциализация, 5) массовое коммерческое использование;

этапность, предполагающая, что анализ проблем, которые могут возникнуть при развертывании энергосистемы, является итерационным

*Журнальный вариант доклада, представленного на заседании Научно-технического совета Росатома «Ядерные энерготехнологии нового поколения». Москва, 27 сентября 2006 г.

и проводится с выделением ближне- и дальнесрочной перспектив. Результаты анализа используются для ранжирования приоритетов как в ближне-, так и дальнесрочной перспективе.

В качестве системных требований к крупномасштабной ядерной энергетике, удовлетворяющей критериям безопасности и экономической эффективности, выберем следующие масштабы энергопроизводства. Доля атомной энергии на рынке электроэнергии в стране должна составлять не менее 30%;

экспортный потенциал. Объем экспорта ядерных энерготехнологий (при обеспечении условий нераспространения чувствительных элементов и материалов) должен быть сопоставим с объемом их использования внутри страны; структура энергопроизводства. Ядерная энергетика должна обеспечивать возможность производства тепловой энергии для электрогенерации и неэлектрического применения: теплоснабжения, опреснения воды, производства водорода и моторного топлива, нового технологического приложения, в металлургии и др.;

сырьевая база. Крупномасштабная ядерная энергетика должна располагать сырьевыми ресурсами на исторически значимый период времени (многие сотни лет);

обращение с отходами. Организация энергопроизводства и топливного цикла должна обеспечивать безопасную окончательную изоляцию радиоактивных отходов.

Цели инновационного развития ядерной энергетики сформулируем следующим образом:

в ближнесрочной перспективе —

наращивание энергетических мощностей с достижением доли атомной энергии в общем балансе производства электроэнергии в стране не менее 25% к 2030 г.;

развертывание регионального атомного энергоснабжения на базе АЭС с реакторами малой и средней мощности;

экспорт ядерной технологии на уровне, сопоставимом с использованием этой технологии внутри страны;

создание базовых элементов новой технологической платформы крупномасштабной ядерной энергетики;

в дальнесрочной перспективе —

создание и развертывание крупномасштабной ядерной энергетики как основы энергообеспечения устойчивого развития нашей страны в третьем тысячелетии.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Ядерная электроэнергетика характеризуется открытым топливным циклом, так как базируется на АЭС с тепловыми ВВЭР и РБМК. Топливообеспечение осуществляется на основе технологий добычи природного урана, его обогащения для изготовления уранового топлива. В обращении с отработавшим топливом используются, главным образом, хранение, частичная химическая переработка с выделением урана и плутония и остекловыванием высокоактивных отходов.

Две основные системные проблемы современной ядерной энергетики хорошо известны:

низкая эффективность полезного использования добываемого природного урана — менее 1%, сырьевая ограниченность;

разомкнутость топливного цикла с необходимостью организации долговременного хранения непрерывно возрастающего количества ядерных материалов (рис. 1).

