

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО КРИТЕРИЮ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

В.И. Усанов*, С.А. Квятковский*, А.А. Андрианов**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033 Россия, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1

**НИЯУ «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31



Представлено описание подхода к оценке ядерно-энергетических систем на основании интегрального показателя, характеризующего их уровень устойчивости, и приводятся результаты сравнительной оценки вариантов этих систем с различным набором реакторов и установок ядерного топливного цикла. Системы характеризуются достижением определенных ключевых событий в шести предметных областях: экономика, безопасность, ресурсы, обращение с отходами, нераспространение и общественная поддержка. Достижение определенных ключевых событий рассматривается на временном интервале до 2100 г., а сами ключевые события оцениваются по их вкладу в достижение целей устойчивого развития.

Показано, что ядерно-энергетические системы на основе открытого ядерного топливного цикла с тепловыми реакторами и уран-оксидным топливом не получают высоких оценок по интегральному показателю устойчивого развития даже в случае решения вопроса с изоляцией отработавшего ядерного топлива в геологических формациях. Постепенное замещение части тепловых реакторов быстрыми реакторами и замыкание ядерного топливного цикла приводят к достижению во многих областях оценки характеристик, близких к максимальным требованиям устойчивого развития, и существенному повышению показателя устойчивого развития ядерно-энергетических систем.

Ключевые слова: устойчивое развитие, быстрые реакторы, замкнутый ядерный топливный цикл, ядерно-энергетическая система.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках международного проекта ИНПРО, осуществляемого МАГАТЭ [1], разработана методология, которая на основе концепции устойчивого развития ООН определяет цели повышения устойчивости ядерной энергетической системы (ЯЭС) в областях, существенно влияющих на эту оценку: экономике, ядерной безопасности, ресурсообеспечении, обращении с РАО, нераспространении, физической защите установок, инфраструктуре. При этом метод общей оценки ЯЭС с позиций устойчивого развития как единого процесса, включающего в себя эти области, не разработан. Между тем, именно идея гармоничного сочетания экономики, социальной сферы, экологии, институциональной струк-

© В.И. Усанов, С.А. Квятковский, А.А. Андрианов, 2017

туры лежит в основе данной концепции как новой объективной реальности общественного развития.

Целесообразность создания метода интегральной оценки ЯЭС с единым количественным показателем устойчивого развития, без которого само понятие становится неоднозначным, а сравнительная оценка ЯЭС с различной конфигурацией реакторного парка и установок ядерного топливного цикла невозможной, неоднократно обсуждалась на совещаниях МАГАТЭ/ИНПРО. Авторами данной работы, участвовавшими в этих дискуссиях, предложен подход к определению агрегированного показателя устойчивого развития.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Почти все эксплуатируемые в настоящее время в мире ЯЭС используют освоенные технологии тепловых реакторов и открытого ядерного топливного цикла. Эти системы отвечают существующим требованиям надзорных органов, обеспечивают гарантированное энергоснабжение по приемлемым ценам и положительно воспринимаются большей частью населения. Вместе с тем, нельзя считать, что эти системы достигли совершенства. В самом начале века на политическом уровне была поставлена задача создания технологической и институциональной базы безопасной, экономически конкурентоспособной крупномасштабной ядерной энергетики с практически неограниченной обеспеченностью топливными ресурсами, с надежно закрытыми каналами распространения ядерного оружия. Фактически в общем виде были сформулированы требования устойчивого развития атомной отрасли, которые впоследствии были детализированы в методологии ИНПРО, разработанной в МАГАТЭ [1]. Основные положения этой методологии служили руководством при разработке методики расчета интегрального показателя устойчивого развития ЯЭС. Близкий по содержанию подход к разработке перспективных реакторных установок принят и в международном проекте «Поколение IV» [2], что свидетельствует об объективном характере требований, предъявляемых к ЯЭС в вопросах повышения устойчивости.

Развитие технологий и инфраструктуры, расширение сотрудничества являются механизмами комплексного улучшения характеристик ЯЭС в шести предметных областях, рассмотренных в исследовании: экономике, безопасности, ресурсах, обращении с отходами, нераспространении и общественной поддержке. Расчет показателя устойчивого развития ЯЭС потребовал большого объема информации по реакторным технологиям и технологиям ЯТЦ, по составу реакторов и инфраструктуре ЯТЦ, по стратегии и сценариям развития энергетического сектора, по возможным вариантам международного сотрудничества в сфере ядерной энергетики.

