

## КОНЦЕПЦИЯ ПОЭТАПНОГО ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ И ЗАМЫКАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЗНАНИЙ О БУДУЩЕМ

**В.С. Каграманян, В.В. Коробейников, В.И. Рачков**

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



Авторы предлагают ядерной индустрии рассмотреть новый вариант решения проблем ОЯТ современной ЯЭ на основе использования уже продемонстрированных в России базовых технологий реакторов БН, МОКС-топлива и гидрометаллургической переработки ОЯТ. Предлагается воспринимать как объективную реальность наличие альтернативных взглядов на будущее ЯЭ и отличающихся «требований» к характеристикам БР и ЗЯТЦ, которые, в силу неоднозначности наших знаний о будущем и о реальном потенциале предлагаемых для разработки технологий, нельзя априори отвергать. Только будущее покажет, какая из идеологий окажется ближе к реальности.

В рамках идеологии «естественной безопасности» вместо детерминистических «требований» к показателям топливных характеристик системы БР авторы предлагают перейти к использованию «целевых показателей», которые могут корректироваться по мере уточнения представлений о будущем и реальном потенциале разрабатываемых технологий. Под термином «требование» подразумевается, что оно должно быть достаточно обосновано и априори может быть выполнено. Реальная же ситуация такова, что практическая возможность выполнения большинства требований «естественной безопасности» не показана даже на экспериментальном уровне.

Из общего перечня «целевых показателей» необходимо выбрать ключевые или приоритетные, которые должны быть продемонстрированы в первую очередь, например, показатели в области безопасности. Предлагается учитывать возможность поэтапного достижения «целевого показателя»: опытно-промышленная установка; головной коммерческий блок; коммерческая установка первого поколения; коммерческая установка второго поколения. Принятие вышеизложенных предложений позволит ядерной науке целенаправленно заниматься разработкой технологий нового поколения для будущего, не отвергая априори результаты предыдущих программ, а у ядерной индустрии появится возможность исследовать потенциал уже продемонстрированных технологий БН и МОКС-топлива для решения текущих проблем современной ЯЭ, например, в области ОЯТ.

**Ключевые слова:** моделирование топливного цикла, легководные реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, природный уран, оптимизация, мировая ядерная энергетика, топливные балансы.

### ВВЕДЕНИЕ

С принятием в 2010 г. Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения» (ФЦП ЯЭНП) [1] в нашей стране стартовал новый этап в освоении технологий быстрых реакторов (БР) и замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). Цель программы – продемонстрировать до 2020 г. ядерные энерготехнологии, на которых можно будет создать крупномасштабную ЯЭ. Предполагается, что технологии для крупномасштабной ЯЭ должны удовлетворять принципу «естественной безопасности» – определенному перечню системных требований в различных областях [2]. В областях ядерной безопасности требуется исключение аварий с «разгоном» на мгновенных нейтронах; сырьевой обеспеченности – радикальное повышение уровня эффективности использования в ЯЭ природного урана; обращения с ядерными отходами – уменьшение радиотоксичности захораниваемых ВАО до уровня, сопоставимого с радиотоксичностью добываемого природного урана; нераспространения – создание технических барьеров, минимизирующих несанкционированный доступ к чувствительным материалам. Предполагается также, что выполнение этих системных требований можно достигнуть лишь при

- отказе от зон воспроизводства и обеспечения КВ активной зоны БР на уровне 1.05;
- организации многократного рецикла в БР без разделения при химпереработке плутония от урана и младших актинидов;
- минимизации времени внешнего ядерного топливного цикла на уровне меньше одного года.

В рамках ФЦП ЯЭНП определены и технологии БР и ЗЯТЦ, обладающие потенциалом удовлетворить требованиям «естественной безопасности», и поставлены задачи по их демонстрации, а именно, разработка

- проекта коммерческой АЭС с натриевым реактором БН-1200 на нитридном топливе;
- технологии и строительство демонстрационного свинцового реактора БРЕСТ-300 на нитридном топливе;
- технологии и создание производства по фабрикации смешанного уран-плутониевого нитридного топлива для стартовых загрузок реактора БРЕСТ-300;
- и демонстрация в рамках пристанционного ядерного топливного цикла (ПЯТЦ) возможности переработки ОЯТ на основе пирохимической или комбинации ее с гидрометаллургической технологией, а также рефабрикации нитридного топлива для БРЕСТ-300.

Для реализации ФЦП ЯЭНП на период до 2020 г. государством выделено около 110 млрд. рублей. Актуальность, важность и интерес государства к освоению технологий БР и ЗЯТЦ обуславливаются тем, что в случае успешной и своевременной коммерциализации этих технологий ядерно-энергетическая отрасль могла бы стать одним из ключевых элементов в решении острой макроэкономической задачи по переводу экономики страны с сырьевого пути развития на инновационно-технологический [3, 4]. Поставленная перед ядерной отраслью задача по освоению технологий БР и ЗЯТЦ чрезвычайно сложна и имеет более чем 60-летнюю мировую не совсем успешную историю. В 50 – 80-е годы прошлого столетия государственные программы по созданию технологий БР и ЗЯТЦ для целей создания крупномасштабной ЯЭ были практически во всех крупных промышленных странах, включая США, СССР, Францию, Великобританию, ФРГ, Швецию, Бельгию, Италию, Японию и др., но ни одна из этих программ не была доведена до коммерческого результата.

Наибольшего успеха в освоении быстрых реакторов достигла наша страна. Более 30-ти лет успешно эксплуатируется на сегодня единственный в мире опытно-

промышленный быстрый натриевый реактор БН-600. В 2014 г. планируется ввести в строй еще один опытно-промышленный реактор БН-800 для решения практической задачи по утилизации высвобождаемых излишков оружейного плутония в виде смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) топлива. Однако необходимо признать, что достигнутые результаты и в нашей стране далеки от конечных экономических целей – создания коммерчески привлекательных АЭС с БР и индустриальной топливной инфраструктуры, предоставляющей этим реакторам коммерческие услуги по переработке ОЯТ, рефабрикации свежего топлива и обращению с ВАО.

С учетом вышесказанного представляется актуальной и весьма важной задача по осмыслению причин неудач предыдущих программ и учету уроков в составлении и реализации программы по освоению технологий БР и ЗЯТЦ на современном этапе.

В настоящей работе авторы поставили перед собой две задачи: первая – проанализировать, какую роль сыграли различные внутренние и внешние для ЯЭ факторы в причинах незавершенности предыдущих программ развития БР и ЗЯТЦ; вторая – на основании результатов анализа выработать предложения, способствующие повышению результативности развития технологий БР и ЗЯТЦ на новом этапе. В качестве внутренних факторов в работе рассматриваются идеологические (выбор целей развития и системных требований к технологиям) и технологические (выбор базовых технологий БР и ЗЯТЦ для развития), в качестве внешних – макроэкономические условия развития ЯЭ.

### **АНАЛИЗ СИСТЕМНЫХ ПРОБЛЕМ В ОСВОЕНИИ ТЕХНОЛОГИЙ БР И ЗЯТЦ В ПРЕДЫДУЩИЕ ПЕРИОДЫ**

В настоящее время распространена точка зрения, что основная причина неудач в реализации предыдущих программ развития БР и ЗЯТЦ в нашей стране, да и в мире в целом связана, в основном, с внутренними для ЯЭ факторами – неправильно выбранными технологиями для развития в рамках неправильно сформулированных идеологий на начальном этапе развития ЯЭ.

Например, в работе [5] утверждается, что основная причина неудач в освоении технологий БР и ЗЯТЦ в нашей стране связана с неправильным выбором технологий, а именно, натриевого теплоносителя, оксидного топлива и гидрометаллургической технологии переработки ОЯТ. Горючесть натрия не позволила достичь требуемого уровня удельных капитальных затрат на АЭС и решить эксплуатационные и безопасностные проблемы; недостаточно высокая плотность оксидного топлива не позволила обеспечить необходимый уровень безопасности, а гидрометаллургическая технология военного происхождения опасна с точки зрения нераспространения. Утверждается также, что выбор натрия в качестве теплоносителя и МОКС в качестве базового топлива был вынужденным из-за существовавших в 1960 – 1970-е гг. системных требований по достижению высоких темпов размножения плутония в ЯЭ, что в настоящем и в будущем уже не актуально.

#### **Технологический выбор**

Рассмотрим сначала несколько обоснованные аргументы о принципиальной ошибке в выборе технологий натриевого теплоносителя, оксидного топлива и гидрометаллургической технологии переработки ОЯТ в качестве базовых технологий для развития. При оценке перспективности той или иной технологической системы БР и ЗЯТЦ будем исходить из возможности довести систему до коммерческого уровня использования, успешно пройдя три последовательные стадии:

- экспериментальное обоснование реализуемости технологий;
- демонстрация свойств безопасности и эксплуатационных качеств технологий на опытно-промышленном уровне;
- коммерциализация технологий на промышленном уровне.