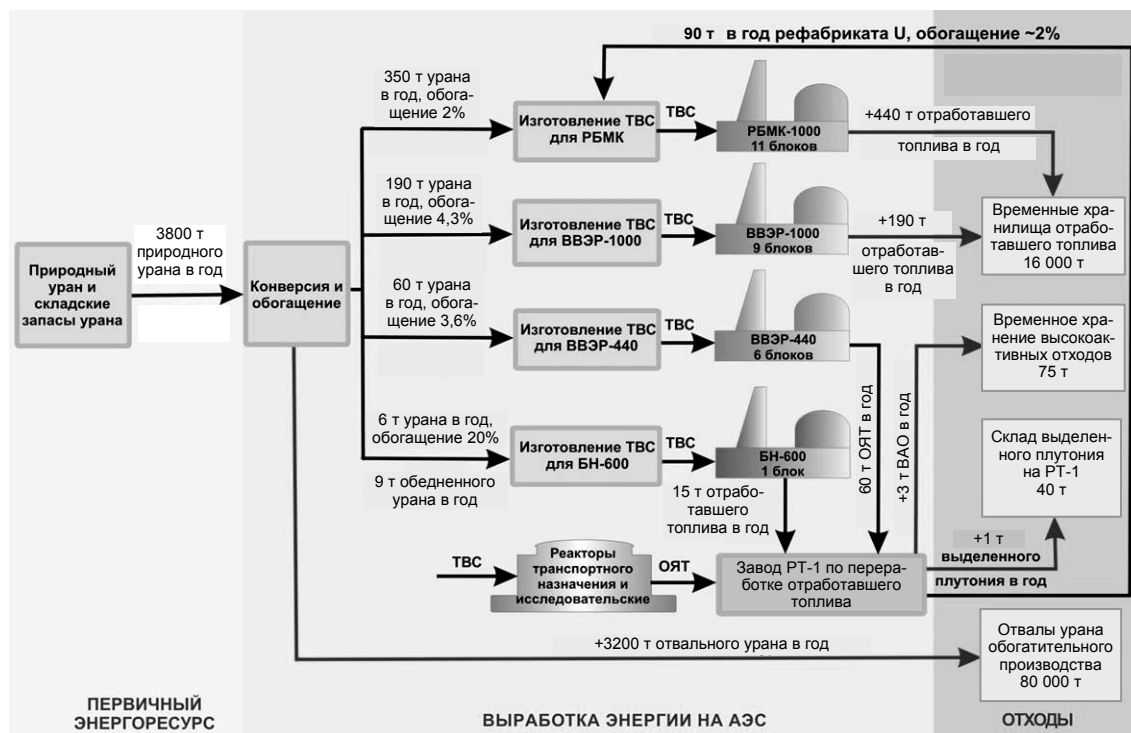
Научные, конструкторские и технологические работы по поиску путей решения отмеченных проблем ведутся в отрасли уже более полувека по нескольким направлениям. Одним из самых перспективных направлений с начала 1950-х годов стала разработка замкнутого топливного цикла ядерной энергетики с быстрыми реакторами, что включает изготовление смешанного уран-плутониевого топлива, переработку отработавшего топлива и многократное использование (рецикл) топлива в быстрых реакторах-размножителях. Именно такие технологии должны составить основу новой технологической платформы крупномасштабной ядерной энергетики XXI века.

Достигнутые к настоящему времени результаты обеспечивают нашей стране лидирующие позиции в технологической готовности к инновационному развитию ядерной энергетики:

по реакторной технологии —

завершается разработка проектов ВВЭР следующего поколения (АЭС-2006 и ВВЭР большей мощности) для массового сооружения в ближнесрочной перспективе;

строится БН-800 для демонстрации и дальнейшей отработки технологий замыкания уран-плутониевого топливного цикла;



Р и с. 1. Технологическая схема современной ядерной энергетики России установленной электрической мощностью 23,2 ГВт (по состоянию на конец 2005 г.)

на разных стадиях НИР и ОКР находятся проработки новых проектов быстрых реакторов с натриевым теплоносителем (БН-1800, БН-ГТ) и быстрых реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (СВБР, БРЕСТ) для различного применения;

по технологии замкнутого топливного цикла —

на промышленном уровне апробирована водная химическая переработка отработанного топлива тепловых реакторов с выделением урана и плутония и остекловыванием высокоактивных отходов (завод РТ-1);

на опытно-экспериментальном уровне продемонстрированы таблеточная и вибротехнологии производства смешанного уран-плутониевого оксидного топлива для быстрых реакторов;

начаты НИОКР по разработке альтернативной технологии топливного цикла ядерной энергетики с быстрыми реакторами (нитридное топливо, сухие методы переработки отработанного топлива, трансмутация Np, Am, Cm и др. в быстрых реакторах, элементы технологии уран-ториевого цикла);

рассматриваются концепции гибридных ускорительно-управляемых установок и жидко-солевых реакторов для сжигания долгоживущих радиоактивных отходов;

по технологии ядерных энергоисточников для неэлектрического применения —

на опытно-промышленном уровне показана возможность использования быстрых реакторов в установках для опреснения воды (БН-350), а также тепловых реакторов для регионального тепло- и электроснабжения (Билибинская АЭС);

на разных стадиях готовности находятся технологии производства энергии для неэлектрического и смешанного применения и проекты перспективных ядерных энергетических установок для реализации этих технологий, включая установки транспортного и космического назначения, теплоснабжения, опреснения воды, газификации угля, производства водорода (КЛТ-40, СВБР, ГТ-МГР, РУТА и др.).

Анализ современной ситуации показывает (см. таблицу), что необходимый уровень готовности к коммерческому использованию тепловых реакторов в настоящее время имеют только технологии ВВЭР, а самый высокий уровень готовности к коммерциализации — технологии быстрых реакторов.