Достижение целей системного улучшения характеристик ЯЭС в нескольких областях является сложной долгосрочной задачей. На международном уровне пути решения этой задачи обсуждаются в проекте ИНПРО «Дорожные карты перехода к глобальной устойчивой ЯЭС» [3]. Переход к ЯЭС, отвечающей требованиям устойчивого развития, рассматривается в этом проекте как поэтапный процесс, в котором выделены важные промежуточные задачи (ключевые события), являющиеся индикаторами развития ЯЭС. Показана целесообразность определения в каждой из предметных областей метрик, характеризующих близость прогнозируемого на различных этапах дорожной карты состояния ЯЭС к конечным целям повышения устойчивости, принимаемым за 100% выполнения полной программы. Идея интегральной оценки уровня устойчивого развития ЯЭС во времени заключается в том, чтобы агрегировать метрики в отдельных предметных областях.

Достижение ключевых событий связано с выполнением конкретных программ, требующих, как правило, больших затрат трудовых и финансовых ресурсов. Имеются отдельные публикации по ожидаемым затратам на реализацию этих программ и другие данные, которые являются исходной информацией для оценки значимости решения про-

межуточных задач относительно конечной цели создания ЯЭС, полностью отвечающей требованиям устойчивого развития. В различных исследованиях [4 – 6] рассматриваются вопросы повышения устойчивости ЯЭС, затрагивающие одну или несколько предметных областей. Приводится качественная оценка состояния ЯЭС на определенный момент времени в данной области. Однако в настоящее время количественная оценка показателя устойчивого развития системы, рассматриваемая в динамике на временном промежутке до конца века и позволяющая отслеживать изменение показателей эффективности во времени, отсутствует.

В работе обсуждается разработанный вариант метрики, характеризующей устойчивость ЯЭС в предметных областях, на основании оценки численных значений вклада ключевых событий в достижение конечных целей устойчивого развития в этих областях. Из-за неполноты информации по данному вопросу данный подход следует рассматривать лишь как первое приближение к решению поставленной задачи. Тем не менее, анализ на чувствительность показал устойчивость получаемых результатов по оценке интегрального показателя устойчивости ЯЭС в широком диапазоне вариаций численных значений индикаторов ключевых событий при сохранении порядка следования и относительной значимости этих событий. На этом основании был сделан вывод о том, что даже при достаточно высокой неопределенности в оценке численных значений значимости ключевых событий интегральный показатель устойчивости ЯЭС обеспечивает возможность анализа основных тенденций развития ЯЭС на большом временном горизонте.



Рис. 1. Процесс достижения устойчивого развития ЯЭС

Естественно, что исходным пунктом любой программы повышения уровня показателей эффективности ЯЭС является выполнение существующих в отрасли требований (рис. 1). Ядерную энергетику на освоенных технологиях и современной законодательной и институциональной базе можно рассматривать как ЯЭС первого уровня устойчивого развития.

Ко второму уровню могут быть отнесены системы, включающие в себя инновационные компоненты, разрабатываемые и осваиваемые на основе эволюционного подхода. На третьем уровне находятся системы, направленные на радикальное обновление технологической и институциональной платформы ядерной энергетики.

Для рассматриваемых в работе предметных областей, существенно влияющих на оценку ЯЭС, определены ключевые события и доли в процентах, которые показывают меру выполнения полной программы устойчивого развития при достижении этих ключевых событий.

- Область безопасности:
 - соответствие существующим национальным нормам и рекомендациям МАГАТЭ – 60%;
 - соответствие требованиям, выдвигаемым для реакторов поколения 3+: вероятность большого выброса радиоактивности в атмосферу $< 10^{-6}$, использование пассивных систем безопасности, наличие контайнмента и ловушки расплава, возможность безопасного останова в течение 72-х часов с момента начала аварии и т.п. [1, 7] – 80 %;
 - соответствие требованиям, предъявляемым к реакторным технологиям поколения 4: вероятность повреждения активной зоны не более, чем в реакторах поколения 3+, отсутствие необходимости отселения людей при авариях, наличие пассивных автоматических систем останова реактора и т.п. [8 – 9] – 90%;
 - детерминистическое исключение тяжелых аварий [10] – 100%.
- Область экономики:

- приемлемые показатели на этапе освоения инновационных технологий – 20%;
- в группе источников (ветер, солнце и др.) с высокой стоимостью электроэнергии, включаемых в систему для диверсификации источников и обеспечения энергетической и экологической безопасности – 40%;
- на уровне средних показателей на рынке электроэнергии – 80%;
- наилучшие экономические показатели в энергетическом секторе – 100%.
- Область ресурсов:
 - ОЯТЦ с реакторами на тепловых нейтронах, в котором на энергопроизводство используется менее 1% природного урана – 0%;
 - вовлечение в топливный цикл обедненного или регенерированного урана, однократный рецикл плутония в тепловых реакторах – 20%;
 - двухкомпонентная система тепловых и быстрых реакторов с многократным рециклом плутония – 80%;
 - использование энергетического потенциала всех делящихся материалов – 100%.
- Область обращения с отходами:
 - приреакторное хранение ОЯТ – 0%;
 - централизованное долгосрочное хранение ОЯТ – 40%;
 - окончательное геологическое захоронение ОЯТ – 80%;
 - захоронение отходов без плутония и минорных актинидов [11] – 100%.
- Область нераспространения:
 - не все государственные обязательства, договоры и политика в отношении нераспространения делящихся материалов отвечают международным нормам – 0%;
 - государственная политика отвечает международным нормам, обеспечивается низкая привлекательность ядерных материалов и ядерных технологий, трудность осуществления диверсий, возможность их оперативного обнаружения [1, 10] – 40%;
 - выполняется предыдущий пункт и обеспечивается баланс производства и потребления делящихся материалов в ЯТЦ – 100%.
- Область общественного мнения и политики:
 - отсутствие поддержки большей части населения и правительства – 0%;
 - неустойчивая поддержка ядерной энергетики, общественные дискуссии значительного масштаба о целесообразности использования ядерной энергетики – 20%;
 - положительное отношение большей части населения и правительства – 40%;
 - полная поддержка со стороны населения и правительства – 100%.

Показатель устойчивого развития ЯЭС $f_l(t_R)$ в предметной области l для временного промежутка t_R рассчитывается путем сложения долей выполнения задач устойчивого развития по ключевым событиям для всех входящих в ЯЭС составляющих:

$$f_l(t_R) = \sum_i x_{li}(t_R) \cdot \frac{N_i(t_R)}{N_{ЯЭС}(t_R)}, \quad (1)$$

где $x_{li}(t_R)$ – мера устойчивости i -й составляющей ЯЭС согласно достигнутому ключевому событию в предметной области l для временного промежутка t_R ; $N_i(t_R)$ – установленная электрическая мощность i -й составляющей ЯЭС на t_R ; $N_{ЯЭС}(t_R)$ – установленная электрическая мощность всей ЯЭС на t_R .

Интегральный показатель устойчивого развития ЯЭС $SI(t_R)$ рассчитывается путем суммирования показателей устойчивого развития ЯЭС $f_l(t_R)$ всех предметных областей:

$$SI(t_R) = \sum_l^{L=6} f_l(t_R) \cdot w_l(t_R), \quad (2)$$

$w_l(t_R)$ – весовой коэффициент, определяющий значимость предметной области l на t_R ; L – количество предметных областей ($L = 6$).

$$\sum_{l=1}^L w_l = 1. \quad (3)$$

Всем предметным областям приданы одинаковые весовые коэффициенты ($w_l = 1/6$), чтобы показать результат, достигнутый показателем устойчивости ЯЭС, без влияния предпочтений к той или иной предметной области. Рассмотрение поведения численного показателя устойчивости проводилось на трех временных интервалах t_R : $t_1 \in [2015 - 2034 \text{ гг.}]$; $t_2 \in [2035 - 2054 \text{ гг.}]$; $t_3 \in [2055 - 2100 \text{ гг.}]$.

В настоящее время модель реализована с использованием электронных таблиц MS Excel, куда занесены необходимые данные по состоянию ЯЭС на рассматриваемых промежутках времени.

РАССМАТРИВАЕМЫЕ ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Моделируются четыре варианта развития ядерно-энергетической системы, установленная мощность которой к концу века достигнет 150 ГВт(э). Темп роста мощностей соответствует, в среднем, вводу 1,5 ГВт(э) в год с учетом замещения выбывающих мощностей. Рассматриваются вопросы оценки системы с учетом общих требований концепции устойчивого развития без привязки к конкретным условиям той или иной страны. Для каждого варианта во всех областях оценки определена в процентах мера выполнения программы устойчивого развития (рис. 2).

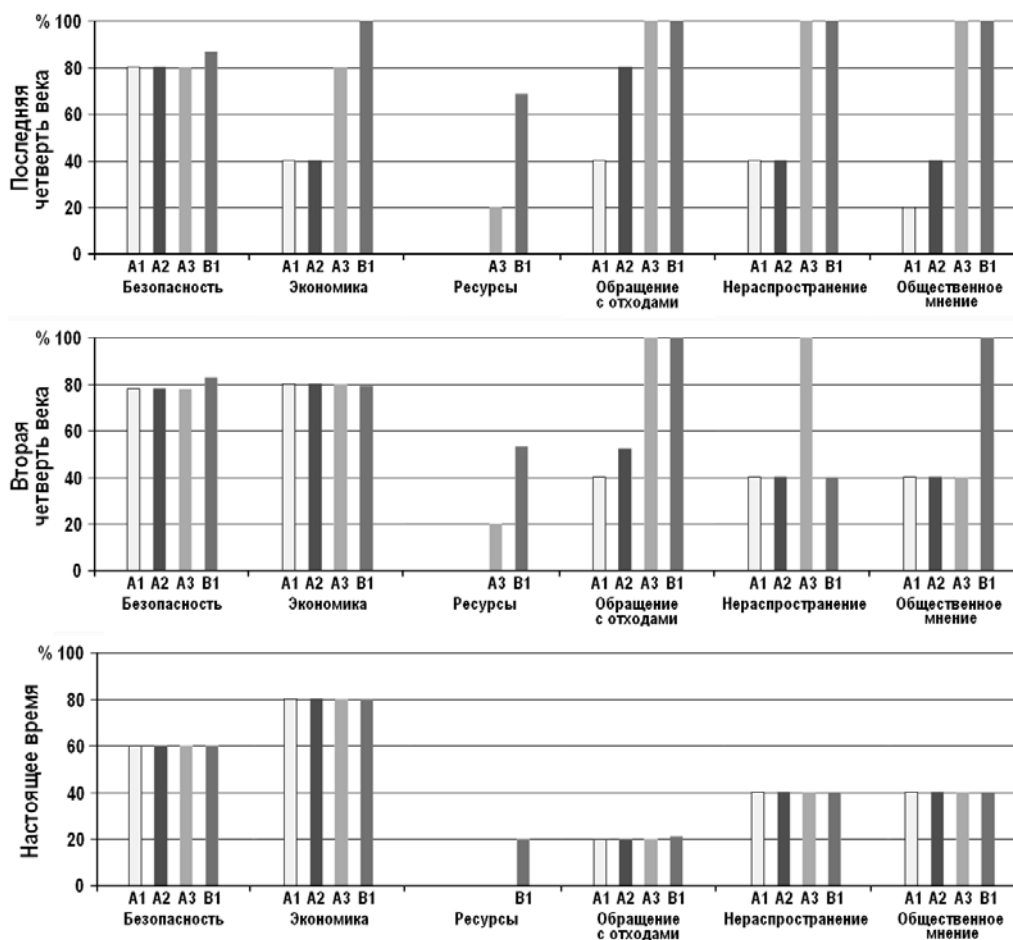


Рис. 2. Оценка выполнения программы устойчивого развития в рассматриваемых вариантах ЯЭС до конца века, %

Вариант А1 соответствует экстенсивному развитию атомной энергетики в странах, которые не планируют замыкание ЯТЦ и откладывают решение вопроса, связанного с накоплением ОЯТ. ЯЭС А1 состоит из тепловых реакторов типа PWR на уран-оксидном топливе, работающих в открытом ядерном топливном цикле. Нарращивание мощностей происходит за счет ввода усовершенствованных реакторов того же типа. ОЯТ реакторов поступает в пристанционное хранилище, а затем – в централизованное сухое хранилище. Значительных изменений в используемых технологиях нет. Сотрудничество в международной области ограничивается услугами внешнего рынка на начальной стадии ЯТЦ.

На основании анализа имеющихся публикаций принято, что граничные условия для этого варианта изменятся во второй половине века. Ожидается, что прогнозируемый рост цен на природный уран и затрат на хранение ОЯТ приведет к ухудшению экономических показателей и в соответствии с приведенным в предыдущем разделе подходом к оценке меры выполнения программы устойчивого развития снизит рейтинг варианта в области экономики с 80 до 40% (см. рис. 2).

Предсказания относительно отношения общественности к тому или иному варианту ЯЭС представляют исключительно трудную задачу и имеют большую неопределенность. Неуправляемое накопление ОЯТ и плутония в нем в условиях отсутствия четких планов по обращению с ОЯТ уже сегодня вызывают беспокойство и протесты общественности. Авторы работы допускают, что эти настроения будут усиливаться в будущем, особенно в том случае, если будет продемонстрирована возможность безопасного и экономически приемлемого решения проблемы накопления ОЯТ. Поэтому для варианта А1 принимается предположение об утрате общественной поддержки в последней четверти века (см. рис. 2).

Вариант А2 отличается от варианта А1 в части обращения с отработавшим ядерным топливом: во второй половине века страны, реализующие этот вариант, постепенно вводят объекты окончательной геологической изоляции ОЯТ или отправляют ОЯТ в центры по их геологической изоляции, созданные на международной основе. В рамках данного исследования предполагается, что достижение этого ключевого события позволит снять остроту проблемы общественной приемлемости этого варианта. Вероятно, это достаточно оптимистическое предположение, поскольку захоронение плутония и минорных актинидов требует убедительного обоснования экологической безопасности объектов изоляции ОЯТ на сотни тысяч лет, а в последнее время, кроме того, требуется еще и обоснование безопасности по критериям нераспространения делящихся материалов. Тем не менее, принятое предположение позволяет оценить максимальный потенциал открытого ЯТЦ при реализации в стране его заключительной стадии.

Вариант А3. В этом варианте так же, как и в А1, стратегия использования ядерной энергии базируется на принципе минимизации инфраструктуры ЯТЦ, но при этом предполагается, что страны, реализующие вариант А3, тесно сотрудничают со странами-поставщиками реакторных технологий и услуг ЯТЦ, включая услуги по возврату ОЯТ для последующей переработки и использования. Результаты такой политики должны существенно сказываться на оценке потенциала варианта в отношении выполнения программы устойчивого развития (см. рис. 1).

Вариант В1 представляет собой двухкомпонентную систему, состоящую из тепловых и быстрых реакторов с развитой инфраструктурой замкнутого топливного цикла, детально исследуемую в настоящее время в России [11, 12] и во Франции [13]. Тепловые реакторы работают частично на уран-оксидном топливе, частично – на смешанном уран-плутониевом (МОКС) топливе. В варианте В1 ввод быстрых натриевых реакторов и усовершенствованных легководных реакторов с частичным использованием МОКС-топлива осуществляется с 2030 г. Во второй половине века вводятся тепловые и быстрые реакторы с характеристиками, улучшенными по ряду показателей [10]. Предпола-

гается, что варианты А3 и В1 реализуются на законодательной основе, допускающей возможность предоставления и получения всего спектра услуг ЯТЦ.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчета показателя устойчивого развития вариантов ЯЭС по формуле (1) представлены на рис. 3. Предложенный динамический подход к оценке индекса устойчивого развития ЯЭС дополняет традиционные методики сравнения вариантов ЯЭС на основе методов дискретного анализа решений [например, 14 – 20].

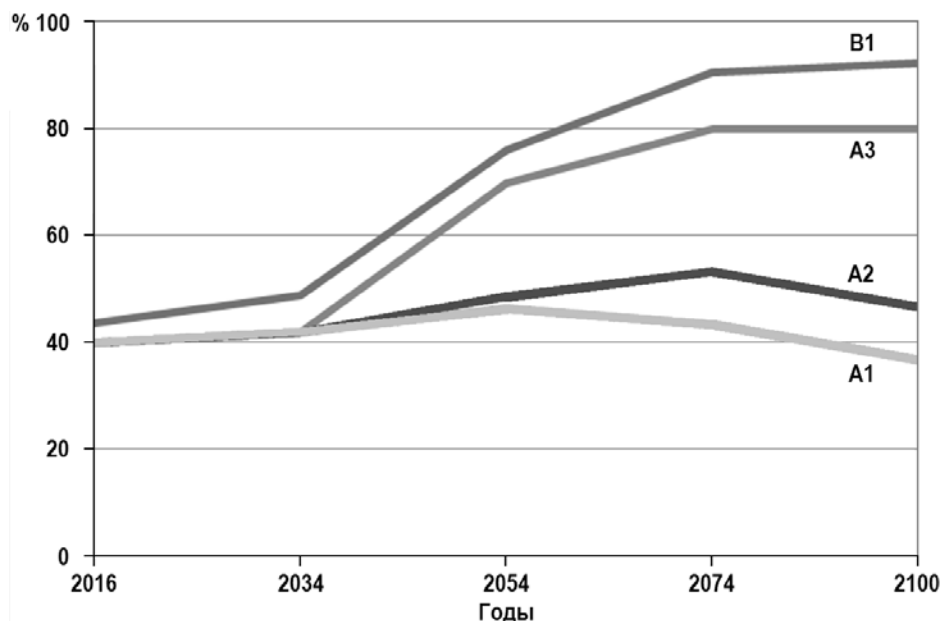


Рис. 3. Расчетный индекс показателя устойчивого развития вариантов ЯЭС

Показатель устойчивого развития варианта А1, моделирующий ЯЭС с открытым ЯТЦ, медленно растет примерно до середины века за счет замещения реакторов второго и третьего поколений реакторами поколения 3+ с улучшенными характеристиками безопасности, оптимизации экономических показателей использования топлива, строительства промежуточных хранилищ ОЯТ и осуществления других мер в рамках эволюционного подхода. Однако этих мер становится недостаточно для стабилизации показателя во второй половине века в том случае, если реализуются постулированные при разработке сценария варианта А1 факторы роста цен на природный уран и затрат на обращение с ОЯТ, рисков распространения делящихся материалов и снижения общественной поддержки этого варианта.

