

УДК 621.039

КОМПЛЕКСНОЕ СРАВНЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ С УЧЕТОМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ “KIND”

© 2020 г. А. А. Каширский*

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”
“Инновационно-технологический центр проекта “ПРОРЫВ”, Москва, Россия*

**e-mail: kana@proryv2020.ru*

Поступила в редакцию 31.12.2019 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

В статье приводится результат сравнительного анализа нескольких гипотетических сценариев развития электроэнергетики России с учетом разработанной в МАГАТЭ в рамках проекта ИНПРО методики KIND для многокритериальной оценки привлекательности альтернативных ядерных и неядерных энергетических систем с точки зрения критериев устойчивого развития. При моделировании сценариев использовались прогнозные значения технико-экономических показателей ядерных и тепловых энерготехнологий с учетом повышения эффективности использования топливных ресурсов в будущем и достижения целевых параметров в части ожидаемых затрат на капитальное строительство станций. Для сценариев с широкомасштабным развитием ядерной энергетики предусмотрен вариант с эволюцией двухкомпонентной структуры генерации, где РБН с замкнутым ядерным топливным циклом (ЗЯТЦ) постепенно вытесняют РТН до полного перехода на новую технологическую платформу к 2100 году. Ключевые показатели эффективности реализации того или иного сценария объединены по категориям: экономика, устойчивость ресурсного обеспечения, обращение с отходами производства, влияние на окружающую среду. На базе программных средств моделирования, разработанных в Частном учреждении “ИТЦП “ПРОРЫВ”, и инструментов сравнительной оценки МАГАТЭ/ИНПРО KIND получена комплексная характеристика выбранных для анализа сценариев развития ядерной и неядерной энергетики. Работа продемонстрировала, как применение данных инструментов может способствовать выбору наиболее целесообразной стратегии развития энергетики с учетом экономических, экологических и ресурсных ограничительных факторов.

Ключевые слова: сценарии развития энергетики, энергетическая стратегия, двухкомпонентная ядерная энергетика, системное моделирование, многокритериальный анализ, МАГАТЭ/ИНПРО, сравнение источников генерации, АЭС, ТЭС, энергетическая устойчивость

DOI: 10.31857/S000233102002003X

Сегодня существует множество различных технологий генерации электроэнергии, каждая из которых имеет свои недостатки и преимущества для потенциальных потребителей. Структура электроэнергетики может сильно зависеть от принятых национальных приоритетов, включая стремление обеспечить производство электроэнергии с наименьшей стоимостью или скорейший переход на безуглеродные источники генерации. Известно, что чем более диверсифицировано энергоснабжение, тем более

устойчива энергосистема с точки зрения энергетической безопасности. На практике, однако, это не всегда достижимо ввиду географических, политических или экономических причин, и неоптимальные решения могут привести к повышению стоимости э/э, ухудшению экологической обстановки и увеличению негативного антропогенного влияния энергетики на окружающую среду. Очевидно, что вопросы устойчивого развития энергетики не должны решаться, полагаясь лишь на экспертное мнение или оценки отдельно взятых специалистов или общественных организаций. Для этих целей разрабатываются средства имитационного моделирования и инструменты сравнительного многокритериального анализа, которые, в свою очередь, используются для обоснования того или иного решения с точки зрения получаемых положительных или отрицательных экономических, экологических и пр. эффектов.

Постановка задачи. Известно, что топливно-энергетический комплекс (ТЭК) играет важнейшую роль для экономики России, обеспечивая внутренних и внешних потребителей необходимыми ресурсами для производства электроэнергии, тепла, топлива и прочих энергетических продуктов. Структура топливообеспечения будущей энергетики, очевидно, будет влиять на показатели ее устойчивого развития в долгосрочной перспективе – ресурсное обеспечение, влияние на окружающую среду, экономическая эффективность производства энергии. Ключевым условием эффективного функционирования ТЭК в России сегодня является наличие минерально-сырьевой базы с достаточным количеством полезных ископаемых, извлекаемых по стоимости, представляющий экономический интерес для добывающей промышленности. Несмотря на то, что Россия является одним из мировых лидеров по запасам нефти, угля, природного газа, различных металлов [1] и пр., масштабный экспорт этих ресурсов с течением времени может привести к существенному удорожанию их стоимости для потребителей внутреннего рынка. Кроме того, являясь четвертой страной в мире по количеству ежегодных выбросов CO_2 от сжигания топлива (1.5 млрд т/год по данным Международного энергетического агентства) и имея в наличии свыше 150 ГВт установленной мощности ТЭС на ископаемом топливе, Россия имеет значительный потенциал для сокращения антропогенного влияния на окружающую среду. Таким образом, внутренняя энергетическая стратегия России в долгосрочной перспективе должна быть ориентирована на минимизацию стоимости электроэнергии без ущерба стратегическим интересам России в области ресурсного самообеспечения и национальным целям по экологии и климатической повестке.

