

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И РАНЖИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ТЕПЛОВЫМИ И БЫСТРЫМИ НАТРИЕВЫМИ РЕАКТОРАМИ

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

* АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

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

** НИЯУ «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31



Приводятся результаты многокритериальной сравнительной оценки возможных сценариев развертывания российской ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми натриевыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле (так называемая двухкомпонентная ядерно-энергетическая система). Сопоставление и ранжирование выполнены с учетом рекомендаций и с использованием инструментария МАГАТЭ/ИНПРО для сравнительной оценки ядерно-энергетических систем, включающих в себя средства проведения анализа чувствительности (неопределенностей) в отношении весовых факторов. Рассмотрены 10 возможных сценариев развертывания российской ядерной энергетики с различными долями тепловых и быстрых натриевых реакторов, включая варианты, предполагающие использование МОКС-топлива в ВВЭР. Задействовано восемь ключевых показателей, оцененных по состоянию на 2100 г. и структурированных в трёхуровневое дерево целей. Сравнительная оценка и ранжирование проводились на основе мультиатрибутивной теории ценности. Модель для оценки ключевых показателей разработана с использованием инструмента ядерно-энергетического планирования МАГАТЭ/ИНПРО MESSAGE-NES. Информационную базу исследования составили публикации специалистов из АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ». Представленные результаты продемонстрировали, что существенное повышение устойчивости российской ядерно-энергетической системы при рассмотрении нескольких критериев эффективности системы может быть обеспечено за счет интенсивного развертывания быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и перехода к замкнутому ядерному топливному циклу. Намечены задачи для дальнейшего исследования, решение которых позволит получить более строгие выводы относительно предпочтительных вариантов развития двухкомпонентной ядерно-энергетической системы.

Ключевые слова: тепловые реакторы, быстрые реакторы, замкнутый ядерный топливный цикл, МОКС-топливо, неопределенность, MAVT, MESSAGE-NES.

ВВЕДЕНИЕ

При обсуждении возможных путей развития ядерной энергетики отправным пунктом обычно является вариант экстенсивного развития существующей системы с тепловыми реакторами и открытым ядерным топливным циклом (ЯТЦ) как наиболее освоенных и приемлемых по стоимости на данный момент технологий. Учитывая то, что срок эксплуатации современных энергоблоков с тепловыми реакторами, который достигает в настоящий момент 60-ти лет, а в перспективе благодаря использованию новых материалов возможно будет увеличен и до 100 лет, есть все основания полагать, что тепловые реакторы будут сохранять значительную долю в национальной ядерной энергетике как минимум до конца нынешнего века. Тем не менее, реализация варианта ядерно-энергетической системы (ЯЭС) только с тепловыми реакторами в открытом ЯТЦ не решает накопившихся и ожидаемых в последующих десятилетиях проблем ядерной энергетике и в перспективе приведёт к ухудшению общего положения ядерной энергетике в связи с нарастанием проблем ресурсообеспечения, обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), экономики и рядом других, что неминуемо повлечет ухудшение отношения общественности к ядерным технологиям. Уже сейчас совокупность данных факторов в ряде стран привела к ограничению развития национальных ядерных программ, а в некоторых других даже к полному отказу от использования ядерной энергии.

В РФ в качестве одного из возможных путей решения проблем ядерной энергетики рассматривается развертывание двухкомпонентной ЯЭС, основанной на совместной работе тепловых водо-водяных реакторов и быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Широко обсуждаются возможные конфигурации такой ЯЭС, которые на различных этапах своего развития могут включать в себя тепловые реакторы с урановым оксидным топливом, тепловые реакторы с частичной или полной загрузкой смешанного уран-плутониевого оксидного топлива (МОКС), быстрые натриевые реакторы с МОКС-топливом [1 – 4]. Все входящие в систему реакторы могут быть увязаны единым замкнутым ЯТЦ, в котором продукты переработки ОЯТ одних реакторов используются для производства нового топлива для других реакторов.

Многообразные возможные конфигурации двухкомпонентной ЯЭС имеют определенные сходства и известные различия, достоинства и недостатки, количественно выражающиеся через ключевые показатели эффективности и характеризующие потребление ресурсов, экономику, материальные потоки в ЯТЦ и прочее. В этой связи становится актуальной задача проведения сравнительного анализа и ранжирования наиболее представительных и вероятных сценариев развития национальной двухкомпонентной ядерной энергетике с тепловыми и быстрыми реакторами с использованием методов многокритериальной оценки, что позволит на количественной основе сопоставить сопряженные с каждым из вариантов затраты, риски и выгоды и дать рекомендации относительно наиболее эффективных направлений повышения устойчивости национальной ЯЭС.

В работе приведен пример такого рода анализа с использованием инструментария и рекомендаций МАГАТЭ/ИНПРО, предназначенных для проведения сценарного анализа и сравнительной оценки вариантов развития ЯЭС. Информационную базу исследования составили публикации специалистов из АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для проведения сравнительного анализа и ранжирования сценариев развертывания двухкомпонентной ЯЭС на основе методов многокритериальной оценки необходимо решить три основные задачи [5 – 9]. Во-первых, создать расчетную модель ЯЭС, учитывающую ожидаемые темпы роста производства электроэнергии и описывающую основные элементы промышленной инфраструктуры, включающей в себя ядерные реакторы и предприятия ЯТЦ с заданными технико-экономическими параметрами. Во-вторых, разработать метод оценки ключевых показателей эффективности, характеризующих экономику, потребление урана, необходимые мощности предприятий ЯТЦ, объёмы ОЯТ, РАО, вторичных делящихся материалов в ЯТЦ и т.д. В-третьих, разработать модель поддержки принятия решений.

