
УДК 621.039.003

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ТЕПЛОВЫМИ И БЫСТРЫМИ РЕАКТОРАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ

© 2019 г. А. А. Андрианов^{1, *}, И. С. Купцов¹, Т. А. Осипова¹,
О. Н. Андрианова², Т. В. Утянская³

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет “МИФИ”, Москва, Россия

²АО ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск, Россия

³АО “Инженерный центр ядерных контейнеров”, Москва, Россия

*e-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.12.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 15.04.2019 г.

В статье на основе выполненных ранее коллективом авторов АО “НИКИЭТ” и ИТЦП “Прорыв” оценок 12-ти возможных сценариев развертывания ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами по 6-ти показателям эффективности проводится их сравнительный анализ на основе методов дискретного анализа решений в соответствии с рекомендациями, выработанными секцией ИНПРО/МАГАТЭ. Показано, что применение разных методов дискретного анализа решений (SSM, MAVT/MAUT, ANP, TOPSIS, PROMETHEE) для оценки привлекательности сценариев, несмотря на некоторые различия в ранжировании, приводит к хорошо согласованным и близким результатам. Ранжирование сценариев с учетом неопределенности в весах для мульти-атрибутивной модели в соответствии с рекомендациями одного из исследований, выполненных по программе Департамента энергетики США, позволило классифицировать сценарии в условиях отсутствия информации относительно значимости показателей эффективности и определить вероятность предпочтения сценариев. Учитывая результаты анализа чувствительности и дополнительный анализ альтернатив с использованием экспертных оценок и всего множества графической и атрибутивной информации, определены наиболее привлекательные сценарии при сделанных предположениях.

Ключевые слова: ключевые показатели эффективности, энергетическое планирование, ядерная энергетика, ядерный топливный цикл, методы дискретного анализа решения

DOI: 10.1134/S0002331019020043

При проведении системно-аналитических и прогнозных исследований в обоснование перспектив развития ядерной энергетики и оценки ее роли в устойчивом развитии, а также при планировании ядерно-энергетических программ и ядерной инфраструктуры требуется оценка набора ключевых показателей эффективности (КПЭ, от англ. Key Performance Indicators, KPI) по различным областям (безопасность, ресурсы, экономика, устойчивость к несанкционированному распространению, обращение с отходами, инфраструктура и пр.), на основе которых могут быть сделаны выводы относительно привлекательности рассматриваемых вариантов [1]. Как правило, КПЭ носят конфликтующий характер: улучшение значения одного из показателей при пе-

реходе от варианта к варианту, сопровождается ухудшением значений других показателей.

Ранжирование вариантов и выбор наиболее приемлемого из них по набору КПЭ требует агрегации экспертных суждений и может проводиться либо не формализовано – на основе интуиции и опыта экспертов, либо на основе применения формальных методов поддержки принятия решений. Последний вариант представляется более привлекательным, поскольку он позволяет структурировать процесс сопоставления рассматриваемых вариантов, аргументировано и на количественной основе представить доводы за и против каждого из них, что позволяет обосновать выбор наиболее приемлемого компромиссного варианта. Повысить степень обоснованности суждений позволяет также корректный учет и оценка влияния неопределенности субъективной и объективной природы на результаты ранжирования.

В том случае, если рассматриваемые варианты заданы явно посредством оценочного набора КПЭ, то для сопоставления и выбора наиболее привлекательного варианта могут быть применены методы дискретного анализа решений (MAVT/MAUT, АНР, TOPSIS, PROMETHEE и др.), которые получили широкое распространение для поддержки принятия решений в разных предметных областях, в т.ч. в области “ядерная инженерия”. Особое распространение данные методы получили в рамках совместных международных проектов по линии МАГАТЭ, OECD/NEA, а также в исследованиях, проводимых Департаментом энергетики США [2].

В рамках проекта сотрудничества “Ключевые индикаторы оценки инновационных ядерно-энергетических систем” (KIND) секции ИНПРО/МАГАТЭ предложены рекомендации по применению данных методов для сравнительного анализа, оценки эффективности и устойчивости систем ядерной энергетики и их компонентов, которые могут быть применены для решения широкого класса задач по сравнению ядерно-энергетических систем на технологическом и сценарном уровнях [3, 4]. В статье выполнен сравнительный анализ сценариев развертывания ядерной энергетики с целью демонстрации потенциала предложенного инструментария для количественного сопоставления и ранжирования рассмотренных вариантов на модельном примере.

Исходные предположения. В серии работ авторов из АО “НИКИЭТ” и ИТЦП “Прорыв” [5–8] были выполнены оценки репрезентативного набора из 6-ти КПЭ, характеризующих как эффективность управления материальными потоками в ЯТЦ, так и экономическую эффективность (табл. 1) 12-ти сценариев развертывания ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами (табл. 2). На основе этих оценок делается экспертное заключение относительно привлекательности рассмотренных сценариев и выполняется обоснование выбора наиболее привлекательного из них. Не обсуждая вопросы технической осуществимости сценариев и сделанных модельных предположений, а также набора используемых КПЭ и рассмотренных сценариев, авторы настоящей статьи на основе представленных в [5–8] данных демонстрируют процедуру сравнительной оценки сценариев с использованием методов поддержки принятия решений. Следует отметить, что в настоящей работе отдельно моделирование сценариев развития ядерной энергетики не проводилось, а брались результаты сценарного анализа, представленные в работах [5–8]. Таким образом исходные технико-экономические данные и производственные характеристики объектов ЯТЦ рассмотренных сценариев полностью соответствуют данным представленным в [5–8].

Относительные значения КПЭ для рассмотренных сценариев представлены на рис. 1 в формате “профили альтернатив” (лучшее относительное значение КПЭ – 1). Как можно видеть, нет ни одного варианта, который по всему набору КПЭ превосходил остальные: каждый из вариантов имеет определенные преимущества по сравнению с другими. По этой причине для ранжирования сценариев необходима агрегация КПЭ с учетом экспертных оценок.

Таблица 1. Ключевые показатели эффективности

№	Аббр.	КПЭ	Размерн.	Категория КПЭ
1	КПЭ-1	Интегральное потребление природного урана	кт	Эффективность управления материальными потоками в ЯТЦ
2	КПЭ-2	Интегральный объем переработки ОЯТ	кт	
3	КПЭ-3	Накопленный объем ОЯТ/ВАО для захоронения	кт	
4	КПЭ-4	Интегральные абсолютные затраты	млрд долл	Экономическая эффективность
5	КПЭ-5	Приведенный фонд обращения с ОЯТ/РАО	млн долл	
6	КПЭ-6	Приведенная топливная составляющая стоимости электроэнергии	ц/кВт ч	

Таблица 2. Сценарии развертывания ЯЭС

№	Сценарные предположения
1	Открытый ЯТЦ, только ТР
2	То же, что 1, и МОКС из запасов Pu
3	Только ТР, полная переработка на МОКС
4	ТР и БР, без переработки ОЯТ ТР
5	То же, что 4, внешний ТЦ БР 3 года
6	То же, что 4, срок службы ВВЭР 60 лет
7	ТР и БР, переработка ОЯТ ВВЭР
8	То же, что 7, отложенная переработка на 30 лет
9	ТР и БР, полная переработка ОЯТ ТР
10	ТР и БР, воспроизводство только в активной зоне БР
11	ТР и БР, воспроизводство в активной зоне БР и боковом бланкете
12	ТР и БР, воспроизводство в активной зоне БР, боковом и торцевом бланкетах

Оценки КПЭ, представленные в [5–8], были дополнены расчетами параметров структур ядерной энергетики по оптимизационной модели российской ядерной энергетики с замкнутым ЯТЦ и реакторными технологиями проекта “Прорыв” (БРЕСТ-1200, БН-1200), ВВЭР-ТОИ. Модель разработана в оптимизационной среде энергетического планирования МАГАТЭ MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts). MESSAGE – динамическая системно-инженерная оптимизационная среда, используемая для средне- и долгосрочного энергетического планирования, анализа энергетической политики и разработки сценариев развития энергетики, разработанная Международным институтом прикладного системного анализа, распространяемая и поддерживаемая в настоящее время МАГАТЭ. Созданная оптимизационная модель прошла обсуждение и апробацию на рабочих совещаниях МАГАТЭ по аналитическим инструментам разработки стратегий устойчивого развития энергетики и позволяет оценить масштабы материальных потоков в ЯТЦ, потребности в услугах ЯТЦ и экономические показатели сценариев развития ядерной энергетики, а также может быть использована для многоцелевой, робастной и стохастической оптимизации, что позволяет решать задачи энергетического плани-