Сложность доведения системы БР и ЗЯТЦ до коммерческого уровня использова-

ния заключается в необходимости в сбалансированном прохождении перечисленных выше стадий четырех различных взаимосвязанных технологических элементов:

- ЯЭУ с БР;
- фабрикация стартового топлива;
- переработка ОЯТ БР и рефабрикация топлива из выделенных при переработке ядерных материалов;
- обращение с ВАО от переработки ОЯТ БР.

Из обзора работ по освоению системы БР и ЗЯТЦ в нашей стране следует, что в 1960 – 1980-е гг. в СССР существовала определенная программа последовательного освоения и коммерциализации всех элементов базовой системы технологий [6, 7]. В этой программе основное и опережающее внимание уделялось решению главной задачи – демонстрации на опытно-промышленном уровне работоспособности, в первую очередь, ЯЭУ с быстрым натриевым реактором – ключевым элементом в общей связке БР и ЗЯТЦ. Удельные затраты на ЯЭУ в структуре стоимости всей системы составляют подавляющую часть – более 70%.

Сегодня на основании многолетнего успешного опыта эксплуатации ЯЭУ с БН-600 можно с уверенностью утверждать, что в нашей стране задача по демонстрации на опытно-промышленном уровне безопасности и эксплуатационных свойств технологии натриевого теплоносителя успешно решена. Мы имеем единственный в мире успешно работающий опытно-промышленный БН-600 на Белоярской АЭС с КИУМ на уровне АЭС с серийными коммерческими тепловыми реакторами [8]. При этом удельные капвложения на БАЭС на уникальную опытно-промышленную установку БН-600 оказались всего на 40% больше, чем на коммерческие АЭС с ВВЭР, построенные в это же время [9]. Учет резервов, заложенных в БН-600, позволил в рамках его габаритов создать проект более экономичного быстрого реактора БН-800 с электрической мощностью 880 МВт(э) [9]. Сегодня просматриваются перспективы дальнейшего снижения удельной величины капвложений в ЯЭУ с реакторами типа БН-1200 вплоть до уровня, характерного для серийных ЯЭУ с ВВЭР.

Что касается уровня безопасности ЯЭУ с БН, то можно отметить, что строящийся сегодня БН-800 удовлетворяет существующим требованиям в области безопасности. Первая лицензия на строительство АЭС после аварии на Чернобыльской АЭС была получена именно на возобновление сооружения БН-800 на БАЭС. Новый концептуальный проект реактора БН-1200, базирующийся на использовании преимущественно пассивных систем, также удовлетворяет всем современным требованиям безопасности в ЯЭ [10,11].

Относительно выбора МОКС-топлива можно отметить, что в нашей стране работоспособность этого типа топлива в таблеточном исполнении продемонстрирована пока еще только на экспериментальном уровне. В рамках решения задачи по утилизации избыточного оружейного плутония в строящемся БН-800 планируется продемонстрировать работоспособность этого топлива уже на опытно-промышленном уровне. При этом следует отметить, что безопасность строящегося БН-800 так же, как и разработанного концептуального проекта БН-1200 [11], обоснована в условиях использования в этих реакторах именно МОКС-топлива.

За рубежом работоспособность МОКС-топлива в натриевых быстрых реакторах была обоснована на опытно-промышленном уровне в процессе эксплуатации реакторов Феникс и Супер Феникс [12]. В настоящее время во Франции разрабатывается новый проект быстрого натриевого реактора «Астрид» также на базе усовершенствованного МОКС-топлива [13]. Разработка этого проекта ведется с учетом повышенных требований в области безопасности, предъявляемых Форумом «Генерация 4» к реакторам четвертого поколения. Япония в начале века провела обширные технико-экономические исследования по оценке перспективности различных видов топлива (МОКС, карбид,

металл, нитрид) и выбрала в качестве базового варианта для своих будущих быстрых натриевых реакторов усовершенствованное МОКС-топливо.

По вопросу о потенциальном риске использования гидрометаллургических методов для переработки ОЯТ с точки зрения распространения плутония отметим, что усовершенствованные современные технологии переработки ОЯТ, в том числе реализуемые на ОДЦ в рамках ФЦП ЯРБ, не предусматривают выделение чистого плутония [14]. Конечно, в случае экспорта этой технологии в неядерные страны существует проблема распространения чувствительных знаний. Но такая же проблема возникает в случае экспорта и любой другой технологии переработки ОЯТ. Еще более острая проблема возникает при экспорте технологий обогащения урана. Практические решения проблемы нераспространения чувствительных знаний сегодня видятся на пути продолжения использования политики ограничений экспорта чувствительных технологий в неядерные страны, а также внедрения многосторонних подходов в предоставлении услуг по обогащению урана, по поставкам свежего топлива с возвратом ОЯТ, по переработке ОЯТ [15].

Исходя из изложенных выше фактов можно утверждать, что реально на сегодня нет никаких технических оснований априори выражать сомнения, что развиваемая в предыдущие периоды система базовых технологий (БН, МОКС и гидрометаллургическая химия) не сможет достичь конкурентоспособности и (или) удовлетворить современным требованиям в области безопасности и нераспространения. Конечно, окончательно отменить «имеющие право быть сомнения» можно будет только после строительства и успешной эксплуатации первых промышленных АЭС с реакторами БН коммерческого уровня мощности в совокупности с обеспечивающими их предприятиями топливного цикла.

Такого рода общие сомнения справедливы не только для базовой системы БН и ЗЯТЦ, но и для любых других систем, включая концептуальный инновационный БРЕСТ с ПЯТЦ, удовлетворяющий всем требованиям «естественной безопасности». Разница заключается лишь в том, что в рамках концептуальной системы БРЕСТ ни один ее элемент не прошел еще стадию демонстрации своей реализуемости даже на экспериментальном уровне. В то же время ключевой элемент ЯЭУ с БН в нашей стране успешно прошел стадию демонстрации своей работоспособности на опытно-промышленном уровне, а за рубежом эту стадию успешно прошли основные технологии топливного цикла – МОКС-топливо и гидрометаллургическая переработка ОЯТ.

Но почему тогда систему продемонстрированных технологий БН и ЗЯТЦ авторы работ [16, 17] априори считают неперспективной? Фактически только из-за невозможности в рамках этой системы в полной мере удовлетворить идеологическим требованиям «естественной безопасности». Так например, требования «естественной безопасности» по  $K_{в.з.} = 1.05$  невозможно (по крайней мере, очень сложно) достичь на МОКС-топливе, а по времени внешнего цикла меньше одного года – на базе гидрометаллургических методов переработки ОЯТ.

Здесь интересно отметить, что в США, в отличие от СССР, в качестве приоритетных технологий топливного цикла были выбраны плотное металлическое топливо и электрохимическая переработка ОЯТ, на которых при необходимости можно было бы достичь требований «естественной безопасности», но и эти технологии тоже не были доведены до коммерческого уровня.

Так в чем же основная причина того, что различные технологии БР и ЗЯТЦ, разрабатываемые в рамках предыдущих программ во многих странах мира, так и не были доведены до коммерческого продукта?

#### **Роль макроэкономических факторов**

В 1960-е гг. идея создания крупномасштабной ЯЭ с ключевой ролью в ней БР была популярна практически во всех крупных индустриальных странах, включая США, СССР, Францию, Великобританию, ФРГ, Италию, Швецию. Макроэкономические факторы, спо-

собствующие государственному интересу этих стран к масштабному использованию ЯЭ, были связаны с высокими послевоенными темпами роста энергоемкой промышленности в этих странах и высокими темпами и требуемыми объемами ввода новых электромощностей.

В те времена высокие текущие темпы роста электропотребления в условиях ограниченных национальных запасов органического топлива обосновывали необходимость государственной поддержки программы развития ЯЭ на основе технологий тепловых реакторов и открытого ядерного топливного цикла, которые уже были доведены до коммерческого уровня использования в рамках экономик ведущих ядерных держав того времени – США и СССР. При этом с самого начала было понятно, что развитие ЯЭ на тепловых реакторах не может быть долгим и масштабным из-за ограниченности запасов природного урана и неэффективности его использования в тепловых реакторах – менее 1%. Существовавшие же в те времена прогнозы, что высокие темпы развития экономики и электроэнергетики сохранятся как минимум до конца XX в., способствовали интересу правительств индустриальных стран в создании и финансировании национальных программ по освоению технологий БР и ЗЯТЦ, позволяющим на два порядка повысить эффективность использования природного урана и тем самым снять сырьевую проблему для ЯЭ на сотни лет вперед. Однако благоприятные макроэкономические условия для развития ЯЭ и государственного интереса к освоению технологий быстрых реакторов сохранились недолго.