Модель поддержки принятия решений может быть основана, например, на методах дискретного анализа решений, где в качестве исходных данных используются результаты сценарного анализа – значения ключевых показателей для каждого из рассматриваемых вариантов ЯЭС. Такая модель, будучи дополненной информацией и данными о предпочтениях экспертов и лиц, принимающих решения, позволит выполнить сравнительный анализ и ранжирование рассматриваемых вариантов, а также с учетом результатов анализа чувствительности (неопределенности) по отношению к основным факторам обозначить наиболее эффективные направления повышения устойчивости национальной ЯЭС.

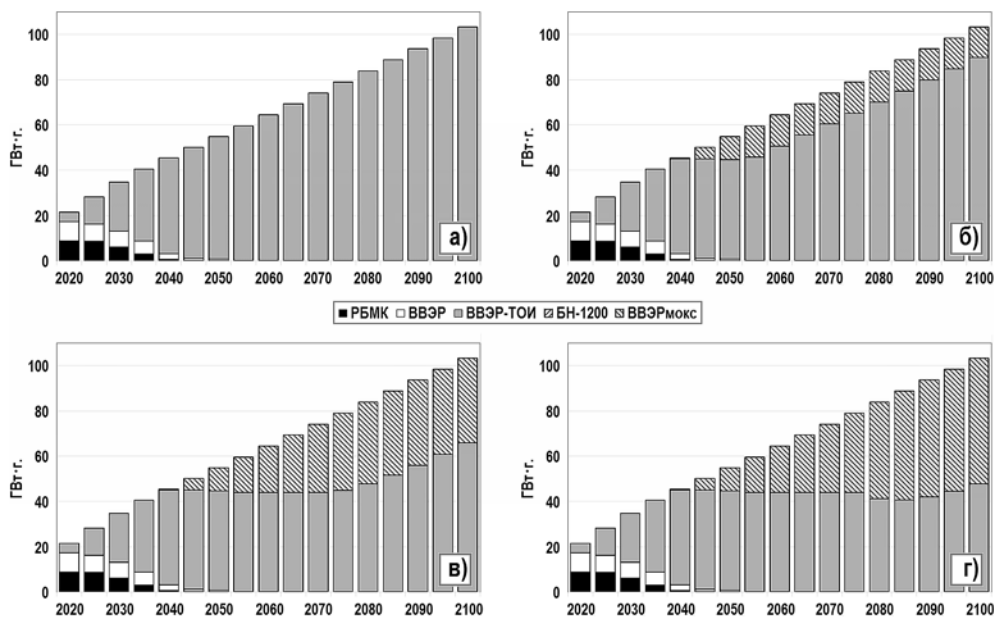


Рис. 1. Сценарии развёртывания национальной ЯЭС: а) ВВЭР(100%); б) ВВЭРмокс(10%); в) ВВЭРмокс(30%); г) ВВЭРмокс(50%)

В ходе выполнения работы с помощью оптимизационной среды ядерно-энергетического планирования МАГАТЭ/ИНПРО MESSAGE-NES [10 – 12] были рассчитаны значения восьми показателей эффективности для десяти экспертным образом отобранных возможных сценариев развёртывания национальной двухкомпонентной ЯЭС, содержащей в различных пропорциях тепловые реакторы (как на урановом топливе, так и с частичной загрузкой МОКС-топлива) и быстрые натриевые реакторы на МОКС-топливе (рис. 1, 2). Для сравнения и ранжирования сценариев был адаптирован расчётный инструмент МАГАТЭ/ИНПРО, предназначенный для сравнительной оценки устойчивости вариантов ЯЭС и проведения анализа чувствитель-

ности (неопределенностей) в отношении весовых факторов [13, 14].