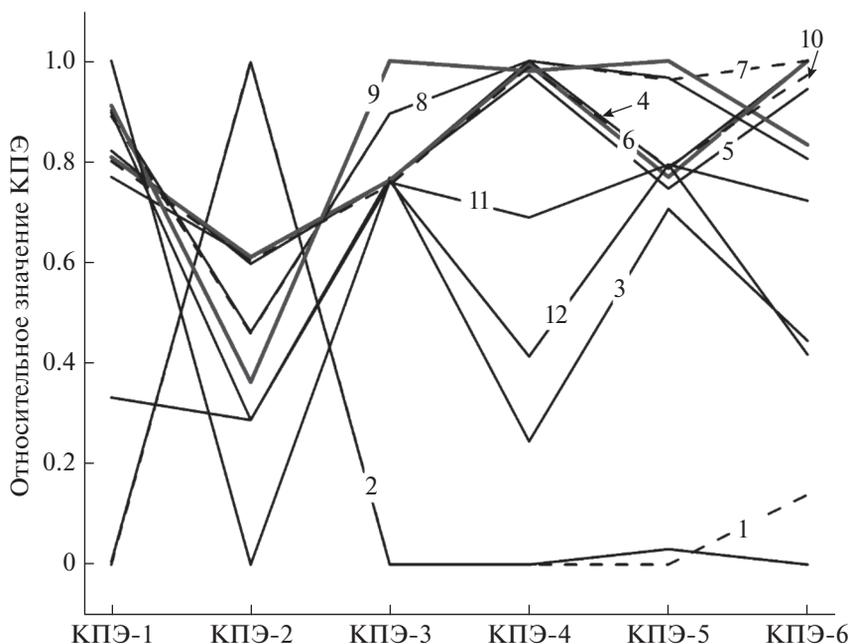


Рис. 1. Представление относительных значений КПЭ сценариев в формате “профили альтернатив”.

рования в многокритериальной постановке с учетом неопределенности [9, 10]. Расчеты, выполненные на основе данной модели, подтвердили корректность представленных в [5–8] оценок КПЭ с учетом сделанных модельных предположений, и продемонстрировали, что к 2100 г. заканчивается переходной этап, и в структуре ядерной энергетики присутствуют только одни быстрые реакторы.

При проведении сравнения выбор модельных предположений был осуществлен в соответствии с рекомендациями, выработанными секцией ИНПРО/МАГАТЭ в проекте сотрудничества “Ключевые индикаторы оценки инновационных ядерно-энергетических систем” (KIND), которые доказали свою работоспособность и эффективность при проведении национальных тематических исследований [4].

Определение недоминируемых сценариев. Одним из полезных предварительных этапов является определение недоминируемых сценариев. Доминируемость сценария означает, что он по всему набору КПЭ хуже, чем те сценарии, которые его доминируют. Поэтому доминируемые сценарии могут быть исключены из рассмотрения при сравнении, что облегчит процедуру сравнения и сделает результаты ранжирования более устойчивыми. Оценки показывают, что доминируемыми сценариями из рассматриваемой совокупности являются сценарии № 3 и 11, которые доминируются сценарием № 7, а также сценарий № 5, который доминируется сценарием № 6. На рис. 1 это обстоятельство отражается в том, что профиль доминированного сценария лежит ниже профиля сценария, который ее доминирует.

Достоинство этого этапа – отсутствие необходимости определения весовых факторов. Однако определение набора недоминируемых сценариев само по себе не позволяет их ранжировать, что требует определения типа решающего правила и весов, отражающих относительную важность КПЭ для экспертов и лица, принимающего решение. При оценке весовых факторов использовались (1) вариант равных весов, отражающий ситуацию, что все факторы равнозначимы или отсутствуют какие-либо представления

Таблица 3. Результаты ранжирования сценариев с использованием различных методов (вариант равных весов)

Ранг сценария	Номер сценария					Группа сценариев
	SSM	MAVT/MAUT	AHP	TOPSIS	PROMETHEE	
1	8	8	7	9	8	1
2	9	9	8	7	9	
3	7	7	9	8	7	
4	4	4	6	6	4	2
5	6	6	4	4	6	
6	10	10	10	10	10	
7	5	5	5	5	5	
8	11	11	11	11	11	3
9	12	12	12	12	12	
10	3	3	3	3	3	
11	1	1	2	2	1	4
12	2	2	1	1	2	

об их относительной важности (такой подход к назначению весов может быть использован в качестве отправной точки при проведении анализа и должен быть дополнен результатами расширенного анализа чувствительности/неопределенности результатов ранжирования к весам), а также (2) результаты опросов экспертов, выполненных в рамках 4-го Диалог-форума ИНПРО “Драйверы и препятствия для регионального сотрудничества на пути к устойчивым ядерно-энергетическим системам” [11].

Сравнение результатов ранжирования с использованием различных методов. В рамках настоящей работы были применены разные классические наиболее часто используемые методы дискретного анализа решений (Simple Scoring Model (SSM), MAVT/MAUT, AHP, TOPSIS, PROMETHEE). Они основаны на различной методической базе, поэтому их одновременное использование позволяет сделать суждение относительно робастности/устойчивости результатов ранжирования по отношению к выбору решающего правила, что важно для повышения степени обоснованности суждений. Таблица 3 отражает результаты ранжирования (ранги) сценариев с использованием различных методов для варианта весов № 1 и их объединение в группы. Как можно видеть, применение различных методов, несмотря на некоторые различия в ранжировании, приводит к хорошо согласованным и близким результатам. Отметим, что наиболее простой и наглядной моделью является мульти-атрибутивная модель (методы MAVT/MAUT), для которой результаты ранжирования представлены на рис. 2а (баллы – значения мульти-атрибутивной функции ценности), рис. 2б отражает разложение общих баллов на отдельные составляющие в соответствии с областями оценки.

Результаты анализа чувствительности по отношению к весам (т.н. подход “линейные веса”) для мульти-атрибутивной модели представлены на рис. 2в. Несмотря на то, что на результаты ранжирования сценариев влияют некоторым образом веса КПЭ, имеются области устойчивости, в которых в широких пределах изменения значения весов, порядок ранжирования сохраняется. При этом сценарии определенной группы не выходят за ее границы. Отметим, что вариант весовых факторов № 2 не привел к изменению рангов сценариев по сравнению с вариантом равных весов.

Учет неопределенности относительной важности КПЭ. В соответствии с рекомендациями одного из исследований, выполненных по программе Департамента энергети-

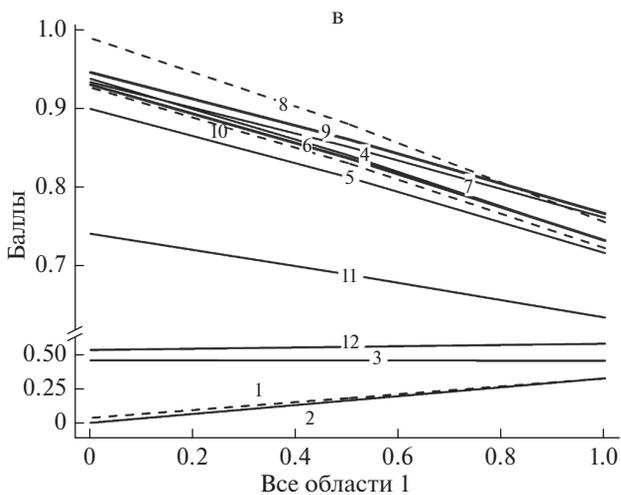
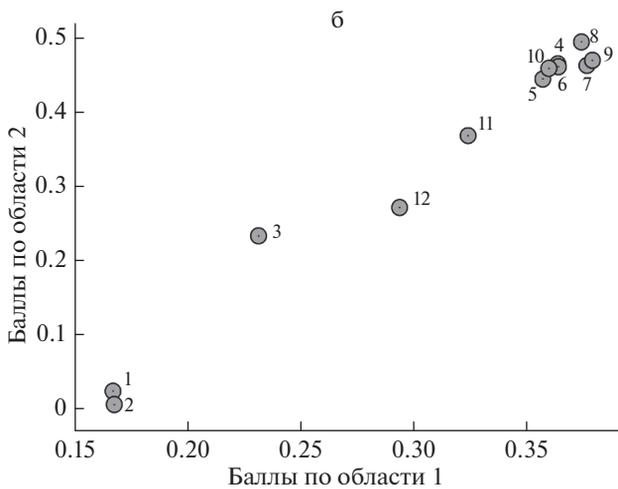
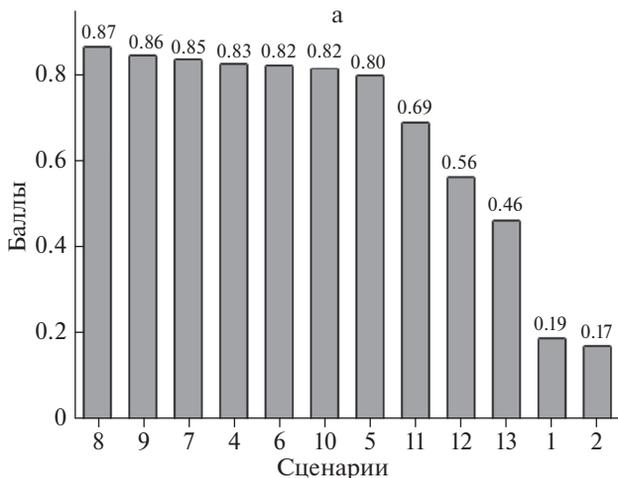


Рис. 2. Ранжирование сценариев для варианта равных весов (а), разложение суммарных баллов по областям оценки (б, область 1 – “эффективность управления материальными потоками в ЯТЦ”, область 2 – “экономическая эффективность”), анализ чувствительности по отношению к весам (в).

ки США [12], был дополнительно реализован метод стохастического формирования весов для мульти-атрибутивной модели поддержки принятия решений, который позволяет ранжировать сценарии в условиях отсутствия информации относительно значимости отдельных КПЭ, а также определить вероятность предпочтения определенного сценария. Данный метод предполагает, что рассматривается задача в вероятностной постановке: ничего не известно о приоритетах (весах) и представляет интерес оценить с какой вероятностью ранжировали бы сценарии разные экспертные группы, имеющие различные взгляды на значимость системных факторов (предполагалось, что все веса распределены равномерно на интервале от 0 до 1, при условии, что их сумма равна единице). На основе этой информации можно осуществить выбор наиболее привлекательного сценария и оценить риски, связанные с принятием ошибочного решения (рис. 3). Результаты ранжирования сценариев на основе данного подхода согласуются с результатами, полученными на основе описанных выше классических детерминистических методов поддержки принятия решений.

Учитывая результаты анализа чувствительности/неопределенности и принимая во внимание дополнительный анализ альтернатив с использованием экспертных оценок и всего множества графической и атрибутивной информации при сделанных сценарных предположениях, наиболее привлекательными сценариями могут быть признаны сценарии № 8, 9, 7. Сценарии № 4, 6, 10, 5 могут быть отнесены ко второй по привлекательности группе. Сценарии № 11, 12, 3, характеризующиеся большой неопределен-

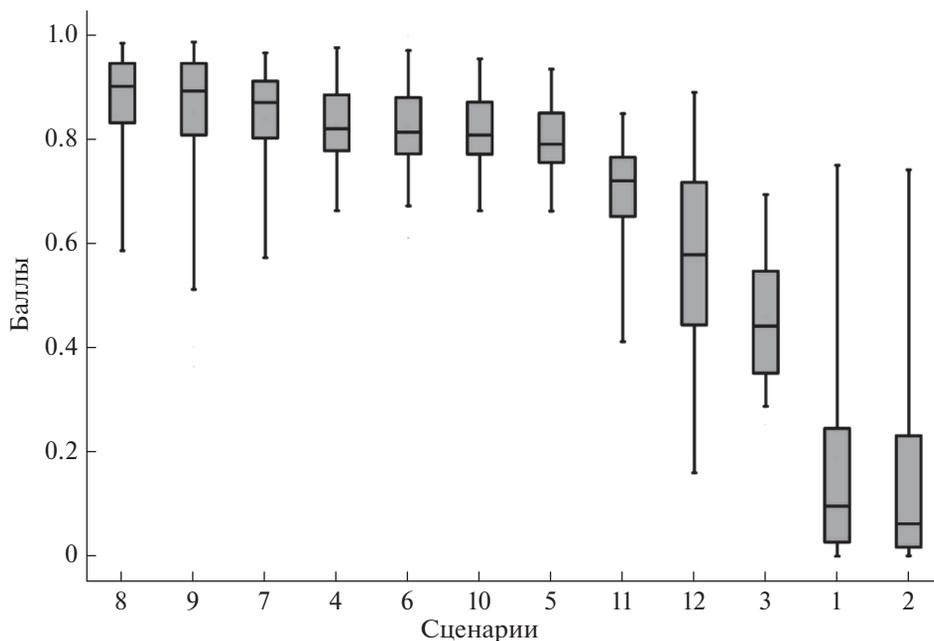


Рис. 3. Ранжирование сценариев с учетом неопределенности в значениях весов с использованием диаграммы размаха (указаны 95, 75, 50, 25, 5% квантили, сценарии ранжирования по среднему значению баллов).

ностью, могут быть объединены в следующую по привлекательности группу. Наименьшую привлекательность имеют сценарии № 1, 2.

Для осуществления дальнейшей дифференциации сценариев внутри каждой из групп необходима информация о предпочтениях экспертов и лица, принимающего решения, по относительной важности КПЭ. Однако даже без учета этой информации выполненный анализ позволяет сделать следующий вывод относительно привлекательности сценариев при условии справедливости сделанных сценарных предположений. Несмотря на высокий потенциал быстрых реакторов с расширенным воспроизводством (большой разброс в баллах у сценария № 12 – см. рис. 3), обеспечение повышения воспроизводства за счет ухудшения экономических КПЭ нецелесообразно. При этом для повышения эффективности и устойчивости системы ядерной энергетики необходима переработка ОЯТ тепловых реакторов с утилизацией плутония в быстрых реакторах. Однако в связи с упомянутой неопределенностью остается открытым вопрос по срокам переработки и типам ОЯТ тепловых реакторов, который в рамках данной работы не рассмотрен. Отметим, что сделанный вывод согласуется с выводами, представленными в работе [3], в которой ранжированы 11-ть сценариев развития глобальной ядерной энергетики, оцененных по 9-ти КПЭ.

Обсуждение. Принимая во внимание ограниченный объем выполненных исследований, результаты представленного анализа, очевидно, не могут лечь в основу обоснования управленческих решений, однако, по мнению авторов, его вполне достаточно для демонстрации основных методических моментов, связанных с применением методов дискретного анализа решений для ранжирования сценариев развития национальной ядерной энергетики. Основная польза агрегации экспертных оценок на основе формализованных математических методов заключается в том, что они позволяют структурировать дискурс и организовать эффективную экспертизу по выявлению наиболее перспективных сценариев развития ядерной энергетики, с демонстрацией на количественной основе достоинств и недостатков сравниваемых вариантов, что позволяет представить аргументированные заключения относительно их привлекательности.

В то же время, чтобы подобного рода анализ лег в основу реальных управленческих решений и способствовал выработке согласованной (компромиссной) позиции по наиболее перспективным сценариям развития национальной ядерной энергетики, необходима организация экспертизы с привлечением проponentов и оппонентов разных технических концепций для выработки единого набора КПЭ, по которым предполагается оценка сценариев, набора сценариев и сценарных предположений. Особое внимание должно быть уделено обсуждению вопросов неопределенности и рисков объективной и субъективной природы, которые должны быть инкорпорированы в анализ, поскольку как новые технологии, так и сценарные условия характеризуются значительной неопределенностью и рисками. В случае реализации такой экспертизы может, как минимум, быть достигнуто объективное, основанное на количественном анализе, понимание сильных и слабых сторон каждого из вариантов, и, как максимум, в случае наличия у участников экспертизы конструктивного настроения, быть выбран наиболее приемлемый компромиссный вариант.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье на основе выполненных ранее коллективом авторов АО “НИКИЭТ” и ИТЦП “Прорыв” оценок 12-ти возможных сценариев развертывания ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами по 6-ти КПЭ выполнен их сравнительный анализ на основе методов дискретного анализа решений в соответствии с рекомендациями, выработанными секцией ИНПРО/МАГАТЭ. Показано, что применение разных классических методов дискретного анализа решений для оценки привлекатель-

ности сценариев, несмотря на некоторые различия в ранжировании, приводит к хорошо согласованным и близким результатам. В соответствии с рекомендациями одного из исследований, выполненных по программе Департамента энергетики США, использован метод стохастического формирования весов для мульти-атрибутивной модели, позволяющий ранжировать сценарии в условиях отсутствия информации относительно значимости отдельных КПЭ, а также определить вероятность предпочтения определенного сценария. На основе этой информации можно осуществить выбор наиболее привлекательной альтернативы и оценить риски, связанные с принятием ошибочного решения. Учитывая результаты анализа чувствительности и принимая во внимание дополнительный анализ альтернатив с использованием экспертных оценок и всего множества графической и атрибутивной информации при сделанных сценарных предположениях, определены наиболее привлекательные сценарии.

Авторы выражают благодарность сотрудникам секции ИНПРО/МАГАТЭ В.В. Кузнецову, Г.А. Фесенко – руководителям работ по созданию инструментария сравнительного анализа ядерно-энергетических систем, любезно предоставленного секцией для целей данной работы, а также сотруднику АО “НИКИЭТ” и ИТЦП “Прорыв” Е.В. Муравьеву за плодотворные обсуждения и советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Andrianov A., Kuptsov I., Murogov V.* Towards sustainable nuclear power development. – ATW: International journal for nuclear power, 2014. V. 59. Issue 5. P. 287–293.
2. *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, 8. P. 3679–3719.
3. *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*, vol. 2014, Article ID 910162, 15 pages. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/910162>
4. *Schwenk-Ferrero A., Andrianov A.* Comparison and Screening of Nuclear Fuel Cycle Options in View of Sustainable Performance and Waste Management. *Sustainability*. 2017; 9(9):1623.
5. *Адамов Е.О., Джалабян А.В., Лопаткин А.В.* и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. *Атомная энергия*. 2012. Т. 112. № 6. С. 319–330.
6. *Муравьев Е.В.* Актуальность замыкания ядерного топливного цикла. *Атомная энергия*. 2011. Т. 111. № 6. С. 334–342.
7. *Муравьев Е.В.* Топливообеспечение ядерной энергетики с вводом быстрых реакторов. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2014. № 5. С. 75–86.
8. *Каширский А.А., Леонов В.Н., Муравьев Е.В., Родина Е.А., Хомяков Ю.С.* Влияние глубины выгорания топлива в реакторах на быстрых нейтронах на технико-экономические характеристики замкнутого ядерного топливного цикла в двухкомпонентной ядерной энергетике. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2016. № 2. С. 92–105.
9. *Андреинов А.А., Купцов И.С., Утянская Т.В.* Некоторые результаты многокритериальной и робастной оптимизации структур ядерно-энергетических систем. *Атомная энергия*. 2017. Т. 123. № 1. С. 9–14.
10. *Андреинов А.А., Андреинова 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.
11. IAEA; 4th INPRO Dialogue Forum, Drivers and Impediments for Regional Cooperation on the Way to Sustainable Nuclear Energy Systems, International Atomic Energy Agency, 4th INPRO Dialogue Forum, Vienna, Austria, 2012. <https://www.iaea.org/services/key-programmes/international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro>
12. *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.

Comparative Evaluation of Nuclear Energy Deployment Scenarios with Thermal and Fast Reactors using MCDA

A. A. Andrianov^{a, #}, I. S. Kuptsov^a, T. A. Osipova^a, O. N. Andrianova^b, and T. V. Utianskaia^c

^a*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

^b*Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Russia*

^c*JSC Engineering Center of Nuclear Containers, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: andreyandrianov@yandex.ru*

The paper presents the results of a multi-criteria comparative evaluation of 12 feasible nuclear energy deployment scenarios with thermal and fast reactors in Russian Federation. A comparative evaluation was performed based on 6 performance indicators and 5 different methods of a multiple-criteria decision analysis (Simple Scoring Model, MAVT / MAUT, AHP, TOPSIS, PROMETHEE) in accordance with the recommendations elaborated by the IAEA/INPRO section. It is shown that the use of different methods of multiple-criteria decision analysis to compare the nuclear energy deployment scenarios, despite some differences in the rankings, leads to well-coordinated and similar results. Taking into account the uncertainties in the weights within a multi-attribute model, it was possible to rank the scenarios in the absence of information regarding the relative importance of performance indicators and determine the preference probability for a certain nuclear energy deployment scenario. Based on the sensitivity analysis results and additional analysis of alternatives as well as the whole set of graphical and attribute data, it was possible to identify the most promising nuclear energy deployment scenario under the assumptions made.

Keywords: key performance indicators, energy planning, nuclear fuel cycle, multi-criteria decision analysis