

Научно-технологическое прогнозирование — инструментарий оценки стратегии инновационного развития двухкомпонентной атомной энергетики

doi 10.26310/2071-3010.2019.250.8.004



А. В. Путилов,
д. т. н., профессор,
декан
avputilov@mephi.ru



В. П. Кучинов,
доцент



В. Н. Червяков,
к. х. н., доцент



Д. С. Смирнов,
к. э. н., доцент

НИЯУ МИФИ

Двухкомпонентная атомная энергетика (ДАЭ) с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах (тепловые реакторы — ТР, быстрые реакторы — БР) — инновационное направление развития перспективных энергетических систем. Рассмотрено современное состояние разработок российских технологий БР, как одной из ядерных систем, составляющей элемент ДАЭ, а также технологическая и экономическая готовность ДАЭ к коммерческому внедрению. Показано, как на экспертных моделях с анализом иерархий возможно оценить перспективы потенциального экспорта ядерного энергоблока с БР, включая экспорт установок замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) при развитии ДАЭ в мире, и подтверждена возможность использования математического моделирования такого экспорта. Экспорт ТР в настоящее время широко осуществляется и вопросов не вызывает. В итоге предложен подход к углубленному анализу роли и места БР в российском ядерном экспорте с установками ЗЯТЦ или без них, при реализации двухкомпонентной ядерной энергетической системы в мире, и сформулированы предложения по обоснованию сроков и экономики создания нового инновационного сектора мирового энергетического рынка.

Ключевые слова: атомная энергетика, реакторы на быстрых нейтронах, замкнутый ядерный топливный цикл, анализ иерархий, аналитические сети, ядерный экспорт.

Введение

В современную эпоху цифровой трансформации реального сектора экономики анализ и оценка инновационного развития сложных инженерных систем, к которым, безусловно, относится атомная энергетика, требуют использования нового инструментария. Мировой атомный рынок — поле экономического соперничества как отдельных стран, так и транснациональных корпораций, включая мировые энергетические альянсы крупнейших корпораций. При этом, преимуществом в этом соперничестве обладает тот, у кого разработан стратегический подход к мирному использованию атомной энергии как в масштабах своей страны, так и в мире. В отечественной практике с принятием в 2014 г. Федерального закона «О стратегическом планировании в Российской Федерации» все более широко распространяются методики научно-

технологического прогнозирования (статья 22 упомянутого закона) как формат инструментария оценки инновационных изменений. При этом, сами бизнес-схемы рыночной реализации объектов использования атомной энергии, в частности апробированных АЭС с ТР, развиваются и совершенствуются. Например, появился подход, который четко выражается словосочетанием: «строй–владей–эксплуатируй» (АЭС «Аккую» в Турции), который требует долгосрочного прогнозирования потребностей в электроэнергии. Следовательно, при стратегическом планировании инновационного развития энергетических систем, даже в одной стране, необходимы обработка и анализ больших данных как об энергетических потребностях на длительную перспективу (многие десятки лет), так и об инженерных возможностях удовлетворения этих потребностей с учетом вклада ядерной энергетики, включая появление новых энергетических

ядерных систем и потребления различных типов ядерного топлива. Все аналитические действия, связанные с таким анализом, можно охарактеризовать как бизнес-информатику [1]. Бизнес-информатика, зародившаяся в университетской среде как направление образовательной подготовки, сегодня выходит в научную сферу как методология экспертного обоснования решений подобных сложных энергетических и международных проблем. Демонстрация конкурентоспособности новой технологической платформы двухкомпонентной ядерной энергетики с замыканием ядерного топливного цикла и реакторами на тепловых и быстрых нейтронах — задача научно-технологического прогнозирования, в котором бизнес-информатика может сыграть роль мощного инструментария и методического комплекса.

1. Особенности научно-технологического инновационного развития в атомной энергетике

Двухкомпонентная атомная энергетика подразумевает совместное функционирование реакторов на тепловых и быстрых нейтронах с обязательным замыканием ядерного топливного цикла. При этом все ее элементы предполагают инновационное развитие. Для формирования перспективных рыночных оценок мирового развития ДАЭ необходимо рассмотрение современного состояния этой проблемы. При этом, если перспективы инновационного развития ТР-систем в определенной степени просматриваются, например, реакторы с водой под давлением со сверхкритическими параметрами, то в области БР-технологий и ЗЯТЦ такие перспективы еще требуют своего осмысления. В этой связи в г. Томске 11-12 октября 2018 г. состоялась отраслевая конференция «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах» Госкорпорации «Росатом» [2], где были подведены промежуточные итоги более чем пятилетней напряженной работы над проектом «Прорыв». Фактически можно говорить о формировании основ новой технологической платформы атомной энергетики с замыканием ядерного топливного цикла и реакторами на быстрых нейтронах.

