

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Проект сотрудничества ИНПРО
“Ключевые индикаторы для инновационных
ядерно-энергетических систем”
KIND

ОБЗОР ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ОТЧЕТА



INPRO

International Project on
Innovative Nuclear Reactors
and Fuel Cycles

Содержание

Аннотация	3
1. Введение.....	4
2. Почему важно проводить сравнительную оценку вариантов ЯЭС/сценариев развития ядерной энергетики: потребности государств-членов.....	5
3. Многокритериальный анализ решений	6
4. Подход к сравнительной оценке вариантов ЯЭС/сценариев развития ядерной энергетики	8
5. Инструментарий оценки “KIND Evaluation Tool” (KIND-ET)	10
6. Тематические исследования по пробному применению подхода “KIND”.....	11
6.1. Объем и содержание рассмотренных проблем.....	11
6.2. Тематические исследования по сравнительной оценке вариантов ЯЭС	11
6.3. Тематические исследования по сравнительной оценке сценариев развертывания ЯЭС.....	15
6.4. Уроки, извлеченные из пробного применения подхода “KIND”	18
7. Резюме итогов проекта сотрудничества ИНПРО “KIND”	19
Справочные материалы	21
Сокращения	22
Глоссарий.....	24

Аннотация

Осуществление Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) было начато в 2000 году в целях содействия обеспечению того, чтобы ядерная энергия была источником, вносящим вклад в устойчивое удовлетворение энергетических потребностей в XXI веке. Деятельность ИНПРО сфокусирована на ключевых проблемах обеспечения глобальной устойчивости ядерной энергетики и преследует цель оказания содействия в разработке долгосрочных ядерно-энергетических стратегий.

В настоящей брошюре представлены основные результаты проекта сотрудничества ИНПРО “Ключевые индикаторы для инновационных ядерно-энергетических систем” (проекта “KIND”). Проект осуществлялся в рамках задачи «Глобальные сценарии» ИНПРО, предусматривающей проведение анализа региональных и глобальных сценариев развития ядерной энергетики с целью получения целостного представления о возможных вариантах устойчивого развития ядерной энергетики в мире в нынешнем столетии.

Проект был реализован в 2014-2017 годах усилиями экспертов из 16 государств — членов МАГАТЭ (далее государств-членов). Заключительный отчет по итогам проекта был опубликован в 2019 году в Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии [1].

В рамках проекта сотрудничества “KIND” были разработаны руководство и инструментарий (подход) для сравнительного анализа состояния, перспектив, преимуществ и рисков, связанных с развитием инновационных ядерных технологий в отдаленной перспективе. Также была изучена возможность применения этого подхода к другим задачам, в том числе тем, которые представляют интерес для стран-пользователей технологий ядерной энергетики и стран-новичков, приступающих к развитию ядерной энергетики. Подход к сравнительному анализу ядерно-энергетических систем (ЯЭС) основан на использовании ограниченного набора ключевых индикаторов из предметных областей методологии ИНПРО и применении современных методов агрегирования суждений и анализа чувствительности/неопределенности.

При осуществлении проекта сотрудничества “KIND” был проведен ряд тематических исследований по сравнительной оценке вариантов гипотетических ЯЭС, а именно: систем на базе реакторов с водой под давлением (PWR), тяжеловодных реакторов (HWR), реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (SFR), реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (LFR), жидкосольевых реакторов (MSR), электроядерных установок с ускорителями-драйверами (ADS) и их соответствующими топливными циклами, а также были выполнены исследования по сравнительной оценке сценариев развития ядерной энергетики и вариантов развития ядерной в сравнении с неядерной энергетикой. Эти тематические исследования продемонстрировали применимость подхода и инструментария “KIND” для анализа достоинств и недостатков рассматриваемых ядерно-энергетических систем.

1. Введение

Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) является частью регулярной программы Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Основными целями проекта являются:

- оказание помощи в обеспечении устойчивого вклада ядерной энергии в удовлетворение энергетических потребностей в XXI веке;
- налаживание контакта между владельцами и пользователями технологий и организация совместного рассмотрения ими международных и национальных мер, необходимых для внедрения желаемых инноваций в области ядерных реакторов и топливных циклов.

Концепция устойчивой ядерной энергетики, применяемая ИНПРО, основывается на определении устойчивого развития Организации Объединенных Наций (ООН) [2]:

“Устойчивое развитие — это развитие, которое отвечает потребностям настоящего без подрыва способности будущих поколений удовлетворять свои потребности”.

На основе этой концепции в ИНПРО была разработана методология детальной оценки устойчивости ЯЭС, которая помогает выявить пробелы, связанные с устойчивостью существующей или планируемой ЯЭС. Ключевыми областями оценки являются: экономика, инфраструктура, обращение с РАО, защищенность от распространения (режим нераспространения), окружающая среда (стрессоры и ресурсы), безопасность реакторов и безопасность топливных циклов.

Устойчивая ЯЭС должна быть самодостаточной и затратоэффективной, эффективно использовать природные ресурсы, характеризоваться минимальной наработкой ядерных отходов, обеспечивать эффективным образом защищенность от распространения и поддерживать надлежащий уровень безопасности и надежности, регулироваться и управляться компетентными учреждениями и поддерживаться достаточно развитой инфраструктурой и межсекторальными научными исследованиями. Во всех этих областях существует множество возможностей для повышения устойчивости ЯЭС. Для проведения сравнительной оценки альтернативных вариантов и выбора наиболее перспективного решения требуется обеспечение многосторонней поддержки в принятии решений.

Оценка с использованием методологии ИНПРО требует достаточно подробной проектной информации о компонентах ЯЭС. Для эволюционных систем такая информация, как правило, доступна, в то время как для будущих инновационных ЯЭС, которые все еще находятся в стадии разработки, как правило, отсутствует достаточная информация для полномасштабной оценки в рамках ИНПРО. Более того, методология ИНПРО не предназначена для проведения сравнительных оценок ЯЭС.

В рамках проекта сотрудничества ИНПРО для устранения этих препятствий “Ключевые индикаторы для инновационных ядерно-энергетических систем” (проекта “KIND”) были разработаны руководство и программные инструменты для сравнительного анализа состояния, перспектив, преимуществ и рисков, связанных с различными вариантами развития ЯЭС, включая будущие инновационные системы.

Подход “KIND” основан на применении набора ключевых индикаторов (КИ) для областей оценки, используемых в методологии ИНПРО, и метода многокритериального анализа решений для агрегирования отдельных аспектов в итоговую оценку альтернатив. Реализация такого подхода требует всесторонней проработки и понимания проблемы принятия решений, наряду с анализом решений с помощью различных математических методов и аналитических инструментов. Кроме того, в рамках проекта изучалось применение подхода “KIND” к различным проблемам, включая сравнительную оценку сценариев развития ядерной энергетики, а также ядерных в сравнении с неядерными вариантами.

Методология подхода “KIND” была создана с учетом накопленного опыта и передовой практики в области применения методов многокритериального анализа решений в ядерной инженерии, а также на основе наиболее значимых современных рекомендаций в области поддержки принятия решений [3 - 9]. Таким образом, подход “KIND” представляет собой современный метод сравнительной оценки вариантов ЯЭС и связанных с ними вопросов.

В настоящее время подход “KIND” широко применяется для сравнительной оценки различных вариантов ЯЭС на уровнях проработки сценариев и технологий с целью сравнения вариантов поставок ядерного топлива

и обращения с РАО, изучения межсекторальных проблем, что подтверждает потенциал разработанного инструментария в оказании поддержки в выработке решений, касающихся широкого спектра различных практических задач в области ядерной энергетики, требующих агрегирования экспертных суждений. Разработанный подход был признан полезным для налаживания продуктивного диалога между сторонниками определенных вариантов энергетических систем и лицами, принимающими решения (ЛПР) в отношении вариантов устойчивого развития ядерной энергетики.

В настоящей брошюре представлено краткое изложение подхода “KIND” и его инструментария, а также основных выводов по итогам осуществления проекта сотрудничества “KIND”.

2. Почему важно проводить сравнительную оценку вариантов ЯЭС/сценариев развития ядерной энергетики: потребности государств-членов

Одна из первоочередных задач ИНПРО заключалась в разработке методологии оценки устойчивости ядерно-энергетически систем (ЯЭС). Однако методология ИНПРО не включала разработку методики или подхода к проведению сравнительной оценки вариантов ЯЭС.

Во многих странах мира ведутся работы по созданию различных инновационных технологий для будущих устойчивых ЯЭС. При имеющемся разнообразии таких разработок странам — разработчикам технологий необходимо сравнивать одни инновационные ЯЭС с другими инновационными или уже существующими ЯЭС для определения приоритетов и корректировки национальных усилий, а также для обоснования выделения ресурсов на НИОКР по инновационным технологиям ядерной энергетики в целях поддержки устойчивого, затратноэффективного развертывания ЯЭС. Подобные оценки проводятся в том числе и применительно к инновационным технологиям, для которых отсутствуют достаточно детальные технико-экономические данные. Поэтому оценка должна основываться на экспертных суждениях, а также учитывать предпочтения ЛПР и других заинтересованных сторон. Мнения экспертов и других заинтересованных сторон, однако, могут расходиться, и в итоговой оценке альтернативных вариантов в процесс анализа необходимо учитывать мнения всех сторон.

