



Виктор Муро́гов

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: УРОКИ ПРОШЛОГО, СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ, НОВЫЕ ИНИЦИАТИВЫ

Несмотря на многообразие и различие сценариев будущего энергетического развития в мире, есть ряд положений, незыблемых для этих прогнозов: рост населения и глобального энергопотребления в мире; ужесточающаяся конкуренция за ограниченные и неравномерно размещенные ресурсы органического топлива; нарастающая зависимость от нестабильной ситуации в районах стран — экспортеров нефти; нарастающие экологические ограничения; неизбежное сокращение в силу разных причин различия энергопотребления богатейших и беднейших стран; ограниченный по масштабам и локальный по регионам характер возможностей возобновляемых источников энергии; возрастающие со временем (в том числе из-за непрерывного роста населения) негативные последствия дефицита энергии.

БУДУЩЕЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В этих условиях роль ядерной энергетики (ЯЭ), единственного нового источника энергии, освоенного в промышленном масштабе и способного ответить на перечисленные вызовы, будет неизбежно возрастать. Непредсказуемость рынка органического сырья (прежде всего нефти) и последний финансовый кризис только подчеркивают роль ЯЭ.

Для России (как и для других ядерных держав, прежде всего США) ядерные технологии — не только и не столько элемент энергетического рынка: это основа нашей экономической, энергетической и политической безопасности. Это основа нашего социального развития:

- ❑ ядерная медицина (новый уровень диагностики и лечения важнейших заболеваний: сердечно-сосудистых, раковых и других);
- ❑ повышение эффективности производства и улучшение качества питания, в том числе безопасная для здоровья консервация продуктов питания;
- ❑ ядерно-физические методы для улучшения технологии и повышения уровня контроля качества в промышленности;
- ❑ развитие науки на основе ядерно-физических методов и приборов: лазеры, ускорители, изотопы.

Для России ядерные технологии способны (и реально могут) обеспечить переход к интенсивному способу ведения экономики, от сырьевой экономики — к индустриальной, машиностроительной, где научно-технический потенциал в таких отраслях, как образование, экология, экономика и культура безопасности, играет роль двигателя общественного и промышленного развития. Ядерные технологии



И
З
А
Н
А
Л

способны в 4–5 раз увеличить долю машиностроительного и научного секторов в экономике страны по сравнению с сырьевым типом хозяйствования.

Именно президент России выступил на Саммите тысячелетия ООН (2000 г.) с инициативой обеспечения энергетической стабильности развития на основе ядерных технологий. Эта инициатива оказалась исключительно своевременной и нашла поддержку мирового сообщества.

В ряде своих резолюций Генеральная конференция Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) поддержала эту инициативу, рекомендовала организовать на ее основе международный проект ИНПРО с участием более 30 стран и включила его в регулярную программу агентства¹.

В резолюциях Генеральной Ассамблеи ООН приветствовалась инициатива президента России, как «отвечающая чаяниям развивающихся стран и как путь гармонизации отношений индустриальных и развивающихся государств»². Но в процессе реализации этой инициативы (в том числе в рамках работы над проектом ИНПРО³ и при анализе возможных перспектив развития ЯЭ стало ясно, что и сама ЯЭ, ядерные технологии должны пройти путь внутреннего (*инновационного*) развития.

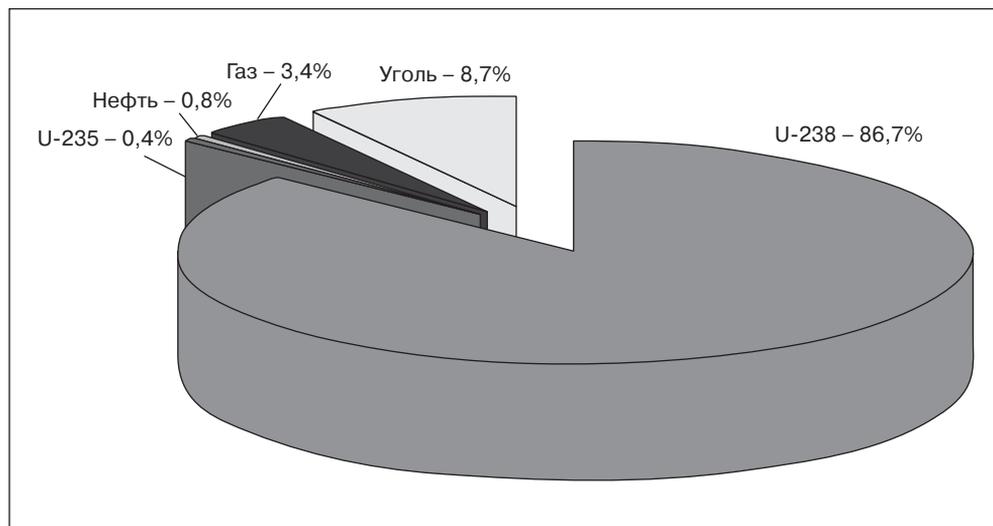
Сейчас, после аварии в Японии на АЭС *Фукусима*, идет обсуждение широкого круга вопросов: от будущего ренессанса ЯЭ до необходимости нового *глобального* режима не только в области нераспространения, но и в сфере ядерной и радиационной безопасности. Обсуждается необходимость создания новых структур, развития инновационных методов управления, обязательных международных стандартов⁴.

