

## ИННОВАЦИОННАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯ – ОСНОВА КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**В.И. Рачков, С.Г. Калякин,**

*ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



В мировой энергетике все более важную перспективу получает безуглеродная энергетика, наиболее развитой частью которой является ядерная энергетика. Технологическая база ядерной энергетики России на основе реакторов ВВЭР достаточна для прогнозируемых ЭС-2030 масштабов строительства АЭС и экспортных поставок. Однако потенциал ее в решении долгосрочных стратегических проблем страны ограничен из-за несоответствия уровня безопасности требованиям к крупномасштабной ядерной энергетике, ограниченных ресурсов природного урана, накопления ОЯТ и проблем его транспортировки и хранения. Для достижения существенно улучшенного топливного баланса ТЭК России в целом, сбережения ценных ресурсов горючих ископаемых, радикального решения проблемы выбросов CO<sub>2</sub> *возможно до конца этого века развернуть крупномасштабную ядерную энергетику*, что означает необходимость скорейшего перехода к замкнутому ЯТЦ и поддержания разумно высоких темпов развития ядерной энергетике на протяжении большей части столетия.

С точки зрения эффективности перевода ядерной энергетике на замкнутый ЯТЦ целесообразно все имеющиеся топливные ресурсы (плутоний и обогащенный уран) использовать, в первую очередь, для ускоренного ввода самодостаточных быстрых реакторов. Недопустимо неэффективное сжигание плутония в виде МОКС-топлива тепловых реакторов. Экономика перехода к замкнутому ЯТЦ диктует необходимость введения в ближайшее время отчислений в фонд обращения с ОЯТ и РАО по примеру других стран с развитой ядерной энергетикой; при этом решение проблемы переработки ранее накопленного ОЯТ может стать основанием для постановки вопроса о государственных субсидиях.

Основные положения, касающиеся реализации стратегии развития ядерной энергетике России до 2100 г., иллюстрируются результатами системного исследования двух сценариев с переходом к замкнутому ЯТЦ при развертывании быстрых реакторов естественной безопасности только на плутонии либо на плутонии и обогащенном уране.

**Ключевые слова:** стратегия трансформирования ядерно-энергетического комплекса, крупномасштабная ядерная энергетике, замкнутый ядерный топливный цикл, быстрый реактор.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Последнее десятилетие XX в. характеризовалось общей стагнацией мировой ядерной энергетики, сворачиванием в ряде ведущих западных стран ядерно-энергетических программ, значительным снижением финансирования программ НИОКР по новым разработкам, утратой кадрового, строительного и промышленного потенциала. Это в значительной мере было связано с реакцией на две крупные аварии: в 1979 г. на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) и в 1986 г. на Чернобыльской АЭС (СССР). Кроме того, достаточность и доступность запасов органического топлива, разработка шельфовых месторождений явились прагматической основой тактических решений по отказу от ранее намеченных планов строительства АЭС в США и ряде европейских стран.

«Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века» [1] (далее Стратегия-2000), опубликованная в 2000 г., стала первым документом государственного уровня, свидетельствующим о начале пересмотра отношения к использованию АЭС, в последующие годы поддержанным ведущими европейскими странами. Осмысление предшествующего периода развития ядерной энергетики, анализ причин сопровождавших его аварий, накапливающихся проблем с облученным ядерным топливом (ОЯТ) и обращением с высокоактивными радиоактивными отходами (ВАО) – все это привело к пониманию приоритетности технологического обновления, которое необходимо для того, чтобы ставить вопрос о крупномасштабной ядерной энергетике.

С 2005 – 2007 гг. в мире начались процессы, характеризующиеся как ядерный ренессанс. Помимо Индии, Китая и Республики Корея значительный интерес к использованию атомной энергии начали проявлять другие развивающиеся страны Азии, Африки и Южной Америки. Некоторые европейские страны, ранее отказавшиеся от каких-либо планов сооружения новых атомных станций, на государственном уровне начали обсуждение возможностей по их возобновлению.

В марте 2011 г. на АЭС «Фукусима» в Японии произошла одна из крупнейших аварий в истории мировой ядерной энергетики. Были разрушены три энергоблока, хранилища ОЯТ, в окружающую среду выброшена радиоактивность в объеме, потребовавшем крупномасштабной эвакуации населения, ограничения доступа людей и хозяйственной деятельности на значительной территории. Эта авария, реанимировавшая многочисленные «чернобыльские фобии», привела к пересмотру рядом стран своих ядерно-энергетических программ либо в сторону полного отказа в будущем от ядерной энергетики (Германия, Италия, Швейцария, Бельгия), либо в сторону сокращения ранее планировавшихся масштабов развития или откладывания их по срокам реализации.