Технологическая готовность отдельных элементов современной ядерной энергетики (экспертная оценка авторов)

Тип реактора	Топливо-обеспечение	Реакторная установка	Обращение с отработавшим топливом

			вом
ВВЭР	5	5	3
РБМК	5	5	2
БН	3	4	2
КЛТ-40	3	3	2
ВБЭР-300	3	3	2
РУТА	3	2	2
СВБР	2	2	1
ГТ-МГР	2	2	1
ВВЭР со сверхкритическими параметрами теплоносителя, КВ ~ 0,8	2	1	1
БРЕСТ	1	1	1
ЖСР	—	—	—

Примечания: 1 — концептуальные НИР в обоснование физических принципов, 2 — НИОКР в обоснование ключевых технических решений, 3 — опытно-промышленная демонстрация, 4 — коммерциализация, 5 — массовое коммерческое использование.

Из этого состояния ядерная энергетика должна сегодня начать свое системное развитие с достижением сформулированных ближне- и дальнесрочных целей. Вектор развития определяется условиями комплексного решения задач долговременного топливообеспечения, а также задач обращения с отработавшим топливом и окончательной изоляции отходов. Основной вопрос при этом заключается в выборе приоритетов, оптимальной стратегии и тактики инновационного развития, минимизирующих технологические и инвестиционные риски. Рассмотрим возможные сценарии такого развития.

БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В БЛИЖНЕСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ

Генерирующие мощности. Для задач ближнесрочной перспективы с учетом масштаба развития (рост установленных мощностей в 2 раза) будем считать обоснованным применяемый сегодня нормативный подход к ядерной и радиационной безопасности технологических объектов. Преимущественное использование освоенных водо-водяных реакторов является единственным вариантом развития ядерной энергетики страны и расширения экспортных поставок в ближнесрочной перспективе. Особое условие — к 2030 г. не менее 10% вводимых мощностей должны обеспечиваться за счет

строительства АЭС с быстрыми натриевыми реакторами.

Замещение выводимых из эксплуатации и наращивание новых мощностей с темпом 2—3 ГВт в год реализуются путем:

достройки энергоблоков высокой и средней степени готовности;

массового сооружения энергоблоков ВВЭР следующего поколения (АЭС-2006), позднее — ВВЭР большей мощности;

создания и массового ввода АЭС с реакторами малой и средней мощности для региональных нужд и экспорта в развивающиеся страны;

сооружения и ввода в действие БН-800;

разработки на основе опыта БН-600, -800 проекта коммерческого быстрого натриевого реактора и строительство малой серии таких реакторов.

Топливообеспечение. Для обеспечения топливом вводимых в стране и за рубежом АЭС с ВВЭР общей суммарной электрической мощностью около 100 ГВт в течение 50-летнего срока службы потребуется до 1 млн т природного урана. Суммарные ресурсы относительно дешевого природного урана в стране оцениваются в пределах от 640 тыс. т до 1 млн т. В ближнесрочной перспективе реализуется программа «Уран России», исследуются возможности поставок урана из других стран, в первую очередь из СНГ.

Обращение с отработавшим топливом. Комплексное решение проблем накопления отработавшего топлива ВВЭР и топливообеспечения коммерческих быстрых реакторов малой серии реализуется путем создания национального ядерного топливно-энергетического центра (ЯТЭЦ), в состав которого войдут следующие сбалансированные по потокам плутония основные элементы:

промышленная линия по радиохимической переработке отработавшего топлива ВВЭР на основе водной химии с выделением плутония и урана, а также фракционированием и компактированием отходов;

промышленное производство по изготовлению из урана и выделенного плутония смешанного топлива для быстрых натриевых реакторов;

АЭС с коммерческими быстрыми натриевыми реакторами малой серии.

Территориально завод по переработке отработавшего топлива тепловых реакторов и цех по изготовлению смешанного топлива для быстрых

реакторов целесообразно разместить на одной площадке, тогда как коммерческие быстрые натриевые реакторы могут размещаться в составе одной или нескольких АЭС на одной или разных площадках.

Для решения проблемы накопления отработавшего топлива ВВЭР суммарной установленной электрической мощностью 50 ГВт потребуется:

проектирование и сооружение предприятия радиохимической переработки производительностью около 1000 т отработавшего топлива в год;

строительство малой серии коммерческих быстрых натриевых реакторов суммарной установленной электрической мощностью до 5 ГВт;

проектирование и сооружение цеха по изготовлению топлива для коммерческих быстрых натриевых реакторов производительностью около 100 т смешанного топлива в год.