Но часто забывается, что сами современные ядерные технологии (легководные реакторы, ЛВР: *ВВЭР*, *PWR* и *BWR*, *БН*) остались на уровне 20–30-летней давности. Более 80% ЯЭ составляют АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами на тепловых нейтронах. Это и есть одна из основных причин стагнации развития ЯЭ в ведущих западных ядерных странах.

Иллюстрацией бесперспективности такого пути развития ЯЭ служит рис. 1.

Развиваясь на основе традиционных водо-водяных реакторов, современная ЯЭ основывается на ресурсах U-235, запасы которого на порядок меньше запасов

Рис. 1. Относительное энергетическое содержание природных источников топлива (энергии), без учета возобновляемых источников⁵



нефти и газа. У такой ЯЭ нет долговременного будущего. О какой стабилизирующей роли ЯЭ в этом случае можно говорить?

Более того, ЯЭ развивается только в одном энергетическом секторе — электроэнергетическом. Но основная масса потребляемых природных ресурсов (органическое топливо) приходится на те сектора, где вклад ЯЭ незначителен (промышленное и бытовое теплоснабжение, транспорт).

Остались на уровне опытных и полупромышленных образцов и не получили широкого применения за более чем 60 лет разработок ядерные энергетические установки (ЯЭУ) с высокотемпературными графитовыми реакторами и газовым (He) охлаждением типа *HTGR*. Ожидалось, что такие ЯЭУ станут основой атомно-водородной энергетики и обеспечат производство искусственного жидкого топлива, что позволило бы ЯЭ внедриться в решение топливной проблемы для транспорта и участвовать в производстве тепла для промышленности (800°C и выше)⁶.

Не получили промышленного развития и атомные станции теплоснабжения (АСТ) для производства бытового тепла (в России было остановлено и затем прекращено строительство АСТ в Нижнем Новгороде и Воронеже).

Также не получили широкого развития малые ЯЭУ с очень привлекательными характеристиками для реакторов малых АЭС (~100 МВт (эл.)) в развивающихся странах и для автономных источников в регионах без энергетических сетей. При этом необходимо упомянуть, что, например, в нашей стране только 12% территории имеют энергетические сети и могут позволить использовать АЭС большой мощности (до 1000 МВт (эл.) и выше). Интереснейшие зарубежные и отечественные разработки (*4S* (Япония), *PRISM* (США), *SVBR* (Россия) и др.) остаются на уровне нереализованных проектов, хотя в оборонной сфере США и Россия (СССР) накопили огромный уникальный опыт, построив около 1000 малых реакторов разного типа для АПЛ⁷.

Возвращаясь к основной проблеме стабильного развития — проблеме неограниченности ядерных ресурсов урана и тория, — необходимо подчеркнуть, что, как и для всех приведенных выше нерешенных проблем ЯЭ, выход есть. Это развитие инновационных технологий, так называемой новой технологической платформы. Остановимся на этом подробнее, так как традиционно понимаемое развитие данной платформы не только не решает упомянутые проблемы будущего развития ЯЭ, но и может создать проблемы для ее полномасштабного развития.