Возникла необходимость вновь вернуться к рассмотрению возможной роли ядерной энергетики в энергетическом балансе как в мире, так и в России. Причем учтены должны быть не только уроки тяжелых аварий, что уже было сделано в Стратегии-2000 и сохраняет свое значение после аварии на АЭС «Фукусима», но и кардинальное изменение ситуации с имеющимися ресурсами органического топлива, интенсивным освоением сланцевых нефтяных и газовых месторождений, а также заметный прогресс в развитии технологий возобновляемых источников энергии, ветровой и солнечной, в первую очередь, и в освоении ресурсов биотоплива.

## **ВОЗМОЖНЫЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ЯЭ**

Анализ подходов к перспективам развития ядерной энергетики в различных странах показывает наличие двух тенденций.

1. Ориентация на развитие ядерной энергетики на базе существующих и усовершенствованных типов тепловых реакторов с открытым ЯТЦ, в котором сжигается лишь  $^{235}\text{U}$ . Сюда же можно отнести варианты с использованием ограниченного дополнительного топливного ресурса в виде смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) топлива, получаемого путем однократной переработки ОЯТ этих реакторов, выделения накопленного в нем плутония и смешения его с отвалным (обедненным) ураном. Несмотря на уже длительную историю доля МОКС-топлива в общем производстве ядерного топлива в мире никогда не превышала 5 %. В настоящее время наблюдается отказ от его использования в ряде стран, а также прекращение производства на некоторых из созданных заводах.

2. Ориентация на освоение замкнутого ЯТЦ с вводом реакторов, обеспечивающих простое либо расширенное воспроизводство ядерного топлива ( $K_B \geq 1$ ). Это могут быть традиционно рассматриваемые быстрые реакторы либо обсуждавшиеся еще в 1970-е гг. и вновь предлагаемые теперь в США легководные реакторы (ЛВР) с жестким спектром нейтронов. Способность воспроизводства позволяет вовлечь в использование  $^{238}\text{U}$  (99,3 % в составе природного) путем наработки делящегося плутония и природный  $^{232}\text{Th}$  путем превращения в делящийся  $^{233}\text{U}$ .

Первый подход олицетворяет путь экстенсивного развития, по которому фактически пока идет вся мировая ядерная энергетика. При этом в оборот вовлекаются все большие количества природного урана, используемого менее чем на 1 %, и непрерывно растут объемы хранящегося ОЯТ. Тем не менее, в современных условиях энергетического рынка (который, как и всякий рынок, работает с учетом лишь ближнесрочной перспективы) данный подход признается оправданным экономически. Концепция дальнейшего развития по этому пути получила распространение в США [2, 3], обладающих крупнейшей в мире ядерной энергетикой, и усилиями ведущих корпораций-разработчиков АЭС тиражируется в развивающихся странах, встающих на путь освоения ядерной энергетики. При этом для последних, особенно не обладающих значительным парком реакторов, предполагается предоставление возможности лизинга ядерного топлива с возвратом ОЯТ в страны-поставщики, где сосредоточиваются все операции внешнего ЯТЦ. Как известно, именно РФ стала инициатором такого подхода к обращению ЯТ, специально предусмотрев возможность приема зарубежного ОЯТ для переработки на своих предприятиях в законодательстве начала 2000-х гг. С точки зрения США, известные мировые ресурсы урана позволяют им придерживаться данного курса достаточно долго [3].

Однако ресурсы урана распределены в мире неравномерно, и перспективы их доступности для разных стран могут сильно различаться. Приемлемость данного курса развития для США и других ведущих держав, имеющих значительные мощности АЭС, несомненно, опирается на их уверенность в том, что они могут как сейчас, так и в достаточно отдаленной перспективе контролировать доступ к этим ресурсам. С другой стороны, накапливаемое ОЯТ в концепции открытого ЯТЦ является бесполезным отходом, и проблема его окончательного захоронения выходит за рамки чисто экономической. Так, в США в 2003 г. авторы системного исследования [2], посвященного стратегии развития национальной ядерной энергетике, полагали, что преимущества прямого захоронения ОЯТ могут не уступать достигаемым при внедрении замкнутого ЯТЦ. Однако та же группа исследователей в 2011 г. [3] рекомендовала реализацию длительного контролируемого хранения накопленного ОЯТ, имея в виду сохранение возможности перехода к замкнутому ЯТЦ в будущем. Эта рекомендация нашла отражение в отчете

специальной комиссии Министерства энергетики США [4], которая была вынуждена признать, что действовавшая в течение 25-ти лет программа окончательного захоронения ОЯТ, несмотря на наличие уже накопленного фонда обращения с ОЯТ, не только не была осуществлена, но должна быть пересмотрена.