Страны — пользователи технологий могут не проявлять особого интереса к техническим инновациям, отдавая предпочтение выбору наиболее зрелых эволюционных ЯЭС и соответствующих сценариев. Однако, если страна — пользователь технологии участвует в НИОКР, она может проявить интерес к некоторым инновационным технологиям. У стран-новичков, как правило, возникает необходимость проведения сравнительной оценки ядерного и неядерного вариантов производства энергии.

Всем странам может потребоваться оценка преимуществ и недостатков различных наиболее подходящих вариантов ЯЭС/сценариев развития ядерной энергетики, сравниваемых при различных обстоятельствах, и их ранжирование с учетом характеристик ЯЭС, а также суждений и предпочтений экспертов и ЛПР.

В ответ на потребности государств-членов в рамках проекта сотрудничества “KIND” были разработаны руководство и инструментальные средства для сравнительной оценки состояния, перспектив, преимуществ и рисков, связанных с разработкой инновационных ядерных технологий в отдаленном будущем, а также изучена применимость такого подхода к другим проблемам, в том числе к проблемам, представляющим интерес для стран — пользователей технологий и стран-новичков.



3. Многокритериальный анализ решений

Многокритериальный анализ решений (МКАР или англ. MCDA) — это совокупность методов, предназначенных для оказания помощи ЛПР в проведении оценки альтернатив, характеризующихся многочисленными и противоречивыми факторами, влияющими на состояние и эволюцию системы, а также при поиске компромиссов в процессе принятия решений. Решение задач с помощью МКАР основывается на выборе конечного числа альтернатив, известных на начало процесса поддержки принятия решений. Каждая из альтернатив характеризуется своими показателями характеристик, относящимися к многочисленным атрибутам и соответствующим критериям.

Для решения различного рода задач, ориентированных на оказание поддержки принятию решений, было разработано большое количество методов МКАР (методы на основе оценки ценности, оценки превосходства или ранжирования — англ. outranking, опорных ситуаций и другие/гибридные методы), см. рис. 1а. Эти методы помогают ранжировать и сортировать соответствующие рассматриваемые варианты и выбирать наиболее перспективные компромиссы. В рамках МКАР особое внимание уделяется анализу устойчивости решения к изменению параметров оценки и к различным применяемым методам.

Процесс поддержки принятия решений в МКАР начинается с определения ЛПР, группы экспертов в предметной области и заинтересованных сторон (лиц, заинтересованных в принятии решения), и далее следуют этапы (см. рис. 1б): постановка и структурирование задачи, формулирование альтернатив, определение и оценка критериев и атрибутов, выбор метода МКАР, проведение МКАР для ранжирования сравниваемых вариантов /сценариев развития ЯЭС, анализ чувствительности /неопределенности для уточнения степени устойчивости результатов ранжирования, окончательные выводы и рекомендации.

Некоторые методы МКАР
Элементарные методы <ul style="list-style-type: none">Метод взвешенной суммыМетод Кепнера-Трегои др.
Методы на основе оценки ценности <ul style="list-style-type: none">MAVTMAUTАНРи др.
Методы на основе оценки превосходства <ul style="list-style-type: none">ELECTREPROMETHEEQUALIFLEXи др.
Методы на основе оценки опорных ситуаций <ul style="list-style-type: none">TOPSISVIKORBIPOLARи др.



а)

б)

Рис. 1. а) Методы и б) схема проведения многокритериального анализа решений.

В рамках проекта сотрудничества “KIND”, после рассмотрения различных методов МКАР для сравнительной оценки характеристик и устойчивости ЯЭС [1, 4], в качестве основного метода сравнительной оценки ЯЭС был выбран метод MAVTмногоатрибутивной теории ценности (англ. multi-attribute value theory —). В [1] обобщен накопленный значительный опыт по применению этого метода для целей сравнительной оценки вариантов с использованием нескольких атрибутов.

MAVT— это метод количественного сравнения, используемый для объединения различных показателей затрат, рисков и преимуществ, а также предпочтений экспертов и ЛПР и получения показателя привлекательности альтернативы — многоатрибутивной функции ценности (см. рис. 2). Метод MAVT основан на использовании одноатрибутивных функций ценности. Эти функции преобразуют различные индикаторы, оцениваемые по “естественной” шкале, в одну общую безразмерную шкалу в соответствии с экспертными суждениями и предпочтениями ЛПР. Одноатрибутивным функциям ценности приписывается определенный вес в соответствии с относительной важностью их индикаторов. Для выявления степени предпочтительности альтернативы необходимо сложить произведение одноатрибутивных функций ценности на соответствующие весовые коэффициенты и получить суммарный балл, отражающий общий ранг альтернативы, при этом предпочтительной будет альтернатива, имеющая наивысший балл.

Благодаря тому, что метод MAVT можно легко адаптировать и он позволяет реализовывать различные подходы к проведению сравнительной оценки и дифференциации альтернатив, в рамках проекта “KIND” на основе метода MAVT был разработан аналитический аппарат, специально предназначенный для использования в качестве средства поддержки при выполнении сравнительной оценки альтернативных вариантов ЯЭС, который был назван инструментарием оценки “KIND” (KIND - ET) [1].

МНОГОАТТРИБУТИВНАЯ ТЕОРИЯ ЦЕННОСТИ



Рис. 2. Схематическое представление метода MAVT.

4. Подход к сравнительной оценке вариантов ЯЭС/сценариев развития ядерной энергетики

Подход к сравнительной оценке вариантов ЯЭС/сценариев развития ядерной энергетики, разработанный в рамках проекта сотрудничества ИНПРО "KIND" (далее по тексту — подход "KIND"), представляет собой итерационный процесс, основанный на принципах "сверху вниз" и "снизу вверх". Данный подход, как процесс поддержки принятия решений, начинается с постановки задачи, стоящей перед ЛПР, определения группы экспертов в данной области и заинтересованных сторон (лиц, заинтересованных в принятии определенного решения), и далее итерационно выполняются следующие этапы (см. рис. 3):

- постановка задачи и определение целей;
- формулирование альтернатив (вариантов ЯЭС);
- определение КИ (требований к наборам КИ);
- оценка индикаторов, включая связанные с ними неопределенности, составление таблиц характеристик;
- выбор метода или методов МКАР, которые будут использоваться;
- построение дерева целей и назначение весовых коэффициентов для них, включая неопределенности;
- ранжирование альтернатив на основе выбранного(ых) метода(ов) МКАР;
- анализ чувствительности и неопределенностей;
- формулирование выводов и рекомендаций.



Рис. 3. Блок-схема применения МКАР.

Подход "KIND" позволил выявить некоторые специфические соображения, касающиеся формулирования набора ключевых индикаторов (КИ) для сравнительной оценки энергосистем с использованием ЯЭС. При разработке набора КИ важно:

- определиться с выбором основных областей оценки, а затем создать набор КИ для этих областей. Выбор основных областей оценки может быть основан на том, что важно для различных заинтересованных сторон, участвующих в оценке, и должен учитывать все основные перспективы;
- не пытаться отражать каждую деталь системы с помощью КИ. Следует помнить, что “ключевые” индикаторы предназначаются только для основных элементов системы и наиболее важных аспектов, подлежащих рассмотрению в ходе оценки. Общее количество КИ должно быть ограничено, предпочтительно иметь не более 15-20 КИ;
- разрабатывать, насколько это возможно, независимые друг от друга КИ во избежание повторного учета одних и тех же аспектов системы;
- не включать в рассмотрение показатели, закрепленные в национальных нормативных документах. Сравнительная оценка предназначена для выбора такого варианта ЯЭС, который окажется наиболее предпочтительным для определенного пользователя среди вариантов, которые удовлетворяют (или, как ожидается, будут удовлетворять) всем нормативным критериям.

Дерево целей служит для определения процедур агрегации индикаторов и оценки весовых коэффициентов, а также интерпретации результатов ранжирования. Такое структурирование позволяет упростить определение весов критериев и обеспечить четкое объяснение результатов ранжирования. Цели высокого уровня и весовые значения областей оценки могут быть определены на основе предпочтений ЛПР. Весовые коэффициенты по каждому из индикаторов могут быть определены экспертами в соответствующей области ядерной инженерии. Пример дерева целей подхода “KIND” в виде трехуровневой иерархической структуры представлен на рис. 4, где оранжевым цветом указаны вспомогательные индикаторы (ВИ), зеленым — ключевые индикаторы (КИ), серым — области оценки и голубым — цели высокого уровня.

Сравнительная оценка на верхнем уровне агрегации не является окончательным результатом, скорее она обеспечивает возможность перейти к более низкому уровню агрегации, а при необходимости и к конкретным индикаторам, чувствительностям и неопределенностям. Такой нисходящий анализ и способ представления результатов способствуют более полезному и продуктивному диалогу с ЛПР. Проведение детального анализа неопределенности /чувствительности помогает значительно повысить уровень доверия к результатам и выводам, поскольку в таком анализе суждения подкреплены выводами об устойчивости результатов.

Подход “KIND” — это удобный систематический подход, позволяющий выполнить все перечисленные выше шаги в рамках полного цикла MAVT. Этот подход учитывает специфические особенности ЯЭС, в том числе и тех инновационных систем, которые рассматриваются на предмет возможного развертывания в отдаленной перспективе. В нем также учитываются проблемы, связанные с нехваткой данных и неопределенностью оценок и суждений экспертов.

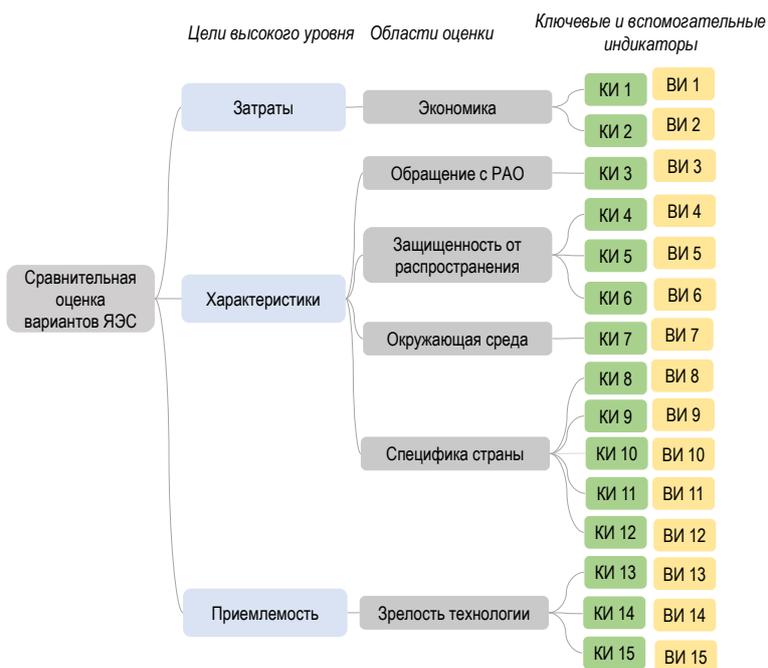


Рис. 4. Схематическое представление дерева целей.

5. Инструментарий оценки “KIND Evaluation Tool” (KIND-ET)

Инструментарий оценки “KIND Evaluation Tool” (KIND-ET) представляет собой созданный на основе метода многоатрибутивной теории ценности (MAVT) набор расчетных средств с использованием Excel-шаблона, который был разработан в рамках проекта сотрудничества ИНПРО “KIND”. Инструментарий KIND-ET предназначен для проведения многокритериальной сравнительной оценки вариантов ЯЭС или сценариев развития ядерной энергетики в соответствии с подходом и рекомендациями, разработанными в проекте “KIND”.

Инструментарий KIND-ET позволяет проводить сравнительный анализ состояния, перспектив, преимуществ и рисков, связанных с развитием ядерных технологий и развертыванием ядерно-энергетических систем. Реализованная архитектура и функциональные возможности инструментария KIND-ET позволяют пользователям модифицировать и адаптировать это инструментальное средство в соответствии со своими потребностями. Инструментарий KIND-ET обеспечивает выявление достоинств и недостатков сравниваемых ЯЭС или сценариев развития ядерной энергетики, а также проведение их оценочного ранжирования с учетом характеристик ЯЭС и суждений и предпочтений экспертов и ЛПР.

Инструментарий KIND-ET обладает достаточной функциональной гибкостью, которая позволяет применять различные подходы для сравнения и ранжирования альтернатив. Таблицы и графики помогают интерпретировать результаты ранжирования. Пользователи инструментария KIND-ET могут применять различные подходы и методы (например, выбирать формы функций ценности) и выполнять другие специфические действия для реализации метода MAVT в соответствии с целями подхода “KIND”.

Стандартная версия инструментария KIND-ET включает трехуровневое дерево целей и 15 ключевых индикаторов. Такая структура подходит для определения нескольких целей высокого уровня, каждая из которых в свою очередь включает области оценки и КИ для каждой области. Программное обеспечение соответствует базовым требованиям: характеризуется проблемной ориентированностью и интегрированностью; имеет дружелюбный для пользователя и интуитивно-понятный интерфейс; обеспечивает автоматизацию и возможности для усовершенствования. Инструментарий был верифицирован на ряде численных примеров посредством сравнения с расчетами на основе коммерческого программного обеспечения для поддержки принятия решений. Выполненная верификация подтвердила, что программное обеспечение KIND-ET обеспечивает корректную оценку и может быть использовано для проведения соответствующих тематических исследований.

Инструментарий KIND-ET обеспечивает относительно простое выполнение анализа чувствительности и неопределенностей и позволяет вводить изменения с целью увеличения или уменьшения количества целей высокого уровня и/или КИ, выбора формы функций полезности. Разнообразные графические панели обеспечивают возможности для эффективного отображения результатов сравнительных оценок.

Инструментарий KIND-ET, инструкция для пользователя и демонстрационные примеры распространяются вместе с отчетом [1] на дополнительном компакт-диске, прилагаемом к печатной копии отчета, либо в виде электронного приложения, загружаемого с веб-сайта МАГАТЭ. Примеры исходных данных и результатов оценки приведены на рис.5 и 6, соответственно.

Цели высокого уровня	Области оценки	Индикаторы	Сокращения индикаторов	Балл мин.	Балл макс.	ЯЭС-1	ЯЭС-2
Затраты	Экономика	LUEC	E1	0	1	0	1
Затраты	Экономика	Уровень инвестиций	E2	0	1	1	0
Характеристики	Обращение с РАО	Объем РАО	WM	0	1	1	0
Характеристики	Защищенность от распространения	Учет гарантий при проектировании	PR	0	1	0	1
Характеристики	Окружающая среда	Потребление природного U	Env	0	1	1	0
Приемлемость	Зрелость технологии	Степень стандартизации	M1	0	1	0	1
Приемлемость	Зрелость технологии	Мировые показатели установки	M2	0	1	1	0

Рис. 5. Исходные данные для инструментария KIND-ET (пример).

Уровни	1a	1b	1c	2a	2b	2c	2cV	3a	3b	3bV	3cV	3cV2
Многоатрибутивная функция ценности	0.346	0.433	0.395	0.465	0.465	0.772	0.761	0.664	0.639	0.484	0.792	0.844
Баллы области оценки												
Использование ресурсов	0.000	0.037	0.033	0.044	0.003	0.187	0.187	0.124	0.117	0.080	0.333	0.323
Обращение с РАО	0.013	0.112	0.085	0.170	0.296	0.312	0.310	0.297	0.306	0.300	0.328	0.322
Экономика	0.333	0.284	0.277	0.251	0.166	0.272	0.264	0.243	0.216	0.103	0.130	0.199
Всего	0.346	0.433	0.395	0.465	0.465	0.772	0.761	0.664	0.639	0.484	0.792	0.844

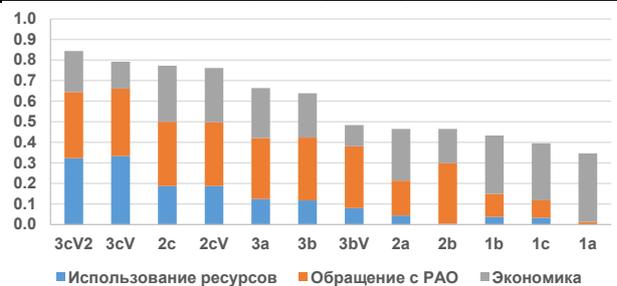
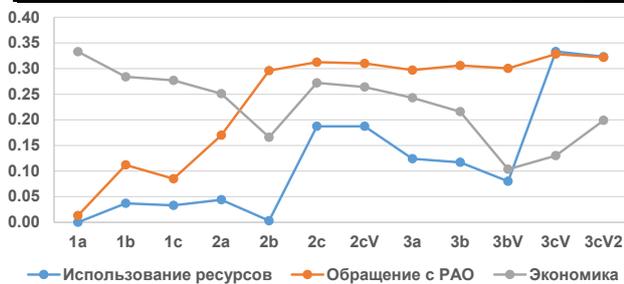


Рис. 6. Результаты, полученные с применением инструментария KIND-ET (пример).

6. Тематические исследования по пробному применению подхода “KIND”

6.1. Объем и содержание рассмотренных проблем

На базе подхода “KIND” был проведен ряд пробных тематических исследований по сравнительной оценке гипотетических ЯЭС; ЯЭС на основе различных типов эволюционных и инновационных реакторов; ядерных и неядерных энергетических систем; сценариев развертывания ЯЭС. Эти тематические исследования были проведены исключительно с целью апробации подхода “KIND” и не претендуют на точное отражение каких-либо реальных сценариев развертывания ЯЭС или официальных планов, принятых в странах, принимавших участие в исследовании. В некоторых случаях результаты этих исследований были представлены и обсуждены с ЛПП с тем, чтобы понять, насколько полезным может быть подход “KIND” для поддержания соответствующего диалога.

Тематические исследования продемонстрировали применимость рекомендаций и инструментальных средств, разработанных в рамках проекта “KIND”, для сравнительной оценки вариантов ЯЭС. Также они подтвердили, что данный подход обеспечивает возможность наглядного отображения достоинств и недостатков сравниваемых вариантов энергетических систем.

Необходимо подчеркнуть, что в подходе, основанном на использовании КИ, не предусматривается определенных индикаторов для каждой области оценки. В приведенных ниже примерах тематических исследований выбирались разные области оценки и соответствующие КИ в соответствии с конкретными задачами и приоритетами данной страны.

В общей сложности было выполнено шесть тематических исследований [1], включая следующие:

- общее тематическое исследование гипотетических ЯЭС;
- сравнение вариантов инновационных ЯЭС;
- сравнение эволюционных с инновационными ЯЭС;
- сравнение вариантов эволюционных ЯЭС;
- сравнение ядерных с неядерными энергетическими системами;
- сравнение сценариев развертывания ЯЭС.

Подробные результаты этих исследований приводятся в [1]. В следующих ниже двух подразделах кратко представлены примеры, иллюстрирующие содержание проведенных исследований.

6.2. Тематические исследования по сравнительной оценке вариантов ЯЭС

Тематическое исследование экспертов из Румынии: сравнение эволюционных с инновационными ядерно-энергетическими системами

В тематическом исследовании, проведенном группой экспертов из Румынии, были поставлены задачи:

- оценить рассматриваемые варианты ЯЭС в сравнении с уже существующей/используемой в настоящее время технологией ЯЭС (CANDU 6) на основе конкретных КИ и с учетом специфики страны;
- провести валидацию полученных результатов посредством анализа чувствительности.

В тематическом исследовании рассматривались три технологии ЯЭС: технология на основе реакторов типа CANDU (два реактора CANDU 6, которые в настоящее время эксплуатируются на АЭС «Чернаводэ»; выработанная ими электроэнергия составляет около 20% от общего производства электроэнергии в Румынии) — технология CANDU; эволюционная ЯЭС с усовершенствованным реактором CANDU поколения III+ — технология ЭЯЭС; инновационная ЯЭС с технологией реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем поколения IV — технология ИЯЭС.

Были выбраны три цели высокого уровня, при этом области оценки группировались, как показано на рис. 7:

- а) экономика (E) — для затрат;
- б) безопасность (S), обращение с РАО (WM), окружающая среда (ENV) и защищенность от распространения (PR) — для характеристик;
- в) зрелость технологии (M) и специфика страны (CS) — для приемлемости.

Для “экономики” были выбраны два КИ: приведенная удельная стоимость энергетического продукта или услуги (E1) и затраты на НИОКР (E2). В оценке “обращения с РАО” учитывались: объем радиоактивных отходов (WM1) и затраты на обращение с отработавшим ядерным топливом (WM2). Оценка ЯЭС по “защищенности от распространения” (режиму нераспространения) проводилась с использованием трех КИ: привлекательность ядерного материала (PR1); привлекательность технологии (PR2) и установленный подход к применению гарантий (PR3). Для “окружающей среды” был выбран следующий КИ: удельная энерговыработка на единицу топлива (количество полезной энергии, произведенной ЯЭС из единицы массы добытого природного урана) (ENV1). В сравнительной оценке рассматриваемых ЯЭС для “безопасности” были выбраны пять КИ, а именно: потенциал предотвращения выбросов (S1); предусмотренные концепцией проекта внутренне присущие и пассивные средства и системы безопасности (S2); вероятность повреждения активной зоны и вероятность большого раннего выброса (S3); параметры выброса (S4); краткосрочные и долгосрочные меры по управлению авариями (S5). Для оценки рассматриваемых ЯЭС на “зрелость технологий” были выбраны три КИ: стадия проектирования (M1); время, необходимое для доработки технологии (M2); степень стандартизации и адаптируемости к условиям лицензирования (M3) (более высокое значение получало более высокий балл в оценке).

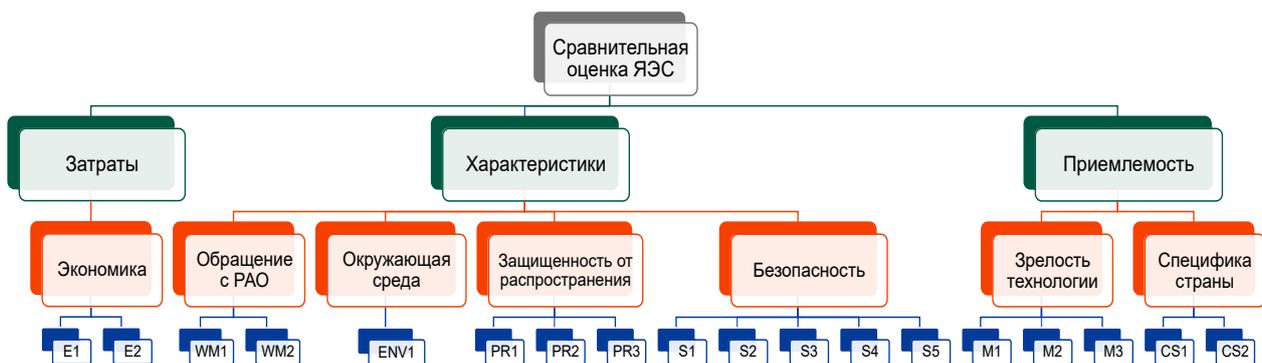


Рис. 7. Структура дерева целей в тематическом исследовании экспертов из Румынии.

Расчеты были выполнены для случаев с различными весовыми значениями на уровне дерева целей:

- случай 1 — весовые значения для целей высокого уровня: экономика 50%, характеристики 30%, приемлемость 20%;
- случай 2 — весовые значения для целей высокого уровня: экономика 30%, характеристики 50%, приемлемость 20%;
- случай 3 — весовые значения для целей высокого уровня: экономика 40%, характеристики 40%, приемлемость 20%.

Как показано на рис. 8, результаты для основных рабочих случаев (случаи 1, 2 и 3 с различными весовыми значениями для целей высокого уровня) демонстрируют, что наибольший общий балл имеют ИЯЭС, указывая на то, что ИЯЭС являются наиболее привлекательным решением (благодаря лучшим характеристикам в областях оценки “безопасность”, “обращение с РАО” и “окружающая среда” и благодаря более высоким достигаемым показателям в области “специфика страны” в рамках цели высокого уровня “приемлемость”).

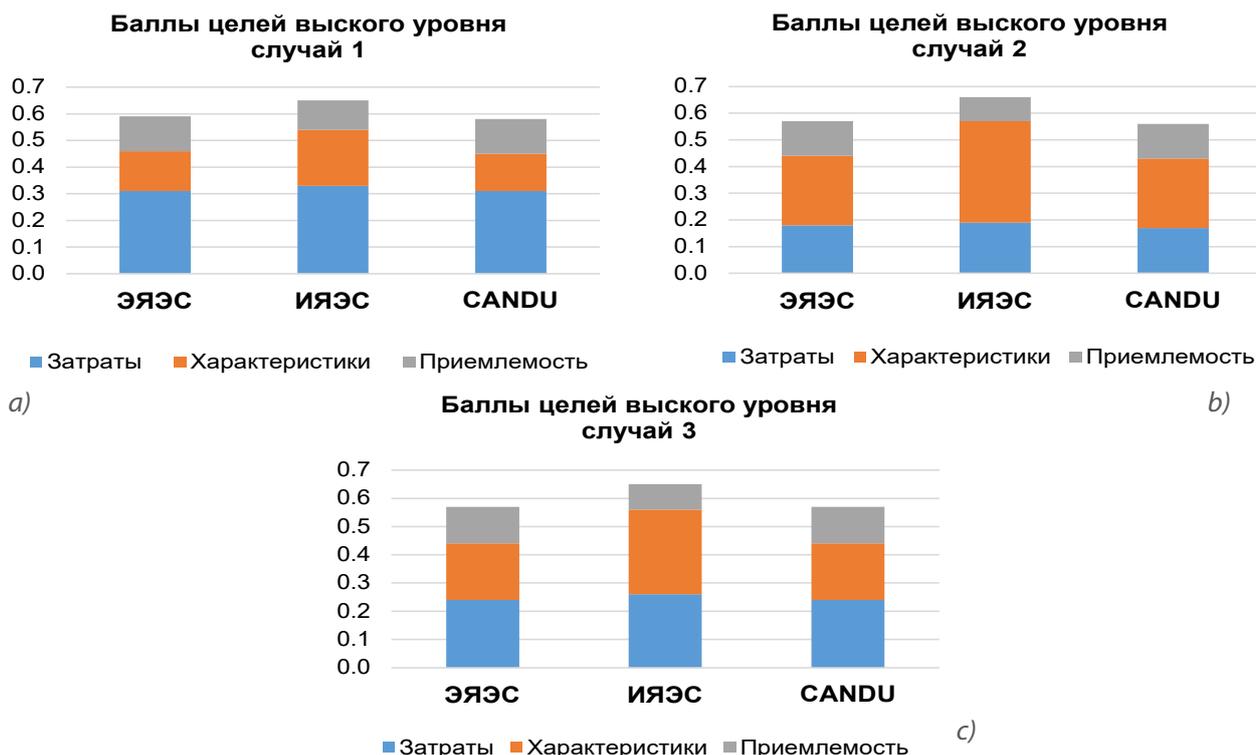


Рис. 8. Баллы целей высокого уровня для: а) случая 1; б) случая 2; в) случая 3.

Результаты тематического исследования, проведенного для Румынии, позволяют сделать вывод о том, что ориентация на инновационные технологии может предоставить Румынии возможности для расширения ее участия в передовых научных исследованиях. Это может способствовать не только развитию местных научных сообществ, но также и созданию широких возможностей для технологического сотрудничества и обмена знаниями между научным сообществом и промышленностью.

Тематическое исследование экспертов из Таиланда: сравнение ядерных вариантов с неядерными вариантами

Тематическое исследование, проведенное экспертами из Таиланда, базировалось на применении набора КИ, разработанного для стран-новичков, и его основная цель сводилась к проведению сравнительной оценки сценариев развития энергетики с ЯЭС и без ядерных систем. Были оценены варианты с ЯЭС (с использованием данных для соответствующих реакторов с водой под давлением поколения III+ (т.е. AP-1000, APR1400, ACPR и ВВЭР)) и с угольной электростанцией (УЭС). Набор КИ был предназначен для четырех областей оценки: “экономика”, “энергетическая безопасность”, “общественная приемлемость” и “инфраструктура”. Для “экономики” использовались два КИ: приведенная удельная стоимость электроэнергии (LUEC — от англ. levelized unit electricity cost) и финансовые потоки. Степень зависимости от поставщиков является единственным КИ для “энергетической безопасности”. Для “общественной приемлемости” были выбраны три КИ: результаты социологических исследований по вопросу общественной приемлемости, внешние издержки и риски аварий. “Инфраструктура” — это область с наибольшим количеством КИ. Для этой области было использовано пять КИ: статус нормативно-правовой базы, статус государственных организаций, наличие инфраструктуры для поддержки владельца/оператора, государственная политика и наличие людских ресурсов.

Ранжирование результатов сравнительной оценки указывает на то, что для Таиланда наиболее предпочтительным вариантом энергетической системы является вариант с УЭС, а не ЯЭС, с соответствующими значениями общего балла 0,468 и 0,412 при весовых коэффициентах 0,3 — 0,7 соответственно для целей высокого уровня в диапазоне областей оценки “экономика” — “приемлемость”, как показано на рис. 9. Результаты показывают, что значительное влияние на общий балл для ЯЭС оказывает “общественная приемлемость”, в то время как привлекательность УЭС в основном определяется “экономикой” и “инфраструктурой”. Анализ чувствительности проводился путем варьирования соотношения весовых коэффициентов увеличение веса “экономики” и одновременное снижение веса “приемлемости” примерно

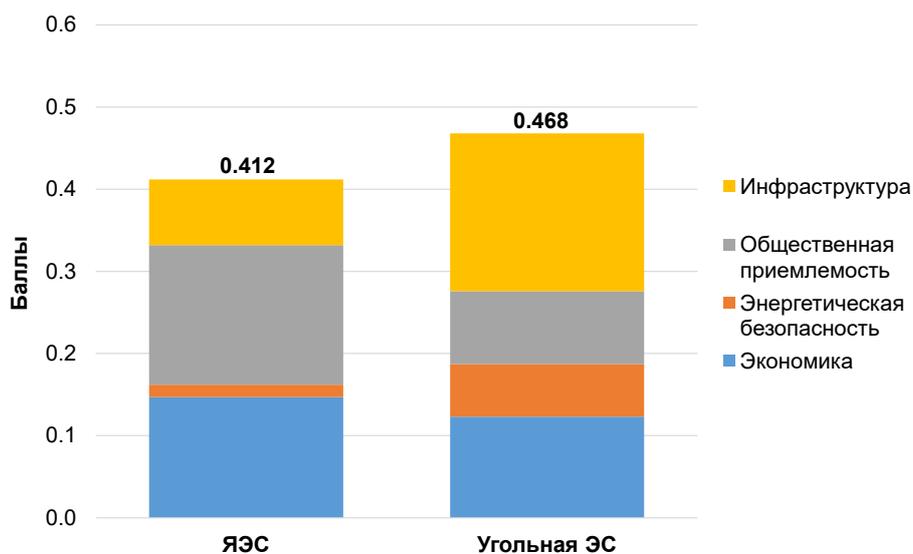


Рис. 9. Анализ чувствительности для ЯЭС и УЭС, выполненный путем изменения весового коэффициента "приемлемости".

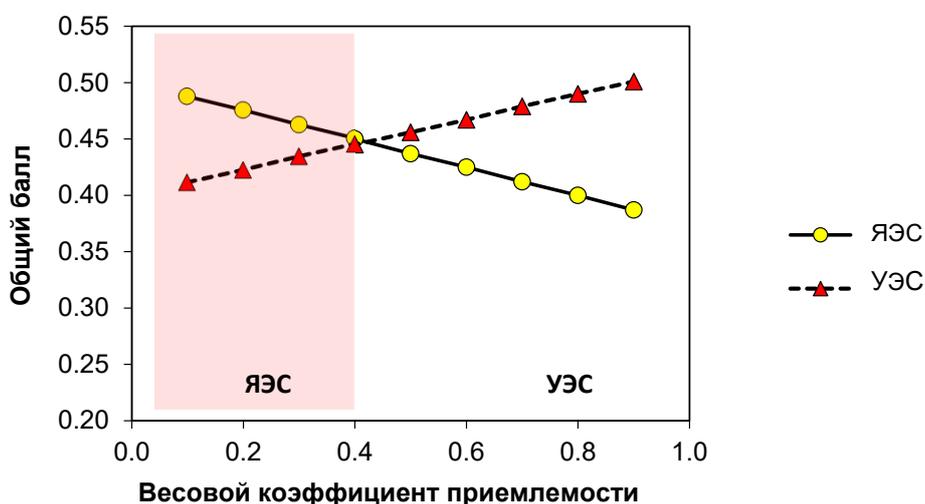


Рис. 10. Анализ чувствительности для ЯЭС и УЭС, выполненный путем изменения весового коэффициента приемлемости.

до значения 0,4 может привести к тому, что ЯЭС становится более привлекательной, чем УЭС. Полученные результаты свидетельствуют о том, что привлекательность ЯЭС превосходит привлекательность УЭС, когда весовой коэффициент "приемлемости" ниже 0,4 (см. рис. 10).

6.3. Тематические исследования по сравнительной оценке сценариев развертывания ЯЭС

Сравнительная оценка сценариев, рассмотренных в проекте сотрудничества "Глобальная архитектура инновационных ядерно-энергетических систем с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом" (GAINS) [10]

Подход "KIND" также может использоваться для сравнительной оценки сценариев развития ядерной энергетики. Для подтверждения было проведено тематическое исследование со сравнением одиннадцати сценариев (таблица 1), рассмотренных в проекте сотрудничества "GAINS". Для отражения важных аспектов ЯЭС, рассматриваемых в этих сценариях, было использовано девять ключевых индикаторов, указанных в таблице 2. Были рассмотрены следующие варианты взвешивания индикаторов, учитывающие возможные

предпочтения экспертов: равная значимость всех КИ; предпочтения экспертов, выраженные в опросниках, распространенных на совещаниях ИНПРО; предпочтение в пользу минимизации инвестиций; предпочтение в пользу минимизации отходов.

На основе подхода "KIND" было проведено ранжирование сценариев от наиболее предпочтительной до наименее предпочтительной ЯЭС, как показано на рис. 11. Также удалось выявить потенциальные достоинства и недостатки соответствующих рассматриваемых ядерных технологий, используемых в ЯЭС, и выработать рекомендации по совершенствованию этих технологий.

Таблица 1. Сценарии развертывания ЯЭС

Сценарии развертывания ЯЭС	Обозначение ¹
Инерционный сценарий ВАУ	L1H1
Инерционный сценарий ВАУ+	L1L2H1
Инерционный сценарий ВАУ+, БР с КВ порядка 1	L1L2H1F1
Инерционный сценарий ВАУ+, БР со средним КВ, средним выгоранием	L1L2H1F2
Инерционный сценарий ВАУ+, БР со средним КВ, высоким выгоранием	L1L2H1F3
Инерционный сценарий ВАУ+, БР с КВ порядка 1 и ЭЛЯУ	L1L2H1F1A1
Инерционный сценарий ВАУ+, БР со средним КВ, средним выгоранием, ЭЛЯУ	L1L2H1F2A1
Инерционный сценарий ВАУ+, БР со средним КВ, высоким выгоранием, ЭЛЯУ	L1L2H1F3A1
Инерционный сценарий ВАУ+, БР с КВ порядка 1 и MSR	L1L2H1F1M1
Инерционный сценарий ВАУ+, БР со средним КВ, средним выгоранием, MSR	L1L2H1F2M1
Инерционный сценарий ВАУ+, БР со средним КВ, высоким выгоранием, MSR	L1L2H1F3M1

Таблица 2. Ключевые индикаторы

Ключевые индикаторы
Потребление природного урана
Ежегодное образование отработанного ядерного топлива (ОЯТ)
Общее количество ОЯТ, предназначенного для длительного хранения
Минорные актиниды (МА) в ядерном топливном цикле (ЯТЦ)
Плутоний в ЯТЦ
Общие мощности по обогащению
Общие мощности по переработке
Общая стоимость урана
Общий объем инвестиций в АЭС

Сравнительная оценка усовершенствованных ядерных топливных циклов, рассмотренных в исследовании АЯЭ ОЭСР

Подход "KIND" был также использован для апостериорного анализа результатов исследования АЯЭ ОЭСР "Усовершенствованные ядерные топливные циклы (ЯТЦ) и обращение с РАО" [11], которое было проведено с целью оценки влияния выбора стратегии ЯТЦ на потребление урана и обращение с РАО. Анализировались следующие варианты ЯТЦ: однократный (открытый) цикл с PWR, рецикл с тепловыми реакторами, равновесный рецикл с комбинацией тепловых и быстрых реакторов и равновесный рецикл с быстрыми реакторами.

¹ L1 — легководный реактор (LWR) с низким выгоранием (45 ГВт-сут/т); L2 — LWR с высоким выгоранием (60 ГВт-сут/т); H1 — тяжеловодный реактор (HWR); F1 — "самодостаточный" БР с коэффициентом воспроизводства (КВ) ~ 1.0; F2 — БР со средним КВ (КВ~1,2), средним выгоранием (~31 ГВт-сут/т); F3 — БР со средним КВ (КВ~1,2), высоким выгоранием (~54 ГВт-сут/т); A1 — ЭЛЯУ (ADS) для сжигания МА; M1 — жидкосолевой реактор (MSR) для сжигания МА.

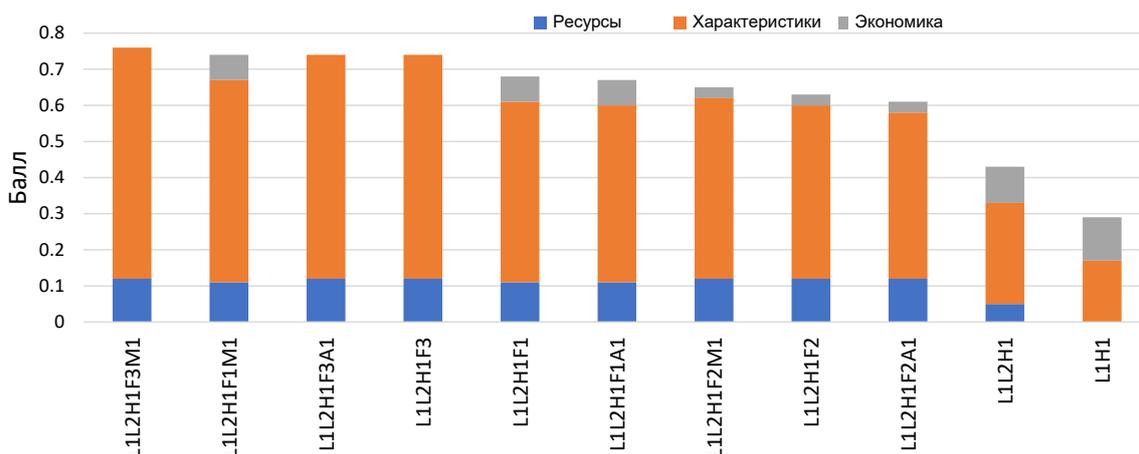


Рис. 11. Ранжирование сценариев развертывания ЯЭС.

Задача оценки состояла в том, чтобы выявить ЯТЦ, которые обеспечивают преимущества для программ по хранению ОЯТ и ВАО, снижают потребление урановых ресурсов и улучшают перспективы развития ядерной энергетики. Всего было рассмотрено 12 вариантов ЯТЦ (см. таблицу 3.), которые были оценены по 8 ключевым индикаторам (см. таблицу 4). Сравнительная оценка (рис. 12) показала, что некоторые частично замкнутые ЯТЦ обеспечивают определенные преимущества применительно к программам по захоронению отходов и позволяют более эффективно использовать природный уран, однако с некоторым увеличением затрат.

Таблица 3. Варианты ЯТЦ

Варианты ЯТЦ	Комментарии
<i>Современная практика в отрасли и ее развитие</i>	
ЯТЦ 1a — "однократный ЯТЦ".	Референтный ЯТЦ
ЯТЦ 1b — "современный ЯТЦ с однократной переработкой"	Однократный рецикл Pu в виде МОХ-топлива
ЯТЦ 1c (вариант схемы 1b)	Позволяет избежать получения чистого Pu в процессе переработки ОЯТ, т. к. Pu выделяется только в смеси с Np
<i>Частично замкнутый ЯТЦ</i>	
ЯТЦ 2a — "сжигание Pu в LWR".	Используются только LWR, МОХ-топливо с обогащенным ураном (МОХ-UE)
ЯТЦ 2b — "сжигание Pu и Am в LWR".	Требуется двух типов топлива МОХ-UE, разделения Am - $Ст$ (продукты распада $Ст$ идут на окончательное захоронение, либо рециклируются как МОХ-топливо)
ЯТЦ 2c — "гетерогенный рецикл Am "	Am рециклируется в мишенях, которые идут на окончательное захоронение после облучения
ЯТЦ 2cV (вариант 2c)	Am и $Ст$ отправляются на хранение (продукты распада идут на окончательное захоронение, либо рециклируются как МОХ-топливо)
<i>Замкнутый ЯТЦ</i>	
ЯТЦ 3a — "сжигание трансуранических элементов в БР".	Основан на концепции интегрального БР, позволяет избежать выделения чистого Pu
ЯТЦ 3b — "двухуровневый ЯТЦ"	Весь Pu сжигается в обычных LWR и БР
ЯТЦ 3bV (вариант 3b)	Pu в обход БР после стадии PWR-МОХ направляется в ЯТЦ с ЭЛЯУ (ADS)
ЯТЦ 3cV1 — "стратегия для всех БР"	Основан на использовании БР с газовым охлаждением поколения IV
ЯТЦ 3cV2 (вариант 3c)	Основан на EFR (европейском быстром реакторе) с использованием МОХ-топлива, UREX+, уран не рециклируется

Таблица 4. Ключевые индикаторы

Область оценки	Ключевые индикаторы
Использование ресурсов	Количество требуемого природного урана в расчете на произведенную энергию
Обращение с РАО	Потери массы трансурановых элементов из-за их попадания в отходы
	Активность ОЯТ и ВАО через 1000 лет
	Тепловыделение ОЯТ и ВАО через 50 лет
	Тепловыделение ОЯТ и ВАО через 200 лет.
	Объем ВАО и ОЯТ
Экономика	Затраты на ЯТЦ
	Равновесные цены на электроэнергию

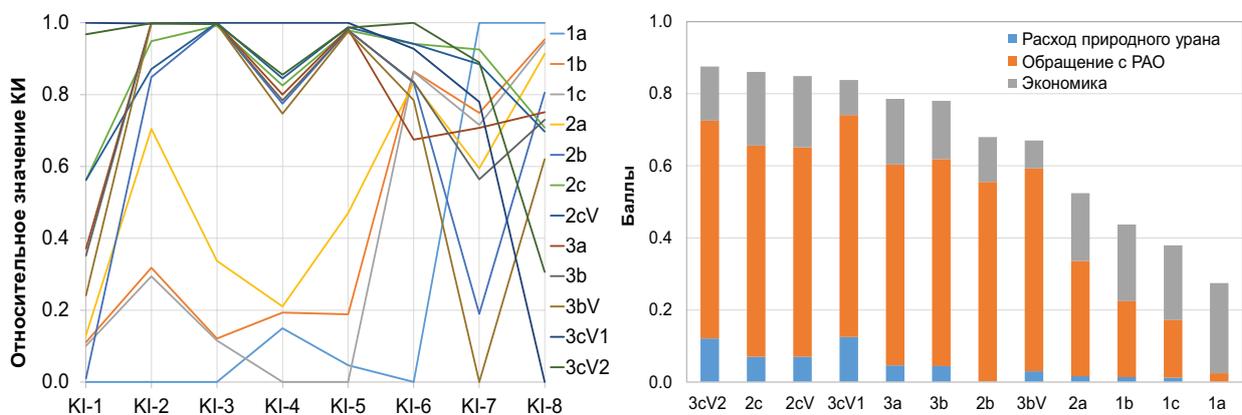


Рис. 12. Профили альтернатив и результаты ранжирования, полученные при оценке вариантов усовершенствованных ЯТЦ.

6.4. Уроки, извлеченные из пробного применения подхода “KIND”

Участниками проекта сотрудничества “KIND” была подтверждена эффективность разработанного подхода при проведении сравнительных оценок не только менее зрелых инновационных ЯЭС, но и других ядерно-энергетических систем, а также вариантов систем с ядерной и неядерной энергетикой. По результатам пробных тематических исследований были сформулированы следующие выводы:

- постановку задачи и разработку дерева целей необходимо проводить итерационно, в рамках консультативного процесса. Задача сравнительной оценки может быть упрощена за счет уменьшения числа целей высокого уровня. Практика показывает, что для оценки разумно учитывать не более двух/трех целей высокого уровня; например, часто используются “затраты”, “преимущества” и “риск” или “экономика”, “характеристики” и “приемлемость”, в зависимости от специфики рассматриваемой задачи сравнительной оценки. Эти цели высокого уровня необходимо увязывать с соответствующими областями оценки в соответствии с методологией ИНПРО, и для каждой области оценки следует выбирать соответствующие индикаторы;
- определение относительной важности (весовых коэффициентов) различных индикаторов, областей оценки или целей высокого уровня должно быть рациональным и разумным и учитывать национальные предпочтения в отношении планов развития ядерной энергетики, а также международные обязательства государств-членов. Весовые значения для индикаторов должны определяться с помощью экспертов в соответствующих областях ядерной инженерии. Весовые значения для областей оценки и целей высокого уровня необходимо определять, консультируясь с ЛПР;
- чтобы избежать использования чрезмерного количества индикаторов, можно воспользоваться многоступенчатой оценкой. На первом этапе сокращается общее количество вариантов

с использованием КИ, а на втором — более детально рассматриваются области оценки с использованием так называемых вспомогательных индикаторов в случаях, когда трудно выделить остающиеся варианты с первоначальными КИ;

- для интерпретации результатов ранжирования необходимо разложить общие баллы оценки на отдельные компоненты в соответствии с заданной структурой дерева целей. На основе этого результаты ранжирования вариантов ЯЭС могут быть аргументированно разъяснены ЛПР и другим заинтересованным лицам;
- результаты анализа чувствительности и неопределенности будут способствовать повышению продуктивности коммуникации, особенно в случаях, когда сравниваемые варианты являются неразличимыми; они также позволяют выявить изменения в позициях и политике, могущие привести к отмене первоначально полученных выводов в отношении сравнительной оценки.

7. Резюме итогов проекта сотрудничества ИНПРО “KIND”

В рамках проекта сотрудничества ИНПРО “KIND” было сделано следующее:

- разработано руководство по определению наборов КИ для сравнительной оценки различных вариантов ЯЭС с применением критериев, касающихся характеристик ЯЭС и ее устойчивого развития;
- адаптированы и доработаны современные методы агрегации экспертных суждений и анализа чувствительности /неопределенности, позволяющие проводить эффективную сравнительную оценку таких вариантов;
- проведены тематические исследования по проверке применимости подхода “KIND”;
- исследован потенциал разработанного подхода в его применении как к ИЯЭС, так и к другим типам ЯЭС, в том числе к системам, которые представляют интерес для стран-пользователей технологий и стран-новичков.

В рамках проекта были сформулированы определенные соображения, касающиеся разработки набора КИ для проведения сравнительных оценок энергосистем, включающих ЯЭС. При разработке набора КИ важно, в частности:

- определить целевую аудиторию для оценки и выбрать те КИ, которые будут понятны этой целевой аудитории;
- определить основные области оценки, а затем КИ для этих областей. Выбор основных областей оценки может быть основан на приоритетах, имеющихся у различных заинтересованных сторон в оценке, с учетом всех основных перспектив рассмотрения;
- разработать КИ, в полной мере учитывая данные, доступные для всех вариантов, с использованием в качестве основы вариант с минимальным количеством подробных данных. При разработке количественных КИ сначала следует убедиться в наличии количественных данных по каждому из оцениваемых вариантов. При использовании качественных КИ необходимо убедиться в непредвзятом отношении экспертов, предоставляющих исходные данные;
- учитывать, что, если в работе, касающейся конкретной области оценки, будет задействовано большое количество экспертов, то это может привести к появлению чрезмерного количества КИ в данной области оценки, поскольку эксперты, досконально зная свой предмет, предпочитают иметь большое количество КИ, отражающих каждый аспект оценки. Это не обязательно улучшает общую оценку, так как четкость расставленных приоритетов может быть утрачена из-за наличия “густого леса” КИ;
- в полной мере описать и задокументировать каждый КИ с тем, чтобы всем было понятно, что включено и как это следует оценивать.

Выбор метода МКАР, наиболее подходящего для решения конкретной задачи, является самостоятельным элементом работы, выполнение которой должно основываться на изучении содержания задачи и информации, предоставленной экспертами в данной предметной области и ЛПР.

Для построения диалога на основе методов МКАР необходимо точно описать все сделанные допущения с тем, чтобы избежать недоразумений при интерпретации результатов. Эти допущения необходимо оценивать посредством проведения анализ чувствительности. Подробное объяснение использованных для выбранной модели допущений в отчете по проведенному тематическому исследованию является областью ответственности экспертов, проводящих исследования на основе МКАР.

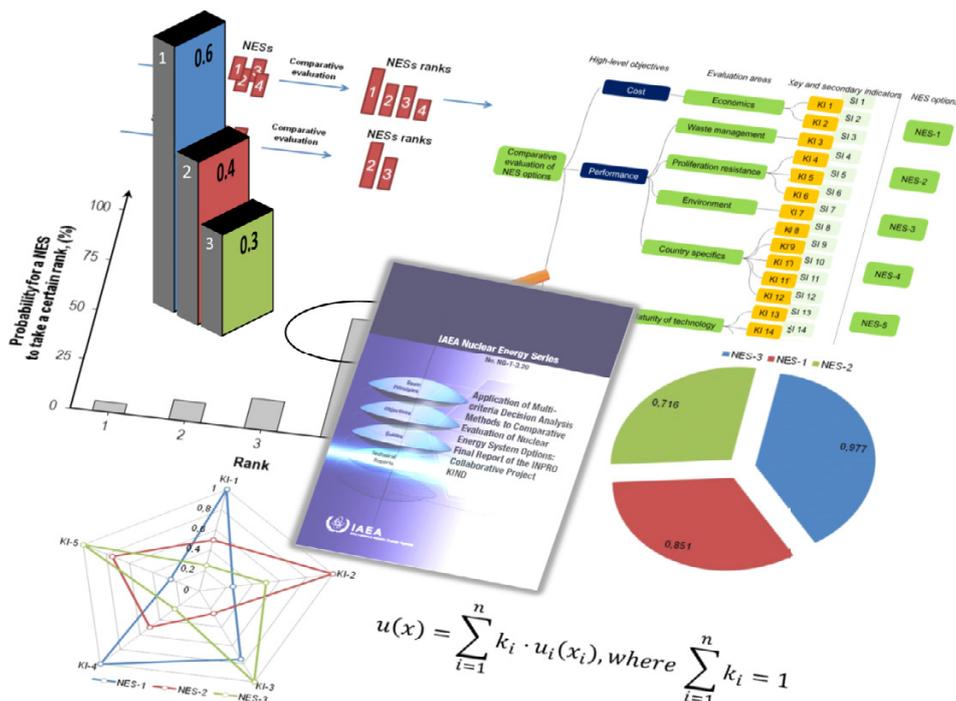
Надлежащим образом организованные тематические исследования, основанные на подходе “KIND”, представляют собой сложную задачу, решение которой — это не только результат формального применения набора аналитических инструментов; оно должно способствовать выработке точного понимания того, что именно могло бы поддержать процесс принятия решений.

Эксперты отвечают за качество основанных на применении методов МКАР исследований, проводимых с целью разработки конкретных рекомендаций и предоставления информации ЛПР о достоинствах и недостатках (затратах, выгодах и рисках) рассмотренных вариантов. ЛПР ответственны за принятие окончательного решения с учетом результатов исследований, базирующихся на методах МКАР, и такое решение должно приниматься с четким пониманием и принятием связанных с ним рисков.

Проведение детального анализа неопределенности /чувствительности помогает значительно повысить уровень доверия к результатам и выводам, поскольку этот анализ подкрепляет суждения информацией о стабильности результатов. Одним из важных направлений дальнейшего развития подхода к сравнительной оценке ЯЭС является распространение применения методов агрегации суждений на задачи с неопределенностями, являющиеся актуальными для решения большинства проблем, с которыми приходится сталкиваться на практике.

Разработка и пробное применение подхода “KIND” продемонстрировали эффективность подхода не только при проведении сравнительных оценок менее зрелых ИЯЭС, но и при сравнительной оценке других энергетических вариантов, в частности, при сравнении сценариев развития ядерной энергетики и ЯЭС с неядерными энергетическими системами.

Дальнейшие шаги в разработке подхода “KIND” будут связаны с применением созданных инструментальных средств в исследованиях по решению тех практических задач, которые заинтересованные государства считают важными. В настоящее время это реализуется в рамках проекта сотрудничества ИНПРО “Сравнительная оценка вариантов ядерно-энергетических систем” (CENESO). Инструментарий KIND-ET будет использоваться для рационализации такого рода системных исследований и выработки методических рекомендаций в отношении конкретных подходов, направленных на улучшение характеристик и устойчивости национальных, региональных и глобальных ЯЭС.



- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.20, Vienna (2019): <https://www.iaea.org/publications/12373/application-of-multi-criteria-decision-analysis-methods-to-comparative-evaluation-of-nuclear-energy-system-options-final-report-of-the-inpro-collaborative-project-kind>.
- [2] BRUNDTLAND COMMISSION, Our Common Future, Oxford University Press, Oxford (1987)
- [3] Kuznetsov V., Fesenko G. et.al. 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. doi:10.1155/2014/910162.
- [4] Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A. et.al. Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. Energies 2015, 8, 3679-3719.
- [5] Кузнецов В., Фесенко Г. и др. Проект сотрудничества ИНПРО “Ключевые индикаторы для инновационных ядерно-энергетических систем” (KIND). Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции (27-30 сентября 2016 г., Москва). Москва, издательство АО «НИКИЭТ», с. 150-160, http://istc-2016.nikiet.ru:8080/apex/www_flow_file_mgr.get_file?p_security_group_id=2087214192187084&p_flow_id=101&p_fname=ru_doklady_vol_1.pdf
- [6] Yoon S., Choi. S., Ko.W., An Integrated Multicriteria Decision-Making Approach for Evaluating Nuclear Fuel Cycle Systems for Long-term Sustainability on the Basis of an Equilibrium Model: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, and Multiattribute Utility Theory Combined with Analytic Hierarchy Process, Nuclear Engineering and Technology, vol. 49, issue 1, Korean Nuclear Society, February 2017, p. 148-164.
- [7] Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Utianskaya T.V. et.al. Multi-criteria Comparative Evaluation of Nuclear Energy Deployment Scenarios with Thermal and Fast Reactors. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, JNFCWT Vol.17 No.1 pp.47-58, March 2019, <https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2019.17.1.47>
- [8] Schwenk-Ferrero A., Andrianov A. Nuclear Waste Management Decision-Making Support with MCDA. Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2017, Article ID 9029406, 20 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9029406>.
- [9] Groudev, P., Zaharieva, N., Margenau, C., Constantin, M. (2017). Comparison of Innovative and Evolutionary NPPs in a Country-Specific Context for Bulgaria (Based on IAEA INPRO KIND – ET Methodology). BgNS Transactions, 22(1), 58-64.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project GAINS, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.14, IAEA, Vienna (2013): <https://www.iaea.org/publications/8873/framework-for-assessing-dynamic-nuclear-energy-systems-for-sustainability-final-report-of-the-inpro-collaborative-project-gains> .
- [11] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, NEA Report No. 5990, OECD, Paris (2006), <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2006/5990-advanced-nfc-rwm.pdf>

Сокращения

АИП	аналитический иерархический процесс
АЭС	атомная электростанция
АЯЭ	Агентство по ядерной энергии ОЭСР
ВАО	высокоактивные отходы
ВВЭР	водо-водяной энергетический реактор
ИС	инерционный сценарий, ВАУ
ИЯЭС	инновационная ядерно-энергетическая система
ИНПРО	Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам
КВ	коэффициент воспроизводства
КИ	ключевой индикатор
ЛПР	лицо, принимающее решение
МА	минорные актиниды
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
МКАР	многокритериальный анализ решений
НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ООН	Организация Объединенных Наций
ОЭСР	Организация экономического сотрудничества и развития
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо
РАО	радиоактивные отходы
УЭС	угольная электростанция
ЦВУ	цель высокого уровня
ЭЯЭС	эволюционная ядерно-энергетическая система
ЯТЦ	ядерный топливный цикл
ЭЛЯУ	электроядерная установка (с ускорителем-драйвером), ADS
ЯЭС	ядерно-энергетическая система
CANDU	канадский дейтерий-урановый реактор
CENESO	проект "CENESO" (проект сотрудничества ИНПРО "Сравнительная оценка вариантов ядерно-энергетических систем")
EFR	Европейский быстрый реактор

ELECTRE	Elimination et choix traduisant la realite (метод исключений и выбора, отражающих реальность)
FR	быстрый реактор
GAINS	проект "GAINS" (проект сотрудничества ИНПРО "Глобальная архитектура инновационных ядерно-энергетических систем с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом")
HWR	тяжеловодный реактор
KIND	проект "KIND" (проект сотрудничества ИНПРО "Ключевые индикаторы для инновационных ядерно-энергетических систем")
KIND-ET	инструментарий оценки "KIND" (KIND-Evaluation Tool)
LUEC	приведенная удельная стоимость электроэнергии
LFR	реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем
LWR	легководный реактор
MAVT	Многокритериальная теория ценности
MAUT	Многокритериальная теория полезности
MOX	смешанное оксидное топливо
MOX-UE	MOX-топливо с обогащением урана
MSR	жидкосолевой реактор (реактор на солевых расплавах)
NESA	Оценка ядерно-энергетических систем
PROMETHEE	метод организации ранжирования предпочтений для обогащения оценок
PWR	реактор с водой под давлением
QUALIFLEX	Качественный гибкий метод
SFR	реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
TOPSIS	метод упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением
TRU	трансурановые элементы

Вспомогательный индикатор — дополнительный показатель, используемый для оценки дополнительного, а не обязательного аспекта системы; может использоваться для повышения разрешающей способности метода оценки при сравнении ЯЭС или сценариев развития ядерной энергетики.

Дерево целей — иерархическая структура, используемая для агрегации при многоуровневом моделировании процесса оценки, которая, следовательно, должна быть разработана перед проведением многокритериальной сравнительной оценки.

Инструментарий оценки “KIND” (KIND-ET) — основанный на MAVT инструментарий (выполненный в среде MS Excel) для многокритериальной сравнительной оценки ЯЭС или сценариев развития ядерной энергетики в соответствии с подходом и рекомендациями, разработанными в рамках проекта сотрудничества ИНПРО “KIND”.

Ключевой индикатор — конкретный, обычно поддающийся измерению показатель характеристик системы в определенной области оценки.

Многоатрибутивная теория ценности (англ. MAVT) — метод количественного сравнения, применяемый для объединения различных показателей в терминах затрат, рисков и преимуществ в общую оценку характеристик (баллы) с использованием одноатрибутивных функций ценности наряду с предпочтениями экспертов и лиц, принимающих решения.

Многокритериальный анализ решений (МКАР, англ. MCDA) — система принятия решений по нескольким критериям, в которой прямо предопределяются альтернативные варианты решений: каждый вариант представлен своими показателями, оцениваемыми по одному и тому же набору критериев.

Одноатрибутивная функция ценности — определяемая для каждого индикатора функция, которая преобразует естественные локальные значения различных индикаторов в универсальную, безразмерную шкалу, например [0, 1], отражающую суждения экспертов в данной предметной области и лиц, принимающих решения.

Подход “KIND” — упорядоченный набор действий, направленных на проведение сравнительной оценки вариантов ЯЭС или сценариев развития ядерной энергетики, основанных на выборе и использовании ограниченного числа ключевых индикаторов вместе с современными методами агрегации суждений и анализа чувствительности /неопределенности.

Проект сотрудничества “KIND” — проект МАГАТЭ/ИНПРО, общая цель которого заключалась в разработке руководства и инструментов для сравнительной оценки состояния, перспектив, преимуществ и рисков, связанных с развитием инновационных технологий ядерной энергетики, а также в изучении потенциала разрабатываемого подхода применительно к другим задачам, в том числе к задачам, представляющим интерес для стран-пользователей технологий и стран-новичков.

Рекомендации проекта “KIND” — набор конкретных указаний, касающихся выбора параметров модели для включения в процесс сравнительной оценки ЯЭС /сценариев развития ядерной энергетики в рамках подхода “KIND”; эти указания нацелены на снижение рисков неразличимости альтернатив и на ранжирование чувствительности результатов к параметрам модели.

Ядерно-энергетическая система — комплексная система, включающая реакторы, ядерные топливные циклы, ядерную инфраструктуру, а также правовые и институциональные механизмы.



INPRO

International Project on
Innovative Nuclear Reactors
and Fuel Cycles