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РИСК ЯДЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Принципиальное, экспериментально обоснованное и апробированное в полупромышленном масштабе решение перечисленных проблем есть, и оно давно известно. Еще в 1944 г. Энрико Ферми обосновал возможность использования практически неограниченных запасов природного урана и тория на основе развития реакторов на быстрых нейтронах в замкнутом ядерном топливном цикле⁸. На сегодняшний день практически общепризнанным является положение, что полномасштабное развитие ЯЭ, способное решить проблему стабильного энергетического развития, возможно только в рамках замкнутого топливного цикла с использованием быстрых реакторов-размножителей⁹. Именно решение этой действительно глобальной проблемы и поставлено в виде задачи перед ведущими международными проектами ИНПРО (в рамках деятельности МАГАТЭ и по инициативе России) и *GIF IV* (ЯР четвертого поколения) — по инициативе США и с участием только ведущих ядерных стран.

Задача оказалась намного сложнее как в научно-техническом, так и в политическом плане, чем это представлялось пионерам развития ЯЭ. Чтобы продемонстрировать это, достаточно даже кратко обратиться к опыту разработки и создания АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

Научно-исследовательские разработки быстрых реакторов ведутся уже более 60 лет: в 1944 г. Э. Ферми определил концепцию развития быстрых реакторов, в 1946 г. был запущен первый экспериментальный быстрый реактор с плутонием *Clementine* (США)¹⁰, охлаждаемый ртутью. В 1951 г. было получено первое ядерное электричество на экспериментальном быстром реакторе *EBR-1* (США)¹¹.

В 1964–1968 гг. впервые в мире был реализован замкнутый ЯТЦ с парометаллургической переработкой и повторным использованием актиноидов (урана, плутония и др.) облученного топлива в рамках *JFR* (интегрированного ЯТЦ) на реакторе *EBR-II* с металлическим топливом и жидкометаллическим охлаждением¹².

В СССР работы по быстрым реакторам велись с 1949 г. под руководством А.И. Лейпунского. Уже в 1956 г. был пущен экспериментальный *БР-2* (аналог *Clementine*), а в 1956 г. на его месте был пущен *БР-5* (5 Мвт (т)) (ФЭИ, Обнинск) — прототип будущих реакторов типа *БН* (оксидное топливо, жидкометаллическое, натриевое охлаждение). В 1973 г. был пущен первый в мире полупромышленный реактор *БН-350* (Казахстан), а в 1980 г. — единственный в мире работающий в настоящее время быстрый энергетический реактор *БН-600* (Белоярская АЭС). Но в России до сих пор не реализован замкнутый уран-плутониевый ЯТЦ, реакторы типа *БН* (*БН-350* и *БН-600*) работали и работают в режиме урановых реакторов-переработчиков, сжигающих дефицитный высокообогащенный природный уран (более 20% обогащения).

Решение данной задачи создания нового типа реактора с жидкометаллическим охлаждением потребовало передачи знаний и преемственности как минимум трех-четырёх поколений ученых, инженеров и технологов. Там, где это не было осуществлено (например, в США), знания и опыт в области технологии быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ в значительной мере были утеряны. Сейчас очевидно, что в США причиной этого стала ошибочная политика: в 1970-е гг. были закрыты практически все работы по быстрым реакторам и по развитию замкнутого ЯТЦ¹³.

Потеря знаний и опыта в этой области — не просто *прямая* экономическая потеря, составляющая десятки миллиардов долларов. Это реальная научно-технологическая катастрофа, связанная с потерей научной школы и утратой лидерства в области развития ЯЭ:

- утрата профессиональных и компетентных кадров;
- потеря системы высшего образования в этой области (прежде всего, профессорского и исследовательского состава);
- потеря экспериментальной базы;
- потеря новых поколений молодых ученых.

Восстановление этих потерь (если оно вообще возможно!) потребует десятилетий упорных усилий государства.

Ключевым вопросом восстановления или создания научных школ, как и реализации инновационной платформы развития ЯЭ, является проблема подготовки компетентного поколения новых специалистов, кадровая проблема. Подготовка кадров должна опережать программы разработки и развития технологий, строительства ядерных объектов и ввода их в эксплуатацию. Масштабный ввод АЭС и других ядерных объектов просто опасен без тщательной проработки и реализации кадровой политики¹⁴.

ПРОБЛЕМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ: ГЛОБАЛЬНОСТЬ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И НАЦИОНАЛЬНЫЙ СУВЕРЕНИТЕТ

Опыт мирового ядерного сообщества, обобщаемый МАГАТЭ, другими международными ядерными организациями и национальными центрами с учетом *обостренного* анализа после тяжелой аварии на АЭС *Фукусима* позволяет надеяться, что основная часть проблем будущего полномасштабного развития ЯЭ (в том чис-

ле проблемы радиационной и ядерной безопасности, экологические проблемы, связанные как с радиационными, так и прямыми тепловыми выбросами в окружающую среду) может быть решена на базе разработанных на лабораторном и проектном уровне конструкций и технологий.

Единственная проблема, которая не является только научно-технической и требует политических решений — это проблема ядерного нераспространения. Она обусловлена серьезной дилеммой: глобальный характер ядерных технологий («Ядерная авария где-либо есть ядерная беда везде») и национальный характер ответственности, то есть приоритет национального суверенитета при решении глобальных вопросов. С этой точки зрения, проблема осложнится с развитием инновационных технологий: по мере строительства реакторов-бридеров, реализации переработки и повторного использования делящихся материалов, трансмутации, строительства большого числа малых АЭС, роста численности персонала ядерных организаций, увеличения объема перевозок ядерных материалов и т. п. (см. табл. 1, 2) будет возрастать риск распространения *чувствительных* ядерных знаний, материалов, оборудования.

Таблица 1. Факторы, влияющие на риск распространения¹⁵

Увеличение масштаба ядерной энергетики
<ul style="list-style-type: none"> — рост числа атомных станций, в том числе региональных атомных станций малой мощности; — рост числа предприятий топливного цикла и их номенклатуры; — увеличение объемов и транспортных потоков ядерных материалов; — увеличение объемов РАО.
Структурные изменения ядерного энергопромышленного комплекса
<ul style="list-style-type: none"> — расширенное воспроизводство топлива, использование быстрых реакторов-бридеров; — переработка ОЯТ, рецикл ядерного топлива, замкнутый цикл.
Развитие ядерной энергетики в ныне неядерных странах, которые исторически не подготовлены к обращению с ядерной технологией (ядерная безопасность и гарантии нераспространения)



Таблица 2. Задачи по повышению устойчивости режима нераспространения¹⁶

Изменения в развивающейся атомной энергетике могут привести к большей доступности ядерных материалов и технологий и повышению риска распространения
Необходимо разработать новые подходы и внедрить дополнительные меры, обеспечивающие, по крайней мере, сохранение риска на его нынешнем уровне
Такие меры необходимы во всех сферах, обеспечивающих режим нераспространения: <ul style="list-style-type: none"> — политической; — институциональной; — технической.
Необходим системный анализ с количественной оценкой риска распространения — как инструмент решения этих задач

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ПОЛИТИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО — ОСНОВА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

С первых шагов освоения ядерной энергии, развития ядерных технологий и создания ядерного оружия основоположники использования энергии атома в мирных целях (Э. Ферми, Л. Сциллард, А. Эйнштейн и др.) предупреждали о глобальных последствиях этого развития. Наряду с предсказанием важнейшей роли ядерных технологий для будущего они подчеркивали необходимость создания надежной международной системы ядерной безопасности. Имеется в виду не только создание соответствующих технологий, гарантирующих безопасное использование ядерной энергии, но и обеспечение режима безопасности с точки зрения недопущения неконтролируемого распространения ядерных технологий и постановки под международный контроль дальнейшего их развития¹⁷.

Наиболее заметный в этом плане первый след в истории оставила инициатива президента США Д. Эйзенхауэра, выдвинувшего в 1953 г. в ООН программу *Атом для мира*. Эта инициатива была поддержана мировым сообществом, в результате чего в 1954 г. Генеральная Ассамблея ООН приняла соответствующую резолюцию в развитие этой программы. Одним из важнейших элементов данной резолюции было решение о создании Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

Еще до утверждения устава МАГАТЭ 1956 г. и образования самой организации в 1957 г. была проведена Первая Женевская конференция по мирному использованию атомной энергии в 1955 г., а затем состоялись еще три подобных форума известных ученых-атомщиков в 1958, 1964 и 1971 гг. Фактически именно они положили начало практическому процессу международной кооперации в мирном использовании атомной энергии.

Ключевым фактором в дальнейшем развитии мирного использования атомной энергии стали разработка и вступление в силу в 1970 г. Договора о нераспространении ядерного оружия. Параллельно шло создание региональных международных организаций — институтов консолидации национальных усилий и дополнительных гарантий мирного и эффективного развития атомной науки и техники. В их числе следует назвать Агентство по ядерной энергии (NEA) и Международное энергетическое агентство (МЭА) — в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), Евр. атом в Евросоюзе и др.