Более полная реализация потенциальных возможностей ядерной энергетики достижима лишь во втором подходе, обеспечивающем увеличение в 200 раз выхода энергии с каждой тонны урана, что означает расширение ресурсной базы на много порядков, поскольку станет экономически оправданным использование бедных месторождений. Однако стратегии развития в рамках этого подхода концептуально различаются в разных странах в зависимости от предполагаемой роли быстрых реакторов в структуре ядерной энергетики. В США, делающих ставку в обозримом будущем на ЛВР в открытом ЯТЦ, предусматривается принципиальная возможность перехода к переработке их ОЯТ (накапливаемого во временном хранилище в течение 100 лет) с целью уменьшения количества высокоактивных отходов (ВАО), подлежащих окончательному захоронению, путем «дожигания» выделяемого плутония и минорных актинидов в быстрых реакторах. Последние в данном случае считаются сами по себе неконкурентоспособными и выполняют роль «чистильщиков» при доминирующих легководных реакторах [3]. Для таких быстрых реакторов принимается коэффициент воспроизводства  $KV < 1$ , и их топливный цикл остается незамкнутым, так как требует постоянной подпитки. Рассматривается также возможность использования быстрых реакторов с  $KV \sim 1$  и с  $KV > 1$ , но их миссия остается принципиально той же, а увеличенная наработка плутония служит лишь средством ускорения выхода мощностей быстрых реакторов в структуре ядерной энергетики на нужный уровень.

Франция и Япония, не имеющие собственных месторождений урана, традиционно строили свои стратегии развития, предусматривающие переход от открытого ЯТЦ ЛВР к замкнутому ЯТЦ с использованием быстрых реакторов с натриевым теплоносителем ( $KV > 1$ ), способных обеспечивать топливом ЛВР. Аналогичная стратегия рассматривалась и по-прежнему предлагается некоторыми авторами в России [5]. Первые шаги к реализации замкнутого ЯТЦ в рамках данной стратегии были пройдены и привели к созданию предприятий по переработке ОЯТ ЛВР во Франции, Великобритании, Японии и России. Но дальнейшее продвижение приостановилось из-за прекращения эксплуатации уже построенных быстрых натриевых реакторов (за исключением БН-600 в России), которые сами по себе были признаны экономически непривлекательными и опасными ввиду риска распространения оружейных технологий (позиция США).

В пользу возврата к этой стратегии выдвигается тезис о приемлемости существования в структуре ядерной энергетики более дорогих быстрых реакторов с  $KV > 1$  при совместном функционировании с ЛВР. Между тем желание оправдать затраты на упомянутые предприятия по переработке ОЯТ породило концепцию (уже реализуемую на практике) применения выделенного плутония для изготовления смешанного оксидного (МОКС) уран-плутониевого топлива ЛВР. Такой подход, очевидно, противоречит первоначальному стратегическому замыслу ввода быстрых реакторов, поскольку с точки зрения топливного баланса использование плутония (как и обогащенного урана) в них заведомо более эффективно, чем в тепловых реакторах.

Позиция России, сформулированная в Стратегии-2000 и развитая в [7 – 10], также ориентирована на освоение замкнутого ЯТЦ. Она основана на концепции создания крупномасштабной ядерной энергетики, которая может быть развита на быстрых реакторах умеренной энергонапряженности без избыточного произ-

водства плутония. При этом важным является полное внутреннее воспроизводство плутония в активной зоне (КВА » 1) с плотным теплопроводным топливом (нитридное, металлическое, карбидное) равновесного состава [6]. Можно отметить, что отказ от высокого коэффициента воспроизводства быстрых реакторов в пользу новых возможностей реакторов с КВ ~ 1 находит признание и в исследованиях США [3].