Результатами деятельности такого национального ЯТЭЦ будут:

переработка отработавшего топлива ВВЭР с выделением регенерированного урана и компактизацией радиоактивных отходов в виде, пригодном для временного хранения до окончательной изоляции;

выработка электроэнергии АЭС с быстрыми реакторами на смешанном топливе;

десятикратное снижение объемов отработавшего топлива за счет перевода каждой 1000 т отработавшего топлива ВВЭР в компактные 100 т отработавшего смешанного топлива быст-

рых натриевых реакторов и временное хранение этого топлива для последующей переработки и утилизации ядерных материалов в коммерческих быстрых реакторах следующих поколений (дальнесрочная перспектива).

Режим нераспространения. При экспорте ВВЭР он достигается предоставлением комплексных услуг топливного цикла для экспортируемых реакторов — поставка свежего топлива и возврат отработавшего топлива в Россию.

Глобальное решение проблемы нераспространения делящихся материалов и чувствительных технологий может быть обеспечено созданием сети международных ядерных топливно-энергетических центров по предоставлению комплексных услуг полного ядерного топливного цикла, включая обогащение урана и обращение с отработавшим топливом. Структура международного ЯТЭЦ, которая может быть аналогична национальной, приведена на рис. 2.

Таким образом, поставленные цели ближнесрочной перспективы инновационного развития ядерной энергетики страны и расширения экспорта уже сегодня имеют достаточно высокий уровень технологической обеспеченности по всему комплексу проблем, включая топливообеспечение, генерацию энергии, обращение с отработавшим топливом, иммобилизацию отходов и нераспространение, и могут быть успешно достигнуты путем:



Р и с. 2. Принципиальная структура и балансовые потоки в системе с международным ЯТЭЦ по предоставлению услуг ядерного топливного цикла

разработки и строительства новых АЭС с ВВЭР;

создания и строительства АЭС с реакторами малой и средней мощности для регионального атомного энергоснабжения;

реализации программы «Уран России» и наращивания мощностей предприятий по обогащению урана и изготовлению уранового топлива;

разработки и сооружения малой серии коммерческих быстрых натриевых реакторов;

создания национального ЯТЭЦ, включая проектирование и сооружение завода по водно-химической переработке отработавшего топлива ВВЭР и изготовлению смешанного топлива для коммерческих быстрых реакторов;

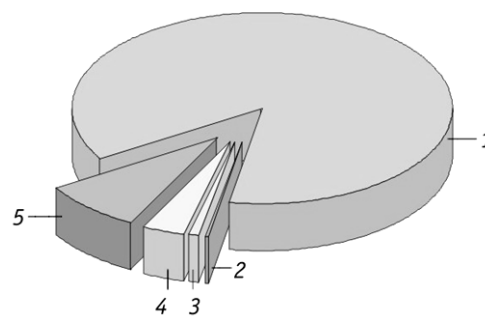
экспорта тепловых реакторов с предоставлением комплекса услуг, в том числе поставок свежего топлива и возврата отработавшего топлива;

создания на территории России международного ЯТЭЦ по предоставлению услуг ядерного топливного цикла под контролем МАГАТЭ, включая услуги по обогащению урана и обращению с отработавшим топливом тепловых реакторов.

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ДАЛЬНЕСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ

Прогноз развития ядерной энергетики в XXI веке. Для определенности примем, что к середине века общая установленная электрическая мощность крупномасштабной ядерной энергетики страны составит около 100 ГВт и примерно такого же масштаба будет экспорт ядерной энерготехнологии. Прогнозировать масштабы неэлектрического применения атомной энергии на долгосрочную перспективу затруднительно, поскольку опыт, имеющийся в этой области, незначителен. Для примера можно говорить лишь о желаемых целях в эквиваленте АЭС тепловой мощностью 100 ГВт к 2050 г.