Глобальный характер развития ядерных технологий отразился в создании ряда специализированных международных организаций, в том числе Всемирной ассоциации организаций, эксплуатирующих атомные станции (WANO), Всемирной ядерной ассоциации, объединяющей в первую очередь предприятия и организации ядерной индустрии (WNA), Всемирного ядерного университета (WNU) и др. Логичным продолжением этого списка известных международных организаций видится и появление Киотского протокола, являющегося отражением глобального характера промышленного развития, но уже для всей энергетической деятельности человечества.

Интернационализация развития ядерных технологий и межнациональные подходы к ядерному топливному циклу

Создание и развитие глобальных (многонациональных) организаций в области ядерной энергетики шло параллельно с осознанием ключевой роли технологии ядерного топливного цикла с точки зрения проблемы нераспространения. В 1970–1980 гг. интенсивно возникают и обсуждаются идеи, концепции и предложения

по международной интеграции именно в области ЯТЦ (например, семинар в Зальцбурге, 1977 г.¹⁸):

- по созданию региональных центров ЯТЦ;
- по международным хранилищам ОЯТ и плутония.

Значительным этапом в процессе обсуждения различных концепций ЯТЦ явилась Международная оценка ядерного топливного цикла, проведенная в 1978–1980 гг. при активном участии экспертов 18 ведущих стран в области развития ядерной энергетики. Однако в силу различных причин (как политического, так и экономического характера), в том числе в силу слишком важной экономической и политической роли, которую играют ядерные технологии в экономике многих стран, эти дискуссии, обсуждения и предложения до конца XX в. оставались практически только на бумаге¹⁹.

Современное состояние разработки концепции многонационального ЯТЦ

Начало XXI в. совпало с рядом важнейших инициатив по реализации международной кооперации в области развития ядерных технологий как основы стабильного энергетического развития человечества: инициатива президента Российской Федерации Владимира Путина на Саммите тысячелетия ООН в 2000 г., инициатива США, приведшая к организации Международного форума GIF IV по разработке инновационных АЭС нового IV поколения и их ядерного топливного цикла. Наступало *предчувствие* нового этапа — этапа *зрелого* развития ядерной энергетики, развития с учетом ошибок и уроков начального периода, в том числе уроков крупнейших аварий на американской АЭС *Три-Майл-Айленд*, на Чернобыльской АЭС и др. Это потребовало глубокого анализа накопленного не только положительного, но и в первую очередь — негативного опыта.

Для специалистов-экспертов было ясно, что:

- *во-первых*, будущее стабильное энергетическое развитие и решение проблем энергетической безопасности в глобальном масштабе с учетом интересов развивающихся государств (прежде всего Китая, Индии, Бразилии, Аргентины и др.) невозможно без учета и использования ядерной энергетики. Весьма важно, что при этом учитывались не только энергетические проблемы, а также необходимость решения задач здравоохранения, обеспечения водой и продовольствием, развитие науки, техники и промышленности;
- *во-вторых*, складывалось понимание, что такие ключевые вопросы будущего развития ядерной энергетики, как безопасность АЭС и установок ЯТЦ, экологические проблемы, в том числе связанные с захоронением радиоактивных отходов и использованием ОЯТ, имеют, в принципе, реальную техническую основу для их решения. И это является в первую очередь проблемой привлечения финансов, материальных и человеческих (интеллектуальных) ресурсов.

Единственной ключевой проблемой дальнейшего развития ядерной энергетики, решение которой неясно даже в принципе, является вопрос нераспространения. Это сложнейшая технико-политическая проблема имеет три составляющих, каждая из которых требует своего решения:

- контроль и учет делящихся материалов (контрольная функция МАГАТЭ),
- технические и инженерные барьеры на пути распространения;
- институциональные меры (международные соглашения, конвенции и т. п. решения).