Предполагаемое в работе решение вопроса по окончательной геологической изоляции ОЯТ значительно повышает показатель устойчивости варианта А2 по сравнению с вариантом А1 во второй половине века (рис. 3). Однако даже при оптимистическом взгляде на отношение общественности к захоронению ОЯТ с содержащимися в нем высокоактивными отходами и делящимися материалами абсолютный рост показателя устойчивого развития ЯЭС в варианте А2 незначителен из-за отсутствия возможности продвижения к целям устойчивого развития в других предметных областях оценки: исключается перспектива радикального снижения радиотоксичности отходов на обозримом горизонте времени и экономии ресурсов природного урана, сохраняется необходимость осуществления дорогостоящих мер гарантий нераспространения делящихся материалов при изоляции ОЯТ.

Более высокий уровень устойчивого развития достигается, когда страна, реализую-

щая открытый цикл (вариант АЗ), отсылает ОЯТ в страну, обладающую инфраструктурой замкнутого цикла (вариант В1), для его переработки и утилизации делящихся материалов. Быстрые реакторы, используя плутоний (а впоследствии и минорные актиниды) из переработанного топлива реакторов на тепловых нейтронах, снижают объемы накопления ядерных отходов и их радиотоксичность, что существенно сказывается на показателях устойчивости в области обращения с отходами. Кроме того, они позволяют кардинально расширить ресурсную базу ядерной энергетики и развить ее мощность в любых необходимых масштабах. Оба эти фактора являются критическими для концепции устойчивого развития и отражаются в оценке показателя устойчивости, характеризующего это развитие (см. рис. 1). Для осуществления перспективных вариантов АЗ, В1 требуется урегулирование сложных вопросов национального и международного законодательства, как и вопросов экономической целесообразности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определенный в работе метод расчета и построенная на его основе модель использованы для расчета интегрального показателя устойчивого развития на заданных временных интервалах прогнозирования для нескольких альтернатив ядерно-энергетической системы (ЯЭС) в сценариях, построенных до конца века. С использованием этих инструментов получена сравнительная оценка вариантов перехода ядерной энергетики к устойчивому развитию. Показано, что ЯЭС на основе открытого ЯТЦ с тепловыми реакторами и урановым топливом характеризуется невысоким уровнем показателя устойчивого развития, а решение вопроса с отработавшим топливом тепловых реакторов путем их захоронения в геологическом хранилище не решает всех проблем открытого ядерного топливного цикла по критериям устойчивого развития. Ввод в систему быстрых реакторов и замыкание ЯТЦ по плутонию в тепловых и быстрых реакторах приводят к существенному повышению показателя устойчивого развития. Расширение международного сотрудничества на заключительной стадии ЯТЦ в варианте утилизации делящихся материалов ОЯТ страны-пользователя в стране-поставщике, обладающей технологиями быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ, дает значительный вклад в устойчивое развитие обоих стран-партнеров.

Литература

1. International Atomic Energy Agency, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. INPRO Manual. IAEA-TECDOC-1575, Rev. 1. Vienna (2008). Электронный ресурс http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1575_web.pdf
2. GEN-IV International Forum, Annual Report 2015, p.135.
3. ROADMAPS Collaborative Project Web Page. Электронный ресурс <https://www.iaea.org/INPRO/CPs/ROADMAPS/index.html>
4. Егоров А.Ф., Коробейников В.В., Поплавская Е.В., Фесенко Г.А. Оценка чувствительности модели развития ядерной энергетики России к возможным изменениям выбранных экономических параметров // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 53-61.
5. Егоров А.Ф., Коробейников В.В., Поплавская Е.В., Фесенко Г.А. Расчетные исследования сценариев развития глобальной АЭ в предположении неоднородного развития мира // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 3. – С. 88-95.
6. Клименко А.В., Миронович В.Л. Идеология и проблемы системно-экономической оптимизации ЯЭУ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 1. – С. 149-157.
7. Goldberg S.M., Rosner R. Nuclear Reactors: Generation to Generation. – American Academy of Arts & Sciences. – 2011. – PP. 6-11. Электронный ресурс <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>
8. OECD, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2014. – 14 p.