Анализ проблем топливообеспечения крупномасштабной ядерной энергетики. Федеральным агентством РФ по недропользованию доказанные ресурсы природного урана в нашей стране оцениваются в 615 тыс. т. В то же время по данным компании «Бритиш Петролеум» для России [2] доказанные ресурсы органического топлива составляют соответственно нефти

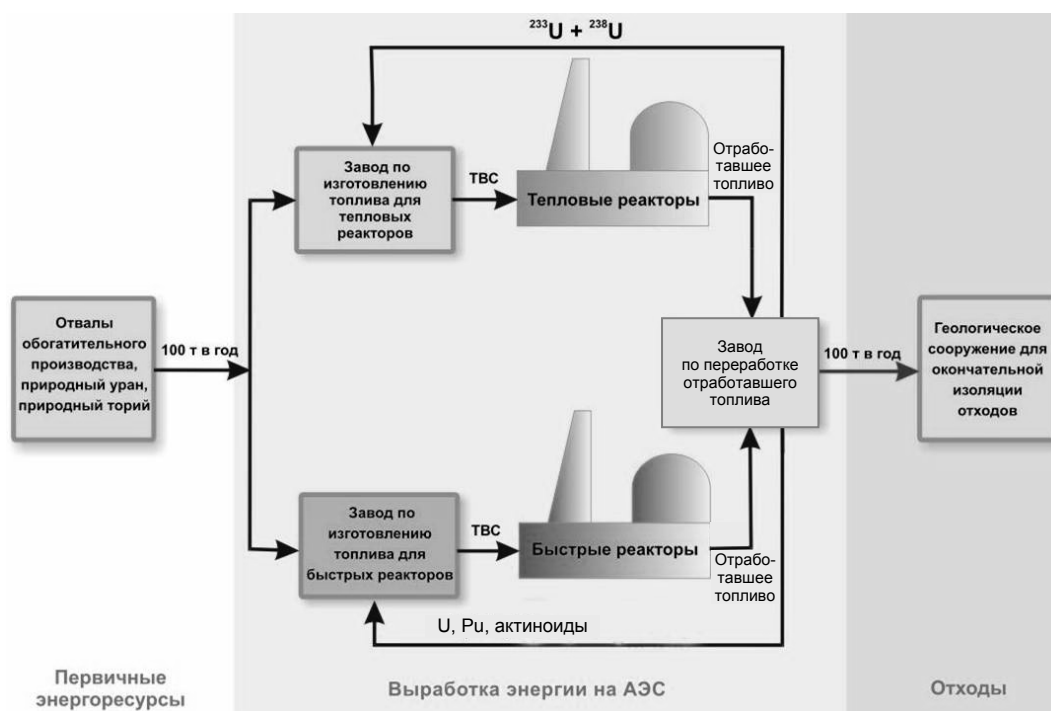


Р и с. 3. Относительный энергопотенциал природных сырьевых ресурсов России: 1 — ^{238}U (86,7%); 2 — ^{235}U (0,4%); 3 — нефть (0,8%); 4 — газ (3,4%); 5 — уголь (8,7%)

9,9 млрд т, газа 48 трлн м³, угля 157 млрд т. Это означает, что в энергетическом эквиваленте суммарный потенциал отечественных запасов ^{238}U в природных месторождениях в 10 раз больше суммарного энергопотенциала природных ресурсов угля и в 25 раз больше, чем природного газа (рис. 3). Учет отвалов обогатительного производства увеличит приведенные цифры еще примерно в 2 раза.

При эффективном использовании этих запасов урана крупномасштабная ядерная энергетика с любым разумным уровнем установленных мощностей может быть обеспечена топливом на длительный исторически значимый период времени. В частности, обедненного урана, накапливаемого в отвалах обогатительного производства, как первичного сырьевого ресурса уже сегодня достаточно для топливообеспечения крупномасштабной ядерной энергетики в течение сотен лет, а с учетом ближнесрочной перспективы развития ядерной энергетики на основе ВВЭР — нескольких тысяч лет. Пути перевода ядерной энергетики на максимально эффективное использование ^{238}U известны: внедрение быстрых реакторов с замыканием топливного цикла по плутонию и урану.

В разных фазах инновационного развития в структуру крупномасштабной ядерной энергетики будущего (рис. 4) могут входить быстрые и тепловые реакторы различных типов, но с точки зрения ее топливообеспечения как энергосистемы важным является выполнение следующих условий:



Р и с. 4. Принципиальная схема крупномасштабной ядерной энергетики России установленной электрической мощностью 100 ГВт

в своем составе она должна иметь быстрые реакторы-размножители ($KB > 1$), допускающие расширенное воспроизводство топлива (как из ^{238}U , так и из ^{232}Th);

обеспечивать возможность многократного рециклинга топлива в этих реакторах;

эффективный коэффициент воспроизводства топлива в системе в целом ($KB_{\text{сист}}$) должен достигать значений, немного больше единицы (с учетом технологических потерь и потребностей развития).