Постепенно пришло осознание, что практически любые шаги в развитии технологии ЯТЦ можно рассматривать как шаги в направлении потенциальной возможности развития немирного использования ядерных технологий. В этой связи на первый план выдвинулась проблема обеспечения энергетического развития без распространения технологии ядерного топливного цикла (прежде всего — без обогащения, производства высокообогащенного урана, переработки ОЯТ и использования плутония в выделенном виде). В 2003 г. по инициативе МАГАТЭ группа экспертов из ведущих стран в области ядерной энергетики подготовила специальный анализ и опубликовала аналитический доклад «Многосторонние подходы к ЯТЦ» INFCIRC/640, 2004 г. был также опубликован доклад Всемирной ядерной ассоциации «Обеспечение гарантий поставок в международном ядерном топливном цикле» и выдвинуты инициативы ряда стран в этой области (США, Россия, Япония, Германия и др.). Среди многих, эти три инициативы наиболее полно и всесторонне отражают основные проблемы развития полномасштабной ЯЭ будущего:

- ❑ создание международных центров ЯТЦ по обогащению и переработке ОЯТ (Россия);
- ❑ создание международных банков ядерного топлива для гарантированного доступа новых государств к продуктам и услугам ЯТЦ (Россия, Германия, Всемирная ядерная ассоциация и др.)
- ❑ Глобальное ядерное партнерство в области ядерной энергетики (GNEP, Global Nuclear Energy Partnerships), выдвинутое США и поддержанное как международный проект более чем 20 странами.

В этой связи возникает естественный вопрос: где (и в чем) находится гарантия, что эти инициативы не постигнет участь так и остаться на бумаге, как это уже имело место на предыдущем этапе развития ядерной энергетики? Как разрушить пассивное или даже негативное отношение ряда стран к этим последним инициативам, усматривающих в них признаки дискриминации, несмотря на заявления и утверждения авторов инициатив об их стремлении оказать помощь и поддержку развивающимся странам в мирном использовании атомной энергии? Как избежать и не повторить судьбу прошлых инициатив?

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ПОЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ЯЭ

Кратко резюмируем результаты анализа особенностей ядерных технологий, являющихся одними из сложнейших и уникальных технологий, призванных решить проблемы стабильности развития в будущем. Сегодня можно утверждать, что задача создания и развития современного ядерного оружия оказалась проще задачи создания современных ядерных энергетических установок и их ЯТЦ. Как уже обсуждалось выше, развитие будущей полномасштабной ЯЭ невозможно без решения задачи создания коммерческих АЭС с реакторами-размножителями, работающих в замкнутом ЯТЦ.

Подтверждением этого является и тот факт, что среди шести отобранных типов ядерных энергетических установок будущего (в рамках международного проекта GIF IV) — три типа реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением: с легким жидкометаллическим теплоносителем (натрием), с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (свинец или сплав свинец-висмут) и один — с газовым теплоносителем (гелий).

Как уже упоминалось, разработки реакторов-размножителей (как в уран-плутониевом топливном цикле с быстрыми реакторами, так и в ториевом цикле с реакторами на тепловых нейтронах) ведутся уже более 60 лет. В 1968 г. в США

(ORNL) был пущен и проработал 7 лет ториевый реактор на расплавленных слоях MSBR с коэффициентом воспроизводства больше 1 ($K_B = 1,06$)²⁰. Экспериментальные исследования на первом в мире полупромышленном реакторе на быстрых нейтронах *БН-350* (Казахстан, СССР) показали достижения $K_B = 1,3$ в плутониевом цикле, а на базе французского реактора на быстрых нейтронах был продемонстрирован в промышленном масштабе замкнутый ЯТЦ с многократной переработкой топлива и коэффициентом воспроизводства $K_B = 1,20-1,30$ ²¹. С 1980 г. надежно работает Белоярская АЭС с реактором на быстрых нейтронах *БН-600* и строится модернизированный *БН-800*. Но все реакторы типа БН до сих пор работают в режиме уранового конвертера.

С материалами по международному сотрудничеству в атомной энергетике можно более подробно ознакомиться в разделе проекта «Перспективы экспорта атомной отрасли России» на сайте ПИР-Центра по адресу: atom.pircenter.org

До сих пор не существует единой концепции (и ее демонстрации) коммерческого быстрого энергетического реактора в замкнутом ЯТЦ для будущей ядерной энергетики. Разработка инновационных проектов АЭС (быстрые реакторы, а также высокотемпературная газографитовая ЯЭУ для ядерно-водородной энергетики, водо-водяного реактора с сверхкритическими параметрами), включенных в международные проекты ИНПРО и GIF IV, оказалась слишком сложной и дорогостоящей для одной страны (даже для таких стран, как США, бывший СССР, Франция, Япония и др.). Более того, проблемы здесь не только и не столько в финансовых затратах. Как показал богатый отрицательный опыт — в т. ч. последней крупной аварии на АЭС Фукусима в Японии, — ядерная энергетика не имеет права на повторение ошибок, приводивших к крупным авариям и тем более катастрофам. Их повторение, как считают специалисты, было бы практически концом ядерной энергетики.