### **БЕЗОПАСНАЯ СТРАТЕГИЯ**

Нельзя не учитывать, что за 60 лет развития мировой ядерной энергетики произошли шесть крупных аварий. Вероятностные подходы, эффективные при поиске слабых проектных решений и выявлении недостатков регламента эксплуатации, не могут рассматриваться как основной критерий безопасности, а тем более, как показатель возможности реализации конкретных аварий.

Применительно к реакторам АЭС можно выделить основные требования, относящиеся к достижению приемлемого уровня безопасности:

- минимальный запас реактивности реактора, не позволяющий реализовать разгон на мгновенных нейтронах, и сохранение в сочетании с эффектами саморегулирования стабильных физических характеристик за время кампании («равновесное» топливо);
- отказ от использования теплоносителя первого контура в виде перегретой воды, пара или газа под высоким давлением, потеря которых (и соответственно охлаждение топлива) приводит к недопустимым выбросам радионуклидов;
- переход на высококипящий жидкометаллический теплоноситель и интегральную шахтную конструкцию реактора с устранением возможности потери охлаждения.

К этому следует добавить принципиальные решения по объектам и технологиям ЯТЦ:

- отказ от прямого захоронения облученного топлива, минимизация количества высокоактивных отходов в замкнутом ЯТЦ с возвратом опасных долгоживущих актинидов и части продуктов деления в быстрые реакторы в составе регенерированного топлива;
- замкнутый ЯТЦ с минимизацией времени выдержки облученного топлива, количества хранимых ядерных материалов и опасности аварий;
- радикальное снижение риска распространения ядерных материалов с отказом от наработки плутония в бланкете быстрых реакторов и от выделения чистого плутония из облученного топлива.

Стратегия-2000 поставила задачу одновременного решения проблемы ОЯТ и технологического усиления режима нераспространения. Возможность отказа от короткого времени удвоения и исключение уранового бланкета, переход к топливу равновесного состава в быстрых реакторах с КВ~1 и постепенный отказ от обогащения урана создают необходимые предпосылки для технологической поддержки режима нераспространения. Технология переработки топлива должна исключать возможность ее использования для выделения Pu, <sup>235</sup>U или <sup>233</sup>U. В этом случае она сводится, в основном, к очистке топлива от продуктов деления с остатком 1–10 %.

Сценарии внедрения быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ должны опираться на реально сложившуюся структуру ядерной энергетики. Развитие ядерной энергетики на базе быстрых реакторов с постепенным вытеснением тепловых потребует взаимной увязки их топливного баланса, переработ-

ки накопленного облученного топлива (более 19 тыс. т на начало 2011 г. в России) и рационального использования топливных ресурсов. В этой связи необходимо четко определить различия между восприятием двухкомпонентной ядерной энергетики, включающей в себя как тепловые, так и быстрые реакторы, как переходного этапа к ядерной энергетике с доминированием быстрых реакторов и известной концепцией двухкомпонентной ядерной энергетики с постоянно сосуществующими тепловыми реакторами и подпитываемыми их топливом быстрыми реакторами-размножителями.

Представление о двухкомпонентной ядерной энергетике сложилось еще до ее фактического появления, во второй половине прошлого века, под основным влиянием следующих факторов:

- первоначальная идея (безусловно, правильная) о необходимости развития ядерной энергетики на базе быстрых реакторов;
- отсутствие высокоэффективной технологии обогащения урана и обусловленное этим требование высокого коэффициента воспроизводства плутония для наращивания мощностей быстрых реакторов;
- обусловленное военными потребностями развитие различных семейств тепловых реакторов на обогащенном уране, в дальнейшем модернизированных для гражданской энергетики, сопровождавшееся авариями, в том числе достаточно серьезными;
- экономическая неконкурентоспособность реально построенных в разных странах быстрых реакторов-размножителей с их специфическими особенностями, продиктованными требованием высокого КВ (высокая плотность энерговыделения, использование натриевого теплоносителя, производство плутония оружейного качества в бланкете).

С освоением технологии обогащения урана наследие промышленности ядерных вооружений послужило фундаментом современной ядерной энергетики на тепловых реакторах. А для более дорогих быстрых реакторов, изначально представлявшихся самодостаточными, была предложена роль подпитчиков топливом тепловых реакторов в дальней перспективе истощения ресурсов дешевого природного урана.

В такой двухкомпонентной ядерной энергетике плутоний, загружаемый в тепловые реакторы с  $KV < 1$ , использовался бы заведомо неэффективно, потребовалась бы массовая циркуляция ОЯТ и плутонийсодержащего топлива между быстрыми и тепловыми реакторами и централизованными заводами по переработке ОЯТ и изготовлению топлива. К сожалению, представление о двухкомпонентной структуре ядерной энергетики, включающей в себя быстрые реакторы-размножители с высоким коэффициентом воспроизводства, стало стереотипом в умах нескольких поколений инженеров.

Аргументы в пользу сохранения тепловых реакторов в составе двухкомпонентной ядерной энергетики делятся на две группы:

- общие соображения о необходимости иметь в запасе альтернативные технические решения, обеспечивающие возможность маневра в процессе развития;
- необходимость диверсификации ядерных технологий применительно к различным энергопотребностям, в том числе для задач теплоснабжения (особенно регионального), производства синтетического топлива и водорода, генерации высокопотенциального тепла для нужд химии и металлургии и т.п.

По первой группе достаточно указать, что предлагаемый путь преимущественного развития ядерной энергетики на базе быстрых реакторов естественной безопасности займет десятки лет, на протяжении которых ядерная энергетика

будет де-факто оставаться двухкомпонентной. В этом случае времени хватит для любых маневров, если они понадобятся.

По второй группе следует отметить два момента. Во-первых, диверсификация технологических применений не связана непосредственно с физикой активной зоны реактора (за исключением некоторых экзотических проектов), так что необходимость использования потенциально опасного теплового реактора с водой под давлением, например, для когенерации электричества и тепла, вместо быстрого реактора естественной безопасности неочевидна. Во-вторых, диверсификация предполагает как технологическое, так и географическое «расползание» ядерных установок в различные области промышленности и регионы, что фактически означает диверсификацию рисков.

Что касается экономической конкурентоспособности, то по мере перехода к АЭС с более высоким уровнем безопасности появится возможность реализации предпосылок к снижению их стоимости. В целом можно заключить, что концепция структуры ядерной энергетики на базе замкнутого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами удовлетворяет основным требованиям формирования крупномасштабной энергосистемы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В мировой энергетике все более важную перспективу получает безуглеродная энергетика, наиболее развитой частью которой является ядерная энергетика, но она начинает подвергаться конкурентному давлению со стороны возобновляемых источников энергии с точки зрения как безопасности, так и экономической привлекательности, особенно в случае сохранения тенденции к росту стоимости современных АЭС.

В стратегическом плане позиция России, ориентированная на освоение замкнутого ЯТЦ, сохраняется. Принципиальным положением является использование быстрых реакторов с КВ~1, обеспечивающих работу на равновесном топливе и сжигание долгоживущих минорных актинидов. Отказ от высоких КВ быстрых реакторов в пользу новых возможностей реакторов с КВ~1 находит признание и в недавних системных исследованиях США.

Ключевыми факторами для масштабного развития ядерной энергетики в России и мире остаются прежде всего безопасность, сырьевые ресурсы и экономическая конкурентоспособность с другими видами энергогенерации. Технологическая база ядерной энергетики России на основе реакторов ВВЭР достаточна для прогнозируемых ЭС-2030 масштабов строительства АЭС и экспортных поставок. Однако потенциал ее в решении долгосрочных стратегических проблем страны ограничен из-за несоответствия уровня безопасности требованиям к крупномасштабной ядерной энергетике, ограниченных ресурсов природного урана, накопления ОЯТ и проблем его транспортировки и хранения.

Для достижения существенно улучшенного топливного баланса ТЭК России в целом, сбережения ценных ресурсов горючих ископаемых, радикального решения проблемы выбросов CO<sub>2</sub> возможно до конца этого века развернуть крупномасштабную ядерную энергетiku, что означает необходимость скорейшего перехода к замкнутому ЯТЦ и поддержания разумно высоких темпов развития ядерной энергетики на протяжении большей части столетия.

С точки зрения эффективности перевода ядерной энергетики на замкнутый ЯТЦ целесообразно все имеющиеся топливные ресурсы (как плутоний, так и обогащенный уран) использовать, в первую очередь, для ускоренного ввода самодостаточных быстрых реакторов. Недопустимо неэффективное сжигание

плутония в виде МОКС-топлива тепловых реакторов.

Экономика перехода к замкнутому ЯТЦ диктует необходимость введения в ближайшее время отчислений в фонд обращения с ОЯТ и РАО (по примеру других стран с развитой ядерной энергетикой); при этом решение проблемы переработки ранее накопленного ОЯТ может стать основанием для постановки вопроса о государственных субсидиях.

Основные положения, касающиеся реализации стратегии развития ядерной энергетики России до 2100 г., иллюстрируются результатами системного исследования двух сценариев с переходом к замкнутому ЯТЦ при развертывании быстрых реакторов естественной безопасности только на плутонии либо на плутонии и обогащенном уране. Целью исследования была демонстрация возможности максимального вклада ядерной энергетики в удовлетворение спроса на электроэнергию вплоть до покрытия 100 %-ного прироста потребления. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- характеристики быстрых реакторов естественной безопасности с невысоким коэффициентом воспроизводства ( $\sim 1,05$ ) при использовании в качестве дополнительного топливного ресурса обогащенного урана приемлемы для ускоренного создания самодостаточной системы быстрых реакторов;

- ускоренный ввод быстрых реакторов с использованием урана позволяет не только обеспечить максимальный вклад ядерной энергетики в общий энергобаланс страны, но и окончательно решить проблему топливных ресурсов с переходом на самообеспечение по топливу и прекращением потребления природного урана;

- переход к ядерной энергетике с доминированием быстрых реакторов на равновесном топливе дает возможность значительного сокращения как объемов переработки ( $\sim 1$  т ОЯТ равновесного топлива на 1 т регенерированного вместо  $\sim 15$  т ОЯТ ВВЭР) и транспортировки облученного топлива тепловых реакторов, так и величины топливных потоков в силу достижимости повышенного выгорания топлива (8–12 % для быстрых реакторов против 4,5–7,5 % для тепловых); при этом также будет обеспечена технологическая поддержка режима нераспространения путем отказа в конечном итоге как от процессов разделения урана и плутония, так и от обогащения урана;

- реализация замкнутого пристанционного ЯТЦ быстрых реакторов при существенном сокращении продолжительности внешнего ЯТЦ и «сжигании» долгоживущих минорных актинидов в составе регенерированного топлива позволяет существенно снизить количество последних в ВАО, открывая путь к их радиационно-эквивалентному захоронению;

- по показателю топливной составляющей электроэнергии АЭС замкнутый ЯТЦ быстрых реакторов в конечном виде (на регенерированном равновесном топливе) даже при ожидаемом существенном удорожании его переделов оказывается экономически более выгодным, чем открытый ЯТЦ ЛВР.

### **Литература**

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. – М.: Минатом России, 2000.

2. The Future of Nuclear Power. – An Interdisciplinary MIT Report. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
3. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. – An Interdisciplinary MIT Report. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
4. Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future. Report to the Secretary of Energy. January 2012. <http://brc.gov>.
5. *Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др.* О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111. – Вып. 4. – С. 183-196.
6. *Адамов Е.О., Большов Л.А., Ганев И.Х. и др.* Белая книга ядерной энергетики. / Под общ. ред. Е.О. Адамова. – М.: НИКИЭТ, 2001.
7. *Рачков В.И.* Атомная энергетика как важнейший фактор устойчивого развития России в XXI веке. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 6. – С. 2-4.
8. *Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М. и др.* Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 201-205.
9. *Адамов Е.О., Джаловян А.В., Лопаткин А.В. и др.* Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – Вып. 6. – С. 319-330.
10. *Рачков В.И., Тюрин А.В., Усанов В.И., Воцинин А.П.* Эффективность ядерной энерготехнологии: системные критерии и направления развития. – М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008. С. 228.

Поступила в редакцию 04.12.2013 г.

#### **Авторы**

Рачков Валерий Иванович, научный руководитель ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН.

E-mail: [vrachkov@ippe.ru](mailto:vrachkov@ippe.ru)

Калякин Сергей Георгиевич, первый заместитель генерального директора по науке, директор Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук.