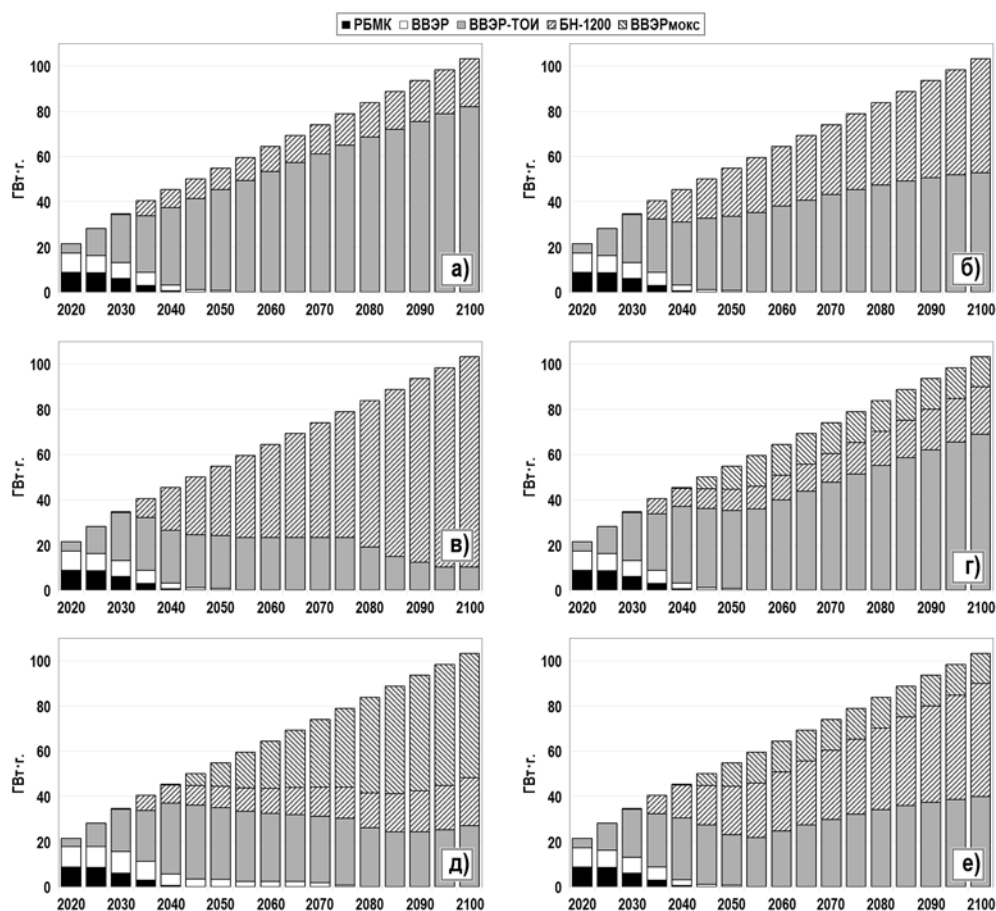


Рис. 2. Сценарии развёртывания национальной ЯЭС: а) БН(20%); б) БН(50%); в) БН(90%); г) ВВЭРмокс(10%)БН(20%); д) ВВЭРмокс(50%)БН(20%); е) ВВЭРмокс(10%)БН(50%)

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

В качестве прогноза роста мощностей ядерной энергетики при проведении сценарного анализа приняты следующие предложения: 2030 г. – 35 ГВт, 2050 г. – 55 ГВт, 2100 г. – 103 ГВт [15]. В качестве кандидатов на ввод в ЯЭС рассматривались реакторы ВВЭР, ВВЭР-ТОИ (модифицированный реактор ВВЭР с повышенной глубиной выгорания), ВВЭРмокс (модифицированный реактор ВВЭР с частичной загрузкой МОКС-топлива) и реакторы БН-1200 на МОКС-топливе. Предполагалось, что ВВЭР и ВВЭР-ТОИ могут быть введены в эксплуатацию начиная с первого года прогнозного периода, БН-1200 – с 2030 г. и ВВЭРмокс – с 2040 г. В таблице 1 представлены рассмотренные в работе десять возможных вариантов развёртывания национальной ЯЭС, которые можно разделить на три группы: открытый ЯТЦ, частично замкнутый ЯТЦ и полностью замкнутый ЯТЦ.

Особенности расчетной модели описаны в [15]. Стоимость услуг предприятий ЯТЦ взята из [1]. Относительно стоимости реакторных установок сделано предположение, что удельные капитальные затраты БН-1200 выше на 10% чем ВВЭР, для которого они составляют 4000 \$/кВт. Норма дисконтирования – 5% [1]. Расчеты проводились с учетом предыстории развития ядерной энергетики в РФ и исходя из предположений, что отсутствуют какие-либо ресурсные и инфраструктурные огра-

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ничения. Структура загрузки предприятий ЯТЦ определяется из решения оптимизационной задачи (минимизация полных дисконтированных затрат на всю программу развития) при условии выхода структуры ЯЭС на указанные в табл. 1 целевые ориентиры. Предполагалось, что возможна переработка ОЯТ всех типов реакторов, включая ОЯТ РБМК. Длительность выдержки ОЯТ перед переработкой для всех типов реакторов принята равной пяти годам. Накопленные к 2015 г. выделенный плутоний (экс-оружейный и энергетический) и плутоний, содержащийся в ОЯТ, представляют ресурс для производства топлива быстрых реакторов.

Таблица 1

Сценарии развертывания национальной ЯЭС

Сценарий	Условное обозначение	Краткая характеристика
Открытый ЯТЦ		
Сценарий 1	ВВЭР(100%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 100%
Частично замкнутый ЯТЦ		
Сценарий 2	ВВЭРмокс(10%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 90%, ВВЭР-ТОИ МОКС – 10%
Сценарий 3	ВВЭРмокс(30%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 70%, ВВЭР-ТОИ МОКС – 30%
Сценарий 4	ВВЭРмокс(50%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 50%, ВВЭР-ТОИ МОКС – 50%
Полностью замкнутый ЯТЦ		
Сценарий 5	БН(20%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 80%, БН – 20%
Сценарий 6	БН(50%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 50%, БН – 50%
Сценарий 7	БН(90%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 10%, БН – 90%
Сценарий 8	ВВЭРмокс(10%)БН(20%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 70%, ВВЭР-ТОИ МОКС – 10%, БН – 20%
Сценарий 9	ВВЭРмокс(50%)БН(20%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 30%, ВВЭР-ТОИ МОКС – 50%, БН – 20%
Сценарий 10	ВВЭРмокс(10%)БН(50%)	В структуре ЯЭС в 2100 г. ВВЭР-ТОИ – 40%, ВВЭР-ТОИ МОКС – 10%, БН – 50%