Таким образом, разработка и реализация проектов быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ для будущего оказалась задачей не одного поколения. Более того, это оказалось задачей, решение которой возможно только при наличии соответствующей научно-технической школы, существующей в очень ограниченном числе ведущих стран в этих областях (например, во Франции, России, Японии, Индии). И в этой необходимости воссоздания научно-технической школы быстрых реакторов состоит одна из главных причин выдвинутой США инициативы по организации международного форума GIF, где во главу угла поставлена разработка быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ.

Решение ресурсной задачи ЯЭ — создание коммерчески выгодного быстрого реактора и его замкнутого ЯТЦ — важнейшая, но только одна из задач, стоящих на пути развития полномасштабной ЯЭ. Например, решение проблемы высоко-радиоактивных отходов также носит как минимум региональный характер в силу своей сложности, капиталоемкости и специфических природных условий ряда государств (например, в плотно населенных регионах, какими являются Западная Европа, Юго-Восточная Азия и др.).

К глобальным проблемам ЯЭ тесно примыкает необходимость разработки технологии и создания промышленного образца для трансмутации долгоживущих продуктов деления и утилизации актиноидов в быстрых реакторах. Решение аналогичной задачи требуется для реализации ториевого топливного цикла.

Эффективное решение этих глобальных проблем невозможно без международной кооперации, без мобилизации финансовых, материальных и, главное, интеллектуальных ресурсов стран-доноров, то есть стран, обладающих необходимым научным и техническим потенциалом, соответствующими научными школами и развитой промышленной инфраструктурой.



Более того, для достижения консенсуса в решении проблемы нераспространения и безопасного развития экологически приемлемого ЯТЦ необходимо показать *профит* от реализации этих инициатив для развивающихся и малых стран (например, стран Восточной и Центральной Европы) в рамках *всей* проблемы долгосрочного развития ядерной энергетики, а не только ее ближайших отдельных этапов. Таким образом, уже в настоящее время целесообразно начать обсуждение, изучение и демонстрацию необходимости и неизбежности — в случае долгосрочного и полномасштабного развития ядерной энергетики — реализации всего комплекса задач на базе международной кооперации на основе реализации Международных центров ядерного топливного цикла и Глобального партнерства в области атомной энергии. Речь идет о создании и развитии:

- международных центров ЯТЦ по обогащению (как это уже предложила Российская Федерация) и снабжению развивающихся и малых стран низкообогащенным урановым топливом;
- международных центров ЯТЦ по приему возвращаемого облученного ядерного топлива (ОЯТ) (эта проблема также находится в стадии обсуждения);
- международных центров ЯТЦ по переработке ОЯТ, выделению плутония и обращению с ним;
- международных центров ЯТЦ по производству плутониевого топлива для быстрых реакторов и по утилизации этого топлива в реакторах на быстрых нейтронах;
- международных центров ЯТЦ по наработке в быстрых реакторах (в ториевых экранах) U-233 и производство на его основе низкообогащенного уранового (*искусственного*) топлива для тепловых реакторов: U-233 +U-238 (для долговременного обеспечения топливом развивающихся и малых стран);
- международных центров ЯТЦ по обращению с ядерными отходами (по захоронению отходов).

Очевидно, что это абстрактное разделение на 6 позиций предполагает разумные комбинации на их основе (например, пункты 2 и 3 — совмещение приема ОЯТ с его переработкой и производством плутония). Решение совокупности перечисленных выше задач в комплексе посылно только в рамках международной кооперации, поскольку требует огромных финансовых, материальных и человеческих ресурсов. Ни одна страна самостоятельно не смогла и не сможет решить этот комплекс задач.

Указанный комплекс задач — действительно глобальная цель века. Альтернативой может явиться *расползание* чувствительных ядерных технологий: обогащения, переработки ОЯТ и др. с потенциальной возможностью появлением десятка новых ядерных стран к середине столетия. Малые и развивающиеся государства должны увидеть необходимость и свой *профит* от реализации упомянутых инициатив и понять, какие изменения необходимы, то есть что именно потребуются откорректировать в национальных программах в результате участия в реализации указанных инициатив и что это им даст — плюсы и минусы.

