

УДК 620.98

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА И РАНЖИРОВАНИЕ
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ NEEDS И KIND**© 2020 г. А. А. Андрианов^{1,2}, С. А. Квятковский¹, И. С. Купцов^{1,2,*}, П. Б. Птицын¹¹Госкорпорация “Росатом”, Частное учреждение “Наука и инновации”, ОЦАИР, Москва, Россия²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

*e-mail: iskuptsov@mephi.ru

Поступила в редакцию 26.05.2020 г.

После доработки 27.07.2020 г.

Принята к публикации 30.07.2020 г.

В работе представлены результаты многокритериального сравнительного анализа и ранжирования шести энергетических технологий, включая 2 варианта ядерно-энергетических установок, 2 вида энергоустановок на ископаемом топливе и 2 варианта возобновляемых источников энергии. Проведенный анализ основывался на совместном использовании подходов, предложенных в рамках проекта NEEDS (6-ая Рамочная программа Европейской комиссии) и совместного проекта ИНПРО/МАГАТЭ KIND. Многокритериальная оценка была выполнена на технологическом уровне. Набор из 36-ти ключевых показателей, объединенных в четырехуровневое дерево целей, совместно с методиками их оценки был заимствован из проекта NEEDS и адаптирован для целей настоящего исследования. Подход к агрегированию количественных оценок и проведению анализа чувствительности/неопределенности результатов ранжирования к ключевым параметрам модели основан на рекомендациях и предполагал использование расчетного инструментария секции ИНПРО/МАГАТЭ. Полученные результаты демонстрируют наибольшую эффективность ядерно-энергетических технологий (особенно быстрых реакторов) с точки зрения достижения целей устойчивого энергетического развития в Российских условиях: их общесистемная эффективность представляется более привлекательной, чем возобновляемых энергоисточников.

Ключевые слова: энерготехнологии, многокритериальный анализ, ранжирование, анализ неопределенности/чувствительности, проект NEEDS, проект KIND, МАГАТЭ, ИНПРО

DOI: 10.31857/S0002331020050040

ВВЕДЕНИЕ

Многокритериальный подход к сравнительной оценке эффективности энерготехнологий и технологий топливного цикла становится с каждым годом все более популярным, поскольку позволяет проводить комплексный многофакторный сопоставительный анализ конкурирующих альтернатив на протяжении всего их жизненного цикла. При этом в рамках данного подхода оказывается возможным учитывать не только экономические факторы, безусловно играющие важную роль, но также критерии и атрибуты, которые невозможно выразить в экономических категориях, например, показатели воздействия на окружающую среду и социум [1–3]. При проведении многокритериального сравнения различных энерготехнологий, включая ядерные энерготехнологии, энерготехнологии на ископаемом топливе, возобновляемые энергоисточники, необходимо решить следующий круг задач:

– выбрать и обосновать набор ключевых показателей эффективности, способных всесторонне и сбалансированно охарактеризовать эффективность сравниваемых энерготехнологий с позиций устойчивого развития;

– сформировать информационные базы данных, на основе которых возможна репрезентативная и реалистичная оценка всех показателей эффективности для каждого рассматриваемого варианта, а также оценка относительной важности показателей эффективности, отражающая приоритеты и видение экспертов и лиц, принимающих решения, на будущее энерготехнологий;

– провести агрегацию индивидуальных оценок показателей эффективности при условии обеспечения комплексности, прозрачности, воспроизводимости, верифицируемости процедуры и выявить сильные и слабые стороны каждой из энерготехнологий, а также указать наиболее привлекательные опции для различных перспектив;

– выполнить анализ чувствительности/неопределенности результатов ранжирования по отношению к ключевым факторам и предположениям, используемых в разработанной модели поддержки принятия решений.

Следуя этой логике, в настоящей работе с использованием международного методического и расчетного инструментария выполнена многокритериальная сравнительная оценка и ранжирование шести энергетических технологий, включая 2 варианта ядерно-энергетических установок, 2 вида энергоустановок на ископаемом топливе и 2 варианта возобновляемых источников энергии, с точки зрения их эффективности для обеспечения устойчивого энергетического развития в Российских условиях и предполагающего гармоничное сочетание социальных, экономических и экологических факторов.

Долгосрочные приоритеты развития российского энергетического комплекса

Энергетическая стратегия Российской Федерации направлена на максимальное использование внутренних источников энергии и реализацию потенциала энергетического сектора для поддержания экономического роста. Энергетическая стратегия определяет следующие основные приоритеты: повышение энергоэффективности, снижение воздействия на окружающую среду, содействие устойчивому развитию и технологическому развитию, повышение эффективности и конкурентоспособности [4, 5].

В Энергетической стратегии предполагается, что энерготехнологии на ископаемом топливе продолжают вносить основной вклад в энергобаланс России (при сохранении преобладания потребления газа и снижении потребления твердого и жидкого ископаемого топлива). Однако доля энерготехнологий на ископаемом топливе будет ежегодно снижаться за счет сооружения новых и реновации существующих электростанций на основе безуглеродных технологий [6, 7].

Если рассматривать различные сектора энергетики, то наиболее интенсивно безуглеродные технологии производства и хранения энергии будут внедряться в электроэнергетике [6, 7]. Тепловые электростанции сохранят свое лидирующее место по объемам вырабатываемой электроэнергии, хотя их доля несколько снизится, доля атомной генерации останется на прежнем уровне и, соответственно, вырастет доля производства электроэнергии на ГЭС, нетрадиционных и возобновляемых источниках энергии. Конкурентоспособность АЭС будет поддерживаться за счет улучшения проектов АЭС и роста цен на ископаемое топливо. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии с учетом затрат на их внедрение в энергосистему России, останутся заметно дороже тепловых электростанций на сетевом рынке электроэнергии. Таким образом, в Российской Федерации предполагается развертывание широкого спектра энерготехнологий, что делает целесообразным проведение их многокритериального сопоставления с целью выявления достоинств и недостатков каждой с точки зрения их эффективности в достижении целей устойчивого энергетического развития.

Проект NEEDS: область применения, подходы и основные результаты

Проект NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability) – это исследовательский проект, финансируемый в рамках 6-й Рамочной программы Европейской комиссии по исследованиям, технологическому развитию и демонстрации (сроки реализации 2004–2009) [8, 9]. Проект NEEDS являлся междисциплинарным исследованием, объединившим усилия специалистов по энергетическим технологиям, оценке экологических, социальных и экономических показателей энерготехнологий, методам поддержки принятия решений. В проекте принимали участие более 60 партнерских организаций, включая более 200 ученых и исследователей, представителей энергокомпаний, профильных министерств и ведомств, общественности, политического истеблишмента. Была выпущена большая серия сборников результатов работы и технических документов (более 230 единиц, все они доступны на веб-сайте проекта NEEDS www.needs-project.org).

В рамках проекта были использованы различные подходы к оценке энерготехнологий и, в частности, отмечалось несмотря на то, что концепция полных затрат обычно считается наиболее обоснованной и предоставляет данные, имеющие непосредственное отношение к энергетической политике, возникает вопрос о том, удастся ли в рамках такого подхода в полной мере охватить разнообразные аспекты устойчивого развития. Политики и представители гражданского общества утверждают, что чисто денежная оценка всех затрат и выгод не позволяет надежно отразить отдельные явления и их реальное значение, которые по своей сути не поддаются количественному определению/монетизации и/или объективной трудности расчета соответствующих показателей. В связи с этим необходимы дополнительные подходы к оценке, в частности те, которые предполагают использование разнообразных показателей устойчивого развития, позволяющих получить более полную картину результирующей эффективности отдельных технологий. В этой связи в рамках проекта были применены два подхода: оценка внешних затрат и оценка, предполагающая использование методов многокритериального анализа решений.

В рамках проекта удалось достичь согласия по набору критериев оценки устойчивости энерготехнологий. Отправной точкой являются три измерения устойчивости: окружающая среда, экономика и общество. Эти три направления устойчивости декомпозируются на четыре иерархических уровня. Набор критериев включает 36 показателей, из которых 11 относятся к экологическим, 9 – к экономическим и 16 – к социальным показателям. Экологическое измерение включало следующие области оценки: энергетические и неэнергетические ресурсы (3 показателя), влияние на изменение климата (1 показатель), воздействие на экосистемы (5 показателей) и образование отходов (2 показателя). Экономическое измерение характеризовалось следующими областями оценки: воздействие на конечных потребителей (1 показатель), воздействие на экономику (2 показателя) и экономический эффект на компании-производители (6 показателей). Социальное измерение включало такие области оценки как: безопасность/надежность энергоснабжения (3 показателя), политическая стабильность и легитимность (2 показателя), общественные и индивидуальные риски (9 показателей), качество жизни (2 показателя). В таблице 1 приведены все критерии оценки проекта NEEDS. Этот набор критериев использовался в рамках настоящего исследования.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, МЕТОДЫ И ДОПУЩЕНИЯ

В рамках настоящей работы были рассмотрены шесть технологий производства электроэнергии, в том числе 2 варианта ядерно-энергетических установок, 2 вида энергоустановок на ископаемом топливе и 2 варианта возобновляемых источников энергии: АЭС с реактором типа ВВЭР (РТН), АЭС с быстрым натриевым реактором (РБН), угольная электростанция (КЭС), газотурбинная электростанция комбинированного цикла (ПГУ), солнечная фотоэлектрическая электростанция (СЭС), ветряная электростанция (ВЭС).

Таблица 1. Критерии оценки проекта NEEDS

Цели высокого уровня	Области оценки	Подобласти	Короткое название КИ	Описание	Ед. измерения
Окружающая среда Критерии, связанные с защитой окружающей среды (оцениваются на основе анализа жизненного цикла)	Энергетические и неэнергетические ресурсы Использование ресурсов (невозобновляемых)	Энергия Энергоресурсы, используемые на протяжении жизненного цикла	Ископаемое топливо	Критерий определяет количество первичной энергии, необходимой для производства 1 кВт·ч электроэнергии, с учетом всего жизненного цикла энерготехнологии.	МДж/кВт·ч
		Минеральные ресурсы Минеральные ресурсы, используемые на протяжении жизненного цикла	Уран	Критерий определяет количество первичной энергии, необходимой для производства 1 кВт·ч электроэнергии, полученной из урана.	МДж/кВт·ч
Изменение климата Оценка вероятного влияния на изменение климата	Влияние на экосистему Потенциальное воздействие на экосистему		Выбросы парниковых газов	Критерий учитывает общее количество выбросов парниковых газов, выраженных в массовом эквиваленте углекислого газа.	кг (Sb-экв.)/кВт·ч
			Землепользование	Критерий определяет потерю видов (флоры и фауны) из-за земли, используемой для производства 1 кВт·ч электроэнергии, и рассчитывается как потенциально пострадавшая часть вида, умноженная на площадь занятой поверхности земли и времени (potentially damaged fraction – PDF).	PDF·м ² ·год/кВт·ч
			Экологическая токсичность	Критерий рассчитывает потери видов (флора и фауна) из-за экологически токсичных веществ, попавших в воздух, воду или почву в связи с производством 1 кВт·ч электроэнергии, и рассчитывается как потенциально пострадавшая часть вида, умноженная на площадь занятой поверхности земли и времени.	PDF·м ² ·год/кВт·ч
			Подкисление/эвтрофикация	Критерий рассчитывает потери видов (флора и фауна) из-за подкисления и эвтрофикации в связи с производством 1 кВт·ч электроэнергии, и рассчитывается как потенциально пострадавшая часть вида, умноженная на площадь занятой поверхности земли и времени.	PDF·м ² ·год/кВт·ч

Таблица 1. Продолжение

Цели высокого уровня	Области оценки	Подобласти	Короткое название КИ	Описание	Ед. измерения
		Тяжелые аварии <i>Воздействие на экосистему в случае тяжелых аварий</i>	Образование углеводородов	Количественная оценка крупных аварийных разливов углеводородов (не менее 10 000 тонн), которые потенциально могут нанести ущерб экосистемам.	т/кВт·ч
			Загрязнение территории	Критерий рассчитывает площадь зараженной земли из-за попадания в нее радиоактивных изотопов. Зараженная поверхность оценивается на основе вероятностного анализа безопасности (только для ядерно-энергетической технологической цепочки).	\$/км ² /кВт·ч
	Отходы <i>Оценка вероятного влияния отходов</i>		Химические отходы	Критерий количественно оценивает общую массу специальных химических отходов, хранящихся в подземных хранилищах и полученных в результате производства 1 кВт·ч электроэнергии.	кг/кВт·ч
			Радиоактивные отходы	Критерий рассчитывает объем САО и ВАО, содержащихся в подземных хранилищах и полученных в результате производства 1 кВт·ч электроэнергии.	м ³ /кВт·ч
Экономика <i>Критерии, связанные с экономикой</i>	Влияние на потребителя <i>Экономические последствия для потребителей</i>		Себестоимость	Критерий показывает среднюю себестоимость производства электроэнергии за 1 кВт·ч и включает в себя капитальные затраты, топливо, расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание (удельные дисконтированные затраты).	€/МВт·ч
	Влияние на экономику и общество <i>Экономический эффект для общества</i>		Постоянные рабочие места	Критерий оценивает число рабочих мест, непосредственно связанных со строительством и эксплуатацией энерготехнологий, включая рабочие места, связанные с добычей или заготовкой и транспортировкой топлива.	чел.-лет/ГВт·ч
			Топливная независимость	Производство электроэнергии может быть подвержено перебоям в обслуживании, если импортное топливо недоступно из-за экономических или политических проблем. Данный критерий отражает степень топливной независимости (экспертная оценка).	Значение

Таблица 1. Продолжение

Цели высокого уровня	Области оценки	Подобласти	Короткое название КИ	Описание	Ед. измерения
	Влияние на производство <i>Экономический эффект на компании-производители</i>	Финансы <i>Финансовое воздействие на генерирующую компанию</i>	Финансовые риски	Энергетические компании могут столкнуться со значительным финансовым риском, если стоимость сооружения электростанции окажется очень высокой. Критерий оценивает затраты, необходимые для привлечения дополнительного капитала.	€
			Чувствительность к стоимости топлива	Вклад стоимости топлива в общую стоимость генерации электроэнергии может варьироваться от нуля (солнечная энергия) до небольшого значения (ядерная энергия) и до значительного значения (газовые турбины). Критерий определяет насколько чувствительны затраты на производство электроэнергии к изменению цен на топливо.	Коэффициент
			Время сооружения	В период строительства электростанции энергетическая компания может столкнуться с существенным недовольством, что может привести к задержкам и другим проблемам при строительстве. Данный критерий характеризует ожидаемое время ввода в эксплуатацию в годах. Время планирования и согласования не включено в критерий.	Год
		Эксплуатационные факторы <i>Факторы, связанные с эксплуатацией технологий, и влияющие на генерирующие компании</i>	Предельная стоимость	Энергетическая компания распределяет на грузку или встраивает установку в эксплуатацию в соответствии с их эксплуатационными затратами, начиная с самых дешевых установок с базовой нагрузкой до установок с максимальной стоимостью в пиковые периоды времени. Данный критерий характеризует предельную стоимость эксплуатации установок.	€/кВт · ч
			Гибкость	Энергетическим компаниям необходимо прогнозировать объем электроэнергии, который не будет утилизирован, а также учитывать время запуска и останки электростанции, которые возможно контролировать. Этот критерий объединяет эти два показателя (определяется на основе экспертной оценки).	Значение