Для энергосистемы, удовлетворяющей этим условиям, первичные сырьевые ресурсы (^{238}U и ^{232}Th) неисчерпаемы, проблема топливообеспечения становится внутренней и решается технологически. Выполнение условия $KB_{\text{сист}} > 1$ переводит вопрос о соотношении мощностей быстрых и тепловых реакторов в системе из категории технических в категорию экономических. Системные вопросы, требующие более детального анализа, включают:

определение параметров быстрых реакторов как ключевого технологического звена замкнутого топливного цикла крупномасштабной ядерной энергетики (удельной загрузки плутония, времени внешнего цикла, KB и др.);

определение оптимальной структуры крупномасштабной ядерной энергетики с быстрыми реакторами-размножителями и легководными

реакторами нового поколения, способными работать на плутонии и/или ^{233}U в режимах с $KB \sim 0,8\text{—}0,9$;

определение момента начала массового ввода в эксплуатацию коммерческих быстрых реакторов, переработки отработавшего топлива и полного замыкания топливного цикла.

Отходы крупномасштабной ядерной энергетики. Проблема обращения с отработавшим топливом ВВЭР, вводимых в эксплуатацию в период до 2030 г., решается развитием усовершенствованных технологий водной химической переработки и использованием быстрых реакторов малой серии. Минимизация отходов достигается путем полного замыкания топливного цикла. В первой фазе использования быстрых реакторов исследования по проблемам полного замыкания топливного цикла концентрируются на поиске путей минимизации отходов, в том числе на вопросах рецикла актиноидов, оптимального обращения с продуктами деления и их окончательной изоляции от экосферы.

Нераспространение в условиях мировой крупномасштабной ядерной энергетики. Решение проблемы нераспространения чувствительных ядерных технологий и материалов в связи с ростом масштабов и расширением географии использования атомной энергии обеспечивается развитием глобальной инфраструктуры

ядерной энергетики и созданием на территориях ядерных государств международных ядерно-энергетических центров по предоставлению заинтересованным странам гарантированных услуг в области ядерного топливного цикла.

В качестве экспортпригодных наряду с ВВЭР в будущем могут рассматриваться быстрые реакторы с $KB < 1$ и/или усовершенствованные легководные реакторы, работающие на денатурированном уране — смеси ^{233}U и ^{238}U . Экспортируемые реакторы обеспечиваются услугами по поставкам свежего и возврату отработавшего топлива. Переработка отработавшего топлива и утилизация выделенных делящихся материалов, как и наработка ^{233}U , осуществляются с применением быстрых реакторов-размножителей в рамках международных ядерных топливно-энергетических центров.

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Благодаря усилиям многих научных коллективов в последнее время в области физики и технологии реакторов и топливного цикла получены основополагающие результаты, обеспечивающие дальнейшее развитие ядерной энергетики. Тем не менее следует отметить необходимость усиления работ в этой области, поскольку все время возникают новые задачи. В частности, предполагаемое существенное, в отдаленной перспективе — в десятки и сотни раз увеличение установленной мощности ядерной энергетики уже сегодня требует нового подхода к обеспечению оптимальных характеристик ядерного топливного цикла и реакторов новых поколений, прежде всего характеристик безопасности, надежности и эффективности.

В этом отношении быстрые реакторы имеют принципиальные преимущества, которые обусловлены наличием особых свойств, внутренне присущих реакторам только такого типа. Подобные свойства должны детально изучаться в экспериментах и учитываться в расчетах. Для этого нужно разрабатывать и строить новые экспериментальные установки, постоянно совершенствовать расчетные коды и вычислительные методы реакторной физики, теплофизики, гидродинамики, прочности и др. С учетом возрастающей сложности задач, которые ставит

практика, крайне недостаточными становятся доступные сегодня компьютерные мощности. В свете сказанного серьезного внимания требуют модернизация и развитие исследовательской и испытательной экспериментальной базы, а также радикальное расширение вычислительных возможностей научных и конструкторских организаций.

Предварительный анализ указывает на необходимость проведения многоплановых научно-технологических работ по решению в ближнесрочной перспективе следующих задач создания новой технологической платформы крупномасштабной ядерной энергетики России:

НИР по анализу проблем инновационного развития ядерной энергетики, разработке системных требований и выбору приоритетов в создании ядерных реакторов и технологий ядерного топливного цикла новых поколений с учетом ключевых аспектов безопасности, экономики, экологии, топливообеспечения, обращения с радиоактивными отходами и нераспространения;

демонстрация головного блока коммерческой АЭС с быстрым реактором нового поколения, отвечающим системным требованиям крупномасштабной ядерной энергетики;

демонстрация перспективных технологий переработки отработавшего топлива быстрых реакторов и полного замыкания ядерного топливного цикла;

НИОКР по созданию легководных реакторов нового поколения (ВВЭР с теплоносителем сверхкритических параметров и высоким собственным коэффициентом воспроизводства топлива $KB \sim 0,8\text{—}0,9$) для работы в замкнутом топливном цикле с $KB_{\text{сист}} \geq 1$;

демонстрация головного блока модульного многоцелевого быстрого свинцово-висмутового реактора для региональных АЭС малой и средней мощности;

НИОКР по обоснованию геологического сооружения для окончательной изоляции отходов полного ядерного топливного цикла;

демонстрация и коммерциализация реакторных технологий для неэлектрического применения;

НИОКР по технологии быстрого реактора большой мощности с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем;

НИОКР по технологии уран-ториевого топливного цикла.

Научно-техническое обеспечение инновационного использования энергии атомного ядра включает также направления проблемно-ориентированных исследований фундаментального характера, среди которых следует выделить:

исследования свойств и разработку технологий получения новых перспективных конструкционных материалов и изделий на их основе;

разработку технологий атомно-водородной энергетики, хранения, распределения и использования водорода как энергоносителя;

изучение новых физических принципов для создания перспективных термоэмиссионных, плазменных, ядерно-лазерных и иных технологий производства, преобразования, накопления и передачи энергии;

развитие нанотехнологий, технологий ядерной медицины и радиобиологии, технологий телекоммуникационных систем и вычислительных мощностей, сопровождающих инновационное использование энергии атомного ядра.

Важная роль в научном обеспечении задач инновационного развития ядерной энергетики должна быть отведена международному научно-техническому сотрудничеству, осуществляемому на принципах приоритета национальных интересов и нераспространения. При условии извлечения максимальной пользы для реализации национальной программы инновационного развития ядерной энергетики целями сотрудничества в ближнесрочной перспективе могут служить повышение уровня глобальной безопасности, содействие решению проблемы энергообеспечения устойчивого развития человечества, а также создание условий для масштабного развития мировой ядерной энергетики, благоприятствующих экспорту российских энерготехнологий и услуг ядерного топливного цикла.

В ближнесрочной перспективе тематические приоритеты международного сотрудничества целесообразно отдать:

созданию и верификации компьютерных кодов нового поколения и баз данных для решения задач моделирования инновационного развития ядерной энергетики с учетом системных аспектов безопасности, экологии, экономики, топливообеспечения, обращения с радиоактивными отходами и нераспространения;

формированию глобального видения мировой ядерной энергетики, разработке архитектуры и созданию глобальной инфраструктуры инновационной ядерной энергетики на базе сети международных топливных центров, определению и согласованию требований пользователей и производителей новых ядерных энерготехнологий;

замыканию топливного цикла ядерной энергетики, включая переработку отработавшего топлива легководных реакторов, изготовление смешанного топлива, а также безопасности реакторов, разрабатываемых в рамках реализации инициатив по созданию Глобальной инфраструктуры ядерной энергетики (Россия) и Глобального ядерного партнерства (США).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в рамках принятых подходов анализ показывает достижимость целей инновационного развития ядерной энергетики России в ближнесрочной перспективе, а также пути минимизации технологических и инвестиционных рисков в этом процессе. Дальнесрочный анализ подтверждает возможность поэтапного энергообеспечения устойчивого развития нашей страны в третьем тысячелетии путем создания и развертывания ядерной энергосистемы принципиально нового типа — с замкнутым топливным циклом и сырьевой независимостью, безопасной, малоотходной, экологически дружелюбной, устойчивой к распространению ядерных материалов и ядерного оружия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лейпунский А.** Ядерные энергетические системы и их технические возможности. Atomic Energy Review, v. 4. Commemorative Issue. Vienna, IAEA, 1966.
2. **Statistical Review of World Energy.** London, British Petroleum, June 2005.

Поступила в Редакцию 3.11.06