Очевидно, реализация предлагаемого проекта должна сопровождаться следующей аналитической работой:

- по анализу требований к необходимой инфраструктуре будущих стран-участников осуществления конкретных инициатив (образование, система контроля в передаче знаний, регулирующие органы, инженерная и технологическая база);

- по реализации программы управления и сохранения ядерных знаний под эгидой МАГАТЭ как для передачи знаний и опыта следующим поколениям специалистов (является самостоятельной проблемой, где ведущую роль уже играет МАГАТЭ), так и в новые развивающиеся страны.

Успешная реализация обсуждаемых инициатив является ключевым фактором для развития ядерной энергетики в будущем и для ее нового этапа — ренессанса ядерной энергетики. 

Примечания

¹ Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle. Expert Group Report to the DG IAEA. Vienna, 2005.

² Тимербаев Р.М. Международный контроль над атомной энергией. М., ПИР-Центр. 2003.

³ Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle. Regional Nuclear Fuel Cycle Centers. IAEA, 1977. Report of the IAEA Study Project.

⁴ Сводный том материалов по МОЯТЦ, МАГАТЭ. Вена. STI/PUB/534/1980.

Rykovanova E. International Nuclear Fuel Service Centers: Russian proposal. *Yaderny Kontrol*. Vol. 10, 2005. № 3–4. Summer/Fall. Pp. 33–38.

⁵ Nuclear Technology Review — 2006. IAEA. Key Issues. Vienna. 2006. Pp. 12–20.

⁶ Муругов В.М., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Международные инициативы МАГАТЭ: от инновационных ядерных технологий к повышению роли ядерного образования. *Бюллетень по атомной энергии*. 2007. № 6. С. 37–41.

Shea T.E., Kagramanian V.S. et al. Proliferation Resistance in Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. 10th International Conference on Nuclear Engineering, 2002. 14–18 April.

⁷ IAEA. International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (INFCE). 1980. February.

Feiveson H. The Search for Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems (TOPs). Report by the TOPs Task Force of the United States Department of Energy. Nuclear Energy Research Advisory Committee. 2001, January.

⁸ International Topical Workshop on Proliferation Resistance in Innovative Reactors and Fuel Cycles, International Atomic Energy and Landau Network. Centro Volta, Como, Italy. 2001.

⁹ Хлебников Владимир. Роль МАГАТЭ в решении актуальных проблем нераспространения ядерного оружия. *Ядерный Контроль*. 2005. № 1 (71). С. 81–96.

¹⁰ Коровин Ю.А., Муругов В.М. Реакторы-бридеры в ядерной энергетике будущего. Обнинск, ИАТЭ, 1990.

¹¹ Пшакин Г.М., Гераскин Н.И., Апсэ В.А. Ядерное нераспространение. М., МИФИ, 2004.

¹² The Future of Nuclear Power. An interdisciplinary MIT Study, 2003.

¹³ IAEA, International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, IAEA, Working Group Reports, 1980.

¹⁴ IAEA, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems (Vols. 1–7), IAEA-TECDOC-CD 1575, IAEA, Vienna (in preparation).

¹⁵ Nuclear Technology Review. NTR — 2006. IAEA. Key Issues. Vienna. 2006. pp. 12–20.

¹⁶ Ibid.

¹⁷ Ibid.; Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles: Report of Phase 1B of INPRO. IAEA-TECDOC-1434. IAEA. Vienna. 2004; Guidance for the



Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles: Report of Phase 1A of INPRO. IAEA-TECDOC-1362. IAEA. Vienna. 2003.

¹⁸ Хлебников Владимир. Цит. соч.

¹⁹ Муругов В. М. Подготовка кадров и будущее атомной отрасли. *Бюллетень по атомной энергии*. 2006. № 10. С. 46–48.

²⁰ Nuclear Technology Review — 2006. Pp. 12–20. Guindon S. History and Status of the Generation — 4 International Forum. IAEA-CN-108-72. 2003.

²¹ Коровин Ю. А., Муругов В. М. Цит. Соч. Fast Reactor Database: 2006 Update. IAEA. Vienna. 2006. IAEA-TECDOC-1531.