9. IRSN, Overview of Generation IV (Gen IV) Reactor Designs // Safety and Radiological Protection Considerations, 2012. – PP. 13-15.
10. White Book of Nuclear Power. Ministry of the Russian Federation for Atomic Energy. General editor E.O. Adamov, Moscow 2001. 128 p.
11. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле. Под редакцией академика РАН Н.Н. Пономарева-Степного. – М.: Техносфера, 2016 г. – 253 с.
12. *Kagramanyan V., Usanov V., Kalashnikov A., Kvyatkovskii S.* Medium-term nuclear industry prospects associated with synergistic LWR/SFR system and related closed nuclear fuel cycle, Global 2015 September 20-24, 2015. – Paris (France), Paper 5115.
13. *Le Mer J., Garzenne C., Lemasson D.* «EDF research scenarios for closing the Plutonium cycle», International conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe technologies and Sustainable Scenarios, FR13, Paris, 4-7 March (2013).
14. *Kvyatkovskii S., Usanov V., Andrianov A.* Assessment of a nuclear energy system based on the integral indicator of sustainable development. Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), 26-29 June 2017, Yekaterinburg, RF, Paper ID IAEA-CN245-194.
15. *Andrianov A., Kuptsov I., Murogov V.* Towards sustainable nuclear power development // ATW: International Journal for Nuclear Power. – 2014. – Vol. 59. – Iss. 5. – PP. 287-293.
16. *Kuznetsov V., Fesenko G., Andrianov A., Kuptsov I.* INPRO activities on development of advanced tools to support judgement aggregation for comparative evaluation of nuclear energy systems. // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2014. – Vol. 2014. – Article ID 910162. – 15 p. DOI: 10.1155/2014/910162.
17. *Schwenk-Ferrero A., Andrianov A.* Nuclear Waste Management Decision-Making Support with MCDA. // Science and Technology of Nuclear Installations, – 2017. – Vol. 2017. – Article ID 9029406. – 20 p., DOI: 10.1155/2017/9029406.
18. *Schwenk-Ferrero A., Andrianov A.* Comparison and Screening of Nuclear Fuel Cycle Options in View of Sustainable Performance and Waste Management. // Sustainability. – 2017. – Vol. 9(9). – P. 1623.
19. *Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I.* Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. // Energies. – 2015. – Vol 8. – PP. 3679-3719.
20. *Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Svetlichny L.I., Utianskaya T.V.* Performance and sustainability assessment of nuclear energy deployment scenarios with fast reactors: advanced tools and application. Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), 26-29 June 2017, Yekaterinburg, RF, Paper ID IAEA-CN245-007.

Поступила в редакцию 14.04.2017 г.

Авторы

Усанов Владимир Иванович, главный научный сотрудник, д-р техн. наук
E-mail: vouss@ippe.ru

Квятковский Степан Александрович, аспирант
E-mail: skvyatkovskiy@ippe.ru

Андрианов Андрей Алексеевич, доцент, к.т.н.
E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

UDC 621.039.543.6

ELABORATION OF APPROACH TO NUCLEAR ENERGY SYSTEMS ASSESSMENT BY CRITERION OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Usanov V.I.*, Kviatkovskii S.A.*, Andrianov A.A.**

*JSC «State Scientific Centre of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

** NRNU «MEPhI», 31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

The purpose of this paper is to demonstrate an approach to the assessment of nuclear energy systems based on the integral indicator of sustainability and the comparative evaluation of various nuclear energy systems with a different set of nuclear reactors and fuel cycle facilities. The proposed approach to the assessment of nuclear energy systems is based on the methodology developed within the IAEA INPRO project.

Advance of the nuclear energy systems to sustainability is characterized by the achievement of certain key developments in six subject areas of the assessment: economy, safety, resources, waste management, non-proliferation and public support. Achieving of certain key developments is considered as a measure to achieving the goals of sustainable development at several time intervals until the end of century.

It is shown that the nuclear energy systems based on a once-through nuclear fuel cycle with thermal reactors and uranium-oxide fuel does not reach the highest ratings by integral indicator of sustainable development, even in the case of isolation of spent nuclear fuel in the geological formations. The gradual replacement of a part of thermal reactors by fast reactors and the closure of the nuclear fuel cycle leads to a more complete comply with requirements of sustainable development in many areas of the assessment and accordingly to the radical enhancement of sustainability of a two component nuclear energy system. Also, the nuclear energy system with thermal reactors and once-through nuclear fuel cycle can reach high ratings in case of closely cooperates on the front-end and back-end of the nuclear fuel cycle with the countries, which developing fast reactors and closed nuclear fuel cycle.

Key words: sustainable development, fast reactors, closed nuclear fuel cycle, nuclear energy system.

REFERENCES

1. International Atomic Energy Agency, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. INPRO Manual. IAEA-TECDOC-1575, Rev. 1, Vienna (2008). Available at http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1575_web.pdf
2. GEN-IV International Forum, Annual Report 2015, p.135.
3. ROADMAPS Collaborative Project Web Page. Available at <https://www.iaea.org/INPRO/CPs/ROADMAPS/index.html>
4. Egorov A.F., Korobeynikov V.V., Poplavskaya E.V., Fesenko G.A. Assessment of Russia Nuclear Power Development Model Sensitivity Analysis to Possible Changes of Selected Economic Parameters. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 3, pp. 53-61 (in Russian).
5. Egorov A.F., Korobeynikov V.V., Poplavskaya E.V., Fesenko G.A.; Computational studies of global nuclear energy development under the assumption of the worlds heterogeneous development. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 3, pp. 88-95 (in Russian).

6. Klimenko A.V., Mironovich V.L. System and economic optimization problems of NNPs and its ideology. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 1, pp. 149-157 (in Russian).
7. Stephen M. Goldberg and Robert Rosner, *Nuclear Reactors: Generation to Generation*. American Academy of Arts & Sciences, 2011, pp. 6-11. Available at <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>
8. OECD, *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*, 2014, 14 p.
9. IRSN, *Overview of Generation IV (Gen IV) Reactor Designs. Safety and Radiological Protection Considerations*, 2012, pp. 13-15.
10. *White Book of Nuclear Power*. Ministry of the Russian Federation for Atomic Energy. General editor E.O. Adamov, Moscow 2001, 128 p. (in Russian).
11. *The two-component nuclear energy system with thermal and fast reactors in the closed nuclear fuel cycle*. Ed. by of RAS Acad. N. Ponomarev-Stepnoy. Moscow. Technosphere Publ., 2016. 253 p. (in Russian).
12. Kagramanyan V., Usanov V., Kalashnikov A., Kvyatkovskii S. Medium-term nuclear industry prospects associated with synergistic LWR/SFR system and related closed nuclear fuel cycle, *Global 2015 September 20-24, 2015. Paris (France)*, Paper 5115.
13. Le Mer J., Garzenne C., Lemasson D. EDF research scenarios for closing the Plutonium cycle. *International conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe technologies and Sustainable Scenarios, FR13, Paris, 4-7 March (2013)*.
14. Kviatkovskii S., Usanov V., Andrianov A. Assessment of a nuclear energy system based on the integral indicator of sustainable development. *Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), 26-29 June 2017, Yekaterinburg, RF, Paper ID IAEA-CN245-194*.
15. Andrianov A., Kuptsov I., Murogov V. Towards sustainable nuclear power development. *ATW: International Journal for Nuclear Power*. 2014, v. 59, iss. 5, pp. 287-293.
16. Kuznetsov V., Fesenko G., Andrianov A., Kuptsov I. INPRO activities on development of advanced tools to support judgement aggregation for comparative evaluation of nuclear energy systems. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2014, v. 2014, Article ID 910162, 15 pages, 2014. DOI:10.1155/2014/910162
17. Schwenk-Ferrero A., Andrianov A. Nuclear Waste Management Decision-Making Support with MCDA, *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2017, v. 2017, article ID 9029406, 20 pages, DOI: 10.1155/2017/9029406
18. Schwenk-Ferrero A., Andrianov A. Comparison and Screening of Nuclear Fuel Cycle Options in View of Sustainable Performance and Waste Management. *Sustainability*. 2017, v. 9 (9), p. 1623.
19. Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I. Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. *Energies*, 2015, v. 8, pp. 3679-3719.
20. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Svetlichny L.I., Utianskaya T.V. Performance and sustainability assessment of nuclear energy deployment scenarios with fast reactors: advanced tools and application. *Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), 26-29 June 2017, Yekaterinburg, RF, Paper ID IAEA-CN245-007*.

Authors

Usanov Vladimir Ivanovich, Main Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: vouss@ippe.ru

Kviatkovskij Stepan Aleksandrovich, PhD Student

E-mail: skvyatkovskiy@ippe.ru

Andrianov Andrey Alekseevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru