

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ЗАКРЫТОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА С БЫСТРЫМИ РЕАКТОРАМИ ДЛЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**В.И. Рачков**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Актуализированы проблемы развития современной ЯЭ и пути их решения на основе замкнутого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами, удовлетворяющие требованиям приемлемой безопасности для крупномасштабной ЯЭ. Анализируется содержание действующей с 2010 г. федеральной целевой программы ЯЭНП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» и этапы ее выполнения. Сделан вывод, что основные положения «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI в.», одобренные Правительством РФ в 2000 г., сохраняются и в настоящее время, хотя и требуют развития с учетом новых реалий на рынке органического топлива, состояния российской и мировой экономики, а также обострения требований безопасности (Фукусима) и нераспространения ядерного оружия.

**Ключевые слова:** замкнутый ядерный топливный цикл, быстрые реакторы, стратегия, ядерная энергетика, федеральная целевая программа.

**Key words:** closed nuclear fuel cycle, fast reactors, strategy, nuclear power engineering, industry, federal state program.

### СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

По состоянию на 31.12.2011 г. по данным МАГАТЭ в мире эксплуатировались 435 ядерных энергоблоков общей установленной электрической мощностью (нетто) примерно 370 ГВт и 63 ядерных энергоблока (60,5 ГВт) находились в стадии строительства [1]. В 2010 г. в мире на АЭС суммарно было выработано 2630 млрд. кВт·ч электроэнергии\* или 13–14 % от общего мирового производства (пик в 1996 г. – 18 %), в то время как на тепловых станциях на ископаемом топливе – более 65 %. Из 16-ти ядерных энергоблоков, строительство которых начато в 2010 г. в мире, 10 энергоблоков приходится на Китай и по два – на Россию и Индию. Средний срок эксплуатации действующих в мире АЭС на конец 2010 г. составил 26 лет (в России – 25 лет) и поступательно рос с замедлением темпов нового строительства и продлением срока службы все большего числа реакторов.

\* В 2011 г. общее производство электроэнергии на АЭС в мире снизилось на 4,4 % по сравнению с 2010 г. и составило 2518 млрд. кВт·ч (данные МАГАТЭ, <http://www.iaea.org/pris>), главным образом, за счет снижения выработки электроэнергии в Японии и Германии в связи с решениями, принятыми после аварии на АЭС «Фукусима».

В соответствии с последним прогнозом Международного энергетического агентства (IEA) состояния мировой энергетики [2] для временного диапазона до 2035 г. доля ядерной энергии в удовлетворении спроса на первичную энергию вырастет незначительно – с 6 % в 2009 г. до 7 % в 2035 г.

По прогнозам МАГАТЭ 2011 г. [3], установленные мощности мирового парка АЭС к 2030 г. достигнут 500 ГВт при минимальном сценарии развития (на 8 % меньше предыдущей оценки) и 746 ГВт – при максимальном, а к 2050 г. – 560 и 1228 ГВт соответственно. При этом суммарная установленная мощность всех электростанций в мире в 2030 г. составит в зависимости от сценария развития соответственно 9700 и 12100 ГВт и в 2050 г. – 20390 ГВт (для минимального сценария). Выработка электроэнергии на АЭС в мире в 2030 г. прогнозируется на уровне 3950–5900 млрд. кВт·ч (11,0–14,8 % общего производства) и в 2050 г. – от 4500 до 9900 млрд. кВт·ч (6,2–13,5 %) в зависимости от рассматриваемого сценария развития.

Сегодня ядерная энергетика России базируется на АЭС с водоохлаждаемыми реакторами на тепловых нейтронах типа ВВЭР и РБМК, работающими в открытом ЯТЦ. На 1 января 2012 г. в России эксплуатируются 10 АЭС (33 энергоблока) общей установленной электрической мощностью 24,2 ГВт (11 % в суммарной установленной мощности электростанций ЕЭС России), которые вырабатывают около 17 % всего производимого в стране электричества (ТЭС – 67 %, ГЭС – 16 %). В стадии сооружения на территории РФ находятся восемь энергоблоков с реакторами ВВЭР общей мощностью 9,6 ГВт (эл.) и один энергоблок с реактором на быстрых нейтронах БН-800 мощностью 0,8 ГВт (эл.).

Ориентиры развития энергетики в России на среднесрочный период до 2030 г. определены «Энергетической стратегией России» [4]. В соответствии с этой стратегией мощность АЭС планировалось увеличить к 2030 г. до 52–62 ГВт, с покрытием до 30% электроэнергии во всей стране. Один из последних долгосрочных прогнозов развития российской ядерной энергетики дан в работе ИНЭИ РАН «Перспективы развития АЭС до середины XXI века». В этой работе анализируются варианты экономически оптимального роста мощностей АЭС в России к 2050 г. в пределах от 100 до 140 ГВт (э). При этом предполагается, что доля выработки ядерной электроэнергии к середине века возрастет до 33–42%.

Глобальный экономический кризис, начавшийся в 2008 г., привел к снижению темпов экономического роста в стране и, как следствие, уменьшению объемов и темпов роста энергопотребления. Дополнительным вызовом планам среднесрочного развития ЯЭ стала авария на японской АЭС «Фукусима» в марте 2011 г.

Влияние этих факторов сказалось на ближайших планах развития ЯЭ во многих странах, включая и Россию. В проекте плана Министерства энергетики, опубликованном в июле 2012 г., планируемый рост мощности ЯЭ в России на период до 2020 г. снизился на 15% с 39–41 до 34 ГВт(э) и ограничивается вводом, в основном, уже строящихся станций.

Но кризис лишь на время может снизить потребление энергоресурсов и, как следствие, интерес к проблемам долгосрочного энергообеспечения устойчивого развития. При неизбежном росте населения и индустриального производства во многих странах мира можно ожидать, что вскоре энергетические и экологические проблемы мира обострятся с новой силой, и в условиях ограниченных и неравномерно распределенных углеводородных ресурсов вновь возрастет интерес к ядерной энергетике.

Нет сомнения, что дальнейшее развитие ЯЭ в нашей стране и в мире в целом

в период до 2030 г. может быть реализовано только на основе коммерчески освоенных технологий тепловых реакторов с открытым топливным циклом, удовлетворяющих современным требованиям в области безопасности. Росатом разрабатывает новый проект «ВВЭР-ТОИ» единичной мощностью 1200-1300 МВт. При проектировании «ВВЭР-ТОИ» учитывались современные требования в области безопасности и тенденции развития строительной индустрии. ВВЭР-ТОИ могут обеспечить прогнозируемые мощности ЯЭ до 2030 г., однако необходимо признать, что реализация намерений масштабного развития ЯЭ к середине века на базе технологий тепловых реакторов может оказаться невыполнимой из-за ряда присущих системе тепловых реакторов проблем:

- все более серьезная утрата кредита общественного доверия после тяжелых аварий на АЭС;

- повышение безопасности тепловых реакторов сопровождается ростом удельных капитальных затрат на новые АЭС опережающими темпами по сравнению с традиционной энергетикой;

- при наличии значительного количества накопленного в мире облученного топлива задача его окончательной утилизации не решена, причем проблема «ядерных отходов» прочно вошла в общественное сознание как неустранимая в принципе;

- используемые сегодня технологии предприятий по обогащению урана и переработке ОЯТ тепловых реакторов с выделением плутония создают опасность распространения ядерных оружейных материалов;

- экономически приемлемые запасы природного урана при неэффективном его использовании в общепринятом сегодня открытом ЯТЦ невелики, что ограничивает масштабы и функционирование современной ядерной энергетики текущим столетием и, как и удорожание обычных видов топлива, несет в себе опасность международных конфликтов.

Именно эти проблемы лежат в основе того, что одно из наиболее представительных системных исследований последнего времени в области энергетики проект Global Energy Assessment (GEA) [5] пришел в 2012 г. к неутешительному для ЯЭ выводу: энергетические потребности человечество может удовлетворить и без ядерной энергетики с ее нерешенными проблемами

Но, с другой стороны, эти исследования так же, как и многие другие, ранее выполненные национальные и международные системные исследования, указывают на возможность и целесообразность значительного увеличения роли ЯЭ в энергообеспечении устойчивого развития на основе ядерных энерготехнологий нового поколения с характеристиками, отвечающими на вызовы современной ЯЭ.

## **СТРАТЕГИИ КРУПНОМАСШТАБНОГО РАЗВИТИЯ ЯЭ**

Анализ подходов к перспективам развития мировой ядерной энергетики показывает наличие двух подходов.

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 топлива (МОХ-топливо), 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 МОХ-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 формирование закрытого 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  $^{238}\text{U}$  наработкой из него делящегося плутония и  $^{232}\text{Th}$  путем превращения его 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, энергетически используемого менее чем на 1%, и производятся непрерывно возрастающие объемы 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, обладающих крупнейшей в мире ядерной энергетикой, и усилиями ведущих корпораций-разработчиков АЭС тиражируется в развивающихся странах, встающих на путь освоения ядерной энергетикой. При этом для последних, особенно не обладающих значительным парком реакторов, предполагается предоставление возможности лизинга ядерного топлива с возвратом ОЯТ в страны-поставщики, где сосредотачиваются все операции внешнего ЯТЦ. Как известно, именно РФ была 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.

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, накапливаемый ОЯТ в концепции открытого ЯТЦ является бесполезным отходом, и проблема его окончательного захоронения выходит за рамки чисто экономической.

Очевидно, что формирование крупномасштабной ядерной энергетикой возможно 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 энергетикой. Можно выделить две стратегии формирования крупномасштабной энергетикой.

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 ( $K_B > 1$ ), способных обеспечивать топливом

ЛВР. Аналогичная стратегия рассматривалась и по-прежнему предлагается некоторыми авторами в России. 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. В пользу этой стратегии выдвигается тезис о приемлемости существования в структуре ядерной энергетики более дорогих быстрых реакторов с  $KB > 1$  при совместном функционировании с ЛВР. Между тем желание оправдать затраты на упомянутые предприятия по переработке ОЯТ породило концепцию применения выделенного из ОЯТ плутония для изготовления МОХ-топлива для ЛВР.

Другая стратегия крупномасштабной ядерной энергетики связана с быстрыми реакторами умеренной энергонапряженности без избыточного производства плутония [6–9]. Это позволяет отказаться от уранового blankets в пользу требований безопасности и нераспространения. При этом важным является полное внутреннее воспроизводство плутония в активной зоне ( $KBA \approx 1$ ) с плотным теплопроводным топливом (нитридное, металлическое, карбидное) равновесного состава.

За последние 10 лет в мировой практике выросла роль системных исследований в обоснование стратегий развития ядерной энергетики на длительный период. Этот подход учитывает высокую инерционность энергетических сценариев вообще и ядерной энергетики, в частности. Сегодня при проектировании АЭС закладываются сроки службы в 60 лет, и можно ожидать увеличения этого срока до 100 лет и более. Технические решения в части ЯТЦ, начиная от добычи урана и кончая захоронением РАО, также имеют долговременный характер. Поэтому для развития ядерной энергетики, безусловно, необходима стратегия на длительную перспективу, на которую должны опираться краткосрочные стратегические решения и планы. Становится ясной необходимость расширения временного масштаба такой стратегии для России как минимум до 2100 г. [9]

В России еще в конце XX в. специалистами ряда отраслевых и академических институтов была выполнена работа по определению главных задач и путей реализации развития крупномасштабной ядерной энергетики страны. Глубокое осмысление предшествующего периода развития ядерной энергетики привело к пониманию приоритетности технологического обновления, которое оправдывало бы постановку вопроса о крупномасштабном развитии ядерной энергетики. Результатом этой работы стала разработка «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI в.» (далее «Стратегия-2000»), одобренной Правительством РФ в мае 2000 г. [10].

В основе «Стратегии-2000» лежат так называемые положения «естественной безопасности», или требования приемлемости крупномасштабной ядерной энергетики:

- исключение аварий, требующих эвакуации, а тем более отселения населения, а также выводящих из хозяйственного использования значительные территории;
- эффективное использование энергетического потенциала добываемого топливного сырья;
- обращение ядерных материалов в топливном цикле без значимого наруше-

ния природного радиационного баланса\*;

- технологическая поддержка режима нераспространения ядерного оружия;
- конкурентоспособность ядерной энергетики в сравнении с другими видами энергогенерации.

Эти положения легли в основу инициативы Президента РФ на Саммите тысячелетия в ООН (Нью-Йорк, 6 сентября 2000 г.) по ориентации на ядерную энергетику в устойчивом развитии человечества в третьем тысячелетии. Российская «Стратегия-2000» была первым документом государственного уровня, свидетельствующим о начале пересмотра в мире отношения к использованию ЯЭ. Позднее в начале века были организованы два международных проекта: Международный Форум «Generation IV» и «ИНПРО» (МАГАТЭ) с подобными целями – проанализировать весь спектр вызовов развитию крупномасштабной ЯЭ (безопасность, нераспространение, отходы, ресурсная база и экономика), выработать требования ее приемлемости и разработать методологию оценки перспективности различных ядерно-энергетических систем.

В «Стратегии-2000» определен ряд технических требований, способствующих удовлетворению требований приемлемости крупномасштабной ядерной энергетики. В частности, применительно к реакторным установкам эти технические требования включают в себя

- обеспечение минимального запаса реактивности реактора, не позволяющего реализовать разгон на мгновенных нейтронах;
- сохранение стабильных физических характеристик активной зоны за время кампании;
- отказ от использования теплоносителя первого контура под высоким давлением, потеря которого приводит к неприемлемым выбросам высокоактивных радионуклидов;
- переход на высококипящий жидкометаллический теплоноситель и интегральную шахтную конструкцию реактора с устранением возможности потери охлаждения.

Применительно к объектам и технологиям ЯТЦ технические требования приемлемости крупномасштабной ядерной энергетики включают в себя

- отказ от захоронения ОЯТ;
- закрытый ЯТЦ с минимизацией времени выдержки облученного топлива;
- возврат долгоживущих высокоактивных актинидов и части продуктов деления в реакторы в составе регенерированного топлива;
- технологическую поддержку режима нераспространения (отказ от наработки плутония оружейного качества в бланкетах быстрых реакторов и от выделения чистого плутония из облученного топлива).

Очевидно, что крупномасштабная ЯЭ может развиваться лишь в случае ее конкурентоспособности на рынке энергии и инвестиций при постепенном отходе от повсеместной практики государственной поддержки. Это тоже одно из требований приемлемости крупномасштабной ядерной энергетики.

«Стратегия-2000» однозначно предполагает, что удовлетворить требованиям приемлемости крупномасштабной ядерной энергетики можно только на пути развития технологий закрытого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с быстрыми реакторами (БР).

---

\* Под сохранением природного радиационного баланса подразумевается, что через определенный исторически не слишком большой период времени суммарная радиоактивность и радиотоксичность отходов, произведенных в результате эксплуатации АЭС и переработки облученного топлива и направляемых на захоронение, не будет значимо превышать суммарной радиоактивности и радиотоксичности изотопов уранового сырья, извлеченных из земной коры для обеспечения АЭС топливом.

Вывод о решающей роли технологий ЗЯТЦ с БР в крупномасштабной ЯЭ не нов и не уникален. Многие индустриальные страны (США, СССР, Франция, Великобритания, Германия, Италия, Япония, Швеция и др.) имели в 1960–1980-е гг. национальные программы по созданию технологий ЗЯТЦ с БР, которые так и не вошли в коммерческую стадию.

Проведенные в начале этого века международные оценки различных ядерно-энерготехнологических систем в рамках Международного Форума «Generation IV» и проекта МАГАТЭ «ИНПРО» также показали на принципиальные достоинства технологий ЗЯТЦ с быстрыми реакторами в решении задач крупномасштабного развития ЯЭ.

Сегодня национальные программы по освоению технологий ЗЯТЦ с БР имеют практически все страны, которые масштабно используют ЯЭ (Франция, Япония, Республика Корея, США) или планируют ее масштабное использование в будущем (Индия, Китай).

В СССР государственная программа по освоению технологий БР существовала с начала освоения мирного использования ядерной энергии. К середине 80-х гг. прошлого столетия создано было два энергетических быстрых натриевых реактора – БН-350 и БН-600, разработан проект реактора БН-800.

После Чернобыльской аварии в период реформирования экономики страны объем работ в области развития ядерно-энергетических технологий, включая и ЗЯТЦ с БР, был существенно сокращен. Однако к моменту возрождения отрасли в начале 2000-х гг. в России еще сохранился достаточно действенный потенциал разработчиков технологий быстрых реакторов и закрытого ядерного топливного цикла.

В части, касающейся БР, особо следует отметить успешную работу реактора БН-600 на Белоярской АЭС. Этот реактор уже отработал 32 года без каких-либо серьезных аварий. На сегодняшний день это единственный в мире действующий энергетический реактор на быстрых нейтронах. Обосновано продление срока его эксплуатации с проектных 30 лет до 45 лет.

Кроме успешной работы быстрых натриевых реакторов в России был накоплен многолетний опыт эксплуатации реакторной установки со свинцово-висмутовым теплоносителем на атомной подводной лодке. На основании этого опыта сегодня в рамках государственно-частного партнерства разрабатывается проект быстрого реактора СВБР-100 мощностью 100 МВт (э) для многоцелевого использования в региональной энергетике. В стране разрабатывался также проект быстрого реактора на свинцовом теплоносителе с пристанционным ядерным топливным циклом.

В области технологий ЗЯТЦ разработаны и продемонстрированы на опытно-промышленном или экспериментальном уровнях следующие технологии:

- промышленная водная переработки ОЯТ реакторов ВВЭР-440 и БН-600 на заводе РТ-1;
- опытное производство таблеточного *смешанного оксидного* уран-плутониевого топлива (МОХ-топливо);
- опытное производство виброуплотненного МОХ-топлива;
- опытное производство нитридного уранового топлива;
- лабораторное производство *смешанного нитридного* (плотного) уран-плутониевого топлива (МНИТ-топливо, или СНУП-топливо);
- лабораторная пирохимическая переработка ОЯТ.

**ФЦП «ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ...»**

Новый этап в развитии технологий ЗЯТЦ с БР в России начался с разработкой и принятием в 2010 г. правительством РФ программы исследований по новой технологической платформе ядерной энергетики в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» (далее Программа) [11] а также Проекта Комиссии при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России «Новая технологическая платформа: замкнутый ядерный топливный цикл и реакторы на быстрых нейтронах».

Ввиду длительности сроков реализации и первоочередной необходимости получения принципиальных технических решений по технологиям реакторов на быстрых нейтронах выполнение Программы осуществляется в два этапа.

На первом этапе (2010 – 2014 гг.) будут достигнуты следующие результаты:

- получение принципиально новых технических решений и разработка новых технических проектов энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах со свинцовым, свинцово-висмутовым и натриевым теплоносителями;
- завершение проектирования и осуществление пуска топливных комплексов по производству MOX-топлива для реакторов на быстрых нейтронах;
- разработка рабочей документации на проект строительства многоцелевого исследовательского реактора на быстрых нейтронах МБИР;
- разработка детектора нейтринной диагностики активной зоны реактора;
- создание установки для получения дисперсных композиционных конструкционных материалов для реакторов.

На втором этапе (2015 – 2020 гг.) планируется

- построение опытно-демонстрационного энергоблока с реактором на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем, а также многоцелевого исследовательского реактора на быстрых нейтронах МБИР (взамен действующих исследовательских реакторов, отработавших ресурс);
- введение в эксплуатацию технически переоснащенного комплекса больших физических стендов;
- построение и введение в эксплуатацию промышленного комплекса по производству плотного MNIT-топлива для реакторов на быстрых нейтронах;
- создание полифункционального радиохимического исследовательского комплекса для отработки перспективных технологий замкнутого топливного цикла;
- завершение разработки и обоснования технологических и проектно-конструкторских решений на промышленный пристанционный модуль переработки отработавшего ядерного топлива реакторов на быстрых нейтронах;
- завершение разработки и обоснования технологических и проектно-конструкторских решений на специализированную нитку централизованного завода переработки отработавшего ядерного топлива реакторов на быстрых и тепловых нейтронах;
- завершение строительства, реконструкции, технического перевооружения

ния и введение в эксплуатацию необходимой исследовательской базы для обеспечения безопасности (ядерной, радиационной, пожарной безопасности ядерных реакторов, установок по производству и переработке ядерного топлива).

В 2012 г. в рамках Программы стартовал проект «Прорыв», консолидирующий проекты по разработке реакторов большой мощности на быстрых нейтронах, технологий замкнутого ядерного топливного цикла, а также новых видов топлива и материалов и ориентированный на достижение нового качества ядерной энергетики. Цель проекта - создание ядерно-энергетического комплекса, отвечающего требованиям к крупномасштабной энергетике и включающего в себя АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, производства по регенерации (переработке) и рефабрикации ядерного топлива, подготовке всех видов РАО к окончательному удалению из технологического цикла.

В рамках проекта «Прорыв» будут реализованы

- проект головного энергокомплекса для сооружения в 2025 г., включающего в себя АЭС с реакторами на быстрых нейтронах мощностью 1200 МВт, и производства по регенерации и рефабрикации ядерного топлива, подготовке всех видов РАО к окончательному удалению;

- опытно-промышленное производство МНПТ-топлива для БР;

- НИОКР, разработка проекта и сооружение опытно-демонстрационного энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300 (реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем);

- НИОКР, разработка проекта и сооружение пристанционного ЗЯТЦ для опытного энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300;

- НИОКР и разработка проекта РУ БН-1200;

- НИОКР и проектно-конструкторские разработки по всем элементам ЗЯТЦ в рамках специализированной нитки централизованного завода.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Основные положения «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI века», одобренные Правительством РФ в 2000 г., сохраняются и в настоящее время, хотя и требуют развития с учетом новых реалий на рынке органического топлива, состояния российской и мировой экономики, а также обострения требований безопасности (Фукусима) и нераспространения ядерного оружия.

2. В XXI в. может возникнуть необходимость формирования крупномасштабной мировой ядерной энергетики.

3. Крупномасштабная ядерная энергетика может быть создана на базе закрытого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах.

4. В России в рамках федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения...» предполагается параллельно разрабатывать (чтобы к 2020 г. выбрать лучшее) следующие проекты:

- реакторные установки с тяжелым (свинец, свинец-висмут) и легким (натрий) жидкометаллическим теплоносителями;

- плотное нитридное уран-плутониевое топливо и оксидное уран-плутониевое топливо;

- пристанционный ядерный топливный цикл и централизованный ядерный топливный цикл.

**Литература**

1. IAEA Power Reactor Information System. <http://www.iaea.org/pris>.
2. World Energy Outlook 2011 OECD/IEA, 2011.
3. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. – Ref. Data Ser. 1, 2011 Ed. – Vienna: IAEA, 2011.
4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. [утвержденная распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р].
5. GEA, 2012: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future / Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
6. Белая книга ядерной энергетики / Под общ. ред. Е.О. Адамова. – М.: НИКИЭТ, 2001.
7. Атомная энергетика как важнейший фактор устойчивого развития России в XXI веке / В.И. Рачков // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006 г. – № 6. – С. 2–4.
8. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200 / В.И. Рачков, В.М. Поплавский и др. // Атомная энергия. – 2010 г. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 201–205.
9. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. / Е.О. Адамов, А.В. Джаловян, А.В. Лопаткин и др. // Атомная энергия. 2012 г. – Т. 112. – Вып. 6. – С. 319–330.
10. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. – М.: Минатом России, 2000.
11. Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 гг. и на перспективу до 2020 г.: федеральная целевая программа [утв. Постановлением Правительства РФ от 3 февраля 2010 г. № 50].

Поступила в редакцию 23.07.2013

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

---

### УДК 621.039

*Development of closed nuclear fuel cycle technologies of fast reactors for large scale nuclear energetic \ V.I. Rachkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 10 pages. – References, 11 titles.*

Problems of modern nuclear power engineering are brought up and described are the possible solutions on the basis of closed nuclear fuel cycle with fast reactors that meet the requirements of inherent safety for large scale nuclear power industry. This article analyses the content of acting since 2010 Federal State Program “Nuclear power technologies of new generation for the period of 2010–2015 and in perspective until 2020” and its progress. The conclusion is that main principles of “Nuclear power engineering development strategy in Russia in the first half of XXI century”, approved by the government of RF in 2000, remain the same even though they require development concerning new reality at the market of organic fuels, state of Russian and world economies and higher safety requirements (Fukushima) as well as nuclear nonproliferation.

### УДК 621.311.25

*Model analysis of spent fuel pit severe accident for SUNPP (Unit 1) under blackout and heat removal failure using MELCOR 1.8.5 \ A.S. Balashevsky, D.V. Shevielov, N.I. Vlasenko, V.Ya. Kozlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 7 titles.*

The calculation model of the spent fuel pit for SUNPP (Unit 1) using MELCOR 1.8.5 computer code has been created. The loss of heat removal from spent fuel pit initiating event has been analyzed. Time limits of fuel damage, hydrogen generated mass and melt-concrete interaction having been estimated.

### УДК 621.039.564.5

*Methods for localization of failed fuel assemblies in MBIR reactor \ P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, D.A. Lukyanov, S.S. Shutov, A.S. Zhilkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 10 pages, 4 illustrations. – References, 6 titles.*

The paper describes the designed fuel element monitoring system for MBIR fast research reactor. The method for localization of failed fuel assemblies on the power operating reactor is proposed. As a result, the time of failed fuel assemblies search on shutdown reactor can be reduced. The method is based on monitoring of delayed neutrons emitted by fission products in coolant, and modeling of the loop distribution of liquid metal coolant.

### УДК 621.039

*Simulation of irradiation of the personnel involved in the process of AMB SNF cutting under water \ V.P. Smirnov, A.Z. Gayazov, I. V. Kuzmin, A.Yu. Leshchenko, S.V. Semenovych, V.V. Serebryakov, A.S. Hrenov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 3 titles.*

The article presents the basic factors of radiation exposure of the personnel in the process of work implementation for handling AMB SNF on the site of FSUE “PA “Mayak”. The results of experimental researches of mechanisms of formation of radiation sources impacting dosimetric situation are provided. The basic approaches to develop the model of formation of radiation exposure of the personnel and results of calculation of the parameters of dosimetric situation at working places using newly developed model are presented.