Одним из способов оценки предпочтительности того или иного сценария развития какой-либо экономической системы является проведение расчетно-аналитического обоснования выбранных для исследования характеристик этих сценариев по заранее определенному набору ключевых показателей эффективности (КПЭ). Эти показатели могут охватывать широкий диапазон областей оценки, включая безопасность, экономическую эффективность, обращение с отходами, влияние на окружающую среду и т.д. Такой подход в настоящий момент разработан и успешно применяется в рамках проекта сотрудничества МАГАТЭ/ИНПРО KIND (аббревиатура от англ. Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems) и предполагает многофакторную оценку устойчивости/эффективности ядерно-энергетических систем (ЯЭС) с целью определения их преимуществ и недостатков по выбранному набору ключевых показателей эффективности [2]. В основу этого подхода легла теория поддержки принятия решений при многих критериях и методы мульти-атрибутивной теории полезности (MAVT) в частности. В рамках метода MAVT значения ключевых показателей эффективности (экспертные оценки или расчетные значения) преобразуются в одну безразмерную шкалу баллов от 0 до 1. Для каждого показателя оценивается весовой коэффициент, характеризующий относительную важность/значимость данного показателя по сравнению с другими. Предпочтительность сценария выявляется путем оценки итоговых баллов каждой из альтернатив посредством умножения полученных баллов на со-

Таблица 1. Достигаемая установленная мощность генерации к 2100 г. в выбранных для исследования сценариях

	120_FR	120_TR	80_REF	80_TR	40_Gas	40_Coal
РБН уст. мощность, ГВт (эл.)	120	0	79	0	0	0
ТР уст. мощность, ГВт (эл.)	0	120	0	79	40	40
Уст. мощн. угольных ТЭС, ГВт (эл.)	13	13	27	27	13	66
Уст. мощн. газовых ТЭС, ГВт (эл.)	21	21	49	49	97	49
Уст. мощн. АЭС	120	120	79	79	40	40
Уст. мощн. ТЭС	34	34	76	76	110	115

ответствующий весовой коэффициент для всех КПЭ с последующим суммированием полученных значений (аддитивная форма мультиатрибутивной функции ценности). Чем выше общий балл сценария, тем предпочтительнее сценарий при заданных параметрах важности критериев оценки [3].

В настоящей работе значения всех ключевых показателей эффективности, выбранных для исследования сценариев, получены расчетным путем с использованием программного продукта системного моделирования УСМ-1, разработанного д. т. н. Е.В. Муравьевым [4]. Модели, создаваемые с помощью данного инструмента, — динамические, представляющие собой развертку состояния моделируемых объектов во времени и позволяющие задавать, исследовать и оптимизировать процесс их развития. Пример использования моделей такого типа можно найти в работах [5, 6].

Основной целью настоящей работы является сравнение набора сценариев развития электроэнергетики по ключевым показателям эффективности, охватывающим критерии экономической конкурентоспособности, эффективности обращения с отходами, ресурсного обеспечения и воздействия на окружающую среду, с применением подхода и инструментов МАГАТЭ/ИНПРО KIND [7]. Ключевые технико-экономические показатели АЭС и ТЭС приняты по данным [2, 8]. Объектом исследования выступают перспективные топливные циклы АЭС и ТЭС с учетом развития инновационных ЯТЦ на базе РБН и ЗЯТЦ и более эффективных технологий сжигания органического топлива. Базовый год для расчета дисконтированных денежных потоков — 2020.

Описание сценариев. В рамках настоящей работы была разработана серия сценариев с ростом установленной мощности электрогенерации с различной динамикой изменения структуры энергобаланса на базе прогнозов ИнЭИ РАН [9]. Сценарии построены с учетом различных предположений относительно принятой энергетической политики после 2050 г. в части отдаваемого приоритета той или иной технологии. Для каждого сценария также учитывается экспорт 23 ГВт (э) ВВЭР к 2060 г (после 2060 г. экспорт ВВЭР прекращается). Во всех сценариях ТР работают в открытом ЯТЦ. В таблице 1 приведено описание выбранных для исследования сценариев с указанием достигаемой установленной мощности к 2100 г.

Как видно из таблицы 1, разработанные сценарии учитывают различные исходные предпосылки относительно масштаба развития ядерной энергетики (ЯЭ) и типа использованной реакторной технологии, что, в свою очередь, влияет на характеристику топливного обеспечения, инфраструктуру ЯТЦ (мощности переработки, производства топлива и т.д.), наработку ОЯТ и ВАО. Топливный баланс и установленные мощности производств для развития двухкомпонентной ЯЭ с РБН и замкнутым ЯТЦ определялись исходя из следующих факторов:

- потребности ТР в УОХ топливе;
- необходимости утилизации P_u как продукта переработки ОЯТ ТР с последующим производством СНУП топлива для РБН;

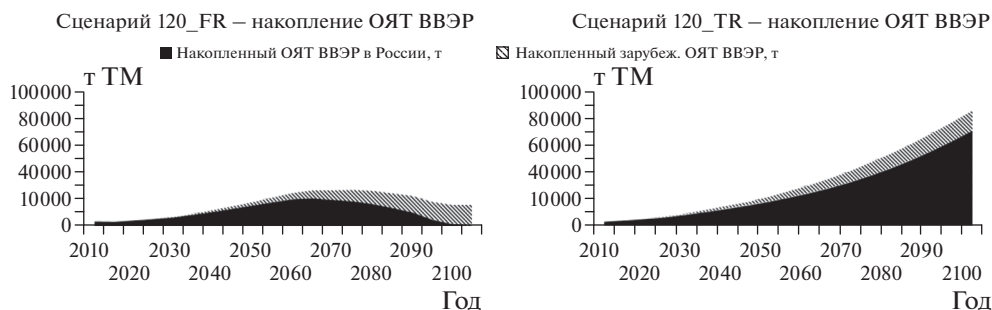


Рис. 1. Накопление ОЯТ ВВЭР в сценариях 120_FR и 120_TR.

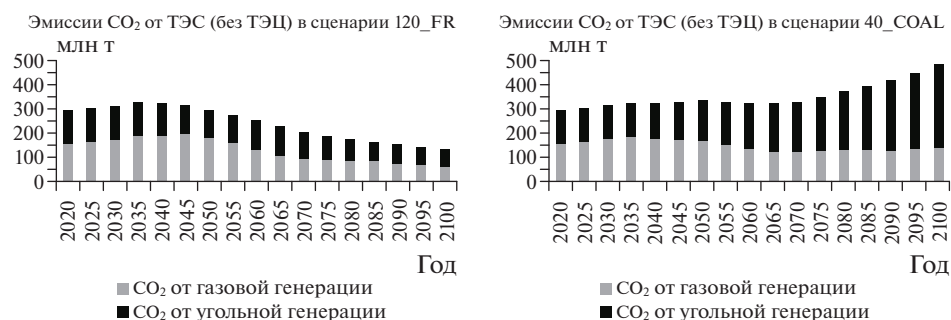


Рис. 2. Эмиссии CO₂ от генерации без учета вклада ТЭЦ в сценариях 120_FR и 40_COAL.

- рециклинга СНУП топлива с КВА ~1.05;
- достаточного количества ОЯТ ВВЭР для переработки;
- длительности внешнего топливного цикла равной 2 годам.

В основу каждого сценария заложено предположение, что после середины века одной из технологий генерации электроэнергии будет отдан приоритет для дальнейшего развития. Это исходное положение существенно влияет на баланс продуктов системы. Корректный расчет количественных показателей, относящихся к потреблению топлива, истощению ресурсной базы, уровню выбросов CO₂, накоплению ОЯТ и Pu определяют итоговую сравнительную оценку сценариев. Для примера, на рис. 1 показано, как в ядерно-энергетической системе (ЯЭС) доля РБН влияет на объемы накопления ОЯТ ВВЭР в сценариях 120_FR (с крупномасштабным развитием ЯЭ на базе РБН) и 120_TR (крупномасштабное развитие ЯЭ на базе ТР), а на рис. 2 — как смещение в пользу генерации на органическом топливе приводит к увеличению выбросов CO₂.

Динамика изменения стоимости углеводородного топлива задана на основе прогнозов ИнЭИ РАН [10]. Динамика изменения цены природного урана для каждого сценария рассчитывалась исходя из скорости истощения минерально-сырьевой базы (МСБ) с учетом данных Красной Книги 2016 (NEA/IAEA) по имеющимся запасам в России с учетом стоимости извлечения. Для представления того, как истощение запасов природного урана влияет на его стоимость целесообразно рассмотреть два крайних сценария с максимальной экономией и максимальным расходом урана — 120_FR и 120_TR.

Таблица 2. Выбранные ключевые показатели эффективности

Высокоуровневая цель	Категория КПЭ	КПЭ	Целевая функция
Снижение затрат	Экономика	Системная LCOE, центов/кВт ч (ставка 5%)	Мин.
Улучшение производственных характеристик	Обращение с отходами	ОЯТ ВВЭР в 2100 г., т (в России)	Мин.
	Обращение с отходами	ОЯТ РБН в 2100 г., т	Мин.
	Ресурсное обеспечение	Интеграл потребления U, тыс. т	Мин.
	Ресурсное обеспечение	Интеграл потребления пр. газа, млрд куб. м	Мин.
	Ресурсное обеспечение	Время израсходования трад. ресурсов U	Макс.
Охрана окружающей среды	Потенциал снижения выбросов	Эмиссии CO ₂ в 2100 г., млн т	Мин.

Таблица 3. Результаты расчета КПЭ для выбранных сценариев исследования

КПЭ	120_FR	120_TR	80_REF	80_TR	40_Gas	40_Coal
Системная LCOE, центов/кВт ч	3.87	4.05	3.87	3.96	4.03	3.90
ОЯТ ВВЭР в 2100 г., т (в России)	0	76058	15461	61134	48187	48187
ОЯТ РБН в 2100 г., т	1516	1450	1126	1457	1457	1457
Интеграл потребления U, тыс. т (с учетом экспорта)	452	998	452	812	648	648
Интеграл потребления пр. газа, млрд куб. м	4843	4843	5628	5628	7827	5628
Время израсходования трад. ресурсов U	2100	2085	2100	2095	2100	2100
Эмиссии CO ₂ в 2100 г., млн т	136	136	280	280	345	482

Результаты оценки. Для оценки привлекательности того или иного сценария разработано дерево целей КПЭ, приведенное в табл. 2. Конкретный набор КПЭ, использованный в настоящей работе, был определен исходя из предыдущего опыта проведения системных исследований и опираясь на методику, приведенную в работах [2, 3, 7]. Все КПЭ были сгруппированы по четырем категориям (экономика, обращение с отходами, ресурсное обеспечение, потенциал снижения выбросов), каждая из которых, в свою очередь, использовалась для выполнения одной из трех высокоуровневых целей сценариев — снижение затрат, улучшение производственных характеристик, охрана окружающей среды.

В таблице 3 приведены результаты расчета КПЭ сценариев. Анализируя полученные значения КПЭ, можно сделать ряд предварительных выводов относительно эффективности того или иного сценария:

1) Несмотря на технологическое перевооружение старых ТЭС на новые, более эффективные по удельному расходу условного топлива, сценарии с высокой долей энергии на ископаемом топливе не смогли обеспечить качественное снижение уровня выбросов CO₂.

2) Существующая МСБ урана, оцененная в ~512 тыс. т с учетом коэффициента извлечения, не способна обеспечить широкомасштабную ЯЭС с доминированием ТР для обеспечения АЭС топливом в России и за рубежом.

3) В сценариях с доминированием ТР накопленные объемы ОЯТ будут сравнимы с объемами ОЯТ в США сегодня (на уровне 80 тыс. т).

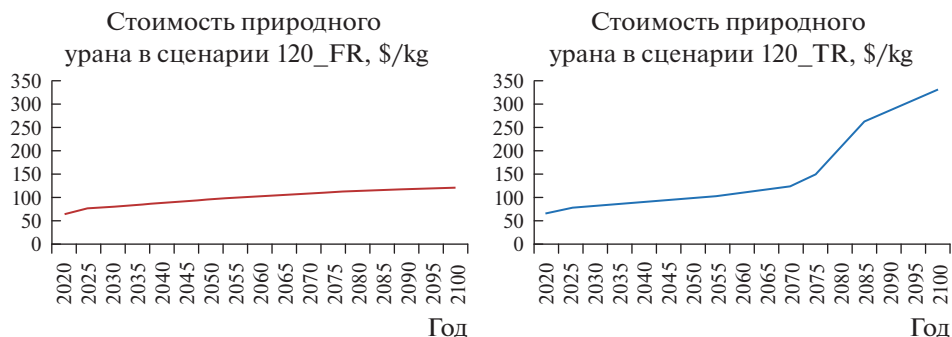


Рис. 3. Динамика изменения стоимости урана в сценарии 120_FR и 120_TR.

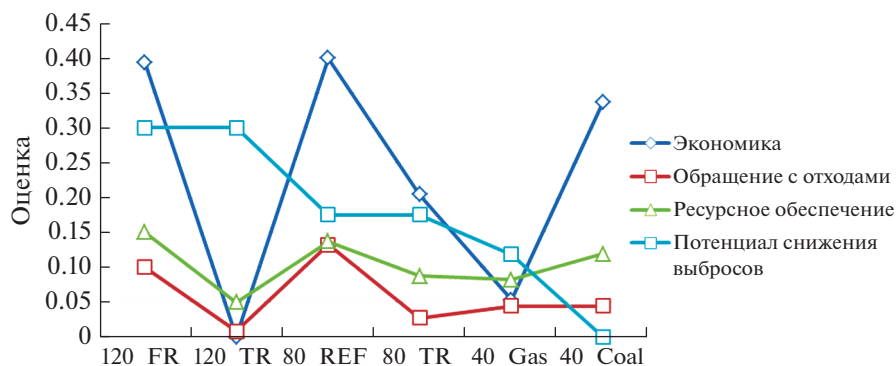


Рис. 4. Относительный вклад категорий КПЭ в общую оценку.

Для того чтобы оценить привлекательность выбранных сценариев с точки зрения критериев устойчивости развития энергетики, необходимо назначить выбранным КПЭ весовые коэффициенты, определяющие относительную важность/значимость показателя для лица, принимающего решение. Существует множество способов определения значений весовых коэффициентов, однако в рамках настоящей работы приняты достаточно консервативные, по мнению автора работы, параметры: снижение затрат – 0.4, улучшение производственных характеристик – 0.3, окружающая среда – 0.3. Веса показателей внутри каждой категории КПЭ распределены равномерно. На основе выбранных весовых коэффициентов было проведено сравнение полученных результатов моделирования сценариев по категориям КПЭ (рис. 4) в части их относительного вклада в общую оценку.

Согласно данным, представленным на рис. 4, сценарии 120_FR и 120_TR оказались опциями с наибольшим потенциалом для снижения выбросов. Стоит отметить однако, что сценарий 120_TR полностью неконкурентоспособен с учетом всей совокупности критериев оценки – обращения с отходами, ресурсного обеспечения и потенциала снижения выбросов. Сценарии 40_Gas и 40_Coal имеют ожидаемо низкие оценки в части экологической приемлемости, однако у последнего имеется преимущество по показателю экономики (в исследовании темп удорожания газа значительно превосходит темп удорожания угля). Также можно отметить, что сценарии 120_FR и 80_Ref лучшие по показателю устойчивости ресурсного обеспечения. На рисунке 5 показано, как все эти факторы формируют общую оценку каждого рассмотренного сценария.

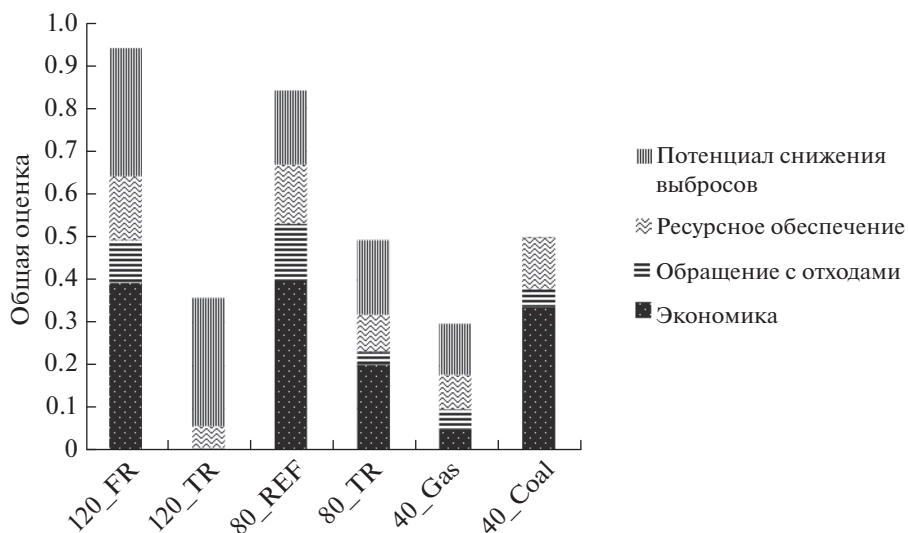


Рис. 5. Общая оценка выбранных для исследования сценариев.

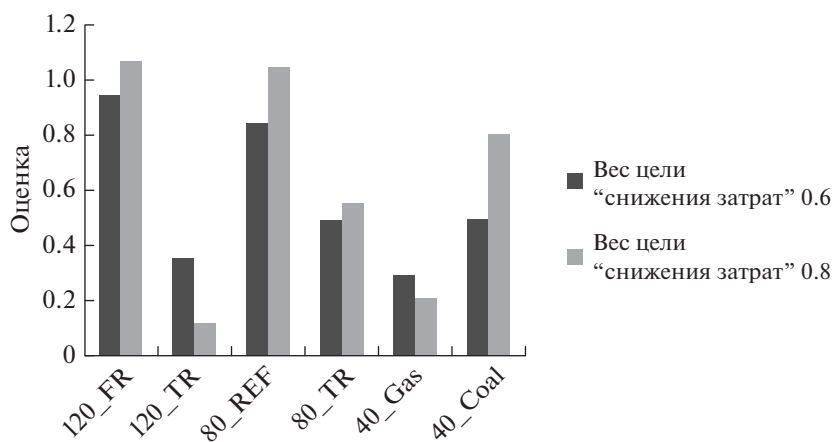


Рис. 6. Анализ чувствительности результатов оценки к вариации весовых коэффициентов.

Любой многокритериальный анализ должен сопровождаться проведением анализа чувствительности результатов оценки к вариации весовых коэффициентов. Такого рода анализ может помочь специалистам из различных областей понять причину отторжения сценария, который, по их мнению, наоборот, кажется наиболее привлекательным. Например, если сместить оценку исключительно в сторону экономической плоскости, установив весовой коэффициент 0.8 высокоуровневой цели "снижение затрат", то привлекательность сценария с преобладающей долей угольной генерации существенно вырастет ввиду достаточно низкой системной приведенной стоимости электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов, полученных в рамках системного моделирования сценариев развития энергетики России с детальным описанием возможных технологических профилей ядерной энергетики, выполнен их сравнительный анализ на базе методов дискретного анализа решений с учетом рекомендаций, выработанных в рамках проекта сотрудничества МАГАТЭ/ИНПРО KIND. Совместное применение этих методов позволило комплексно сравнить рассмотренные гипотетические сценарии развития электроэнергетики России и выявить их системные преимущества и недостатки. Для проведения дальнейших работ по сценарному анализу и комплексной оценке вариантов реализации национальной стратегии развития ядерной и общей энергетики России представляется целесообразным совместно использовать инструменты системного моделирования и поддержки принятия решений в условиях многокритериальной оценки (в качестве такого подхода, например, может быть использован подход KIND, разработанный в секции ИНПРО МАГАТЭ), что позволит качественно улучшить расчетно-аналитические обоснования выбора наиболее эффективной стратегии развития энергетики России.

Автор выражает благодарность сотрудникам секции ИНПРО/МАГАТЭ В.В. Кузнецову и Г.А. Фесенко за предоставленную возможность применения инструментария сравнительного анализа ядерных и неядерных систем для дополнения выработанного в Частном учреждении “ИТЦП “ПРОРЫВ” подхода к системному моделированию сложных экономических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 гг.”. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. М. 2018 г.
2. Кузнецов В., Фесенко Г., Андрианов А. Проект сотрудничества ИНПРО “Ключевые индикаторы для оценки инновационных ЯЭС” (KIND). Сборник докладов на IV Международной научно-технической конференции “Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики”. АО “НИКИЭТ” Т. 1. 2016.
3. Андрианов А.А., Купцов И.С., Осипова Т.А., Андрианова О.Н., Утянская Т.В. Сравнительный анализ сценариев развертывания ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами на основе методов дискретного анализа решений. Известия РАН. Энергетика. 2019. № 2.
4. Муравьев Е.В. Генератор системных моделей УСМ-1. Препринт ОАО “НИКИЭТ” ЕТ-08/75, 2008.
5. Муравьев Е.В., Каширский А.А. Влияние глубины выгорания топлива в реакторах на быстрых нейтронах на технико-экономические характеристики замкнутого ядерного топливного цикла в двухкомпонентной ядерной энергетике. Известия РАН. Энергетика. 2016. № 1.
6. Адамов Е.О., Каширский А.А., Муравьев Е.В., Толстоухов Д.А. Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетики при переходе к замыканию ядерного топливного цикла. Известия РАН. Энергетика. 2016. № 5.
7. Кузнецов В., Фесенко Г., Андрианов А., Купцов И.С. INPRO Activities on Development of Advanced Tools to Support Judgment Aggregation for Comparative Evaluation of Nuclear Energy Systems. Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations 2015.
8. Макарова А.С., Малахов В.А. Выполнение многовариантных оптимизационных расчетов развития электроэнергетики и топливных отраслей для удовлетворения внутреннего спроса на энергоносители по регионам страны и эффективного экспорта энергоресурсов при традиционной и новой стратегии развития ядерной энергетики России. Определение внутриотраслевых условий обеспечения эффективности ядерной энергетики. Отчет ИНЭИ, 2013.
9. Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / Под ред. Макарова А.А., Григорьева Л.М., Митровой Т.А.; ИНЭИ РАН—АЦ при Правительстве РФ — Москва, 2016. 196 с. ISBN 978-5-91438-023-3.
10. Системные исследования развития энергетики: курс лекций / Макаров А.А. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 280 с.

Comparative Analysis of Russian Energy Development Scenarios Using the “KIND” Approach**A. A. Kashirsky****ITC for “PRORYV” Project, Moscow, Russia***e-mail: kana@proryv2020.ru*

A comparative analysis study of several hypothetical Russian energy development scenarios has been completed using the “KIND” approach, which was developed at IAEA within the INPRO project for assessing the preferability of alternative nuclear and/or non-nuclear energy system options. Preferability is established by evaluating a set of key performance indicators that define these options from different aspects of the energy system. The simulation models incorporated nuclear and fossil-fuel power system technical and economic performance data taking into account improved fuel efficiency characteristics and capital cost reductions that are expected to occur in the future. For scenarios that envision large-scale nuclear power development an option where generation capacity evolves into a two-component system with fast reactors using closed nuclear fuel cycle technologies gradually displace traditional thermal reactors is thoroughly analyzed. The key performance indicators developed for assessing the preferability of each scenario are grouped into several categories, including economics, resource utilization, waste management and environmental impact. Using system modeling tools developed within the “Proryv” project and “KIND” comparative assessment tools several energy development scenarios were evaluated in this way. The work demonstrated how a combination of these tools can be used to identify the most sensible option for developing a sustainable energy system with economic, ecological and resource availability factors taken into account.

Keywords: energy development scenarios, energy strategy, two-component nuclear power, system modeling, INPRO, power generation sources, NPP, fossil-fuel generation, energy sustainability