Стратегия развития атомной энергетики в длительной перспективе опирается на следующие постулаты и ожидания достижения основных целей:

- безопасность и экологическая приемлемость перспективной атомной энергетической системы;
- принципиальная двухкомпонентность перспективной атомной энергетики с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах;
- экспорт высоких технологий в производстве тепловой и электрической энергии на АЭС и их топливном обеспечении, открытость результатов разработок для мирового атомного рынка.
- формирование в рамках ДАЭ широкомасштабной мировой атомной энергетики, конкурентоспособной по отношению к другим видам генерации энергии.

Переход к двухкомпонентной структуре атомной энергетики на базе тепловых и быстрых реакторов с замыканием ядерного топливного цикла является

ключевым направлением стратегии развития атомного энергопромышленного комплекса (АЭПК) Госкорпорации «Росатом», которая при этом должна учитывать зарубежные тенденции в этой сфере. Например, в рамках международного форума «Генерация-4» ведущие страны — разработчики ядерных технологий выработали требования к реакторам нового четвертого поколения. Среди шести ядерных технологий, выбранных для совместного развития, четыре — это различные типы технологий БР и замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). В рамках международного проекта «ИНПРО» под эгидой МАГАТЭ были сформулированы требования пользователей к инновационным ядерно-энергетическим системам, удовлетворяющим принципам устойчивого развития. Исследования в рамках ИНПРО также подтвердили важность развития технологий БР и ЗЯТЦ как основы двухкомпонентной атомной энергетики ближайшего будущего. При этом основные российские конкуренты (Китай, Индия, Южная Корея, ЕС) на сегодняшний день пока говорят только о развитии отдельного компонента системы — БР и необходимости снижения объемов облученного ядерного топлива (ОЯТ), не связывая пока БР и традиционные реакторы на тепловых нейтронах (например, типа ВВЭР или РWR) в единую систему с ЗЯТЦ.

Российские специалисты, обосновывая эффективность двухкомпонентной атомной энергетики, имеют значительный научный задел для этого:

- опыт эксплуатации быстрых натриевых реакторов (в частности, БН-350, БН-600 и БН-800);
- опыт эксплуатации быстрых реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) на атомных подводных лодках;
- опыт эксплуатации завода по переработке облученного ядерного топлива на ФГУП «ПО «Маяк».

Дополнительно к этому принципиально новой является разрабатываемая сегодня энергетическая система с замыканием ядерного топливного цикла и реакторами на быстрых нейтронах, так называемый проект «Прорыв», который предусматривает создание ядерных энерготехнологий нового поколения. В ближайшие годы на площадке Сибирского химического комбината в Томской области планируется создать опытно-демонстрационный энергокомплекс (ОДЭК) в составе реактора на быстрых нейтронах типа БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и замыкающего его ядерный топливный цикл пристанционного завода, который включает в себя модуль по переработке облученного смешанного уран-плутониевого (нитридного) топлива, модуль изготовления новых твэлов и ТВС из регенерированного облученного топлива и модуль утилизации радиоактивных отходов (БР с ПЯТЦ). Проект «Прорыв» разрабатывается в рамках федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения», которая реализуется вплоть до 2020 г. На сегодняшний день в девяти центрах ответственности этого проекта заняты порядка двух тысяч высококвалифицированных специалистов. В основном это сотрудники ведущих научных, проектных и производственных организаций российской атомной отрасли. Основные инновационные возмож-

ности развития данной энергетической системы при реализации этого проекта:

- исключение тяжелых аварий АЭС с данным типом реактора (реактивностные аварии, аварии с потерей охлаждения, пожары, взрывы), требующих эвакуации населения;
- замыкание ядерного топливного цикла для полного использования энергетического потенциала уранового сырья (включение в топливный цикл урана-238);
- последовательное приближение к радиационно-эквивалентному захоронению РАО, что означает захоронение в земные пласты отходов с той же (удельной) радиоактивностью, что и извлеченное ранее из недр урановое сырье;
- технологическое усиление режима нераспространения ядерного оружия (не требуется изотопное обогащение урана, коэффициент воспроизводства реакторной установки близок к 1, потенциально при производстве нового топлива из переработанного ОЯТ не выделяется плутоний);
- приведение уровня капитальных затрат при сооружении АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, по крайней мере, до уровня АЭС сравнимой мощности на тепловых нейтронах;
- обеспечение конкурентоспособности атомной энергетики в сравнении с другими видами энергогенерации (газовая генерация, ВИЭ и пр.);
- обеспечение масштабного развития российской атомной энергетики к концу столетия на существующей минеральной ресурсной базе (фактически, ЗЯТЦ создает базу для крупномасштабной ядерной энергетики);
- переработка ОЯТ, включая ранее накопленные тепловыми реакторами его объемы, сжигание плутония и других радиоактивных элементов в БР дает предпосылки для окончательного решения проблемы радиоактивных отходов и создания условия для более безопасной жизни.

Двухкомпонентная атомная энергетика — приоритетное направление развития атомной отрасли в нашей стране, но реализация такой энергетической системы в достаточном масштабе возможна только на мировом атомном рынке. Опыт строительства реакторов АЭС на тепловых нейтронах, широко используемый сегодня, необходимо дополнить компетенциями по замыканию ядерного топливного цикла с участием в нем БР. Следовательно, необходимо формировать соответствующую мировую ядерную инфраструктуру. Прежде всего, необходимо говорить о создании центров по переработке ОЯТ и изготовлению из него смешанного уран-плутониевого топлива для БР и ТР, которые будут размещаться в ограниченном числе стран. Также необходимо говорить о создании системы транспортировки ОЯТ, соответствующей системы учета и контроля ядерных материалов, используемых в ДАЭ, их физической защиты. Кроме того, необходимо будет учитывать возможность эффективного осуществления гарантий МАГАТЭ на всех установках, входящих в ДАЭ, а также необходимость заключения международных правовых документов о гарантиях

предоставления услуг в области ядерного топливного цикла, включая поставки свежего топлива и обращения с ОЯТ.

Научно-технологические прогнозные оценки показывают, что долгосрочное инновационное развитие мировой ядерной энергетики может быть обеспечено созданием в период двадцатых-сороковых годов текущего столетия первых промышленных энергокомплексов (ПЭК) на базе реакторов на быстрых нейтронах, обеспечивающих замыкание ядерного топливного цикла АЭС с реакторами на тепловых нейтронах. Российская атомная отрасль способна обеспечить реализацию следующих инноваций:

- АЭС с РУ БН-1200, обеспечивающими конкурентоспособности АЭС с реакторами типа ВВЭР;
- АЭС с РУ БР-1200, реализующим конкурентоспособность с ПГУ и ВИЭ
- технологическое сокращение расходов природного урана в несколько раз и темпа роста запасов ОЯТ с внедрением БР и установок, реализующих ЗЯТЦ;
- поэтапное использование технологий переработки ОЯТ при достижении экономической целесообразности (соотношение перспективных цен уранового сырья и хранения ОЯТ, обеспечение ядерным топливом мирового парка реакторов различных типов и пр.).

2. Обеспечение политической и общественной приемлемости развития двухкомпонентной атомной энергетики

Широкомасштабное развитие двухкомпонентной атомной энергетики в мире невозможно без обеспечения ее политической и общественной приемлемости как в странах, в которых она будет развиваться, так и мире в целом.

Основные пути достижения политической приемлемости двухкомпонентной атомной энергетики состоят в обеспечении того, чтобы данная энергопромышленная система:

- исключила накопление выделенного плутония в ядерном топливном цикле и, как максимум, обеспечила исключение возможности выделения чистого плутония при переработке ОЯТ;
- обеспечила минимизацию времени нахождения выделенного плутония вне реакторной установки в процессе его обращения в ядерном топливном цикле.
- позволила принципиально решить проблему высокоактивных РАО, желательно, с использованием ограниченного числа хранилищ РАО.

Средствами достижения заявленных целей является обеспечение следующих технических параметров будущего промышленного энергетического комплекса:

- обеспечение баланса наработки плутония и его потребления соотношением реакторов на тепловых и быстрых нейтронах;
- гибридная переработка облученного ядерного топлива реакторов на быстрых нейтронах в технологической цепочке рефабрикации;

- совершенствование международной нормативно-правовой базы, разработка новых средств контроля и мониторинга в рамках МАГАТЭ.

Общественная приемлемость наряду с вопросами безопасности базируется на долговременной (в течение нескольких поколений) конкурентоспособности той или иной энергетической технологии. Новая технологическая платформа с двухкомпонентной атомной энергетикой дает такую возможность благодаря сырьевой устойчивости (полное воспроизводство делящихся нуклидов в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах и переход к закрытому или «замкнутому» ядерному топливному циклу), а также реализации инновационных технологических подходов:

- исключение и упрощение за счет тяжелого жидкометаллического теплоносителя ряда систем безопасности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах;
- снижение материалоемкости при упрощении конструкции реакторных установок в серийном исполнении;
- снижение топливной составляющей за счет «самообеспечения» ядерным топливом.

К росту общественной приемлемости новых проектов ведет также и актуализация вопросов цифровизации, необходимость которой уже ни у кого не вызывает сомнений. Экономика всего мира вступила в эпоху серьезных преобразований, в эпоху четвертой промышленной революции. За последнее время вопросам формирования цифровой экономики и внедрения основных принципов «индустрии 4.0» во всех сферах деятельности уделяется значительное внимание на всех уровнях: правительственном, законодательном, исполнительном и, конечно же, отраслевом. Госкорпорация «Росатом» является одним из лидеров отечественной цифровой трансформации, в атомной отрасли накоплены уникальные компетенции по разработке цифровых решений самого разного профиля — расчетных кодов, систем управления проектами и разработкой (Multi-D, ЕИП ПН «Прорыв»), корпоративных ИТ-решений и т. д. Несмотря на это, ведется большая работа по разработке и развитию портфеля цифровых продуктов для вывода их на новые, в том числе международные, рынки, а также для повышения эффективности цифрового сопровождения традиционных бизнесов Госкорпорации «Росатом», к которым относится атомная энергетика.

3. Метод анализа иерархий и аналитические сети — инструментарий инновационной бизнес-информатики

В научно-технологическом прогнозировании оценить перспективы инновационного энергетического развития на базе новой технологической платформы способны только высококвалифицированные эксперты, которых необходимо тщательно подобрать и мотивировать. Но только соответствие современным информационным подходам позволит сделать экспертную деятельность эффективной и достаточно достоверной. В современной бизнес-информатике (поскольку мирное использование атомной энергии —

высокотехнологичный бизнес) имеется немало путей и технологий обеспечения достоверности и эффективности экспертной деятельности. Одним из таких путей является использование метода аналитических сетей (МАС) с обработкой экспертных заключений и пошаговым описанием процессов принятия сложных решений [3] на базе иерархических моделей (метод анализа иерархий — МАИ).

Применяя метод МАС/МАИ можно получить результаты, недостижимые при использовании только математической логики при экспертном научно-технологическом прогнозировании и обработке только вербальных суждений. В технологиях МАИ и МАС можно обрабатывать цифровые оценки экспертных предпочтений, в то время как обычная логика позволяет получать только порядковые предпочтения на основе вербальных оценок. В принятии инновационных решений следует четко понимать различия между иерархическими и сетевыми структурами: иерархия состоит из уровней в порядке убывания важности. Элементы каждого уровня сравниваются по доминированию или влиянию относительно элементов соседнего верхнего уровня. Ветви иерархических структурных решений направлены от главной цели (например, коммерциализации технологий двухкомпонентной атомной энергетике) вниз, даже если элементы нижних уровней влияют на элементы более высоких уровней [4-6]. Влияние — это особый вид взаимодействия при формировании принятия инновационных решений, направление связей сверху вниз стимулирует проявление влияния элементов нижних уровней иерархии на те уровни, что расположены выше. Эксперты могут оценить результаты разработки элементов технологии новой технологической платформы и при обработке их оценок методами МАС/МАИ могут быть получены обоснованные и аргументированные рекомендации.

Знание экспертами технологических деталей позволяет формировать аргументированные суждения. В частности, в проекте «Прорыв» предусмотрено исключение аварий с потерей охлаждения и с разгоном реактора на мгновенных нейтронах. Интегральная конструкция реакторной установки позволяет локализовать течи теплоносителя в объеме корпуса и исключить осушение активной зоны. Это исключает аварии, требующие эвакуации населения. Будет освоена технология свинцового теплоносителя, что обеспечивает основы внутренне присущей безопасности новой технологической платформы. Разработан технологический регламент эксплуатации системы технологии свинцового теплоносителя применительно к реакторной установке БРЕСТ-ОД-300, разработаны конструкции оборудования системы (массообменные аппараты, фильтры теплоносителя, датчик водорода в газе, аэрозольные фильтры и пр.), средство контроля качества теплоносителя прошло приемочные испытания, а также успешно проведены испытания натурного макета диспергатора газа. Все эти данные экспертным методом могут быть переведены в прогнозные оценочные суждения.

При анализе уровня разработки технологии новой технологической платформы можно привести перечень кодов, используемых для обоснования проекта

РУ БРЕСТ-ОД-300, освоенное лабораторное, опытное производство СНУП-топлива для РУ БРЕСТ и реакторов типа БН, а также реакторные испытания экспериментальных сборок со СНУП-топливом. Показана экологическая безопасность новой технологической платформы и оценена экологическая эффективность захоронения РАО. Переработка ОЯТ БР для рецикла невыгоревшего урана и плутония открывает возможность решения проблемы отходов в перспективной атомной энергетике путем выбора оптимальных подходов к обращению с различными компонентами долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО).

Обоснованы три основных технологических решения по обеспечению политической приемлемости и экологической обоснованности замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ):

- пирохимическая переработка ОЯТ быстрых реакторов для сокращения длительности выдержки ОЯТ перед его переработкой и для исключения выделения чистого плутония при его переработке;
- трансмутация минорных актинидов в быстрых реакторах для обеспечения радиационного баланса между добываемым топливным сырьем и захораниваемыми радиоактивными отходами (РА).

Экспертные оценки показывают, что сырьевая устойчивость новой технологической платформы и переход к замкнутому ядерному топливному циклу обеспечивает долговременную конкурентоспособность инновационного развития атомной энергетике. Все типы БР в ЗЯТЦ позволяют сменить сырьевую базу атомной энергетике с ограниченного ресурса урана-235 (0,7% природного урана) на практически неограниченный уран-238 (99,3%), значительная часть которого находится на складах и не нуждается в повторной добыче (отвальный уран при обогащении). Например, реакторы на быстрых нейтронах (БР) на 1 ГВт (эл.) потребляют в год 0,7 т отвального урана, по сравнению с примерно 190 т природного урана в реакторах на тепловых нейтронах типа ВВЭР при открытом ЯТЦ. Такая сырьевая база открывает перспективы масштабного использования атомной энергетике для решения проблем устойчивого развития.

Научно-технологический прогноз перспектив развития атомной энергетике и анализ подходов в России и других странах к перспективам развития мирного использования атомной энергии показывает на мировом атомном рынке наличие двух основных концепций:

- развитие атомной энергетике на базе реакторов на тепловых нейтронах с открытым ядерным топливным циклом;
- формирование замкнутого ядерного топливного цикла с вводом реакторов на быстрых нейтронах, обеспечивающих воспроизводство ядерного топлива для нужд ДАЭ.

Перспективная и крупномасштабная атомная энергетике на длительную перспективу может реализоваться только при втором подходе. При этом наиболее перспективной стратегией является соблюдения баланса производства и потребления плутония.

Научно-технологическое прогнозирование позволяет определить инновационные перспективы

новых технологических элементов путем экспертного анализа. Технологические элементы новой технологической платформы развития атомной энергетике, которые уже сегодня имеются на высоком уровне разработанности и технологической готовности, что могут оценить эксперты и оформить свои оценки по методу МАС/МАИ:

- опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК);
- энергоблок с реакторной установкой БРЕСТ ОД-300 со свинцовым теплоносителем;
- модуль фабрикации и рефабрикации плотного ядерного топлива (МФР);
- модуль переработки облученного ядерного топлива (МП);
- энергоблок с реакторной установкой типа БН-1200 (РБН-1200);
- «облицовый проект» промышленного энергокомплекса АЭС с РБН-1200 и технологиями замыкания ядерного топливного цикла.

Для отечественной атомной отрасли необходимо создать аналитическую сеть из высококвалифицированных экспертов, которая способна обосновать различные варианты в системе: «выгоды – возможности – издержки – риски», далее будет использоваться аббревиатура «подход – ВВИР». Фактически должна быть сформирована аналитическая система ВВИР с обратной связью, которая способна будет определить приоритеты возможных альтернатив путем обобщения оценок по «выгодам – возможностям – издержкам – рискам».

4. Системная экономика и двухкомпонентная атомная энергетике: цифровая картина будущего

Возможная динамика структуры генерирующих мощностей АЭС России к концу текущего столетия ориентирует на удвоение или даже возможное утроение выработки доли электроэнергии на АЭС. При этом возможен также значительный объем экспорта ядерных технологий двухкомпонентной атомной энергетике на базе новых технологических разработок. Для научно-технологического прогнозирования необходимо проработать несколько сценарных инновационных вариантов.

На первом этапе можно ограничиться всего двумя сценарными условиями: вероятный и оптимистический. Вероятный масштаб означает лишь поддержание вклада атомной энергетике в общее отечественное производство электроэнергии на уровне 20-25%, без улучшения энергобаланса страны: это стратегия стабилизации без развития. Оптимистический масштаб обеспечивает увеличение вклада атомной энергетике в покрытие спроса на электроэнергию, способствует повышению энергобезопасности страны благодаря снижению зависимости от скудеющих, дорожающих и загрязняющих окружающую среду горючих ископаемых. Это стратегия безопасного устойчивого роста, обеспечивающая «движущую силу перспективы» для атомной отрасли.

Как минимум, для этих сценарных вариантов должны быть детально проанализированы:

- формирование основ двухкомпонентной атомной энергетики с реакторами на тепловых (например, типа ВВЭР) и быстрых нейтронах (типа БН);
- полный переход на новую технологическую платформу к концу текущего столетия с технологически обоснованным соотношением реакторов на быстрых нейтронах и других реакторов на тепловых нейтронах различных типов и замыканием ядерного топливного цикла.

В ходе научно-технологического прогнозирования должен быть предусмотрен оценка перспектив экспорта АЭС с реакторами на тепловых нейтронах (до 100% мощностей производства собственных реакторов этого типа (ВВЭР) и до 50-100% для БР, топлива для ВВЭР, топлива первых загрузок и начальных подпиток БР, создание перспективных энергокомплексов. Ядерное топливо как экспортный продукт давно присутствует на мировом атомном рынке, но при замыкании ядерного топливного цикла должны произойти инновационные изменения, требующие аналитического рассмотрения. Топливный баланс развивающейся двухкомпонентной системы атомной энергетики с замыканием ЯТЦ строится с использованием следующих видов ядерного топлива (в соответствии с динамикой изменения действующих мощностей АЭС):

- свежее урановое оксидное топливо реакторов на тепловых нейтронах на основе обогащенного урана для пуска новых энергоблоков и возможной дальнейшей подпитки в последующих перегрузках;
- свежее урановое нитридное или оксидное топливо БР на основе высокообогащенного урана для пуска новых блоков и их начальной подпитки до замыкания собственного ЯТЦ;
- стартовое топливо БР (смешанное нитридное уран-плутониевое – СНУП топливо или МОКС) из «стороннего» плутония на основе продуктов переработки ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах;
- МОКС (смешанное оксидное) для реакторов типа ВВЭР и БР на основе продуктов переработки ОЯТ реакторов типа ВВЭР или БР с частичным замыканием их собственного ЯТЦ;
- регенерированное СНУП или МОКС топливо БР на основе плутония из собственного ОЯТ с коэффициентом воспроизводства около единицы при неограниченном рециклировании;
- регенерат урана из ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах (приоритетно наряду с отвальным ураном) в качестве сырьевой добавки при изготовлении СНУП или МОКС топлива БР, а также для дообогащения при производстве уранового топлива БР и реакторов типа ВВЭР.

Динамика топливопотребления АЭС России включает поставки топлива для экспортируемых АЭС (но без учета регенерированного топлива экспортированных РБН, производимого в пристанционном ЯТЦ за рубежом). В системе с полным переходом на новую технологическую платформу при росте мощностей АЭС к концу текущего столетия примерно до 120 ГВт (э) полное топливопотребление к концу века остается близким к современному уровню благодаря экономичности БР, постепенно заменяющих ВВЭР в двухкомпонентной системе. Для поддержания продолжающегося роста парка БР в конце текущего века, при прекращении поступления плутония из ОЯТ реакторов типа ВВЭР, до 12-15% топливопотребления БР может быть обеспечено замыкающим урановым топливом. Экономика ядерного топливного цикла в перспективе также потребует кардинальных изменений с учетом его участия в обращении с РАО и обеспечении радиационно-эквивалентного его захоронения.

Для анализа ДАЭ как складывающегося мирового рынка атомной энергетики требуется определить потенциальных потребителей новых технологических продуктов на уровне государств и поставщиков технологий и услуг в рамках ДАЭ учетом международного режима нераспространения ядерного оружия. Структура целей, которые подлежат определению и оценке при решении этой проблемы, приведена в табл. 1.

Выявление положительных и отрицательных аспектов возможных решений экспорта в рамках ДАЭ позволит выбрать наиболее перспективный вариант из возможных альтернатив. Анализ должен быть всесторонним, что может быть достигнуто идентификацией всех факторов рассматриваемой проблемы, относящихся к трем главным аспектам: экономике, политике и безопасности. Кроме того, исследование должно быть объективным и строго базироваться на критериях и приоритетах, которые будут рассматриваться в анализе возможных решений. Будущее исследование должно включать четыре основных этапа, которые кратко сформулированы в табл. 2.

Описанные процедуры анализа иерархий могут быть выполнены с привлечением экспертов, которые способны оценить научно-технологические аспекты новой технологической платформы атомной энергетики и их влияние на проблемы экономики, политики и безопасности. Зачастую, только качественные (вербальные) оценки возможны на первом этапе: от «очень высокие» до «очень низкие». По международному опыту применения методов аналитических систем и анализа иерархий (МАС/МАИ) составлена и описана в литературе лингвистическая шкала, которая может быть использована на первом этапе работ. При этом

Таблица 1

Структура целей аналитической системы для оценки ДАЭ как мирового рынка атомной энергетики

ВЫГОДЫ	ВОЗМОЖНОСТИ
Распространение отечественных технологий, новые рабочие места на российских предприятиях, влияние на долгосрочную экономическую стратегию в энергетике	Создание новых альянсов крупных игроков на мировом атомном рынке, рост общественной и политической приемлемости атомной энергетики, рост авторитета отечественной атомной отрасли
ИЗДЕРЖКИ	РИСКИ
Появление новых конкурентов в мирном использовании атомной энергии, дополнительные обременения при соблюдении международного режима нераспространения ядерного оружия	Создание международной напряженности при неправильных и недостаточно обоснованных решениях по экспорту новой технологической платформы, финансовые потери при срыве контрактов

Этапы анализа ДАЭ как мирового рынка атомной энергетики

Этап	Краткое содержание работ в рамках конкретного этапа
1. Постановка задачи	Формирование структуры экспортных решений и выявление основных показателей их качества, построение иерархии для возможных выгод, издержек, возможностей и рисков, упорядочение приоритетов критериев в этих иерархиях
2. Развитие методики парных сравнений	В рамках попарных сравнений получение значений приоритетов критериев и альтернатив, анализ экспертных суждений о предпочтительности одного элемента по сравнению с другим, систематизация оценок интенсивности предпочтений на базе фундаментальной шкалы
3. Построение иерархии факторов	Оценка важности выгод, возможностей, издержек и рисков, установление приоритетов факторов экономики, безопасности и политики, разбиение факторов на детализирующие их подфакторы
4. Синтез глобальных приоритетов	Расчет и анализ глобальных приоритетов альтернатив умножением приоритетов каждой альтернативы на нормированные приоритеты остальных элементов в каждой иерархии, суммирование полученных оценок, ранжирование альтернатив и формулирование научно-технологических прогнозных предпочтений

приоритеты лингвистических оценок формулируются следующим образом: очень высокие – 0,42; высокие – 0,26; средние – 0,16; низкие – 0,1; очень низкие – 0,06. Обобщение результатов синтеза глобальных приоритетов альтернатив предусматривает также оценку устойчивости выводов при изменении приоритетов. Это обеспечивает всесторонний анализ чувствительности решений, в процессе которого исследуется влияние возможных возмущений приоритетов выгод, издержек, возможностей и рисков на результат выбора, а также влияние совместных возмущений приоритетов критериев и альтернатив.

Система управления знаниями, которая успешно развивается в отечественной атомной отрасли [7], может быть дополнена инструментарием МАС/МАИ на примере решения задач развития ДАЭ. Управление знаниями об экономических аспектах создания новых энергетических систем стало основой новой дисциплины в НИЯУ МИФИ «Экономика цифрового проектирования и конструирования в атомной отрасли», которая представляет собой развитие полученных ранее компетенций, знаний умений и навыков при изучении инженерных дисциплин на экономические аспекты реализации новых разработок в атомной отрасли, в частности, двухкомпонентную систему атомной энергетики. Как естественное развитие бизнес-информатики дисциплина включает четыре вложенных модуля», предусмотрены как тематические лекции, так и практикумы, призванные закрепить полученные знания и выработать умения решать экономические задачи на примерах проектов и систем реализации объектов использования атомной энергии. Описанные выше подходы к научно-технологическому прогнозированию развития сложных инженерных систем нашли отражение в курсе, четко воспринимаются студентами.

Накопленный при этом опыт показывает, что формирование аналитической сети целесообразно начать с поиска и привлечения экспертов, владеющих необходимыми знаниями в атомной энергетике, включая вопросы экономики и ядерного нераспространения, их экспресс-обучения основам анализа иерархий и формирования навыков командной работы. Представляется, что такой подход обеспечит на базе работ по анализу экспорта технологических продуктов и услуг в рамках ДАЭ учет международного режима ядерного нераспространения, выполненных настояще-му времени, с целью выявления вопросов, требующих дополнительного решения.

Заключение

Реализацию стратегии развития двухкомпонентной атомной энергетики в России и помощь мировому сообществу в осознании перспективности такого развития может обеспечить научно-технологическое прогнозирование. Россия – технологический лидер в мире, и наша задача – помочь многим странам мира при реализации устойчивого развития атомной энергетики. Для многих государств уже реализуемая атомная энергетика – это апробированная, чистая, безопасная и экономичная технология, которая будет играть важную роль в достижении энергетической безопасности и целей устойчивого развития в XXI веке – необходимо найти механизмы международной кооперации для новой технологической платформы развития атомной энергетики. Необходимо распространить опыт МЦИ МБИР и ИТЭР для международной экспансии ПН «Прорыв». Для прорывного движения вперед нам всем необходимо объединить усилия. Имеющиеся в России, а также в других странах экспериментальные установки, научную инфраструктуру, профессиональные компетенции целесообразно сложить вместе на взаимовыгодных условиях.

Список использованных источников

1. А. В. Путилов, А. Г. Воробьев, М. Н. Стриханов. Инновационная деятельность в атомной отрасли. Кн. 1. Основные принципы инновационной политики». М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2010. 384 с.
2. Отраслевая конференция «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах» Госкорпорации «Росатом», г. Томск, 11-12 октября 2018 г. <http://www.innov-rosatom.ru/events/proriv/otraslevaya-konferentsiya-zamykanie-toplivnogo-tsikla-yadernoy-energetiki-na-baze-reaktorov-na-bystr>.
3. А. В. Путилов, М. Н. Стриханов, Г. В. Тихомиров. Подготовка кадров для развивающейся атомной энергетики // «Известия вузов. Ядерная энергетика», 2019, № 2. С. 208-218.
4. Т. Л. Саати. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. М.: Издательский дом «Либроком», 2010. 367 с.
5. Н. А. Ильина, А. В. Путилов. Анализ становления, текущее состояние и перспективы развития основных участников мирового инновационного атомного рынка // Инновации, 2012, № 9. С. 10-15.
6. Н. А. Ильина, А. В. Путилов. Инновационная экономика, инновационное бизнес-образование и инновационные компетенции // Инновации, 2016, № 1. С. 11-17.

- Н. А. Ильина, А. В. Путилов, И. А. Баранова. Аналитические подходы к выбору инструментария для формирования системы управления знаниями // *Инновации*, 2016, № 4. С. 14-20.
- Федеральный закон от 28.06.2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации».

Scientific and technological forecasting — a tool for evaluating the innovative development strategy of two-component nuclear power

A. V. Putilov, doctor of technical sciences, professor, dean.

V. P. Kuchinov, associate professor.

V. N. Chervyakov, candidate of chemical sciences, associate professor.

D. S. Smirnov, candidate of economic sciences, associate professor.
(NRNU MEPhI)

Two-component nuclear energy with thermal and fast neutron reactors (fast reactors — FR) is an innovative direction

in the development of promising energy systems. The current state of the development of Russian FR technologies is considered. Technological and economic readiness for commercial implementation. It is shown how, using expert models with hierarchy analysis, it is possible to assess the prospects of exporting a nuclear power unit, including the export of nuclear fuel cycle facilities, and the possibility of using mathematical modeling for export issues of a nuclear fuel is confirmed. As a result, an approach was developed for an in-depth analysis of the role and place of FR in Russian nuclear exports with or without nuclear fuel cycle installations in the implementation of a two-component nuclear energy system in the world, and proposals were formulated to justify the timing and economy of creating a new innovative sector of the global energy market.

Keywords: nuclear energy, fast neutron reactors, closed nuclear fuel cycle, hierarchy analysis, analytical networks, nuclear export.

#EdCrunchSpb: «Когнитивная революция в образовании»

Место проведения: ул. Казанская, 3 (4-й корпус РГПУ им. А. И. Герцена). Начало в 9.30. <https://edcrunchspb.ru>.

С 17 по 19 октября 2019 г. в Санкт-Петербурге пройдет международная конференция EdCrunchSpb об инновационных подходах в образовании. Организатором мероприятия выступает РГПУ им А. И. Герцена совместно с Университетом НТИ 20.35 и НИТУ «МИСиС».

Темой мероприятия станет «Когнитивная революция в образовании». Общая цель EdCrunchSpb: наметить пути и направления смены парадигмы системы образования в соответствии с требованиями времени.

За последние 50 лет нейро- и когнитивные науки сильно продвинулись в понимании человеческой природы. И сегодня нам доступно множество научных открытий о природе человека и принципах работы мозга, которые мы должны использовать. EdCrunchSpb — это конструктивный диалог ученых и практиков сферы образования с целью перестройки педагогических практик на основе последних технологических разработок и достижений науки.

Pre-day 17 октября, начало в 9.30

Авторы прогрессивных образовательных практик, идеологи и методологи неформального образования соберутся вместе, чтобы обсудить современные вызовы, которые побуждают к пересмотру привычной образовательной парадигмы, а также наметить возможные пути развития и поддержки современных неформальных образовательных технологий и проектов. Сессия будет проходить в режиме параллельного включения по всей стране — представители неформального и инновационного образования из других регионов удаленно подключатся к вступительной части, а затем проведут проектные сессии на своих площадках одновременно с Санкт-Петербургом.

Пленарная секция 18 октября, начало в 9.30

Проектирование нового подхода к построению процесса и оценки результатов обучения на основе современных научных теорий и разработок. Диалог ведущих ученых — представителей когнитивных и нейро-наук, практиков, новаторов и представителей власти и бизнеса.

17-19 октября работа шести треков EdCrunchSpb

Участники конференции познакомятся с прикладными технологиями, основанными на открытиях когнитивных наук, которые обеспечивают качественный прорыв любому образовательному процессу, раскрывая потенциал познавательных способностей взрослого или ребенка в соответствии с реалиями сегодняшнего дня. Спикеры конференции EdCrunchSpb - всемирно признанные профессионалы в области цифровых и нейротехнологий, разработчики новейших моделей образования, специалисты по оценке качества обучения и проектированию образовательных пространств. Интерактивная работа с этими уникальными носителями революционных идей в рамках мастерских и рабочих групп, проходящих в рамках шести треков EdCrunchSpb, гарантирует каждому участнику совершенно новое понимание процессов обучения как детей, так и высококвалифицированных сотрудников, экономию времени и ресурсов в планировании обучения. Особое внимание будет уделено новым технологическим проектам в сфере образования, которые будут презентованы в рамках питч-сессии.

Аккаунты EdCrunchSpb в соцсетях:

Instagram: edcrunchspb2019, ВКонтакте: edcrunchspb_2019, Facebook: 2019edcrunchspb.

Контакты для СМИ: Наталия Павлова

+7(915) 244 4212,

natapavlova@outlook.com.