Энергетический кризис в 1973 г. способствовал продолжению политики поддержки развития ЯЭ, но одновременно привел к осознанию в странах Запада необходимости создания национальных программ по энергосбережению, которые в 80–90-е годы привели к значительному снижению темпов роста потребления электроэнергии в этих странах, в том числе и за счет переноса энергоемкой и экологически опасной промышленности в третьи страны, в первую очередь, страны Азии.

В 1979 г. в США произошла авария на АЭС ТМТ, которая, с одной стороны, привела к последующему удорожанию затрат на обеспечение безопасности АЭС, а с другой стороны, к утрате абсолютного доверия со стороны общественности и потере политического интереса к поддержке развития ЯЭ.

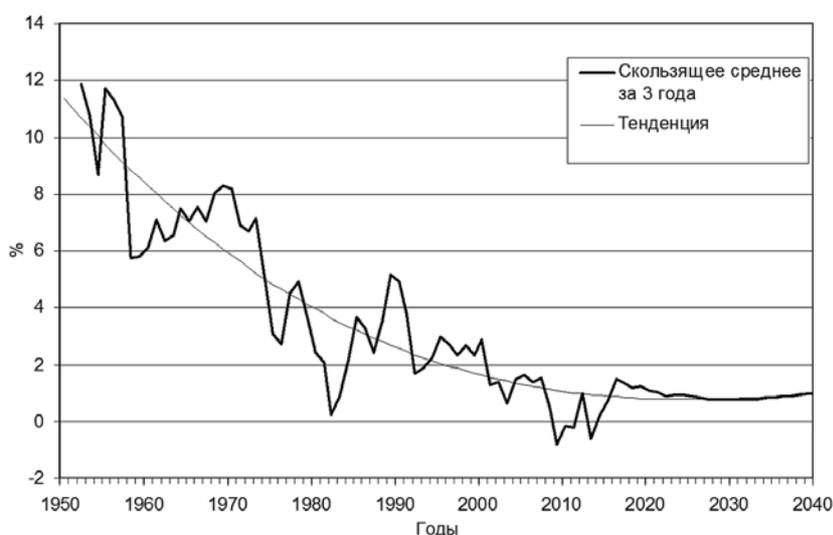


Рис. 1. Темпы развития электроэнергетики в США, %

В результате всех этих мер усредненные темпы развития электроэнергетики в этих странах стали снижаться. Например, в США усредненные по трем годам темпы постоян-

но снижались (рис. 1) и стабилизировались к концу XX в. на уровне до 1% в год [18]. Снижаться стала потребность и в дополнительном вводе новых электростанций. На рисунке 2 видно, как в США в период 1985 – 1996 гг. происходило снижение ввода не только АЭС, но и общего числа всех новых электростанций.

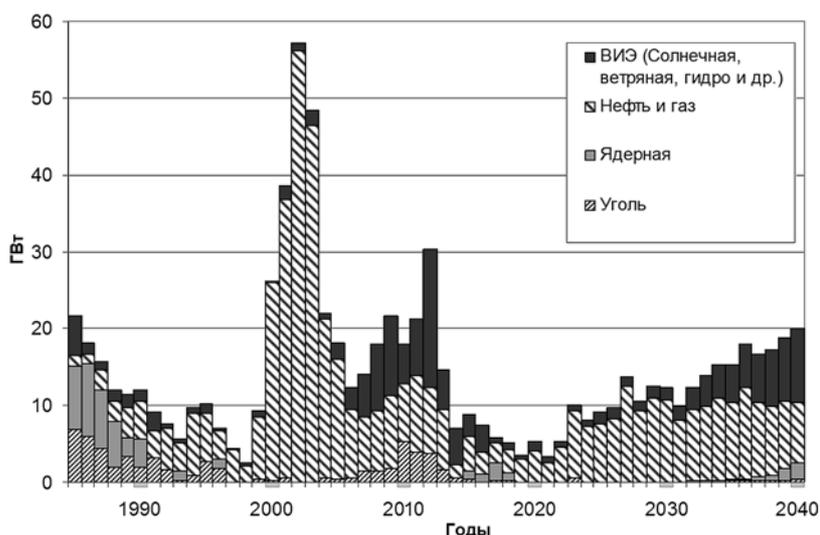


Рис. 2. Прирост электрогенерирующих мощностей в США, ГВт

Возникающие в некоторые периоды всплески экономической активности и потребности в дополнительной электроэнергии, как, например, в США в 1997–2003 гг., стало экономически выгодно покрывать за счет быстрого строительства (два – три года) станций малой мощности на природном газе или политически поддерживаемых возобновляемых источников энергии [18].

Инерционная и капиталоемкая ЯЭ, которая сыграла важную роль в энергообеспечении многих крупных стран Запада на этапе их индустриального развития, в новых экономических условиях становилась финансово, а после ТМ1 и Чернобыля и политически не привлекательным источником энергии. На рисунке 3 показан сделанный в 1970 г. прогноз развития ЯЭ в США на период до 2010 г. до 2500 ГВт(э) в сравнении с реальной ситуацией на уровне 100 ГВт(э).

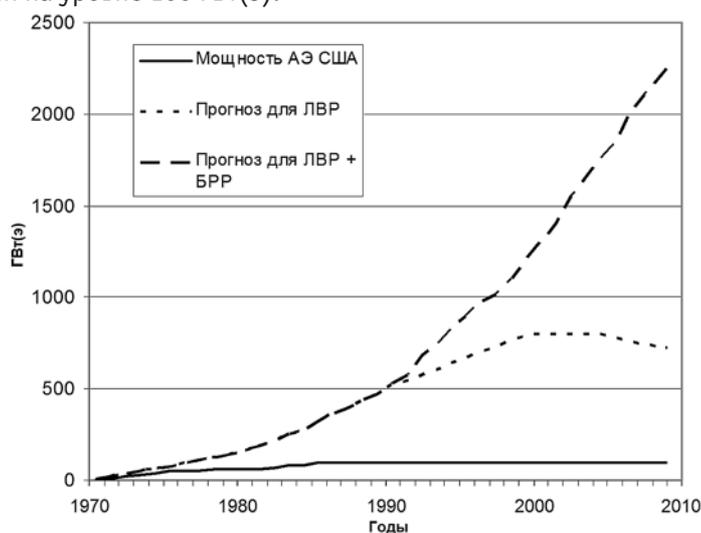


Рис. 3. Генерирующие мощности атомной энергетики США и прогнозы, ГВт(э)

На рисунке 4 представлен график роста потребления электроэнергии в ведущих индустриальных странах Западной Европы.

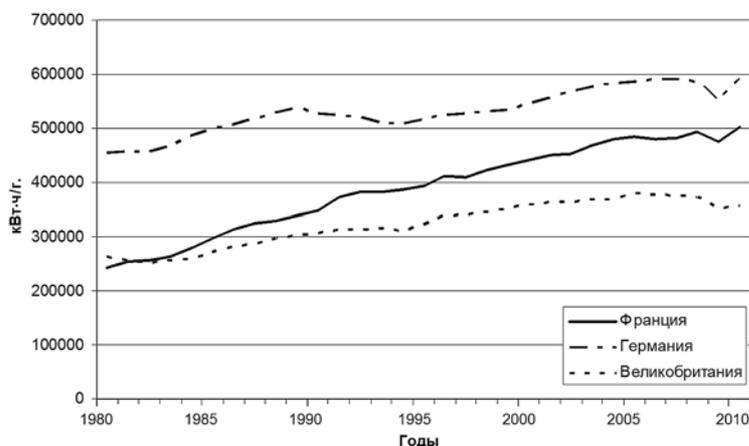


Рис. 4. Годовое производство электроэнергии в ведущих индустриальных странах Западной Европы, кВт·ч/год

Нам представляется, что именно эти внешние для ЯЭ макроэкономические факторы, а не широко обсуждаемые как противниками, так и сторонниками ЯЭ реальные и мнимые проблемы в области безопасности, нераспространения и ядерных отходов лежат в основе того, почему правительства многих стран, включая США, Францию, Великобританию, Германию, Италию, Бельгию, поддерживавших развитие программ БР в своих странах в 1960 – 1970-е гг., потеряли всякий интерес к массовому строительству новых АЭС и, как следствие, к замораживанию и прекращению финансирования программ развития ядерных технологий нового поколения, включая технологии БН. В подтверждение этого тезиса на рис. 5 представлена история роста мощностей АЭС в мире по регионам [19], из которого следует, что даже после Чернобыля новые АЭС продолжали интенсивно строиться в азиатском регионе: в Японии, Республике Корея, на Тайване (Китай), где с запозданием (по сравнению с Западом) продолжались интенсивное индустриальное развитие экономики и соответственно рост потребности в новых мощностях.

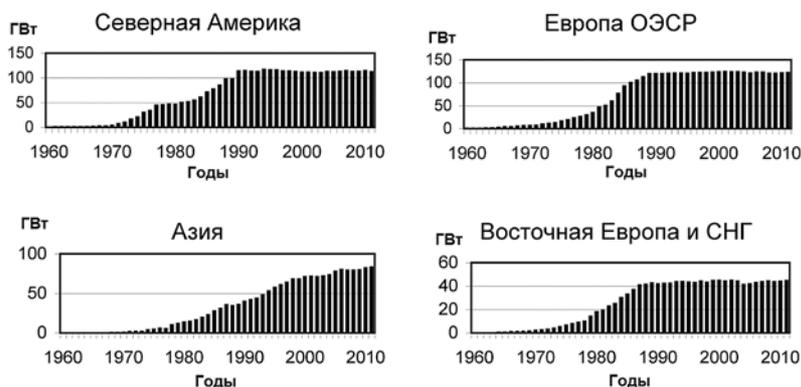


Рис. 5. Развитие атомной энергетики в регионах мира, ГВт

Сегодня макроэкономические условия для развития ЯЭ в мире наиболее благоприятны для Китая, Индии и частично Южной Кореи, где наблюдается планомерный интенсивный рост промышленности и потребностей в электроэнергии, строятся новые АЭС и планируется масштабное развитие ЯЭ. Естественно, что именно эти страны озабочены больше всех освоением ядерных энерготехнологий нового поколения, включая БР и ЗЯТЦ.

В нашей стране макроэкономический фактор также сыграл ключевую роль в незавершенности предыдущих программ и может оказать существенное влияние на итоги реализации новой программы освоения технологий БР и ЗЯТЦ. Известно, что в результате неудачного реформирования экономики страны в 90-е годы была потеряна значительная часть энерго- и наукоемкой промышленности. Уровень потребления электроэнергии в целом снизился, перспективы развития экономики долгие годы представлялись туманными. Естественно, что в этих условиях никаких экономических стимулов для строительства новых АЭС, а тем более для освоения новых технологий в стране, не было и не могло быть.

В случае, если экономика России будет продолжать функционировать в рамках сложившейся сырьевой концепции с низкими темпами развития, зависящими при этом от колебаний цен на энергетическое сырье на внешних сырьевых рынках, то реально не будет каких-либо серьезных экономических оснований и стимулов к масштабному развитию ЯЭ. Однако если в ближайшее десятилетие реально начнется декларированный перевод экономики на научно-технологический путь, включая ее реиндустриализацию, то может возникнуть реальная экономическая потребность в интенсивном и планомерном развитии электроэнергетического сектора.

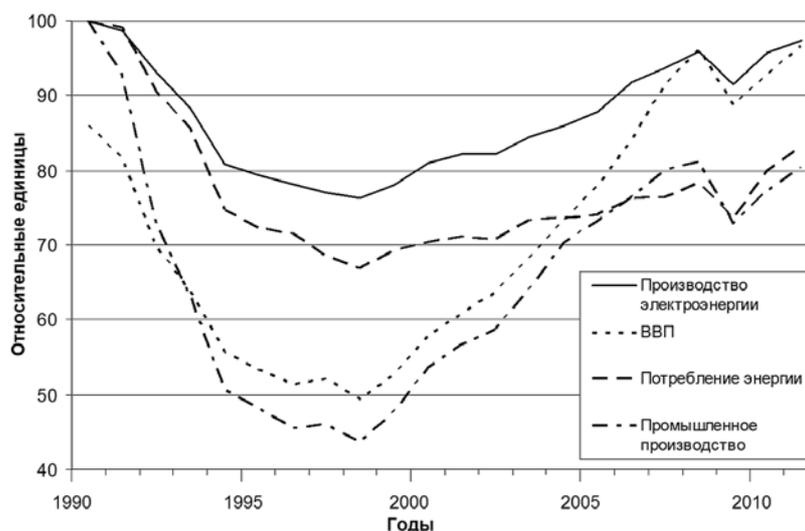


Рис. 6. ВВП, производство электроэнергии, потребление энергии и промышленное производство в России, относительные единицы

Это в свою очередь откроет перспективы для масштабного развития ЯЭ на новой технологической базе. И здесь возникает ключевой вопрос, а будут ли к этому времени в нашей стране реально освоены и коммерциализированы технологии БР и ЗЯТЦ? Нам представляется, что ответ на этот вопрос может оказаться в значительной зависимости от того, какая именно идеология будет сегодня лежать в основе нового этапа развития технологий БР и ЗЯТЦ.

#### Роль идеологических аспектов

Отметим, что развитие технологий БР и ЗЯТЦ в России реализовывалось и реализуется в рамках некой официально поддерживаемой идеологии, определяющей цели развития, внешние требования и перспективность технологий, например, принятая на сегодня идеология «естественной безопасности». Помимо официальной идеологии в нашей стране во все времена существовали и существуют альтернативные идеологии.

Так, например, в первый период освоения БР, помимо официально поддерживаемой идеологии, требовавшей достижения коротких времен удвоения на уровне шести

– восьми лет и освоения быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, в рамках альтернативной идеологии выдвигались требования по времени удвоения на уровне трех – четырех лет [20, 21], что невозможно было бы сделать без освоения гелиевых быстрых реакторов. В работе [22] излагается альтернативная идеология крупномасштабной многокомпонентной ЯЭ, в рамках которой перспективные быстрые реакторы с  $KB = 1.5$  должны обеспечивать вторичным топливом усовершенствованные тепловые реакторы.

В зарубежных странах также используются национальные идеологии развития БР и ЗЯТЦ, однако все они существенно отличаются от российских идеологий. Так, например, сегодня в Индии рассматривается трехступенчатая модель крупномасштабного развития ЯЭ до уровня 300 и более ГВт(э), где основная роль быстрых натриевых реакторов заключается в наработке избыточного урана-233 из тория для обеспечения топливом будущих усовершенствованных тяжеловодных реакторов. Требование по  $KB$  для БР ставится на уровне 1.5, который предполагается достичь на металлическом топливе. Перспективная технология переработки – электрохимическая. Вместе с тем начальный этап экономического освоения АЭС с БН планируется реализовать с использованием продемонстрированных технологий топливного цикла: МОКС-топлива и гидрометаллургической переработки ОЯТ.

В Китае так же, как и у нас ставится задача крупномасштабного развития ЯЭ. Однако конечную цель освоения системы БР и требования к их характеристикам предполагается определить позднее – к 2030 г. На начальном этапе предлагается развивать БН с  $KB = 1$  на МОКС-топливе. В будущем, в случае нехватки сырьевых ресурсов, необходимо будет создать быстрые натриевые реакторы на металлическом топливе с  $KB = 1,5$  для обеспечения сырьем интенсивного развития ЯЭ. Если же проблем с сырьем в будущем не будет, то роль БН с  $KB < 1$  будет заключаться в утилизации накапливаемых в тепловых реакторах высокоактивных трансурановых элементов.

В странах с развитой ЯЭ технологии БР и ЗЯТЦ сегодня развивают уже не для масштабного строительства новых АЭС, как это было раньше в рамках их старых идеологий, а для утилизации плутония и младших актинидов, накопленных в ОЯТ тепловых реакторов и (или) сырьевой обеспеченности ЯЭ в долгосрочной перспективе. В этих странах также не требуются достижения в БР высоких  $KB$ , однако выбор перспективных технологий ЗЯТЦ у них отличается от российского. Во Франции и Японии выбирают усовершенствованный таблеточный МОКС и гидрометаллургическую переработку, а в США и Республике Корея – металлическое топливо и пирохимию.

В этой связи возникает законный вопрос, в чем причина использования столь противоречивых идеологий развития БР, включая требования по  $KB$  и выводы относительно степени перспективности тех или иных технологий топливного цикла? Можно ли обосновать, какая из перечисленных идеологий более правильная?

Проведенный анализ подходов, используемых при выработке различных идеологий развития БР, показывает на некоторую их методологическую особенность – сугубо научную ориентацию этих идеологий.

Большинство рассматриваемых идеологий развития БР и ЗЯТЦ вырабатываются представителями науки, близкими к правительствам. В рамках этих идеологий представители науки формируют свое видение будущего ЯЭ, прогнозируют масштабы и описывают возможные проблемы на пути ее создания. Затем определяют потенциальную роль и место в будущей ЯЭ различных инновационных технологий, определяют требования к топливным характеристикам реакторов, выбирают перспективные технологии и просят деньги у государства на их развитие.

В рамках такого научно-ориентированного подхода степень обоснованности защищаемых идеологий и требований к характеристикам реакторов напрямую зависит от степени реализуемости на практике представлений ученых о далеком будущем ЯЭ и

предлагаемых инновационных технологий, работоспособность которых еще не продемонстрирована. А это означает наличие значительной неопределенности в исходных предпосылках, невозможности согласования альтернативных идеологий и наличия неизбежных рисков в процессе практической реализации любой из идеологий:

- реальные экономические и топливные характеристики предлагаемых инновационных технологий могут быть далеки от ожидаемых показателей;
- реальные затраты и сроки на разработку и доведение инновационных технологий до коммерческого результата могут быть значительно больше планируемых цифр;
- реальная экономическая потребность в строительстве новых АЭС в будущем к моменту освоения инновационных технологий может быть значительно меньше ожидаемой или вообще отсутствовать.

О реальности таких рисков свидетельствует длительный опыт развития технологий БР и ЗЯТЦ в нашей стране и в мире. Например, высокие требования по времени удвоения к быстрым реакторам в 1960 – 1970-е гг. выдвигались как раз исходя из нереализовавшихся представлений о будущем. В те годы основной проблемой ЯЭ считалась сырьевая обеспеченность, отсюда и выдвигались различные высокие требования во времени удвоения горючего и КВ для первых быстрых реакторов.

Что же оказалось в реальности? В 1990 – 2000-е гг. не было макроэкономической необходимости в дальнейшем развитии ЯЭ во всех странах, имевших программы по развитию БР. Выявились и реальные внутренние проблемы современной ЯЭ – это не только и не столько сырье, сколько экономика и безопасность, и в некоторой степени нерешенные проблемы ОЯТ и распространения чувствительных знаний при экспорте некоторых технологий. В рамках идеологии «естественной безопасности» решение всех проблем современной ЯЭ, в том числе и в области накапливаемых ОЯТ, связывается с перспективами освоения и последующей коммерциализацией инновационных систем технологий БР и ЗЯТЦ, удовлетворяющих требованиям «естественной безопасности». При этом работоспособность большинства элементов таких систем еще не продемонстрирована даже на экспериментальном уровне, а ранее продемонстрированные элементы технологий в рамках предыдущих программ развития БР и ЗЯТЦ априори отвергаются, поскольку не удовлетворяют требованиям «естественной безопасности». Это значит, что существует большой риск, что проблемы современной ЯЭ могут остаться так и нерешенными в ближайшие десятилетия, а разрабатываемая инновационная ЯЭ так и не будет создана к моменту начала перевода экономики страны на научно-технологический путь развития.

Сложившаяся ситуация, с одной стороны, снижает интерес атомной индустрии страны к участию в разработке инновационных технологий для далекого будущего, а с другой стороны, вызывает необходимость в поиске дополнительных мер по преодолению реальных рисков, стоящих на пути развития БР и ЗЯТЦ на новом этапе в нашей стране.

Решение обеих проблем авторы видят в смене парадигмы в методологии выработки идеологии освоения технологий БР и ЗЯТЦ путем привлечения к этому процессу представителей не только науки, смотрящей в будущее, но и ядерной индустрии, решающей реальные проблемы современной ЯЭ.

#### **Авторы предлагают**

1) отказаться от используемой парадигмы, когда представители науки вырабатывают различные видения будущей ЯЭ, описывают ее предполагаемые проблемы, определяют требования к характеристикам и обосновывают необходимость финансирования и развития только тех инновационных технологий БР и ЗЯТЦ, которые отвечают выработанным им требованиям;

2) перейти к новой парадигме, когда представители науки хотя и вырабатывают различные видения будущей ЯЭ, но в рамках своих видений определяют уже не

требования, а скорее целевые показатели для характеристик инновационных технологий БР и ЗЯТЦ, которые могут корректироваться по мере уточнения представлений о будущем и реальном потенциале разрабатываемых технологий.

Параллельно представители индустрии отрасли вырабатывают реальные требования и коммерциализируют в сотрудничестве с наукой уже успешно продемонстрированные технологии БР и ЗЯТЦ для решения конкретных проблем современной ЯЭ, не создавая при этом серьезных помех для реализации альтернативных научных видений будущей ЯЭ.

### **ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ НОВОЙ ПАРАДИГМЫ**

Рассмотрим пример использования предлагаемого нового идеологического подхода с предложениями для науки по корректировке идеологии «естественной безопасности» и для индустрии по варианту использования продемонстрированных технологий БР и ЗЯТЦ в решении проблем ОЯТ реакторов ВВЭР.

#### **Предложения по корректировке идеологии «естественной безопасности»**

На основе выполненного выше анализа причин неудач и успехов в реализации предыдущих программ развития БР и ЗЯТЦ предлагается ряд мер общего плана, которые могут существенным образом повысить результативность выполнения новой программы развития технологий БР и ЗЯТЦ в нашей стране.

– Воспринимать как объективную реальность наличие альтернативных взглядов на будущее ЯЭ и отличающихся «требований» к характеристикам БР и ЗЯТЦ, которые, в силу неоднозначности наших знаний о будущем и о реальном потенциале предлагаемых для разработки технологий, нельзя априори отвергать. Только будущее покажет, какая из идеологий окажется ближе к реальности.

– В рамках идеологии «ЕБ» вместо детерминистических «требований» к показателям топливных характеристик системы БР перейти к использованию «целевых показателей», которые могут корректироваться по мере уточнения представлений о будущем и реальном потенциале разрабатываемых технологий. Использование термина «требование» подразумевает, что оно должно быть достаточно обосновано и априори может быть выполнено. Реальная же ситуация такова, что практическая возможность выполнения большинства требований «ЕБ» не продемонстрирована даже на экспериментальном уровне.

– Из общего перечня «целевых показателей» выбрать ключевые или приоритетные, которые должны быть продемонстрированы в первую очередь, например, показатели в области безопасности.

– Учитывать возможность поэтапного достижения «целевого показателя»: опытно-промышленная установка; головной коммерческий блок; коммерческая установка первого поколения; коммерческая установка второго поколения.

– Сравнивать или оценивать технологии в рамках единой идеологии и достигших одинакового уровня освоения. При этом необходимо понимать, что задача науки заключается в поиске новых технологических решений, а также в обосновывании и демонстрации их работоспособности. Что же касается выработки конкретных требований и выбора продемонстрированных технологий для коммерциализации, то это уже задача для индустрии.

– На экспериментальном уровне исследовать альтернативные технологические решения. Вывод о перспективности той или иной технологии можно делать только после ее успешной демонстрации на опытно-промышленном уровне.

Принятие вышеизложенных предложений позволит ядерной науке целенаправленно заниматься разработкой технологий нового поколения для будущего, не отвергая априори результаты предыдущих программ. А у ядерной индустрии появится возможность исследовать потенциал уже продемонстрированных технологий БН и МОКС-топ-

лива для решения текущих проблем современной ЯЭ, например, в области ОЯТ.

### **Предложения для ядерной индустрии**

Основные задачи, стоящие перед ядерной индустрией сегодня, заложены в экономически эффективных и социально приемлемых директивах правительства страны относительно масштабов развития ЯЭ в период до 2030 г. на внутреннем и внешнем энергетических рынках. При этом нет сомнений, что любой ожидаемый рост мощностей АЭС к 2030 г. вплоть до уровня 40 – 60 ГВт(э) может быть реализован на основе использования коммерческих технологий ВВЭР и открытого топливного цикла, удовлетворяющих современным требованиям в области безопасности.

Представляется также, что при таком уровне развития ЯЭ реальной системной проблемой для ядерной индустрии будет не столько сырьевая, сколько проблема отложенного решения по судьбе накапливаемых в стране ОЯТ ВВЭР и РБМК. Незавершенность топливного цикла современной ЯЭ ставит под сомнение ее экономическую эффективность и экологическую безопасность. Сегодня решения проблемы накапливаемых ОЯТ тепловых реакторов в мире ищутся в двух направлениях: во-первых, это реализуемый в Швеции и Финляндии вариант геологической изоляции ОЯТ; во-вторых, это реализованный во Франции вариант переработки ОЯТ с выделением урана и плутония для однократного рецикла в виде МОКС-топлива в действующих тепловых реакторах и с остекловыванием ВАО для последующей геологической изоляции.

По мнению авторов, оба варианта не подходят для условий России, поскольку существенно затрудняют реализацию возможных вариантов крупномасштабного развития ЯЭ в России в период после 2030 г. Например, в первом варианте геологическая изоляция всех ОЯТ вместе с плутонием исключает возможность реализации масштабного развития ЯЭ в будущем.

Во втором варианте, хотя и сокращаются текущие годовые объемы накапливаемых ОЯТ тепловых реакторов в шесть – семь раз, масса накопленного в ЯЭ плутония уменьшается в два раза, а содержание в нем примесей радиотоксичного америция-241 значительно увеличивается. Возможно, что для стран с масштабной ЯЭ, таких как Франция, Япония, США и Республика Корея, где освоение быстрых реакторов задерживается, сокращение накопленной массы плутония в ЯЭ может быть скорее не проблемой, а решением проблемы. Но в условиях стран, где только планируется масштабное развитие ЯЭ на быстрых реакторах, таких как Россия, Индия и Китай, уничтожение стартового горючего для будущих быстрых реакторов и накопление при этом для них проблем с америцием неприемлемо.

Авторы предлагают ядерной индустрии рассмотреть новый вариант решения проблем ОЯТ современной ЯЭ на основе использования уже продемонстрированных в России базовых технологий реакторов БН, МОКС-топлива и гидрометаллургической переработки ОЯТ.

В определенной мере предлагаемый вариант похож на французский. Инфраструктура предлагаемого варианта также включает в себя промышленный завод для водной переработки всех выгружаемых из ВВЭР урановых ОЯТ и цех по фабрикации МОКС-топлива из всего выделяемого плутония при переработке ОЯТ ВВЭР. Но в отличие от французского варианта предлагается изготавливать МОКС-топливо не для рецикла в тепловых реакторах, а для его однократного рецикла в небольшом количестве реакторов БН, специально построенных для целей утилизации плутония из ОЯТ ВВЭР (далее БН-утилизаторы).

Ориентировочно число БН-утилизаторов можно оценить исходя из годового баланса количества плутония, накапливаемого в ВВЭР, и плутония, потребляемого на изготовление МОКС-топлива для подпитки БН-утилизатора. Например, если принять уровень накопления плутония в ВВЭР около 200 кг Pu/ГВт(э) год, а годовое потребление плутония на производство МОКС-топлива для быстрого реактора типа БН-1200 около 1200 кг Pu/ГВт(э) год, то это означает, что для утилизации плутония из ОЯТ от шести ВВЭР нужно будет ввести один БН такой же единичной мощности. С

учетом потребности в плутонии для реализации начальной загрузки реактора БН и различий физических свойств плутония, нарабатываемого в тепловых и быстрых реакторах, результирующее соотношение по мощности в системе ЯЭ между реакторами ВВЭР и БН-утилизаторами ОЯТ может увеличиться до девяти, т.е. имея в системе ЯЭ около 10% мощностей на реакторах типа БН, можно будет обеспечить ежегодную полную утилизацию всего накапливаемого во всех ВВЭР плутония в составе МОКС-топлива для быстрых реакторов.

Применительно к возможным масштабам развития ЯЭ в нашей стране в период до 2030 г. предлагаемое решение проблем ОЯТ всех действующих ВВЭР-1000 и планируемых к строительству новых ВВЭР возможно при создании топливной инфраструктуры, включающей в себя

- завод РТ-2 для переработки ОЯТ ВВЭР мощностью от 800 до 1200 т/г. в зависимости от суммарной мощности обслуживаемых ВВЭР от 40 до 60 ГВт(э);

- сопряженный цех по производству МОКС-топлива из всего выделяемого при переработке ОЯТ плутония в количестве 8 – 12 т/г.;

- малую серию реакторов БН-1200 в количестве четырех – шести блоков, вместо части запланированных реакторов ВВЭР для рецикла МОКС-топлива, сделанного из всего выделенного плутония при переработке ОЯТ ВВЭР.

При этом предполагается, что эта малая серия реакторов БН-утилизаторов ОЯТ будет работать все время на плутонии, выделяемом из ОЯТ ВВЭР, т.е. создаваемая инфраструктура позволит до конца срока службы всех ВВЭР непрерывно перерабатывать в полном объеме их ОЯТ и утилизировать весь выделяемый при этом плутоний. Это означает, что предлагаемый вариант обеспечивает демонстрацию возможности полного и окончательного решения проблемы ОЯТ современной ЯЭ. Что касается судьбы образующегося в рамках предлагаемого варианта МОКС ОЯТ БН-утилизаторов, то ее предлагается определить позднее с учетом складывающихся рыночных перспектив для дальнейшего наращивания мощностей ЯЭ в период после 2030 г. и степени промышленной готовности инновационных технологий БР и ЗЯТЦ, разрабатываемых в рамках ФЦП ЯЭНП для развития крупномасштабной ЯЭ. С учетом неопределенности наших знаний о будущем рассматривается широкий спектр возможных сценариев развития событий в будущем от весьма оптимистических до пессимистических.

**В оптимистическом сценарии** развития предполагается, что макроэкономические перспективы для строительства новых АЭС после 2030 г. будут весьма хорошими. Разрабатываемые в рамках ФЦП ЯЭНП технологии БР и ЗЯТЦ нового поколения будут успешно продемонстрированы к 2030 г. При складывании таких условий естественно полагать, что накапливаемый МОКС ОЯТ БН-утилизаторов будет переработан в рамках новой инфраструктуры ЗЯТЦ, создаваемой для реализации крупномасштабного развития ЯЭ, а весь плутоний, выделяемый из этих ОЯТ, будет использован для изготовления стартовых загрузок новых инновационных БР, работающих в режиме полного замкнутого ядерного топливного цикла.

**Второй сценарий** также предполагает, что макроэкономические перспективы для строительства АЭС после 2030 г. будут хорошими, но при этом по каким-то причинам промышленная демонстрация технологий БР и ЗЯТЦ нового поколения временно задержится, например, до 2040 – 2050 гг. Если реакторы БН-1200 на МОКС-топливе удастся усовершенствовать так, что они станут удовлетворять возросшим к этому времени требованиям по безопасности и экономической эффективности, то вполне разумно полагать, что накапливаемые МОКС ОЯТ БН-утилизаторов могут быть переработаны, а извлекаемый плутоний будет использован для изготовления стартовых загрузок этих усовершенствованных БН-1200, работающих в режиме полного замкнутого топливного цикла. В этом случае в период после 2030 г. потребуются дальнейшее развитие топ-

ливной инфраструктуры ЯЭ, а именно, добавление производств по усовершенствованной гидрометаллургической переработке ОЯТ МОКС БН, а также по рефабрикации усовершенствованного МОКС-топлива для новых БН-1200.

**Третий (пессимистический) сценарий** предполагает, что в силу неизвестных нам сегодня причин после 2030 г. не будет никакой потребности в строительстве новых АЭС. В этом случае, проблемы ОЯТ МОКС БН-утилизаторов придется решать в рамках существующей структуры ЯЭ. Например, это можно будет сделать на основе реализации переработки МОКС ОЯТ БН и организации многократного рецикла плутония в виде МОКС-топлива как в построенных БН-утилизаторах, так и в действующих реакторах ВВЭР. Для этого также потребуются несколько развить созданную ранее топливную инфраструктуру добавлением к ней стадий гидрометаллургической переработки ОЯТ МОКС, а также рефабрикации МОКС-топлива для построенных БН и ВВЭР. Предварительные оценки показывают, что наличие в ЯЭ определенных долей реакторов БН и ВВЭР на МОКС-топливе может позволить организовать многократный рецикл плутония и стабилизацию его количества в ЯЭ. При этом роль ВВЭР на МОКС-топливе с  $KB = 0,5$  – обеспечение эффективного выжигания излишков плутония, накапливаемых в урановых ВВЭР, а роль реакторов БН на МОКС-топливе (с  $KB = 1.05$ ) – очистка для последующего рецикла выделяемого из МОКС ОЯТ ВВЭР «грязного плутония» от четных изотопов путем повышения доли делящихся изотопов в топливе.

Определив роль для первых БН и возможную судьбу их ОЯТ теперь можно выработать и системные требования к топливным характеристикам БН-утилизаторов.

**Требования по безопасности.** Здесь необходимо принимать во внимание, что предлагаемая инфраструктура по утилизации ОЯТ ВВЭР, включающая в себя ограниченное число БН-утилизаторов, должна рассматриваться как составная часть существующей ЯЭ и поэтому должна удовлетворять всем существующим требованиям в области ядерной безопасности. В силу этого для предлагаемых БН-утилизаторов нет необходимости в разработке новых особых повышенных требований безопасности, как это может быть разумно в случае с инновационными технологиями, разрабатываемыми для крупномасштабной ЯЭ.

**Требования по экономике.** С точки зрения вопросов экономики важно осознавать, что предлагаемые к строительству ограниченное число АЭС с БН-утилизаторами должны рассматриваться не как конкурирующие технологии относительно АЭС с ВВЭР, а как необходимая часть топливной инфраструктуры для завершения топливного цикла современной ЯЭ. При этом важно будет продемонстрировать, что результирующая стоимость электроэнергии в ЯЭ с учетом дополнительных затрат на создание топливной инфраструктуры по обращению с ОЯТ ВВЭР, включая строительство и эксплуатацию производств по переработке ОЯТ, обращению с ВАО, фабрикации МОКС-топлива и малой серии БН-утилизаторов плутония, существенно не увеличивается и остается экономически привлекательной и приемлемой для потребителя.

**Требования по KB.** Величина KB БН-утилизатора в нашем случае примерно определяет отношение количества плутония, накапливаемого в ОЯТ БН, к количеству плутония из ВВЭР, использованного при изготовлении МОКС-топлива для БН. При  $KB = 1$  весь накапливаемый в ОЯТ ВВЭР плутоний сохранится для будущего теперь в составе МОКС ОЯТ БН. Чем больше KB, тем больше плутония будет нарабатываться для будущей ЯЭ. Представляется, что вопрос об оптимальном KB для БН-утилизаторов должен решаться с учетом скорее не идеологических, а чисто экономических факторов, включая оценку затрат на увеличение KB в реакторе, на хранение избыточного плутония, и ожидаемого экономического эффекта от реализации хранимого плутония в будущем, в момент его реальной востребованности в ЯЭ.

**Требования по временам задержек топлива** перед переработкой определя-

ются отдельно для ОЯТ ВВЭР и ОЯТ БН МОКС. В случае с ОЯТ БН МОКС требования по задержкам будут зависеть от сценария их утилизации в будущем. Если переработка ОЯТ БН МОКС будет реализовываться в рамках будущей топливной инфраструктуры крупномасштабной ЯЭ, то естественно полагать, что требуемые времена задержек будут определяться исходя из логики минимизации времен задержек до уровня, обеспечивающего наработку плутония для стартовых загрузок новых АЭС с БР. Здесь реальные требования могут быть определены позднее в зависимости от создаваемой к тому времени технологической базы ЗЯТЦ и от потребностей в росте мощностей АЭС с БР зпосле 2030 г.

Что касается требований по задержкам для ОЯТ урановых ВВЭР, то они должны быть определены уже сейчас. При этом необходимо учитывать два фактора. Чем дольше будут выдерживаться ОЯТ ВВЭР перед переработкой, тем легче и дешевле будет его переработать. Но с другой стороны, чем больше время хранения ОЯТ, тем больше будет в нем накоплено в результате распада Pu-241 радиотоксичного Am-241. Реализованный во Франции вариант переработки ОЯТ PWR показывает, что оптимальным временем задержки при переработке ОЯТ ВВЭР может быть уровень в четыре – пять лет, пока содержание Am-241 в ОЯТ ВВЭР невелико, и выделяемый при переработке америций может быть трансформирован в остекловываемые ВАО вместе с продуктами деления и остальными младшими актинидами. В этом случае плутоний, извлекаемый при переработке урановых ОЯТ ВВЭР, будет относительно чист, и производство МОКС-топлива для БН-утилизаторов может быть организовано без усложнения радиационной обстановки, характерной для случая с наличием значительных примесей Am-241.

**Требования по нераспространению** определяются отдельно для технологий, используемых при создании топливной инфраструктуры по утилизации ОЯТ в стране, и отдельно для технологий, идущих на экспорт в третьи страны. При создании топливной инфраструктуры по утилизации ОЯТ представляется разумным применить меры, усложняющие доступ к чувствительным ядерным материалам. Например, при переработке ОЯТ ВВЭР плутоний целесообразно выделять вместе с ураном в равных долях. Производство МОКС-топлива для БН желательнее организовать на площадке, сопряженной с переработкой ОЯТ ВВЭР. Весь плутоний, извлекаемый при переработке ОЯТ ВВЭР, предлагается использовать для производства МОКС-топлива БН.

Что касается проблемы нераспространения при экспорте ядерных технологий, то здесь надо принимать во внимание, что основой для экспорта в среднесрочной перспективе будут АЭС с ВВЭР. Создание в стране топливной инфраструктуры по утилизации плутония из ОЯТ ВВЭР позволит экспортировать ВВЭР в пакете с предложением по поставкам свежего топлива и возврату ОЯТ. С нашей точки зрения, это наилучший на сегодня вариант решения проблемы нераспространения в мире чувствительных технологий и материалов. Другой вариант – это развитие предложенной Россией концепции создания международных центров ЯТЦ, например, международного ЯТЦ-центра по утилизации ОЯТ экспортируемых ВВЭР. Этот центр мог бы включать в себя выделенную на заводе РТ-2 специальную нитку по переработке ОЯТ экспортируемых ВВЭР и сопряженное производство МОКС-топлива для одного – двух БН-утилизаторов.

### **ВЫВОДЫ**

1. В работе проанализирована роль различных факторов в причинах незавершенности предыдущих программ развития БР и ЗЯТЦ и показано, что основная причина не технологическая и не идеологическая, а макроэкономического характера. Неблагоприятные для ЯЭ макроэкономические тенденции (минимизация темпов роста, энергонасыщение, перестройка) в 1980-1990-е гг. привели к потере экономического и государственного интереса к освоению технологий БР и ЗЯТЦ во всех стра-

нах, имевших программы по их освоению для создания крупномасштабной ЯЭ.

2. Сегодня наиболее благоприятные макроэкономические условия для развития ЯЭ и освоения технологий БР и ЗЯТЦ реализуются в Китае и Индии, в странах с планомерно и интенсивно растущей экономикой и энергетикой. В России сегодняшняя макроэкономическая ситуация (сырьевая экономика, низкие темпы роста) не благоприятствует развитию ЯЭ. Однако в случае, если в ближайшее десятилетие реально начнется декларированный перевод экономики на научно-технологический путь, включая ее реиндустриализацию, то это откроет перспективы для масштабного развития ЯЭ на новой технологической базе.

3. С учетом макроэкономической неопределенности условий развития ЯЭ в стране и необходимости минимизации финансовых и технологических рисков предлагается освоение технологий БР и ЗЯТЦ на новом этапе реализовывать в рамках идеологии поэтапного замыкания ЯТЦ с участием науки и ядерной индустрии. При этом в рамках научных программ, включая ФЦП ЯЭНП, усилия и средства концентрируются на разработке и демонстрации работоспособности инновационных технологий БР и ЗЯТЦ для создания в случае необходимости крупномасштабной ЯЭ в будущем. В рамках же ядерной индустрии исследуются и реализуются на базе уже продемонстрированных технологий (БН, МОКС-топлива и гидрометаллургической переработки ОЯТ) приемлемые варианты решения актуальной проблемы современной ЯЭ в области ОЯТ.

### **Литература**

1. Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года: федеральная целевая программа [утв. Постановлением Правительства РФ от 3 февраля 2010 г. № 50].
2. 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.
3. Рачков В.И. Атомная энергетика как важнейший фактор устойчивого развития России в XXI в. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 6. – С. 2–4.
4. Рачков В.И., Тюрин А.В., Усанов В.И., Вошинин А.П. Эффективность ядерной энерготехнологии: системные критерии и направления развития. – М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008. – 228 с.
5. Адамов Е.О., Ганев И.Х. Экологически безупречная ядерная энергетика. – М.: НИКИЭТ. 2007. 145 с.
6. Energy Strategy of Russia for the period up to 2030. Approved by the Order of RF Government No 1715-r of November 13, 2009.
7. Лейпунский А.И. и др. Расчетные исследования по физике энергетических реакторов на быстрых нейтронах. / Доклад на III Женевской конференции. 1964.
8. Атомные станции России. – М.: Росэнергоатом, 2011.
9. Assessment of Nuclear Energy Systems Based on a Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. IAEA. Vienna, 2012, IAEA-TECDOC-1639.
10. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. – М.: ИздАт, 2012. – 632с
11. 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.
12. Status of liquid metal cooled fast reactor technology. IAEA. Vienna, 1999, IAEA-TECDOC-1083.
13. Интернет-ресурс: ASTRID – Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration / Presented by A.Vasile (CEA) // IAEA Seminar on Fast Reactors, Bariloche, Argentina, 1-5 October 2012 [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-10-01-10-05-WS-NPTD/7.5\\_Vasile\\_ASTRID.pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-10-01-10-05-WS-NPTD/7.5_Vasile_ASTRID.pdf)

14. *Gavrilov P.M., Khaperskaya A.V., Fedorov Yu.S. et al.* Complete Testing of SNF Reprocessing Technology for EDS in the Hot Cells. Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Conf. Global2011. Rep. 501241.
15. *Декусар В.М., Егоров А.Ф., Коробейников В.В. и др.* Моделирование работы международного ядерного топливного центра. Препринт ФЭИ-3213, Обнинск, 2012. - 14 с.
16. *Ганев И.Х., Лопаткин А.В., Орлов В.В.* Радиационный баланс при развитии ядерной энергетики с БРЕСТ-1200 и ВВЭР-1000. // Атомная энергия. – 2001. – Т. 91. – Вып. 5. – С. 337-342.
17. *Adamov E.O., Orlov V.V.* A radical approach needed for a nuclear future in Russia. // Nuclear Engineering International. – 1992. – Vol. 37, № 454. – P. 42-44.
18. Интернет-ресурс: Annual Energy Outlook 2013 with Projections to 2040. US Energy Information Administration. // [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2013).pdf) – PP. 71–72.
19. Интернет-ресурс: [http://TheFutureofNuclearPower:A\\_GlobalandRegionalOutlook/](http://TheFutureofNuclearPower:A_GlobalandRegionalOutlook/) Н-Holger Rogner, A. McDonald // [http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/NP\\_Future\\_KeynoteRognerMcDonaldFeb09.pdf](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/NP_Future_KeynoteRognerMcDonaldFeb09.pdf)
20. *Орлов В.В.* Каким должно быть время удвоения быстрых реакторов? // Атомная энергия. – 1971. – Т. 31. – Вып. 3. – С. 195–197.
21. *Orlov V., Slesarev I., Zaritsky S. et al.* The Theoretical Possibility of Doubling Time Reduction in FR by Using Heterogeneous Configurations of Various Types of Fuel. Proc. on Conf. Fast Reactor Physics, IAEA-SM-244/76, v. 2, Vienna: IAEA, 1980, PP. 469-480.
22. *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.

Поступила в редакцию 20.12.2013 г.

#### **Авторы**

Каграманян Владимир Семенович, советник директора, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.  
E-mail: [kagramanyan@ippe.ru](mailto:kagramanyan@ippe.ru)

Коробейников Валерий Васильевич, главный научный сотрудник отдела, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор физ.-мат. наук, профессор.  
E-mail: [korob@ippe.ru](mailto:korob@ippe.ru)

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)

УДК 621.039.543.6

## THE CONCEPT OF PHASED MASTERING OF FAST REACTORS TECHNOLOGIES AND CLOSURE OF NFC UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY OF FUTURE KNOWLEDGE

Kagramanyan V.S., Korobeynikov V.D., Rachkov V.I.

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

### ABSTRACT

In this paper the authors suggest that the nuclear industry consider a new way to solve SNF problems of the present-day nuclear power engineering on the basis of technologies already used in Russia: BN reactors, MOX fuel and SNF hydrometallurgical reprocessing. As our knowledge about the future of nuclear power and the real potential of the technologies proposed for further development are ambiguous, existence of alternative views on the future of nuclear power and divergent “requirements” to FR and CNFC should be taken as an objective reality and they cannot be rejected a priori. Only the future will show which of the ideologies will turn out to be closer to reality.

As part of the “natural security” ideology instead of deterministic “requirements” to fuel performance indicators of a BR system the authors propose to proceed to a “target indicator” that can be updated as our ideas on the future and the real potential of emerging technologies becomes more precise. Using the term “requirement” means that it must be sufficiently substantiated and can be done a priori. The real situation is that the practical ability to perform most of the requirements of “natural security” has not been demonstrated even on experimental level.

Out of the whole list of “targets” one should select key or priority ones that should be demonstrated in the first place, for example in the field of safety indicators. We suggest considering the possibility of phased reaching a “target indicator”: an experimental industrial installation; head commercial unit; commercial installation of the first generation, second generation commercial plants. Acceptance of the above proposals will allow nuclear science to purposefully develop the next-generation technologies for the future without rejecting a priori the results of the previous programs. And the nuclear industry will be able to explore the BN and MOX-fuel technology potential, which has already been demonstrated, to solve the current problems of modern nuclear power, for example in the field of spent nuclear fuel.

**Key words:** nuclear fuel cycle modelling, light water reactors, fast breeder reactors, natural uranium, optimization, Global Nuclear Energy, fuel balance.

### REFERENCES

1. Yadernye energotekhnologii novogo pokoleniya na period 2010–2015 godov i na perspektivu do 2020 goda: federal'naya celevaya programma [utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 3 fevralya 2010 g. № 50]. [Next Generation Nuclear Technologies – 2020: Federal Target Program] [Approved by the Order of RF Government No 50 of February 3, 2010], (in Russian)
2. Adamov E.O., Dzhhalovyan 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, no. 6, pp. 319–330.

3. Rachkov V.I. Atomnaya energetika kak vazhnejshij faktor ustojchivogo razvitiya Rossii v XXI v. [Nuclear energy as an important factor for sustainable development of Russia in XXI century]. *Energobezbezhenie i vodopodgotovka*. 2006, no. 6, pp. 2–4.
4. Rachkov V.I., Tyurin A.V., Usanov V.I., Voshchinin A.P. Effektivnost' yadernoj energotekhnologii: sistemnye kriterii i napravleniya razvitiya [The effectiveness of nuclear power technology. System criteria and directions of development]. Moscow, CNIATOMINFORM Publ. 2008, 228 p. (in Russian)
5. Adamov E.O., Ganev I.H. Ekologicheski bezuprechnaya yadernaya energetika [Environmentally friendly nuclear power]. Moscow, NIKIET Publ. 145 p. (in Russian)
6. Energy Strategy of Russia for the period up to 2030. Approved by the Order of RF Government No 1715-r of November 13, 2009. (in Russian)
7. Leypunskij A.I. e.a. Raschetnye issledovaniya po fizike energeticheskikh reaktorov na bystryh nejtronah. Doklad na Tret'ej zhenevskoj konferencii [Studies in the physics of fast neutron reactors. Proceedings of the Third Geneva Conference]. 1964.
8. *Atomnye stancii Rossii* [Russian nuclear power plants]. Moscow, Rosenergoatom Publ. 2011.
9. Assessment of Nuclear Energy Systems Based on a Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. IAEA. Vienna, 2012, IAEA-TECDOC-1639.
10. Kuznecov I.A., Poplavskij V.M. *Bezopasnost' AES s reaktorami na bystryh nejtronah* [Security NPP with fast reactors]. Moscow, IzdAt Publ. 2012. – 632 s.
11. Rachkov V.I., Poplavskij V.M., Tsibulya A.M. e.a. Konceptiya perspektivnogo energobloka s byстрыm natrievym reaktorom BN-1200 [Concept of prospective power unit with fast neutron reactor BN-1200]. *Atomnaya energiya*. 2010, vol. 108, no. 4, pp. 201–205.
12. Status of liquid metal cooled fast reactor technology. IAEA. Vienna, 1999, IAEA-TECDOC-1083.
13. ASTRID – Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration. Presented by A.Vasile (CEA). IAEA Seminar on Fast Reactors, Bariloche, Argentina, 1-5 October 2012. Available at: [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-10-01-10-05-WS-NPTD/7.5\\_Vasile\\_ASTRID.pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-10-01-10-05-WS-NPTD/7.5_Vasile_ASTRID.pdf)
14. Gavrilov P.M., Khaperskaya A.V., Fedorov Yu.S. e.a. Complete Testing of SNF Reprocessing Technology for EDS in the Hot Cells. Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Conf. Global 2011. Rep. 501241.
15. Dekusar V.M., Egorov A.F., Korobejnikov V.V. e.a. Modelirovanie raboty mezhdunarodnogo yadernogo toplivnogo centra [Simulation of the International Nuclear Fuel Center Operation]. Preprint SSC RF-IPPE-3213, Obninsk, 2012. 14 p. (in Russian)
16. Ganev I.H., Lopatkin A.V., Orlov V.V. Radiacionnyj balans pri razvitii yadernoj energetiki s BREST-1200 i VVEER-1000 [Radiation Balance in Nuclear Power Growth with BREST-1200 and VVEER-1000 Reactors]. *Atomnaya energiya*. 2001, vol. 91, iss. 5, pp. 337–342.
17. Adamov E.O., Orlov V.V. A radical approach needed for a nuclear future in Russia. *Nuclear Engineering International*. 1992, vol. 37, no. 454, pp. 42–44.
18. Annual Energy Outlook 2013 with Projections to 2040. US Energy Information Administration. Available at: [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2013).pdf) (pp.71–72).
19. The Future of Nuclear Power: A Global and Regional Outlook. H-Holger Rogner, A. McDonald. Available at: [http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/NP\\_Future\\_KeynoteRognerMcDonaldFeb09.pdf](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/NP_Future_KeynoteRognerMcDonaldFeb09.pdf)

20. Orlov V.V. Kakim dolzhno byt' vremya udvoeniya bystryh reaktorov? [What should be the doubling time of fast reactors?]. *Atomnaya energiya*. 1971, vol. 31, iss. 3, pp. 195–197.

21. Orlov V., Slesarev I., Zaritsky S. e. a. The Theoretical Possibility of Doubling Time Reduction in FR by Using Heterogeneous Configurations of Various Types of Fuel. Proc. on Conf. Fast Reactor Physics, IAEA-SM-244/76, vol. 2, Vienna: IAEA, 1980, pp.469–480.

22. Alekseev P.N., Asmolov V.G., Gagarinskij A.Yu. e.a. O strategii razvitiya yadernoj energetiki Rossii do 2050 g. [Strategy of the development of nuclear energy in Russia until 2050]. *Atomnaya energiya*. 2011, vol. 111, iss. 4, pp. 183–196.

### Authors

Kagramanyan Vladimir Semyonovich, Director Adviser, FSUE «SSC RF-IPPE»,  
Cand. Sci. (Engineering).  
E-mail: kagramanyan@ippe.ru

Korobeynikov Valerij Vasil'evich, Principal Scientist of Department, FSUE «SSC RF-IPPE»,  
Dr. Sci. (Engineering), Professor.  
E-mail: korob@ippe.ru

Rachkov Valery Ivanovich, Research Supervisor, FSUE «SSC RF-IPPE»,  
Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding member of the Russian  
Academy of Science.  
E-mail: vrachkov@ippe.ru