Таблица 1. Продолжение

Цели высокого уровня	Области оценки	Подобласти	Короткое название КИ	Описание	Ед. измерения
Социальная сфера <i>Критерий, связанных с общественным мнением (опрос экспертов)</i>	Надежность энергообеспечения <i>Социальная защита</i>	Политическая ответственность <i>Преemptивность власти</i>	Доступность	Все технологии могут иметь эксплуатационные простои или частичные сбои из-за неисправностей оборудования или из-за технического обслуживания. Этот критерий показывает долю времени, в течение которого генерирующая установка вырабатывает электроэнергию на номинальной мощности.	Фактор
			Надежность поставок	Рыночная концентрация поставщиков энергии в первичном энергетическом секторе, которая может привести к экономическим или политическим нарушениям.	Шкала значений
	Социальная защита	Преemptивность власти	Хранилище отходов	Вероятность того, что хранилища будут не готовы или не доступны в момент, когда надо будет принимать отходы от всего жизненного цикла технологии.	Шкала значений
			Приспособляемость	Техническая характеристика каждой технологии, позволяющая ей быть гибкой для модернизации и внедрения инноваций.	Шкала значений
			Противоречия	Наличие конфликтов (исторические свидетельства), обусловленных особенностями энергетических систем.	Шкала значений
	Политическая устойчивость, законодательство <i>Политическая легитимность</i>		Участие	Требования к процессам принятия решений с участием общественности, особенно в отношении разрешений на строительство или эксплуатацию энергообъектов.	Шкала значений
			Смертность	Потерянные годы жизни всего населения из-за нормальной эксплуатации в сравнении с тем, как если бы эксплуатация не эксплуатировалась.	YOLL/кВт·ч (years of life lost – YOLL)
	Общественные и индивидуальные риски <i>Риски</i>	Стандартные риски <i>Риски при штатной работе</i>	Заболелость	Годы жизни с поправкой на инвалидность, рассчитанные для всего населения и оцененные при нормальной эксплуатации в сравнении с тем, как если бы эксплуатация не эксплуатировалась.	DALY/кВт·ч (disability adjusted life years – DALY)
			Смертность от аварии	Число вероятных смертельных случаев на каждый кВт·ч электроэнергии, при тяжелых авариях с 5 или более жертвами на аварии.	Смертность/кВт·ч

Таблица 1. Окончание

Цели высокого уровня	Области оценки	Подобласти	Короткое название КИ	Описание	Ед. измерения				
				Вероятное максимальное число погибших в результате одной аварии в технологической цепочке производства электроэнергии.	Жертв/случай				
				Опасения граждан в связи с негативными последствиями для здоровья во время нормальной работы технологии производства электроэнергии.	Шкала значений				
				Восприятие гражданами характеристик риска, личный контроль над ним, масштаб потенциального ущерба и их знание рисков.	Шкала значений				
				Вероятность теракта (оценка на основе анализа уязвимости, потенциального ущерба и общего восприятия риска).	Шкала значений				
				Вероятные максимальные последствия успешного теракта. Специально для маловероятных аварий с особенно тяжелыми последствиями.	Число случаев со смертельным исходом				
				Возможность злоупотребления технологиями или материалами, присутствующими в технологической цепочке производства ядерной электроэнергии.	Шкала значений				
				Общее функциональное и эстетическое влияние на ландшафт всей технологии и ее топливной цепочки (исключая транспорт).	Шкала значений				
				Количество шума, производимого генерирующей установкой, а также транспортировкой материалов на электростанцию и в обратном направлении.	Шкала значений				
				Максимальное количество жертв	Предполагаемый риск	Предполагаемый риск	Максимальное количество жертв	Вероятное максимальное число погибших в результате одной аварии в технологической цепочке производства электроэнергии.	Жертв/случай
				Штатная эксплуатация	<i>Принимаемые социальными рисками</i>	Предполагаемая эксплуатация	Штатная эксплуатация	Опасения граждан в связи с негативными последствиями для здоровья во время нормальной работы технологии производства электроэнергии.	Шкала значений
Предполагаемый несчастный случай		Предполагаемый несчастный случай	Предполагаемый несчастный случай	Восприятие гражданами характеристик риска, личный контроль над ним, масштаб потенциального ущерба и их знание рисков.	Шкала значений				
Вероятность теракта	Терроризм <i>Риск террористической атаки</i>	Вероятность теракта	Вероятность теракта	Вероятность теракта (оценка на основе анализа уязвимости, потенциального ущерба и общего восприятия риска).	Шкала значений				
Последствия теракта		Последствия теракта	Последствия теракта	Вероятные максимальные последствия успешного теракта. Специально для маловероятных аварий с особенно тяжелыми последствиями.	Число случаев со смертельным исходом				
Нераспространение		Нераспространение	Нераспространение	Возможность злоупотребления технологиями или материалами, присутствующими в технологической цепочке производства ядерной электроэнергии.	Шкала значений				
Ландшафт		Ландшафт	Ландшафт	Общее функциональное и эстетическое влияние на ландшафт всей технологии и ее топливной цепочки (исключая транспорт).	Шкала значений				
Шум		Шум	Шум	Количество шума, производимого генерирующей установкой, а также транспортировкой материалов на электростанцию и в обратном направлении.	Шкала значений				
Качество жизни <i>Качество жилой среды</i>									

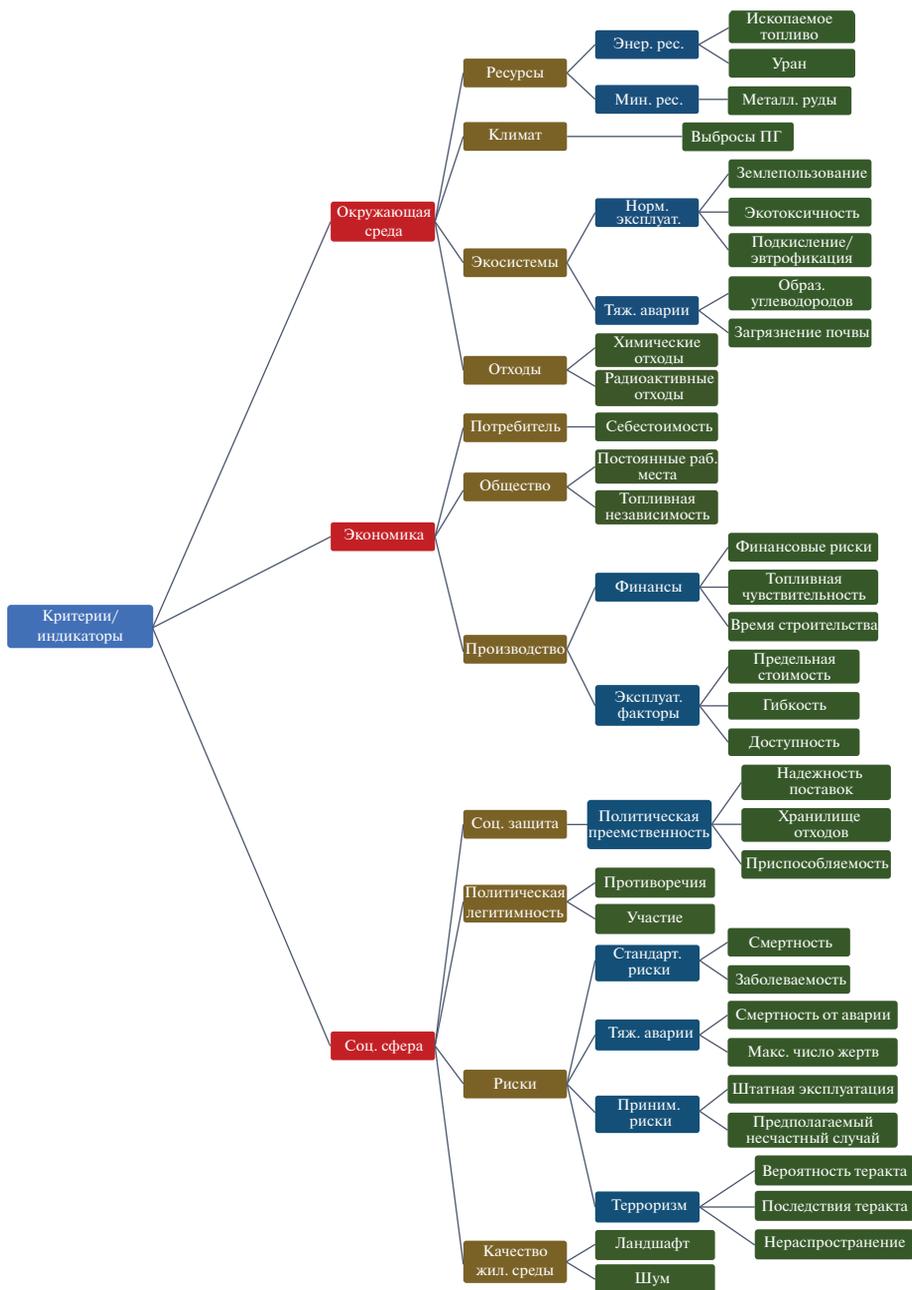


Рис. 1. Дерево целей.

Ключевые индикаторы и их иерархическое расположение

Все 36 критериев оценки, предложенных в проекте NEEDS, были применены для сравнительной оценки шести рассматриваемых в настоящем исследовании технологий производства электроэнергии. Ключевые показатели были иерархически организованы в виде четырехуровневого дерева целей таким же образом, как это было сдела-

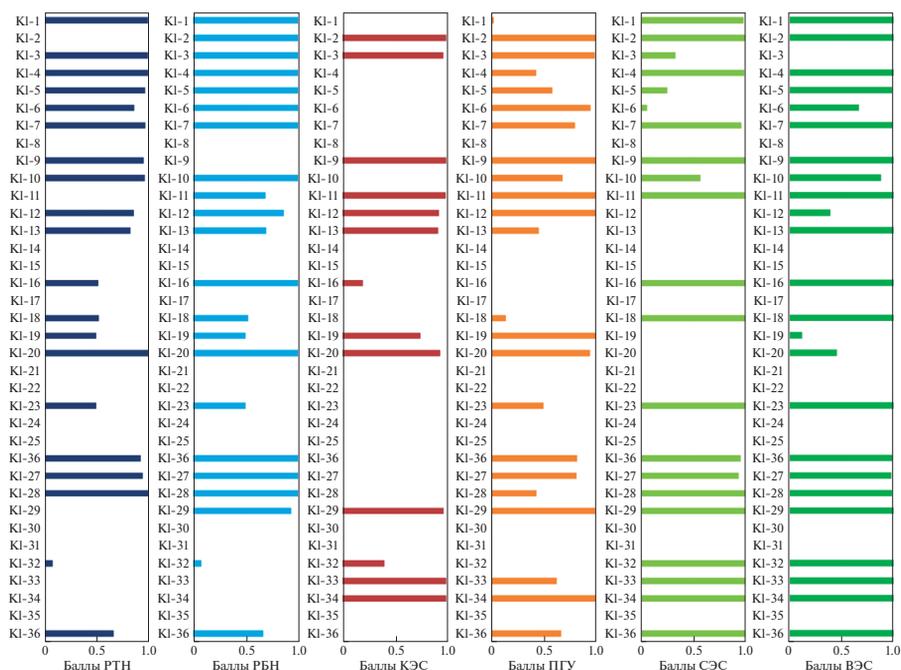


Рис. 2. Нормализованные значения ключевых индикаторов.

но в проекте NEEDS (рис. 1): дерево целей включает в себя три цели высокого уровня, 11 областей и 17 подобластей оценки, 36 критериев оценки.

Экономические оценки рассмотренных энерготехнологий были взяты из публикаций Института энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН) [7, 10, 11]. В случае отсутствия специфических для России данных по некоторым критериям использовались либо данные проекта NEEDS (если не было значительных различий в оценках этих показателей среди стран, участвующих в проекте NEEDS), либо было решено присвоить таким показателям одинаковые нулевые значения для всех вариантов (если разброс оценок из проекта NEEDS по соответствующим показателям был значительным). Окончательные нормированные значения ключевых индикаторов для рассматриваемых энерготехнологий представлены на рис. 2.

Варианты весовых коэффициентов

Для любого метода агрегации количественных оценок необходимо выбрать весовые коэффициенты, которые используются для свертывания отдельных критериев в обобщенные метрики. Весовые коэффициенты отражают предпочтения лиц, принимающих решения, экспертов и прочих заинтересованных сторон, демонстрируя относительную важность критериев, областей оценки и целей высокого уровня. Вариант “Равные веса” использовался в качестве отправной точки для анализа, предполагая, что все аспекты на каждом уровне дерева целей имели одинаковую относительную важность (этот подход может применяться, когда нет информации от экспертов и лиц, принимающих решения, или когда доступной информации об относительной важности критериев недостаточно [12, 13]). Однако, даже если нет детальной информации о приоритетах экспертов, стейкхолдеров, лиц, принимающих решения, подход “Равные

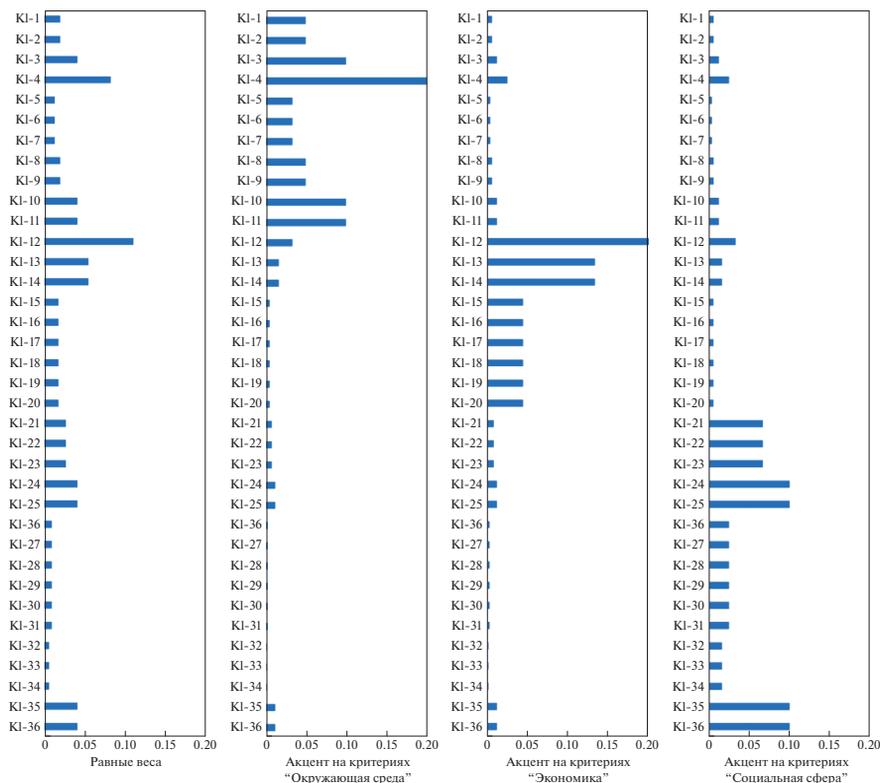


Рис. 3. Весовые коэффициенты.

веса” в сочетании с детальным анализом чувствительности/неопределенности к весам позволяет сделать выводы о потенциале рассматриваемых вариантов с различных перспектив.

Другие три варианта набора весов, отличные от базового варианта, предполагали поочередное присвоение высокого веса либо экологическим, либо экономическим, либо социальным критериям соответственно (рис. 3). Для демонстрационных целей предполагалось, что вес выделенной высокоуровневой цели равен 0,8, а веса двух оставшихся целей принимались равными половине от 0,2. Следует отметить, что веса на каждом более низком уровне дерева целей были определены в соответствии с подходом “Равные веса”.

Агрегация экспертных оценок

Сравнительная оценка и ранжирование рассматриваемых энерготехнологий проводились с использованием многокритериальной теории ценности (метод MAVT, от англ. Multi-Attribute Value Theory): была использована аддитивная форма мультиатрибутивной функции ценности, а также линейные оценочные функции с локальными областями определения для всех критериев [1]. Расчетные инструменты МАГАТЭ, разработанные секцией ИНПРО и предназначенные для проведения многокритериального сравнительного анализа и ранжирования вариантов энерготехнологий и анализа чувствительности/неопределенности в отношении критериев, весовых коэффици-

циентов и оценочных функций, были адаптированы для целей настоящей работы (инструмент KIND-ET и его расширения – Overall Score Spread Builder, Ranks Mapping Tool, Uncertainty Propagator) [1, 14, 15].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАНЖИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты ранжирования для базовых вариантов весов

Следует отметить, что все альтернативы являются недоминируемыми, то есть среди всего набора вариантов нет вариантов, которые были бы однозначно хуже, по крайней мере, одного из оставшихся. Это означает, что каждая альтернатива может занять первое место в рейтинге, если сложатся соответствующие условия (приоритеты).

Вполне ожидаемо, что учет немонетизируемых социальных, экологических и экономических критериев и атрибутов приведет к тому, что рейтинги вариантов, полученные в рамках подхода к оценке на основе методов многокритериального анализа решений, будут отличаться от оценок, основанных на расчете удельных дисконтированных затрат, а также полных затрат для того же набора альтернатив. Отметим, что согласно оценке, основанной на расчете удельных дисконтированных затрат для рассматриваемого в исследовании набора технологий, наиболее привлекательным вариантом является ПГУ, за которым следуют КЭС, РТН и РБН, ВЭС, СЭС [7]. На рисунке 4 показаны результаты ранжирования для рассмотренных вариантов весовых коэффициентов и указаны отдельные составляющие итоговых баллов, соответствующие целям высокого уровня.

Как можно видеть, многокритериальный подход отдает предпочтение ядерным и возобновляемым источникам энергии. Следует отметить, что в отличие от результатов, представленных в проекте NEEDS, в настоящем исследовании в виду отличия российской оценки социальных и экономических индикаторов от европейских оценок, ядерные технологии в целом представляются более привлекательными альтернативами, чем возобновляемые источники энергии с точки зрения достижения целей устойчивого развития. При этом быстрые реакторы Поколения-IV (РБН) демонстрируют большую эффективность, чем реакторы Поколения-III (РТН).

Включение широкого набора социальных критериев приводит к общему снижению рейтинга ядерных технологий и повышению привлекательности возобновляемых источников энергии, из которых ВЭС представляется более привлекательной, чем СЭС. Угольные технологии наименее эффективны в рамках многокритериального анализа, в то время как газовые технологии занимают места в рейтинге близкие к ядерным технологиям. В целом прослеживается следующая тенденция: акцент на окружающую среду снижает привлекательность ископаемых источников энергии по сравнению с другими технологиями, акцент на экономику снижает привлекательность возобновляемых источников энергии, акцент на социальные аспекты снижает привлекательность ядерных технологий.

Достоинства и недостатки рассматриваемых энерготехнологий

При интерпретации результатов многокритериального ранжирования недостаточно указать только то, что один вариант более привлекателен, чем другой: необходимо объяснить причины этого. Возможный способ выполнить это требование – разбить итоговые баллы на отдельные компоненты в соответствии со структурой дерева целей (такое разложение может быть выполнено на разных уровнях дерева целей). Это позволяет всем сторонам, заинтересованным в результатах анализа, отследить вклад каждого аспекта оценки в итоговые баллы альтернатив.

Рисунок 5 демонстрирует достоинства и недостатки энерготехнологий для базового варианта взвешивания: чем выше оценка комплексного показателя, тем выше привлекательность варианта по соответствующему аспекту. Чтобы упростить восприятие ко-

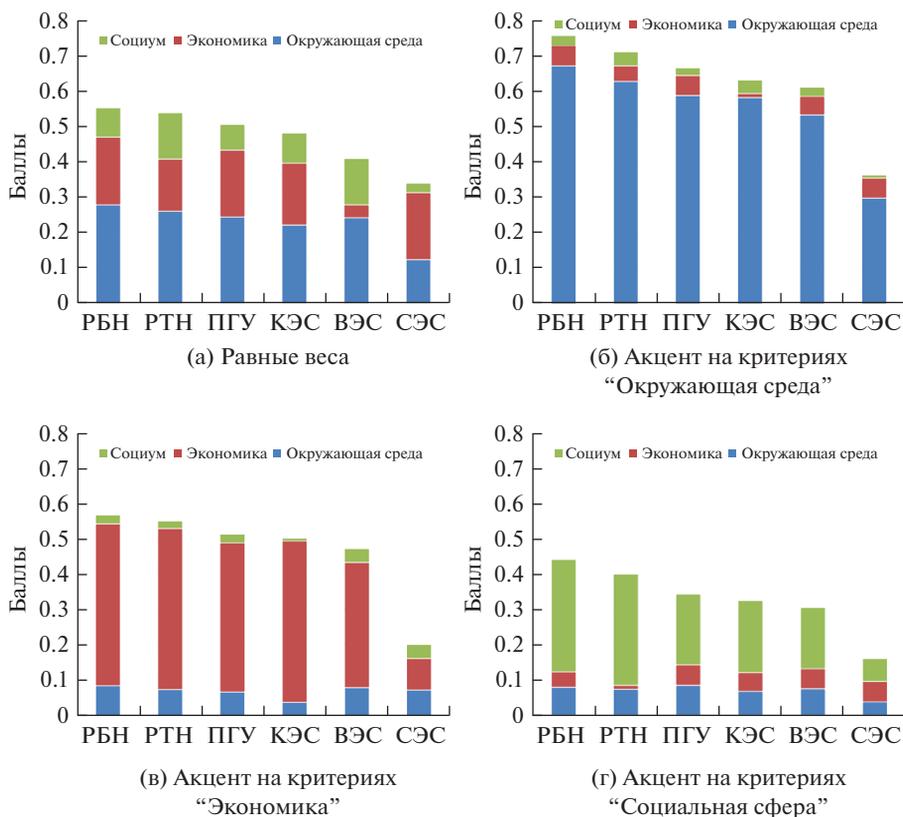


Рис. 4. Ранжирование результатов для различных вариантов весов.

личественных данных о баллах по областям оценки, был использован метод “условного форматирования”, отображающий оценку в цветовой гамме: “хорошо” (зеленый), “приемлемо” (оранжевый), “плохо” (красный). Такое представление позволяет в наглядной форме продемонстрировать сильные и слабые стороны каждого технологического варианта. Следует отметить, что во избежание некорректной интерпретации результатов оценки следует помнить, какие индикаторы включены в каждую область (табл. 1) и какой вариант взвешивания был применен на более низких уровнях дерева целей (в данном случае – равное взвешивание).

В частности, из представленных оценок можно видеть, что как СЭС, так и ВЭС имеют самые высокие баллы по областям оценки из социальной сферы, за которыми следуют РБН, ПГУ, РТН и КЭС. Для областей оценки, принадлежащих категории “Окружающая среда”, соответствующие баллы для РБН и ВЭС являются наиболее привлекательными, в то время как баллы для КЭС являются менее привлекательными. Для областей оценки “Экономика” РТН, РБН, КЭС, ПГУ демонстрируют наиболее привлекательные и близкие между собой значения баллов, в то время как баллы для СЭС довольно низкие для аналогичных областей оценки.

Проведенный анализ по выявлению системных достоинств и недостатков рассмотренных вариантов выработки электроэнергии с точки зрения баллов областей оценки подтверждает наблюдение проекта NEEDS [8, 9], которое состоит в том, что профиль технологических характеристик оказывает решающее влияние на рейтинг рассматри-

Области оценки	РТН	РБН	КЭС	ПГУ	СЭС	ВЭС
Ресурсы	🟡 0.062	🟢 0.083	🟡 0.061	🟡 0.062	🔴 0.055	🔴 0.042
Изменение климата	🟢 0.083	🟢 0.083	🔴 0	🟡 0.036	🟢 0.082	🟢 0.083
Влияние на экосистему	🟢 0.059	🟡 0.042	🔴 0.021	🟢 0.053	🟡 0.039	🟢 0.057
Отходы	🔴 0.040	🟢 0.070	🔴 0.041	🟢 0.070	🟡 0.065	🟢 0.078
Влияние на потребителя	🟢 0.096	🟢 0.096	🟢 0.103	🟢 0.111	🔴 0	🟡 0.044
Экономика и общество	🟢 0.046	🟢 0.039	🟢 0.051	🟡 0.025	🔴 0	🟢 0.056
Влияние на производство	🟡 0.047	🟢 0.056	🔴 0.035	🔴 0.039	🔴 0.037	🟡 0.048
Надежность энергообеспечения	🟡 0.014	🟡 0.014	🔴 0	🟡 0.014	🟢 0.028	🟢 0.028
Политика и законодательство	🟢 0	🟢 0	🟢 0	🟢 0	🟢 0	🟢 0
Риски	🔴 0.030	🟡 0.042	🔴 0.027	🟡 0.043	🟢 0.061	🟢 0.062
Качество жизни	🟡 0.028	🟡 0.028	🔴 0	🟡 0.028	🟢 0.042	🟢 0.042

Рис. 5. Баллы энерготехнологий по областям оценки.

ваемых технологий. Это влияние особенно отчетливо проявляется для технологий, имеющих высокодифференцированный профиль (т.е. высокие показатели по одним индикаторам и низкие показатели по другим). Ядерные технологии являются наиболее ярко выраженным примером, имеющим эти особенности: при равной значимости экологических, экономических и социальных аспектов и акценте (увеличение соответствующего веса) на защиту климата и экосистем, минимизацию объективных рисков и доступность технологии, ядерные энерготехнологии занимают в рейтинге первое место. С другой стороны, уделяя повышенное внимание радиоактивным отходам, загрязнению территории в результате гипотетических аварий, неприятию потенциального риска, террористической угрозе и конфликтному потенциалу, рейтинг ядерных технологий снижается. В частности, это подчеркивает необходимость дальнейшего технического прогресса в направлении смягчения соответствующих потенциальных негативных последствий использования ядерных энерготехнологий.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Глобальный анализ неопределенности по отношению к весам

Описанные выше результаты ранжирования были получены для четырех предопределенных вариантов взвешивания, чтобы продемонстрировать общие тенденции многокритериальной оценки на основе метода MAVT. В то же время очевидно, что существует значительная неопределенность в приоритетах, предъявляемых к энерготехнологиям в долгосрочной перспективе, с точки зрения достижения целей устойчивого развития. Как следствие весовые коэффициенты характеризуются значительной неопределенностью. Таким образом представляется целесообразным провести ранжирование вариантов в условиях отсутствия информации о приоритетах (относительной важности – весах ключевых показателей) с целью изучения того, как неопределенности в весах повлияют на итоговые баллы и ранги рассматриваемых вариантов, а также определить вероятности предпочтения определенного варианта.

При проведении глобального анализа неопределенности в отношении весов были рассмотрены два варианта: вариант I предполагал, что все веса были неопределенными, вариант II предполагал, что только веса целей высокого уровня были неопределенными. Разбросы в итоговых баллах и рангах энерготехнологий для обоих случаев показаны на рис. 6 (указаны средние значения, 5-й, 25-й, 75-й и 95-й процентиля). Вероятности для вариантов занять определенное место в рейтинге представлены в табл. 2. Количество проанализированных комбинаций весов составило 10000 при

Таблица 2. Вероятности для вариантов занять определенное место в рейтинге

Вариант I – Все веса неопределенны

Ранг	РТН	РБН	КЭС	ПГУ	СЭС	ВЭС
1	2	28	2	13	5	49
2	17	13	10	8	34	19
3	21	26	11	19	13	11
4	27	13	15	21	15	9
5	12	14	14	34	18	9
6	20	6	49	6	15	4

Вариант II – Только веса целей высокого уровня неопределенны

Ранг	РТН	РБН	КЭС	ПГУ	СЭС	ВЭС
1	0	62	0	0	0	38
2	30	20	0	0	17	32
3	38	16	6	18	11	11
4	15	2	5	58	12	8
5	17	0	22	23	26	11
6	0	0	66	0	34	0

условии, что все веса равномерно распределены в пределах $[0, 1]$, при условии, что сумма весов для каждой комбинации весов равна единице.

Вариант I показывает, что с учетом наибольшей степени неопределенности в приоритетах все альтернативы могут потенциально занимать первое место в рейтинге, но некоторые из них наиболее вероятно можно найти на первом месте, тогда как другие менее вероятно (табл. 2). ВЭС с наибольшей вероятностью может занять первое место в рейтинге, за которой следует РБН. СЭС, КЭС и РТН с меньшей вероятностью могут занять первое место в рейтинге для рассматриваемого случая.

Вариант II демонстрирует, что наиболее привлекательными технологиями являются РБН (наиболее вероятно) и ВЭС (менее вероятно) (табл. 2). Другие энерготехнологии не могут оказаться на первом месте в этом случае. Интересно отметить, что РБН при неопределенности только в весах высокоуровневых целей может занимать только первые места в рейтинге (не ниже 4). Самый высокий разброс в рейтинге демонстрирует СЭС (от 2-го до 6-го места в рейтинге), а самый низкий – ПГУ (от 3-го до 5-го места в рейтинге).

Общий вывод, который может быть сделан на основе результатов сравнения разбросов в итоговых баллах и рангах для рассмотренных случаев моделирования неопределенностей в весах, заключается в том, что привлечение экспертов и выявление предпочтений заинтересованных сторон для определения относительной важности областей и критериев оценки позволяет значительно снизить неопределенности в итоговых баллах и сделать более определенные выводы касательно потенциала каждого из рассматриваемых вариантов.

Глобальный анализ чувствительности по отношению к высокоуровневым весам

Также был проведен глобальный анализ чувствительности в отношении весов высокоуровневых целей, чтобы определить альтернативы, которые потенциально могут занимать первый ранг (в предположении равнозначимости весов на более низких уровнях дерева целей). Выполненный анализ показывает диапазоны весов высокоуровневых целей, для которых определенная опция может занимать первое место в рейтинге, так называемая “карта предпочтений” (рис. 7, ось абсцисс демонстрирует

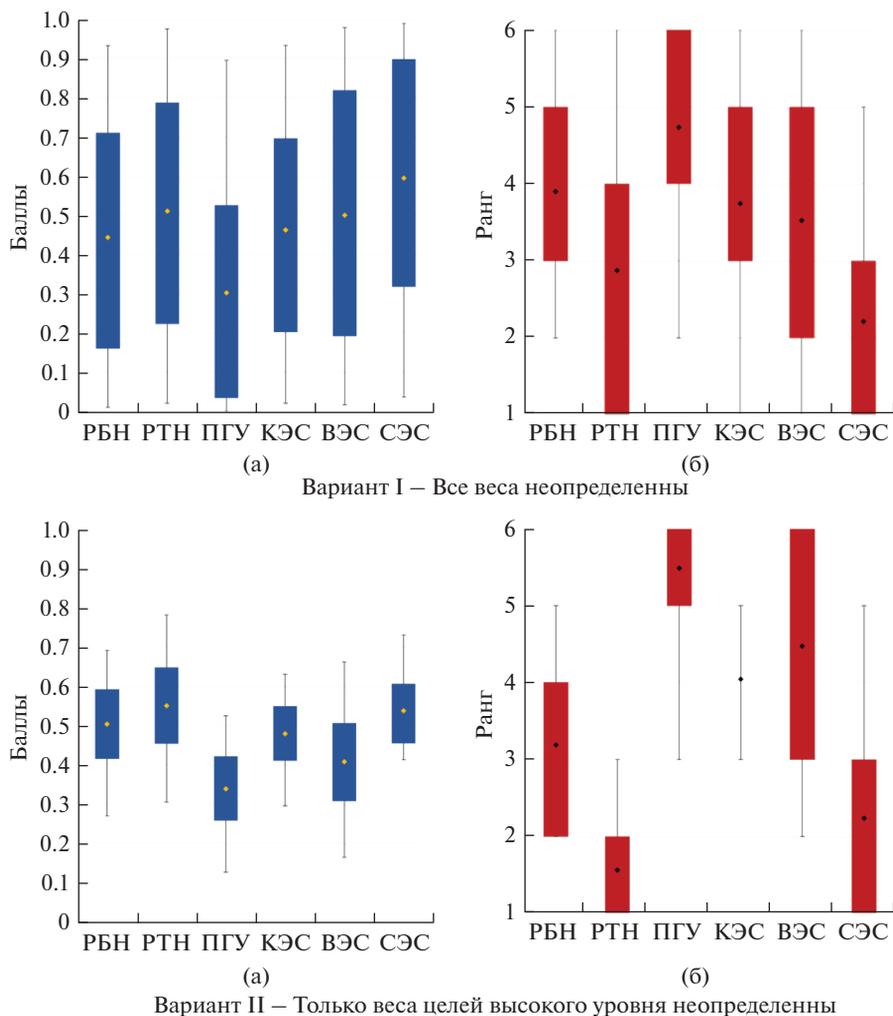


Рис. 6. Разброс в итоговых баллах (а) и рангах (б).

возможные значения веса высокоуровневой цели “Окружающая среда”, ось ординат показывает возможные значения высокоуровневой цели “Экономика”, ось абсцисс соответствует возможным значениям веса высокоуровневой цели “Социальные аспекты”, сумма этих весов равна единице). Диаграмма также демонстрирует, что только РБН и ВЭС могут занимать первое место в рейтинге. ВЭС является наиболее привлекательным вариантом, если важность социальных критериев выше остальных, в то время как РБН становится наиболее перспективной альтернативой в случаях высокой важности целей “Экономика” и “Окружающая среда”.

Локальный анализ неопределенности в отношении оценочных функций, весов и ключевых показателей

Как правило, точные значения ключевых показателей и формы оценочных функций также неизвестны, и они характеризуются диапазоном возможных значений.

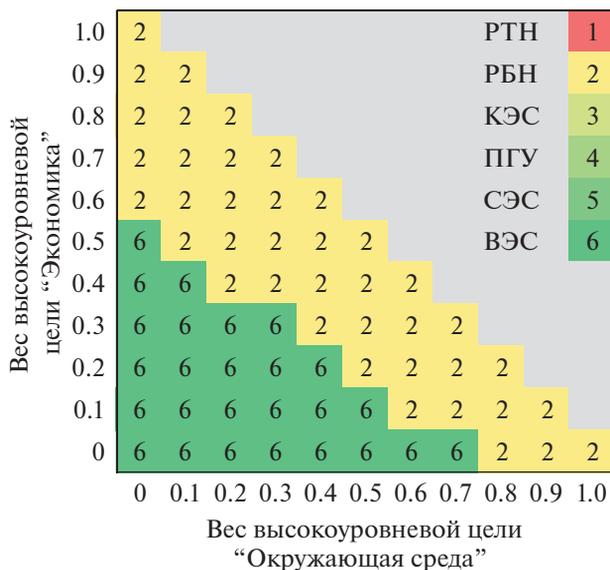


Рис. 7. Карта предпочтений опций в зависимости от относительной важности высокоуровневых целей.

Анализ неопределенности в отношении ключевых показателей и оценочных функций демонстрирует изменения в конечных результатах (итоговые баллы и ранги альтернатив) из-за различий в ключевых показателях и оценочных функциях. Анализ неопределенности, основанный на классическом подходе анализа ошибок [15], использовался для оценки неопределенностей в итоговых баллах энерготехнологий из-за неопределенностей в формах оценочных функций, а также незначительных неопределенностей в ключевых показателях и весах.

Неопределенности в итоговых баллах энерготехнологий из-за упомянутых неопределенных факторов указаны в табл. 3 для первого варианта взвешивания (предполагалось, что абсолютные неопределенности в степенях экспоненты, определяющих формы оценочных функций, равны ± 1.0 , (в базовом варианте оценочные функции – линейные) и была принята 10% относительная неопределенность в весах и ключевых показателях). Как видно из таблицы, относительные неопределенности в итоговых баллах вариантов лежат в диапазоне 4.0–6.0%, при этом порядок рангов с учетом неопределенностей такой же, как и тот, который был определен в условиях отсутствия учета неопределенности в этих факторах. В целом эти результаты указывают на то, что порядок ранжирования не чувствителен к незначительным неопределенностям в форме оценочных функций, ключевых показателях и весах. Аналогичные наблюдения также справедливы и для других вариантов взвешивания.

Таблица 3. Итоговые баллы и их неопределенность

Показатель	РТН	РБН	КЭС	ПГУ	СЭС	ВЭС
Средняя оценка итоговых баллов	0.505	0.552	0.340	0.481	0.409	0.538
Абсолютные неопределенности	0.021	0.022	0.020	0.023	0.022	0.023
Вклад от неопределенностей в ключевых показателях	0.010	0.009	0.013	0.011	0.018	0.012
Вклад от неопределенностей в оценочных функциях	0.011	0.012	0.005	0.015	0.007	0.014
Вклад от неопределенностей в весах	0.016	0.016	0.013	0.015	0.012	0.014

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящая работа демонстрирует, что сравнительная оценка привлекательности различных технологий производства электроэнергии с точки зрения достижения целей устойчивого развития на основе методов многокритериального анализа решений является выполнимой и может служить основой для структурирования дискурса о будущем энергоснабжения и поддержки принятия обоснованных решений в энергетическом секторе экономики. Разработанные надлежащим образом модели поддержки принятия решений в условиях многокритериальной оценки позволяют делать выводы о наиболее перспективных вариантах для различных приоритетов, в том числе тех, которые определяются в соответствии с принципами устойчивого развития и предполагают гармоничное сочетание социальных, экономических и экологических факторов.

Результаты оценок показывают, что сравнение энерготехнологий на основе только экономических показателей (прежде всего удельные дисконтированные затраты) без учета других аспектов и целей устойчивого развития демонстрирует одностороннюю картину, отдавая предпочтение вариантам производства электроэнергии на ископаемом топливе. Многокритериальный подход для сравнения и ранжирования альтернатив предлагает решения, отличные от тех, которые получены с использованием экономических показателей: предпочтения отдаются вариантам производства электроэнергии, которые имеют самую высокую общесистемную эффективность с учетом целей устойчивого развития. В рассматриваемом случае это ядерные технологии и возобновляемые источники энергии.

Методы теории поддержки принятия решений при многих критериях позволяют на системной основе определять наиболее многообещающую альтернативу из набора возможных с учетом конфликтующего характера критериев, характеризующих технические характеристики, потребности в ресурсах, экономические показатели наряду с другими показателями эффективности. Применение данных методов способствует тому, что процесс принятия решения становится последовательным, всесторонним, прозрачным, воспроизводимым и поддающимся проверке.

Полученные результаты следует рассматривать как предварительные: в дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть более широкий спектр возможных перспективных технологий производства электроэнергии, учесть, что некоторые технологии могут использоваться многоцелевым образом, актуализировать базы данных о производительности энерготехнологий и их экономических показателей, адаптируя их к актуальным российским условиям. Следует также включить в рассмотрение наряду с производством электроэнергии и производство тепла для промышленных и бытовых нужд, а также проводить сравнительные оценки сценариев развития энергетического сектора экономики. Экспортный потенциал энерготехнологий также является важным фактором, который представляется целесообразным принимать во внимание в процессе принятия решений по выбору перспективных энерготехнологий на национальном уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты позволяют сделать предварительные выводы о потенциале различных технологий производства электроэнергии в соответствии с принципами устойчивого развития на основе многокритериальной парадигмы оценки. В частности, продемонстрировано, что сравнение энерготехнологий на основе только экономических показателей, без учета других критериев оценки и факторов, определяемых целями устойчивого развития, показывает одностороннюю картину, отдавая предпочтение вариантам производства электроэнергии на ископаемом топливе. Многокритериальная оценка энерготехнологий демонстрирует выдающиеся характеристики ядерно-энергетических технологий (особенно быстрых реакторов) для достижения целей устойчивого развития энергетики в российских условиях — их общесистемная эффек-

тивность представляется более привлекательной, чем возобновляемых энергоисточников. Расширение рамок выполненного анализа представляется целесообразным с целью получения конкретных практических рекомендаций и выводов о наиболее предпочтительных технологических вариантах для российского энергетического сектора. К числу приоритетных задач следует отнести актуализацию данных и показателей эффективности перспективных энерготехнологий, пересмотр набора критериев оценки, вовлечение в экспертизу заинтересованных сторон, представителей общественности и лиц, принимающих решения, с целью выявления и учета в анализе их предпочтений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND / International Atomic Energy Agency, IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.20, 2019.
2. Andrianov A., Kuptsov I., Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A. Innovative nuclear energy systems: state-of-the art survey on evaluation and aggregation judgment measures applied to performance comparison. *Energies* 2015, 8, 3679–3719.
3. Andrianov A., Kuptsov I., Kuznetsov V., Fesenko G. 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. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. // *Собрание законодательства*. 2009. № 48. Ст. 171.
5. Энергетика России: взгляд в будущее (Обосновывающие материалы к Энергетической стратегии России на период до 2030 г.) / Баринов В.А., Барон Ю.Л., Батенин В.М. и др. М.: Энергия, 2010. 616 с.
6. Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 г. (Министерство энергетики Российской Федерации, Москва, 2020). <http://minenergo.gov.ru/node/1920>. (Дата обращения: 28.04.2020).
7. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Макарова А.С., Новикова Т.В., Панкрусина Т.Г. Стратегические перспективы электроэнергетики России // *Теплоэнергетика*. № 11. 2017. С. 40–52.
8. The NEEDS website — <http://www.needs-project.org> (<http://www.needs-project.org/>) (дата обращения: 28.04.2020).
9. Ricci A. Policy use of the NEEDS results.
10. Веселов Ф.В., Ерохина И.В., Макарова А.С., Хоршеев А.А. Комплексная оценка эффективных масштабов обновления тепловых электростанций при обосновании рациональной структуры генерирующих мощностей на перспективу до 2035 г. // *Теплоэнергетика*. 2017. № 3. С. 5–14.
11. Веселов Ф.В., Макарова А.С., Новикова Т.В., Толстоухов Д.А., Атнокова П.В. Конкурентные перспективы АЭС в формировании низкоуглеродного профиля российской электроэнергетики // *Энергетическая политика*. 2017. № 3. С. 68–77.
12. 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.
13. Andrianov A., Schwenk-Ferrero A. Comparison and screening of nuclear fuel cycle options in view of sustainable performance and waste management. *Sustainability*. 2017; 9(9) : 1623.
14. *International Atomic Energy Agency*, User instructions for KIND-ET tool, IAEA, Vienna, 2020.
15. *International Atomic Energy Agency*, User instructions for KIND-ET extensions, IAEA, Vienna, 2020.

Comparative Evaluation and Ranking of Different Power Technologies Based on the Integrated NEEDS & KIND Framework

A. A. Andrianov^{a, b}, S. A. Kvyatkovsky^a, I. S. Kuptsov^{a, b, *}, and P. B. Ptitsyn^a

^aAnalytical R&D Centre, Private Enterprise “Science and Innovation”, SC ROSATOM, Moscow, Russia

^bNational Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

*e-mail: iskuptsov@mephi.ru

This article provides the results of a case study on a comparative evaluation and ranking of six power generation technologies including 2 nuclear, 2 fossil fuel and 2 renewable power

generation options. The performed analysis was based on the combination of the approaches proposed within the project New Energy Externalities Development for Sustainability (the NEEDS project) and the INPRO/IAEA KIND collaborative project (so-called the integrated NEEDS & KIND framework). The set of key indicators (36 key indicators arranged in a four-level objectives tree) along with approaches for their assessment including relevant databases were borrowed from the NEEDS project and adapted for the present study. The approach for judgments aggregation is based on the IAEA/INPRO approach to carrying out comparative evaluations (the KIND approach). Also, the study includes the results of the advanced sensitivity/uncertainty treatment with respect to weighing factors and key indicators using relevant tools developed within the INPRO/IAEA CENESO collaborative project. The presented results demonstrate the outstanding performances of nuclear power technologies (especially fast reactor technologies) for meeting sustainable energy development goals in the case of Russia whose performance even better than the performance of renewable energy sources.

Keywords: power generation technologies, multi-criteria analysis, ranking, uncertainty, sensitivity analysis, project NEEDS, project KIND, IAEA, INPRO