E-mail: [kalyakin@ippe.ru](mailto:kalyakin@ippe.ru)

УДК 621.039

## **INNOVATIVE NUCLEAR POWER TECHNOLOGY – THE BASIS OF LARGE-SCALE NUCLEAR POWER ENGINEERING**

Rachkov V.I., Kalyakin S.G.,

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

### ABSTRACT

Carbon-free power engineering with its most developed part, nuclear power, is becoming more and more promising in the world power engineering. The Russian WWER-based technological capabilities are sufficient for NPPs construction and export deliveries on the predicted ES-2030 scale. However, their potential for the solution of domestic long-term strategic problems is restricted because of the safety level inconformity to the requirements for large-scale nuclear power engineering, limited natural uranium resources, SNF accumulation, as well as its storage and transportation problems. With the aim of substantially improving the fuel balance in Russia as a whole, conserving valuable resources of fossil fuels, and comprehensively solving the problem of carbon dioxide emissions, *it is possible to launch large-scale nuclear power engineering by the end of the century*. This necessitates prompt transition to the closed NFC along with maintenance of reasonably high development rates of nuclear power engineering over much of the century.

As for the efficiency of nuclear power transfer to the closed NFC, it would be reasonable to primarily use all available fuel resources, such as plutonium and enriched uranium, for accelerated commissioning of self-sufficient fast reactors. Inefficient plutonium combustion as thermal reactor MOX-fuel is unacceptable. The economy of transition to the closed NFC calls for making contributions in the near future to the spent nuclear fuel and radioactive waste management fund by the example of other countries with developed nuclear power engineering. In this context, the solution of the problem related to previously accumulated SNF reprocessing may afford ground for raising an issue of state subsidies.

The basic provisions for the implementation of nuclear power engineering development in Russia up to 2100 are illustrated by the system research results of two scenarios with transition to the closed NFC in launching inherently safe fast reactors fueled only with plutonium or enriched uranium.

**Key words:** strategy for transformation of a nuclear power engineering complex, the large-scale nuclear power engineering, the closed nuclear fuel cycle, fast reactor.

### REFERENCES

1. Strategiya razvitiya atomnoj energetiki Rossii v pervoj polovine XXI veka. Osnovnye polozeniya. [The development strategy of Russia's nuclear industry in the first half of the XXI century. Key provisions.]. Moskow, Minatom Rossii Publ. 2000. (in Russian)
2. The Future of Nuclear Power. An Interdisciplinary MIT Report. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
3. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. An Interdisciplinary MIT Report. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
4. Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future. Report to the Secretary of Energy. January 2012. Available at: <http://brc.gov>.

5. Alekseev P.N., Asmolov V.G., Gagarinskij A.Yu. e.a. O strategii razvitiya yadernoj energetiki Rossii do 2050 goda [Development Strategy of Russian nuclear power by 2050]. *Atomnaya energiya*. 2011, vol. 111, iss. 4, pp. 183–196.
6. Adamov E.O., Bol'shov L.A., Ganev I.H. e.a. Belaya kniga yadernoj energetiki [White book of nuclear power engineering].– M.: NIKIET, 2001.
7. Rachkov V.I. Atomnaya energetika kak vazhnejshij faktor ustojchivogo razvitiya Rossii v XXI veke [Nuclear energy as an important factor for sustainable development of Russia in XXI century]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2006, no. 6, pp. 2–4.
8. Rachkov V.I., Poplavskij V.M., Tsibulya A.M. e.a. Konceptiya perspektivnogo energobloka s bystrym natrievym reaktorom BN-1200 [Concept of prospective of power unit with fast neutron reactor BN-1200]. *Atomnaya energiya*. 2010, vol. 108, iss. 4, pp. 201–205.
9. Adamov E.O., Dzhalogvyan A.V., Lopatkin A.V. e.a. Konceptual'nye polozheniya strategii razvitiya yadernoj energetiki Rossii v perspektive do 2100 g. [Conceptual Development Strategy of Russian nuclear power in the run up to 2100]. *Atomnaya energiya*. 2012, vol. 112, iss. 6, pp. 319–330.
10. Rachkov V.I., Tyurin A.V., Usanov V.I., Voshchinin A.P. *Effektivnost' yadernoj energotekhnologii: sistemnye kriterii i napravleniya razvitiya* [Effectiveness of nuclear power technology: System criteria and development directions]. Moscow, CNIATOMINFORM Publ. 2008, 228 p. (in Russian)

### Authors

Rachkov Valery Ivanovich, Research Supervisor of the State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Science.

E-mail: vrachkov@ippe.ru

Kalyakin Sergey Georgievich, First Deputy General Director on Science, Director of Institute for Nuclear Reactors and Thermal Physics, SSC RF-IPPE, Dr. Sci. (Engineering).

E-mail: kalyakin@ippe.ru