Рис. 3. Дерево целей

Для проведения сравнительной оценки использовались восемь ключевых показателей, оцененных по состоянию на 2100 г.: интегральные потребности в природном уране, услуги по обогащению урана и по переработке ОЯТ, количества ОЯТ, РАО от переработанного ОЯТ, плутония и обедненного урана в ЯТЦ, приведённая стоимость электро-

энергии (LCOE) (рис. 3). Чем ниже значение показателя, тем выше его оценка в баллах. Все показатели сгруппированы в пять областей оценки (природные ресурсы, инфраструктура ЯТЦ, обращение с отходами, ядерные материалы, экономика), которые объединены в три высокоуровневые цели (использование ресурсов, эффективность ЯТЦ, экономическая эффективность). Значения показателей для рассматриваемых сценариев приведены в табл. 2 (все сценарии являются недоминируемыми, т.е. среди всей совокупности сценариев нет таких вариантов, которые по всему набору показателей были бы хуже, как минимум, одного из оставшихся).

Таблица 2

Ключевые показатели для рассматриваемых сценариев

Сценарий	Интегральное потребление урана, кт	Интегральные потребности в обогащении урана, ктЕРР	Интегральные потребности в переработке ОЯТ, кт т.м.	Количество ОЯТ в 2100 г., кт т.м.	Количество РАО в 2100 г., кт	Количество плутония в ЯТЦ в 2100 г., кт	Количество обедненного урана в 2100 г., кт	LCOE, миллс/кВтч
ВВЭР(100%)	787.65	666.75	0	126.98	0	1.09	1669.03	29.48
ВВЭРмокс(10%)	782.92	662.72	27.36	106.12	26.92	0.84	1658.34	29.89
ВВЭРмокс(30%)	776.18	656.97	71.81	69.11	70.76	0.54	1644.80	30.40
ВВЭРмокс(50%)	772.07	653.46	92.71	51.06	91.42	0.41	1638.11	30.57
БН(20%)	658.10	556.25	12.15	111.54	10.96	1.02	1544.24	29.53
БН(50%)	492.27	414.81	41.77	77.70	38.93	0.91	1384.26	30.22
БН(90%)	284.97	237.99	100.28	13.96	95.37	0.76	1184.07	31.09
ВВЭРмокс(10%)БН(20%)	651.51	550.63	346.08	81.58	46.76	0.77	1531.93	30.29
ВВЭРмокс(50%)БН(20%)	640.97	541.64	126.27	14.46	123.68	0.34	1511.78	31.57
ВВЭРмокс(10%)БН(50%)	470.99	396.66	79.63	44.59	76.26	0.65	1359.36	31.70

Сравнительная оценка и ранжирование сценариев проводились на основе мультиатрибутивной теории ценности (Multi-Attribute Value Theory – MAVT) – использовались аддитивная форма мультиатрибутивной функции ценности и убывающие линейные функции в качестве одноатрибутивных функций ценности для всех показателей эффективности [6 – 8]. В качестве отправной точки при проведении анализа был использован вариант равных весов, предполагающий, что все показатели эффективности имеют одинаковую важность. Такой подход может быть применён при недостатке информации об относительной важности показателей эффективности, что вполне естественно при рассмотрении отдаленной перспективы [13, 16]. При этом оценка, основанная на подходе «равных весов», в сочетании с расширенным анализом чувствительности (неопределенности) к весовым факторам даёт возможность сделать общее заключение о привлекательности сравниваемых вариантов в различных возможных ситуациях.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАНЖИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ВЕСАМ

На рисунке 4 приведены результаты ранжирования сценариев на основе метода MAVT для базового варианта весов (общие баллы сценариев разложены на отдельные составляющие в соответствии с высокоуровневыми целями). По результатам

оценки рассматриваемых вариантов сценарий БН(90%) с долей быстрых натриевых реакторов 90% в структуре ЯЭС в 2100 г. набирает наибольшую сумму баллов для базового варианта весов.

За ним со значительным отставанием по сумме баллов следуют сценарии БН(50%), ВВЭРмокс(10%)БН(50%), БН(20%), ВВЭРмокс(50%)БН(20%). Сценарии ВВЭРмокс(50%), ВВЭРмокс(30%), ВВЭРмокс(10%), ВВЭР(100%) и ВВЭРмокс(10%)БН(20%) набрали наименьшую сумму баллов с незначительной разницей между ними.

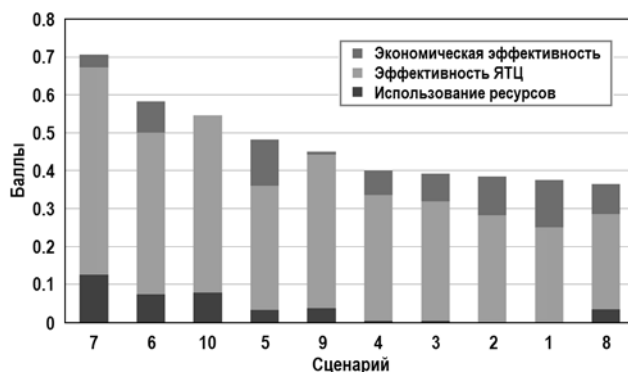


Рис. 4. Результаты ранжирования для базового варианта весов.
Сценарии: 7 – БН(90%); 6 – БН(50%); 10 – ВВЭРмокс(10%)БН(50%); 5 – БН(20%); 9 – ВВЭРмокс(50%)БН(20%); 4 – ВВЭРмокс(50%); 3 – ВВЭРмокс(30%); 2 – ВВЭРмокс(10%); 1 – ВВЭР (100%); 8 – ВВЭРмокс(10%)БН(20%)

Если рассматривать оценки сценариев по каждой высокоуровневой цели, то для цели «Использование ресурсов», очевидно, наилучшими баллами обладает сценарий БН(90%), а наименьшее количество баллов у вариантов ВВЭР(100%) и ВВЭРмокс(10,30,50%). Для цели «Эффективность ЯТЦ» наибольшие баллы также у варианта БН(90%), наименьшие – у ВВЭР(100%) и ВВЭРмокс(10%)БН(20%). Для цели «Экономическая эффективность» наивысшие баллы у ВВЭР(100%), за ним с небольшим отставанием идет БН(20%), а наименьшие баллы для этой цели получили варианты ВВЭРмокс(10%)БН(50%) и ВВЭРмокс(50%)БН(20%). Несмотря на то, что по экономической эффективности сценарий БН(90%) получил не самые высокие баллы, однако лучшие показатели этого сценария по целям «Использования ресурсов» и «Эффективность ЯТЦ» сделали этот вариант в итоге наиболее привлекательным в условиях равных относительных значимостей показателей эффективности. Вариант ВВЭРмокс(10%)БН(50%), предполагающий использование примерно 20% МОКС-топлива в ВВЭР, несмотря на незначительное сокращение объемов потребляемого урана и удорожание ЯТЦ за счёт производства и переработки МОКС-топлива для тепловых реакторов занял третье место в рейтинге. Как следует из табл. 2, особенностью этого варианта, как и других вариантов с использованием МОКС-топлива в ВВЭР, является возможность снижения количества плутония в ЯТЦ.

Описанные результаты ранжирования приведены для базового варианта весов. В то же время очевидно, что имеет место значительная неопределённость в приоритетах развития ЯЭС в долгосрочной перспективе, и, как следствие, весовые факторы характеризуются значительным разбросом. В этой связи представляет интерес оценить, как неопределённость в весах скажется на итоговых баллах рассматриваемых вариантов. Оценка разброса в баллах вследствие неопределённости весов была выполнена в соответствии с методикой, предложенной в одном из исследований, выполненных по программе Департамента энергетики США [17]. Данная методика позволяет ранжировать сценарии в условиях отсутствия информации относительно значимости показателей эффективности и определить вероятность пред-

почтения определенного сценария. Данный метод предполагает, что ничего не известно о приоритетах (весах) и оценивается как ранжировали бы сценарии разные экспертные группы, имеющие различные взгляды на значимость показателей. Эта информация может быть представлена в виде статистических распределений (например, используя диаграмму размаха), а на ее основе можно осуществить выбор наиболее привлекательного сценария, оценить его устойчивость и вероятность его предпочтения.

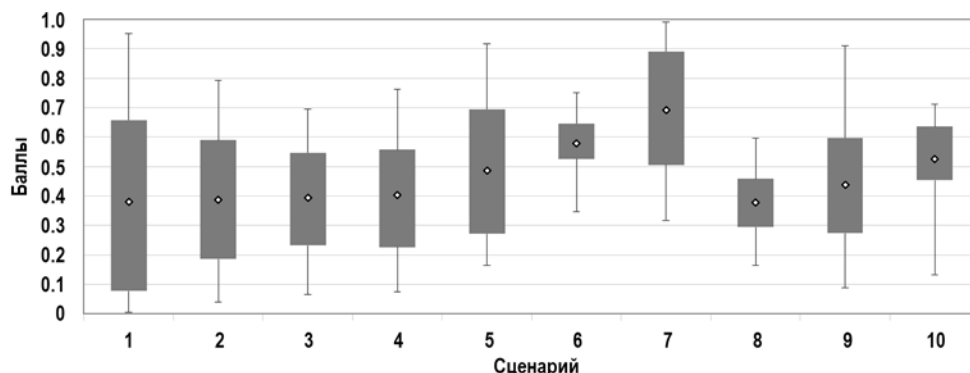


Рис. 5. Разброс сценариев в баллах вследствие неопределённости весов (указаны средние значения, 5, 25, 75 и 95% квантили). Сценарии: 1 – ВВЭР (100%); 2 – ВВЭРмокс(10%); 3 – ВВЭРмокс(30%); 4 – ВВЭРмокс(50%); 5 – БН(20%); 6 – БН(50%); 7 – БН(90%); 8 – ВВЭРмокс(10%)БН(20%); 9 – ВВЭРмокс(50%)БН(20%); 10 – ВВЭРмокс(10%)БН(50%)

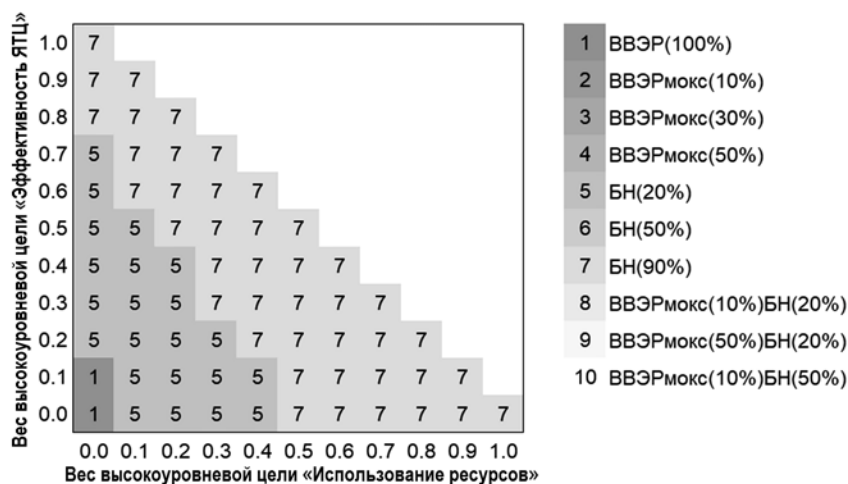


Рис. 6. Картирование сценариев, принимающих первый ранг, в пространстве весов высокоуровневых целей. Предполагается, что ось аппликата (вес высокоуровневой цели «Экономическая эффективность») направлена на читателя

Разброс в итоговых баллах сценариев вследствие неопределенности значений весов приведен на рис. 5 (количество проанализированных комбинаций весов составило 10 000, и предполагалось, что все веса распределены равномерно на интервале [0, 1] при условии, что сумма весов в каждой выборке равна единице). Сценарий БН(90%) характеризуется наиболее привлекательным разбросом в итоговых баллах среди всей совокупности вариантов. Сценарий БН(20%) также может стать весьма привлекательным, если сложатся определенные условия; ожидается, что он будет более привлекательным, чем все варианты, предполагающие совместную работу БН и ВВЭР на МОКС-топливе. Сценарии ВВЭР(100%) и ВВЭРмокс(10,30,50%) можно считать статистически неразличимыми. Наименьший разброс

в баллах имеет вариант БН(50%), но этот разброс перекрывается разбросом баллов сценариев БН(20%) и БН(90%).

Для выявления тех сценариев, которые потенциально могут иметь первый ранг, был выполнен анализ неопределённости по отношению к весам высокоуровневых целей (при условии равных весов на нижележащих уровнях дерева целей). Выполненный анализ позволяет указать те области значений весов, при которых соответствующая опция может занять в рейтинге первое место (на рис. 6 по оси абсцисс расположены возможные значения весов для высокоуровневой цели «Использование ресурсов», по оси ординат – значения весов для цели «Эффективность ЯТЦ», по оси аппликата – значения весов для цели «Экономическая эффективность», сумма этих весов равна единице).

ОБСУЖДЕНИЕ

Рисунок 6 позволяет сделать предварительные выводы о наиболее эффективных путях повышения устойчивости национальной ЯЭС в условиях многокритериальной оценки. Как показано на рисунке, сценарий ВВЭР(100%) с уран-оксидным топливом в открытом ЯТЦ получил первый ранг в пространстве весов высокоуровневых целей при условии доминирования экономических критериев оценки и отсутствия необходимости в минимизации использования ресурсов природного урана, объёмов ОЯТ и плутония. Еще долгое время экономика будет оставаться основным критерием при принятии решений в пользу включения того или иного варианта реакторной технологии и топливного цикла в действующую ЯЭС. Поэтому данный результат подтверждает актуальность дальнейшего развития реакторов типа ВВЭР с учетом современных и перспективных требований безопасности и конкурентоспособности. Сценарий БН(20%) становится наиболее привлекательным, если повышается значимость цели «Экономическая эффективность», но при этом сохраняется актуальность в повышении эффективности ЯТЦ и использовании ресурсов.

При высокой значимости целей «Использование ресурсов» и «Эффективность ЯТЦ» наиболее привлекательным из всех рассмотренных сценариев является вариант БН(90%), в котором доля БН растет постепенно и достигает 90% только к концу века.

В то время как выполненные оценки вполне определенно указывают на существенные преимущества вариантов с большой долей реакторов БН по сравнению с вариантом ВВЭР(100%), роль тепловых реакторов с МОКС-топливом в двухкомпонентной системе отчетливо не проявилась. В частности, варианты с МОКС-топливом не получили, как показано на рис. 6, первый ранг в пространстве весов высокоуровневых целей, несмотря на то, что вариант ВВЭРмокс(10%)БН(50%) занял третье место в общем рейтинге (см. рис. 4). Это противоречие показывает необходимость дальнейших исследований в отношении роли тепловых реакторов с МОКС-топливом в двухкомпонентной системе.

Полученная существенная зависимость состава реакторного флота и установок ЯТЦ моделируемой ЯЭС от степени принимаемых во внимание целей рационального использования ресурсов, эффективной организации ЯТЦ и обращения с радиоактивными отходами свидетельствует о том, что методы оценки структуры ЯЭС только на основании экономических показателей, отдающие предпочтение системе тепловых реакторов, показывают одностороннюю картину. Многокритериальные методы оценки альтернатив предлагают решения, которые отличаются от решений на основании экономических подходов и обеспечивают системную эффективность энергопроизводства и повышение его экологических характеристик с учетом требований концепции устойчивого развития.

Безусловно, полученные результаты носят иллюстративный характер. Имеет смысл рассмотреть большее число возможных конфигураций двухкомпонентной ЯЭС, различные темпы роста установленных мощностей ЯЭС, иные наборы показателей эффективности, принимая во внимание то, что быстрые натриевые реакторы могут быть использованы не только для коммерческого производства электроэнергии, но и как аппарат, избыток нейтронов в котором позволяет выжигать минорные актиниды и рабатывать изотопы для их последующего применения в медицине и промышленности. Важными для будущих исследований могут стать, в частности, задачи учета возможности многократного рецикла плутония в тепловых реакторах после «облагораживания» плутония в реакторах типа БН [4] и оценки влияния на структуру российской ЯЭС экспортных поставок реакторов и услуг ЯТЦ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты многокритериальной сравнительной оценки десяти возможных сценариев развертывания российской ядерной энергетике с различными долями тепловых и быстрых натриевых реакторов, включая варианты, предполагающие использование МОКС-топлива в ВВЭР. Оценка проведена с использованием восьми показателей эффективности, оцененных по состоянию на 2100 г. с использованием инструментария МАГАТЭ/ИНПРО для сценарного анализа развития и сравнительной оценки вариантов ЯЭС.

Проведённый цикл исследований позволяет сделать предварительные выводы о путях развития национальной ЯЭС как энерготехнологии устойчивого развития, обеспечивающей гармоничное сочетание технических, экономических и экологических факторов. Представленные результаты демонстрируют, что повышение устойчивости национальной ЯЭС путем гармоничного сочетания целей «Экономическая эффективность», «Использование ресурсов» и «Эффективность ЯТЦ» на основе продемонстрированных к настоящему времени реакторных технологий может быть обеспечено за счет развертывания быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и перехода к замкнутому ЯТЦ. Результаты выполненного анализа показали необходимость дальнейших исследований в отношении места тепловых реакторов с МОКС-топливом в двухкомпонентной системе как коммерчески освоенной технологии, способной «сжигать» избыточный плутоний и обеспечивать баланс его производства и потребления в системе.

Литература

1. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле. / Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного – М.: Техносфера, 2016. – 160 С.
2. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др. О стратегии развития ядерной энергетике России до 2050 г. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111. – Вып. 4. – С. 183-196.
3. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Кухаркин Н.Е. и др. Стратегический взгляд на ядерную энергетике России на современном этапе // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – Вып. 3. – С. 123-126.
4. Гулевич А.В., Декусар В.М., Каграманян В.С., Клинов Д.А., Усанов В.И. Вызовы и стимулы развития натриевых быстрых реакторов в современных условиях // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 3. – С. 131-135.
5. 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.
6. 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 pages. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/910162>.

7. *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 pages. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/9029406>.

8. *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.

9. *Andrianov A.A., Andrianova O.N., Kuptsov I.S., Svetlichny L.I., Utianskaya T.V.* Multi-criteria Comparative Evaluation of Nuclear Energy Deployment Scenarios with Thermal and Fast Reactors, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*. – Vol. 17. – No. 1. – PP. 47-58.

10. *IAEA.* MESSAGE – Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impacts. User manual (DRAFT). – Vienna, Austria: IAEA, 2016.

11. *IAEA.* Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide. IAEA Nuclear Energy Series NG-T-5.2. – Vienna, Austria: IAEA, 2016. – 126 p.

12. *Андрианов А.А., Коровин Ю.А., Федорова Е.В.* Оптимизация систем ядерной энергетики в среде энергетического планирования MESSAGE. – Обнинск: ИАТЭ, 2012 – 132 с.

13. *IAEA.* Application of Multicriteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND. IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.20. – Vienna, Austria: IAEA, 2019. – 229 p.

14. *Кузнецов В., Фесенко Г., Жеребилова А., Филлипс Дж.Р.* Средства анализа сценариев развития и поддержки принятия решений по устойчивости систем ядерной энергетики. / Тезисы докладов V Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» 2 – 5 октября 2018 г. – Москва: НИКИЭТ – 2018, с. 40-42.

15. *Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Купцов И.С., Осипова Т.А., Утянская Т.В.* Оптимизационные модели двухкомпонентной ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2018. – № 3. – С. 100-112. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.09>.

16. *Zardari N.H., Ahmed K., Shirazi S.M., Yusop Z.B.* Weighting methods and their effects on multi-criteria decision-making model outcomes in water resources management. – Springer International Publishing. – 2015.

17. *Wigeland R. et al.* Nuclear fuel cycle evaluation and screening. Final Report «Fuel Cycle Research & Development», October, 2014. – Department of Energy (DOE), FCRD-FCO-2014-000106.

Поступила в редакцию 21.08.2020 г.

Авторы

Усанов Владимир Иванович, главный научный сотрудник, д-р техн. наук

E-mail: vouss@ipre.ru

Квятковский Степан Александрович, аспирант

E-mail: skvyatkovskiy@ipre.ru

Андрианов Андрей Алексеевич, доцент, к.т.н.

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Купцов Илья Сергеевич, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

UDC 621.039.003

MULTI-CRITERIA COMPARISON AND RANKING OF POSSIBLE RUSSIAN NUCLEAR ENERGY DEPLOYMENT SCENARIOS WITH THERMAL AND SODIUM-COOLED FAST REACTORS

Usanov V.I. *, Kviatkovskiy S.A. *, Andrianov A.A. **, Kuptsov I.S. **

* JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

** NRNU MEPhI

31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

The authors present the results of a multicriteria comparative assessment of possible Russian nuclear power deployment scenarios with thermal and sodium-cooled fast reactors in a closed nuclear fuel cycle (the so-called two-component nuclear power system). The comparison and ranking were carried out taking into account the recommendations and using the IAEA/INPRO tools for comparative assessment of nuclear power systems, including the means of sensitivity/uncertainty analysis in relation to weighting factors. Within this work, 10 possible Russian nuclear energy deployment scenarios with different shares of thermal and sodium-cooled fast reactors were considered, including options involving the use of MOX fuel in VVER. Eight key indicators were used, assessed as of 2100 and structured into a three-level objectives tree. The comparative assessment and ranking were carried out on the basis of multi-attribute value theory. The model for assessing key indicators was developed using the IAEA/INPRO MESSAGE-NES nuclear energy planning tool. The information base of the study was formed by publications of experts from JSC SSC RF-IPPE, NRC Kurchatov Institute and NRNU MEPhI. The presented results show that it is possible to significantly increase the stability of the Russian nuclear power system, when considering several criteria of the system's efficiency, through the intensive deployment of sodium-cooled fast reactors and transition to a closed nuclear fuel cycle. The paper outlines the tasks for further research, which will make it possible to obtain more rigorous conclusions regarding the preferred options for the development of a two-component nuclear energy system.

Key words: thermal reactors, fast reactors, closed nuclear fuel cycle, MOX, MAVT, MESSAGE-NES.

REFERENCES

1. *Two-component Nuclear Power System with Thermal and Fast Reactors in the Closed Nuclear Fuel Cycle*. Ed. by the Academ. of RAS Ponomarev-Stepnoy N.N. Moscow. Tekhnosfera Publ., 2016, 160 p. ISBN 978-5-94836-434-6 (in Russian).
2. Alekseev P.N., Asmolov V.G., Gagarinskii A.Yu., Kukharkin N.E., Semchenkov Yu.M., Sidorenko V.A., Subbotin S.A., Tsibul'skii V.F., Shtrombakh Ya.I. On a Nuclear Power Strategy of Russia to 2050. *Atomnaya Energiya*. 2011, v. 111, iss. 4, pp. 183-196 (in Russian).
3. Alekseev P.N., Gagarinskii A.Yu., Kukharkin N.E., Semchenkov Yu.M., Sidorenko V.A., Subbotin S.A., Tsibul'skii V.F., Shimkevich A.L., Shtrombakh Ya.I. Strategic View on Nuclear Power in Russia at the Present Stage. *Atomnaya Energiya*. 2017, v. 122, iss. 3, pp. 123-126 (in Russian).
4. Gulevich A.V., Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., Klinov D.A., Usanov V.I. Development of Sodium-cooled Fast Reactors under Modern Conditions: Challenges and Stimuli. *Atomnaya Energiya*. 2018, v. 125, iss. 3, pp. 131-135 (in Russian).

5. 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.
6. 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 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/910162>.
7. 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 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/9029406>
8. 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.
9. Andrianov A.A., Andrianova O.N., Kuptsov I.S., Svetlichny L.I., Utianskaya T.V. Multi-criteria Comparative Evaluation of Nuclear Energy Deployment Scenarios with Thermal and Fast Reactors. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, v. 17, no. 1, pp. 47-58.
10. IAEA. *MESSAGE – Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impacts*. User manual (DRAFT). Vienna, Austria. IAEA, 2016.
11. IAEA. *Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide*. IAEA Nuclear Energy Series NG-T-5.2. Vienna, Austria. IAEA, 2016, 126 p.
12. Andrianov A.A., Korovin Yu.A., Fedorova E.V. *Optimization of Nuclear Energy Systems by means of the Energy Planning Tool MESSAGE*. Obninsk. INPE NRNU «MEPhI» Publ., 2012. 132 p. (in Russian).
13. IAEA. *Application of Multicriteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND*. IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.20. Vienna, Austria. IAEA, 2019, 229 p.
14. Kuznetsov V., Fesenko G., Zherebilova A., Phillips J.R. Scenario Analysis and Decision Support Tools for Enhancing Nuclear Energy System Sustainability. *Proc. of the V-th International Scientific and Technical Conference «Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power»*, October 2–5, 2018. Moscow. NIKIET Publ., 2018, pp. 40-42 (in Russian).
15. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Osipova T.A., Andrianova O.N., Utyanskaya T.V. Optimization Models of Two-component Nuclear Energy System with Thermal and Fast Reactors in a Closed Nuclear Fuel Cycle. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 3, pp. 100-112; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.09> (in Russian).
16. Zardari N.H., Ahmed K., Shirazi S.M., Yusop Z.B. *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision-Making Model Outcomes in Water Resources Management*. Springer International Publishing, 2015.
17. Wigeland R. et al. *Nuclear Fuel Cycle Evaluation and Screening*. Final Report «Fuel Cycle Research & Development», October, 2014, Department of Energy (DOE), FCRD-FCO-2014-000106.

Authors

Usanov Vladimir Ivanovich, Chief Scientist, Dr. Sci. (Nuclear Engineering)

E-mail: vouss@ippe.ru

Kviatkovskiy Stepan Aleksandrovich, PhD Student

E-mail: skvyatkovskiy@ippe.ru

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

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Kuptsov Ilya Sergeevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru