

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. ЛЕЙПУНСКОГО»

ФЭИ-3309

А. Ф. Егоров, В. В. Коробейников

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ПРОЕКТА ИНПРО
ПО ЯДЕРНО-ВОДОРОДНЫМ СИСТЕМАМ: ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ
И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕПЯТСТВИЯ**

Обнинск – 2024

А. Ф. Егоров, В. В. Коробейников

Исследование совместного проекта ИНПРО по ядерно-водородным системам: движущие силы и экономические препятствия.

Препринт ФЭИ-3309. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2024. — 32 с.

Ключевые слова: атомно-водородная энергетика, возобновляемые источники энергии, паровая конверсия метана, высокотемпературный ядерный реактор, многокритериальный анализ, водо-водяной энергетический реактор, отработавшее ядерное топливо, ядерный топливный цикл.

В мире на сегодняшний день неядерным способом ежегодно производится порядка 95 млн т водорода, среди которых 5 млн тонн — в России. Такой способ получения водорода продолжает вносить отрицательное воздействие на окружающую среду. Поэтому необходим переход с существующих и доминирующих технологий выработки водорода на основе энергии ископаемого топлива на существующие электролизные технологии и технологии на основе ПКМ с улавливанием CO₂.

По большей части текущим потребителем продукта выступает химическая промышленность и металлургические предприятия. Новые потребители водорода относятся к т. н. перспективным. Здесь уровень потребления находится на начальной стадии (сотые доли процента глобального потребления). Это говорит о том, что данные группы потребителей: транспорт, выработка электроэнергии и др. еще не показали своего фактического потенциала. Такие особенности подразумевают высокие неопределенности экономической оценки, и поэтому наиболее целесообразно применять многокритериальный анализ.

In the world today, about 95 million tons of hydrogen are produced annually by non-nuclear means, including 5 million tons in Russia. This method of hydrogen production still have a negative impact on the environment. Therefore, it is necessary to switch from existing and dominant technologies for hydrogen generation based on fossil fuel energy to existing electrolysis technologies and technologies based on steam methane reforming with CO₂ capture.

For the most part, the current consumer of the product is the chemical industry and metallurgical enterprises. New hydrogen consumers are among the so-called promising ones. Here, the level of consumption is at the initial stage (hundredths of a percent of global consumption). This suggests that these consumer groups: transport, electricity generation, etc. have not yet shown their actual potential. Such features imply high uncertainties in economic assessment and therefore, it is most advisable to apply a multi-criteria analysis.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Этапность и инновации в ядерной энергетике.....	8
2 Техничко-экономический анализ экономической оценки результатов научной деятельности.....	10
2.1 Описание сценариев развития АЭ при моделировании возврата НИОКР.....	10
2.2 Реакторные данные	10
2.3 Особенности моделирования	11
2.4 Результаты расчета	12
2.5 Краткие выводы к разделу	13
3 Модель двухкомпонентной глобальной ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами ...	14
4 Переход с экономических оценок на многокритериальный анализ	16
5 KIND.....	17
6 Технологии АВЭ, рассматриваемые в системном анализе производства водорода	21
6.1 Запасы природных ресурсов	22
6.2 Набор ключевых натуральных показателей для анализа вариантов производства водорода.....	25
6.3 Рейтинги технологий	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	29

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВЭ	– атомно-водородная энергетика
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
ВИЭ	– возобновляемые источники энергии
ВТГР	– высокотемпературный ядерный реактор
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергетике
МКА	– многокритериальный анализ
НИОКР	– научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ПКМ	– паровая конверсия метана
ОЯТ	– отработавшее ядерное топливо
ЯТЦ	– ядерный топливный цикл
CCUS	– улавливание, утилизация и хранение углерода
FR	– быстрый реактор
HTGR	– высокотемпературный реактор с газовым охлаждением
MESSAGE	– модель альтернативных стратегий энергоснабжения и их общее воздействие на окружающую среду
Nat U	– природный уран
NES	– ядерная энергетическая система
NFC	– ядерный топливный цикл
NZE	– чистые нулевые выбросы
OTFC	– открытый ядерный топливный цикл
TR	– тепловой реактор

ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении экономических аспектов развития водородной ядерной энергетической системы (ЯЭС) нельзя опираться только на экономические критерии, в особенности это важно для среднесрочного и долгосрочного периодов её развития. На развитие подобных генерирующих технологий и соответствующих инфраструктурных предприятий оказывает влияние большое число трендов стратегического формирования энергетических систем, включая изменения мировых рынков и состава ядерных и неядерных технологий. Могут играть весомую роль экологические последствия, ядерная, радиационная, пожарная безопасность, обращение с отходами, использование внутренних ресурсов, таких как минеральные и трудовые ресурсы, загрузка производственных мощностей, уровень освоённости технологии, мнение общественности и, следовательно, политическая стабильность.

Инструментом, способным учесть как экономические, так и неэкономические тренды развития общества и факторы производства электроэнергии и водорода, является системный анализ. Международные программы, развиваемые, в частности, в МАГАТЭ и в проекте Международного форума Поколение 4 (АЯЭ/ОЭСР) при анализе перспективных ядерных энергетических систем, ориентированы на использование именно многокритериальных/многофакторных подходов при сравнении энерготехнологий и систем, которые формируют ядерные технологии.

В работе хотелось бы затронуть тему экономических препятствий по внедрению ядерно-водородной энергетической системы. Как правильно указано во многих публикациях [1]—[3], стоимостные характеристики энергетических систем всегда «плавали» и находились в выбранном диапазоне неопределённости между минимальной и максимальной стоимостью производства энергии, электроэнергии и водорода, в частности. Подобная неопределённость учитывает либо масштабность, капиталоемкость и уникальности создаваемого проекта, либо изменение стоимостей топливной составляющей, которая включает как стоимость самого топлива, так и топливную инфраструктуру отрасли, либо и то и другое. На рисунке 1 показана неопределённость стоимости производства водорода в 2021, 2022 и в случае сценария нулевых выбросов CO₂ в атмосферу [4].

Как видно из рисунка, минимальная стоимость производства водорода составляет примерно 0,7 \$/кг H₂ в варианте сценария нулевых выбросов CO₂ в атмосферу с использованием технологии на основе природного газа без улавливания CO₂. На рисунке 1 это серая полоса (третья слева). Максимальная стоимость, представленная на рис. 1, относится к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) — ветроэнергетике.

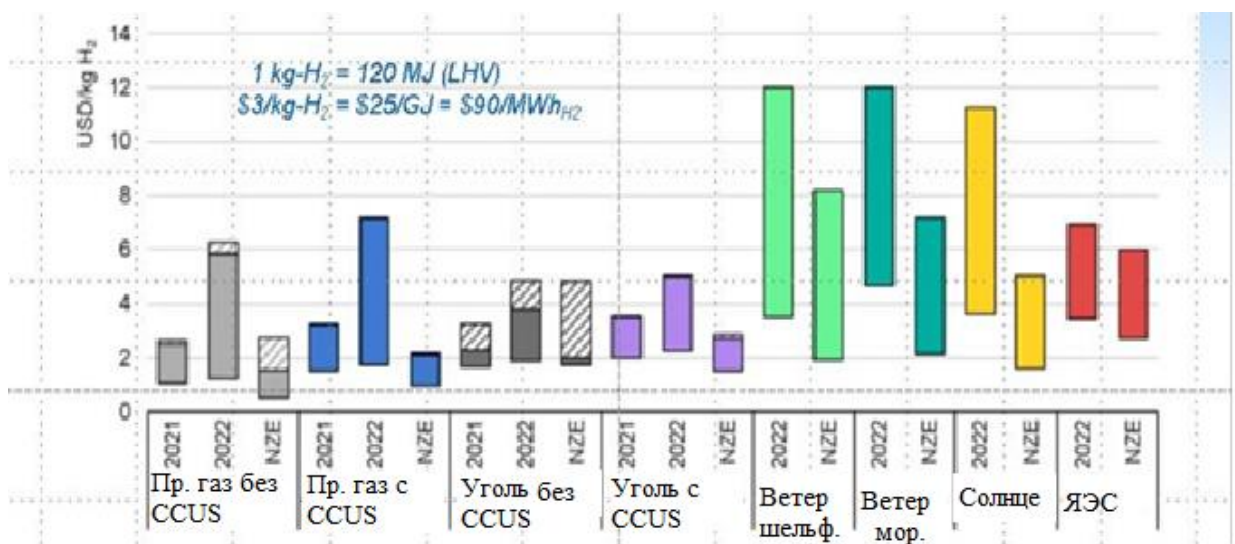


Рис. 1. Неопределенность стоимости производства водорода в 2021, 2022 и в случае сценария нулевых выбросов CO₂ в атмосферу

Здесь, по соответствующим оценкам 2022 г., стоимость производства водорода может достигать до 12 \$/кг H₂. Это справедливо как для морских установок, так и для ветроэнергетики, которая базируется на суше.

Еще можно заметить, что наибольший разброс значений стоимости наблюдается в следующих вариантах выработки водорода: все ВИЭ, кроме солнечных панелей (оценка 2022 г.), природный газ с/без улавливателя CO₂ (оценка 2022 г.). В целом можно заключить, что оценки на 2022 г. имеют наибольшую экономическую неопределенность стоимости среди всех представленных.

Как известно, наибольший потенциал имеет тот вариант альтернатив, который, при прочих равных условиях либо условиях, удовлетворяющих определенным требованиям в текущей ситуации, имеет наименьшую экономическую стоимость. С точки зрения устойчивого развития такой вариант позволяет экономить ресурсы человечества. Если представить, что наименьшая стоимость из заданных вариантов будет иметь наибольший потенциал, обозначенный за «1», а наибольшая стоимость — наименьший потенциал, обозначенный за «0», то рисунок 1 трансформируется в рисунок 2.

На рисунке 2 представлена аналогичная рисунку 1 неопределенность потенциалов производства водорода в 2021, 2022 и в случае сценария нулевых выбросов CO₂ в атмосферу с учетом только экономического критерия. Такая безразмерная форма представления видится более понятной в том смысле, что вариант, наиболее близкий к 1, т. е. к наибольшему потенциалу, является более приоритетным, т. к. имеет наименьшую стоимость.

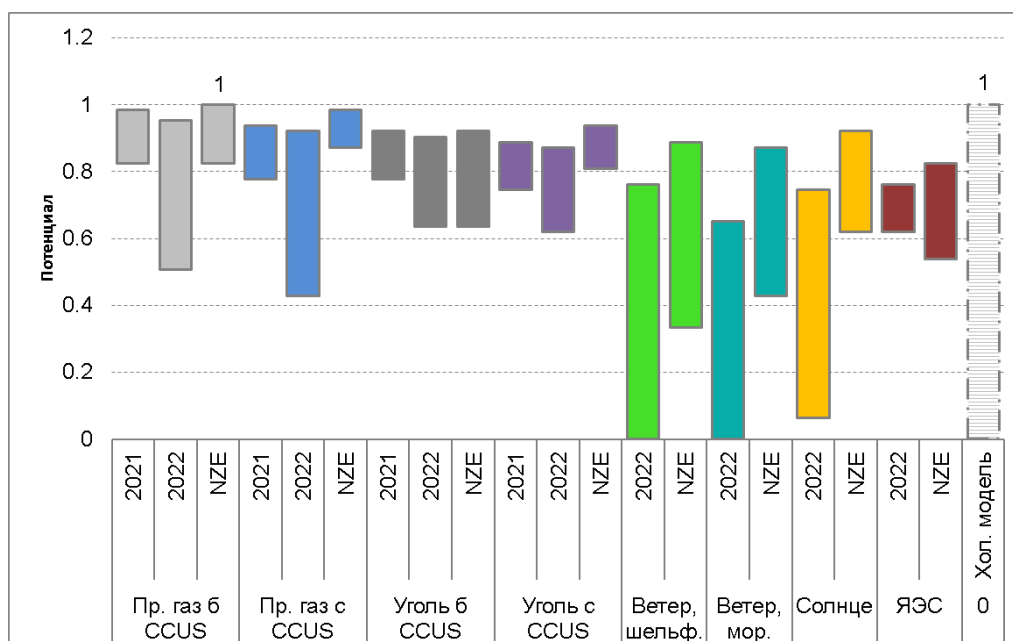


Рис. 2. Неопределенность потенциалов производства водорода в 2021, 2022 и в случае сценария нулевых выбросов CO₂ в атмосферу с учетом экономического критерия

Чем длиннее цветная полоса, тем больше риск, т. к. стоимость, например, ВИЭ может достигать как потенциала 0,9 в случае ветроэнергетики (сценарий NZE), так и иметь худший, нулевой, потенциал с наибольшей среди всех стоимостью. Еще на рисунке 2 добавлен вспомогательный серый столбец справа, с заштрихованной областью и пунктирной границей. Он не описывает каким-либо образом представленные на рисунке 1 технологии, а введен дополнительно для описания особенностей инноваций в оценках сравнения потенциалов энергетических систем.

Представленные на рисунке 1 экономические характеристики альтернативных технологий производства водорода и переформатированные в альтернативные безразмерные потенциалы на рисунке 2 описывают технологии, которые уже освоены. Даже ядерные технологии для производства водорода (рис. 1) описывают существующие реакторные технологии на тепловых нейтронах с открытым ядерным топливным циклом (ЯТЦ). Для таких реакторных установок уже сложилась определенная инфраструктура предприятий Front-End и Back-End с поставками свежего и отработавшего топлива — экономически рентабельная производственная цепочка перетока ресурсов, материалов и услуг. Другое дело, когда в качестве альтернативы рассматривается инновационная реакторная технология. Здесь идет речь о вложении больших финансовых (порядка \$50 млрд на тематику быстрых реакторов [5]) и временных ресурсов. Это включает создание линейки реакторных технологий с постепенной отработкой различных технологий из области безопасности и

улучшения технико-экономических характеристик. Такой путь развития технологии может привести к пуску коммерческой серии реакторов. Если серия будет иметь большой масштаб развития, то экономические затраты на НИОКР могут быть перераспределены между реакторными блоками и незаметны в итоговой стоимости производимой энергии, а могут быть отнесены, например, к первому блоку, и тогда стоимость энергии будет заведомо высокой. Соответственно, такая технология будет экономически смотреться очень плохо, а ее потенциал, построенный только на основе экономики, будет проигрывать существующим технологиям. Т. е. инновация в самом начале своего развития всегда экономически невыгодна по сравнению с эволюционными ядерными энергоисточниками.

Далее в разделах 1—3 приведены особенности ввода быстрых реакторов и инфраструктуры замкнутого ядерного топливного цикла в существующую инфраструктуру тепловых реакторов в открытом цикле. Указанные модели относятся косвенно к процессу производства водорода, который является крайне энергозатратным, и генерация устойчивой электрической энергии многие столетия может также обеспечить выработку водорода.

1 Этапность и инновации в ядерной энергетике

Как правило, от технологической идеи до ее физической реализации в промышленном масштабе проходит достаточно продолжительный период времени, связанный с обоснованием предлагаемой технологии, ее апробацией и отработкой в модельном и/или полунатурном эксперименте; оценкой готовности производства, влияния на окружающую среду и т. д.

Уровень готовности (освоенности) технологии — эта область является отдельным исследованием и обращена к экспертному сообществу. Кроме того, освоенность формируется за счет демонстрации технологии на реализованных в жизни предкоммерческих образцах.

Важным этапом в отборе перспективных технологий, определении их места и роли при определении планов и стратегий развития является определение уровней готовности технологий. Особую важность, сложность и ответственность процедура определения и применения уровней готовности имеет в экспертизе инновационных проектов в капиталоемких отраслях промышленности, к которым относится ЯЭ. Данный подход широко применяется международным сообществом. Как указано в [7], научные исследования можно разделить на фундаментальные, поисковые и прикладные.

В широком понимании жизненный цикл отдельной ЯЭ технологии идет поэтапно и начинается с фундаментальных научных исследований, затем конструирования и разработки пилотных образцов, далее освоения серийного

производства и массовым практическим использованием с получением экономических и других эффектов. Завершается жизненный цикл постепенным вытеснением новыми, более прогрессивными технологиями и, наконец, существенным сокращением и прекращением её использования. На рисунке 3 представлена линейная модель научных исследований и промышленных инноваций. Фундаментальные и поисковые работы в жизненный цикл изделия, как правило, не включаются. Однако на их основе осуществляется генерация идей, которые могут трансформироваться в проекты НИОКР [7].



Рис. 3. Этапы развития НИОКР

В процессе экономической конкуренции производств темпы технологического совершенствования нарастают. Однако на этапах зрелости технология будет асимптотически приближаться к естественному или физическому пределу, и для дальнейших улучшений нужны будут все большие интеллектуальные и временные затраты (рис. 4) [8].

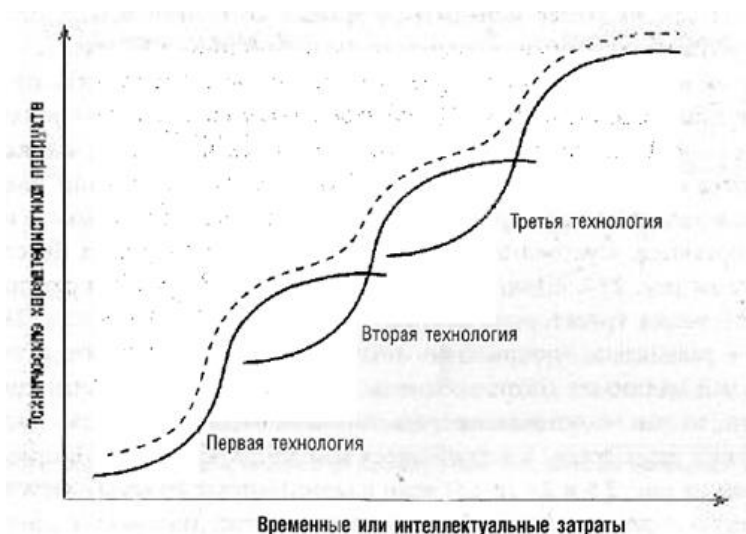


Рис. 4. Пересечение S-кривых старой и новой технологии

Это траектория развития новых технологий, напоминает пересекающиеся s-кривые. Здесь скачок на следующую технологическую кривую связан с внедрением совершенно новой (инновационной) технологии.

2 Технико-экономический анализ экономической оценки результатов научной деятельности

Модель, согласно которой переход на инновационные ядерные технологии реализуется за счет прекоммерческих инвестиций, подробно описана в [5]. Здесь, математическая модель по переходу с существующей системы на инновационную, с замкнутым ядерным топливным циклом, была реализована в программе MESSAGE. В материале явно указано, что только масштабная программа по вводу БР (30 ГВт и более) может обеспечить возврат средств на научные исследования менее чем через 20 лет. Такой сценарий может быть реализован, в частности, в рамках международного/регионального сотрудничества.

В рассмотренной выше модели MESSAGE по возврату инвестиций в НИОКР предполагалось, что инвестиции в НИОКР прекращаются к моменту строительства первой коммерческой АЭС.

2.1 Описание сценариев развития АЭ при моделировании возврата НИОКР

В текущем разделе кратко представлена математическая модель, в которой рассматриваются два упрощенных сценария развития АЭ с модельного нулевого года по 100-й год. Единственные реакторы в сценариях — это быстрые реакторы типа БН-1200 с МОКС-топливом и сроком службы 60 лет.

В первом сценарии предполагается ввод быстрых реакторов с достижением суммарной мощности всех введенных реакторов 50 ГВт (эл.), а во втором — 100 ГВт.

В сценариях не моделируются предприятия пред- и послереакторного топливного цикла. Тем не менее экономика основных переделов топливного цикла (топливо и переработка ОЯТ) учитываются в модели как компоненты стоимости производства электроэнергии на быстрых реакторах.

Цель математической модели состоит в оценке сроков возврата средств, вложенных в НИОКР быстрых реакторов.

2.2 Реакторные данные

Рассматриваемые АЭС с быстрыми реакторами были объединены в один тип БН-1200 с МОКС-топливом. Экономические условия реализации электроэнергии на рынке и экономические характеристики топливного цикла представлены в таблице 1. Следует отметить, что все использованные

в расчетах величины являются среднегодовыми, т. е. соответствуют рабочим характеристикам реакторов в установившемся режиме работы.

Таблица 1 – Входные данные для расчета основных экономических показателей АЭС с РУ БН-1200, 1 mills = 10^{-3} US\$. Экспертные оценки

Характеристики	2-блочная АЭС с РУ БН-1200	
	первый блок	второй блок
Процент на инвестиции, 1/год	0,02	0,02
Отпускная цена единицы электроэнергии, mills/ кВт·ч	52,8	52,8
Доля рынка	1	1
Стоимость плутония, \$/кг	0	0
Стоимость отвалного урана, \$/кг	0	0

2.3 Особенности моделирования

В отличие от [5], [9], в рамках текущей модели исследовались более реалистические сценарии инвестиций в НИОКР, в которых финансирование НИОКР не прекращается после ввода первой коммерческой АЭС.

Моделирование проводилось за две итерации. Сначала рассчитывалась стоимость электроэнергии на РУ типа БН-1200, а затем на основе полученных данных проводились сценарные исследования по возврату средств за НИОКР.

Расчет экономических показателей для моделирования учета НИОКР АЭС проводилось по методическому инструменту МАГАТЭ–NEST [10]. Удельная стоимость электроэнергии в выбранных условиях равна 39,6 mills/кВт·ч.

В модели не учитывается баланс материалов в системе. Предполагается, что существует необходимое количество топлива для запуска и перегрузок. Основное внимание уделено экономической составляющей.

В сценариях 1 и 2 предполагались следующие варианты вложения средств в НИОКР:

- 1) ежегодные отчисления в науку из расчета 20 млрд долл. на 50 лет,
- 2) ежегодные отчисления в науку из расчета 30 млрд долл. на 50 лет,
- 3) ежегодные отчисления в науку из расчета 20 млрд долл. на 50 лет и сверх этого, двукратное ежегодное увеличение финансирования НИОКР в первые 20 лет моделирования.

Для каждого сценария были выбраны следующие индикаторы:

- баланс между прибылью системы и затратами на обслуживание и возврат долга,
- ввод/вывод быстрых реакторов по годам,
- структура генерирующих мощностей АЭС,
- срок возврата денег за НИОКР и строительство.

2.4 Результаты расчета

На рисунке 5 представлены результаты моделирования двух сценариев развития энергетики и трем вариантам вложения средств в НИОКР. В таблице 2 в соответствии с рис. 5 представлены данные по срокам возврата средств на научные исследования. В первом столбце представлен один из вариантов финансирования НИОКР, во втором и третьем (в зависимости от сценария) — год «перехода через нуль» кривой баланса денежных средств.

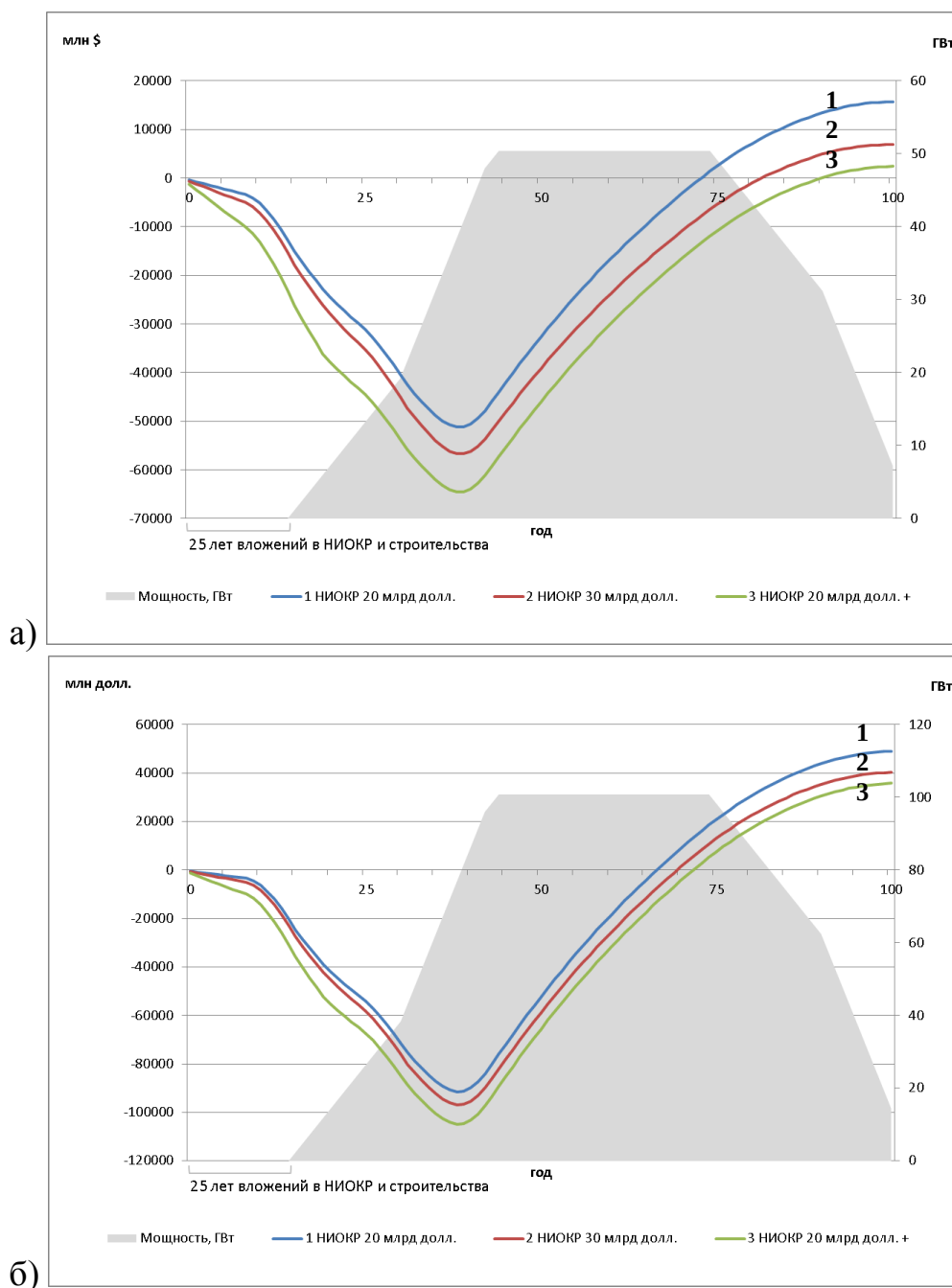


Рис. 5. Возврат НИОКР и капиталовложений быстрых реакторов:
а) 50 ГВт; б) 100 ГВт

Таблица 2 – Возврат денежных средств за строительство и науку

Вариант	Год возврата	
	50 ГВт	100 ГВт
1 НИОКР 20 млрд долл.	73	67
2 НИОКР 30 млрд долл.	82	70
3 НИОКР 20 млрд долл. +	90	72

Провал на графиках описывает ситуацию, когда финансируется НИОКР и происходит строительство блоков. Пересечение с осью абсцисс показывает возврат затраченных средств по НИОКР и капитальным затратам.

Самая низкая точка на графиках показывает, что строительство последнего блока завершено и все мощности (50 или 100 ГВт в зависимости от сценария) находятся в эксплуатации.

Затраты системы складываются из ежегодных расходов на НИОКР и капитальных затрат.

Из таблицы 2 и рисунка 5 видно, что на скорость возврата средств влияет масштаб развития отрасли.

2.5 Краткие выводы к разделу

Из анализа рассмотренных материалов и выполненных модельных расчетов возврата НИОКР следует, что на финансирование НИОКР и скорость возврата средств влияет:

- конкурентоспособность (снижение стоимости по сравнению с конкурентами),
- «накопление технического опыта»,
- масштабность развития отрасли,
- серийность технологий,
- структура ввода и финансовая интеграция блоков.

Также принципиальным является вопрос экономической цели таких проектов. В соответствии моделью амортизация РУ БН переносится на вновь возводимые блоки (в последующем без привлечения кредитных средств). В случае погашения основного долга и процентов по кредиту за счет амортизации (полностью либо частично) скорость возврата средств за НИОКР и строительство может значительно возрасти.

3 Модель двухкомпонентной глобальной ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами

Не останавливаясь на технических особенностях моделирования, в разделе кратко представлены результаты моделирования структуры глобальной ЯЭС с использованием расчетного комплекса MESSAGE [11].

В среднесрочной перспективе сценарий подразумевает использование тепловых реакторов для производства электроэнергии и быстрых реакторов, которые в качестве топлива используют переработанное ОЯТ и тоже производят электроэнергию. В таком цикле за счет расширенного воспроизводства ядерного «горючего», как считается, существенно расширится топливная база атомной энергетики, а также появится возможность уменьшить объемы радиоактивных отходов благодаря «выжиганию» опасных радионуклидов. При формировании стратегии и будущего развития АЭ наилучшим образом применяются сценарные исследования. Технологические особенности производства электроэнергии на атомных станциях через учет материальных балансов на финальных выгрузках из реактора требуют рассмотрения больших сценарных временных интервалов (более 60 лет).

В ходе работы было проведено расчетное моделирование глобальной двухкомпонентной ЯЭС на основе модельных предположений и особенностей, представленных в проекте ИНПРО — SYNERGIES [12].

В базовой структуре выработки электроэнергии глобальной ядерно-энергетической системы (рис. 6) до 2063 года доминируют тепловые реакторы без переработки собственного ОЯТ (область графика закрашена зеленым цветом). Таким образом, экономически оправданным до 70-х годов текущего столетия будет развитие глобальной ЯЭС на основе открытого ЯТЦ с тепловыми реакторами и урановым топливом. Это объясняется более низкими капитальными затратами на строительство реакторов на тепловых нейтронах по сравнению со строительством быстрых реакторов, низкими ценами на природный уран и невысокой стоимостью временного хранения ОЯТ. Однако повышение цены природного урана при заданных в работе темпах развития мировой ядерной энергетики и прогнозируемое повышение затрат на заключительной стадии открытого ЯТЦ, связанное с необходимостью решения проблем нераспространения и окончательного удаления ОЯТ путем его захоронения в геологических хранилищах, приводит к существенному изменению структуры производства электроэнергии глобальной ЯЭС. Поэтому после середины 2060-х годов идет плавное вытеснение тепловых реакторов без переработки собственного ОЯТ альтернативными инновационными реакторными технологиями (двухкомпонентная ядерно-энергетическая система с ЗЯТЦ).

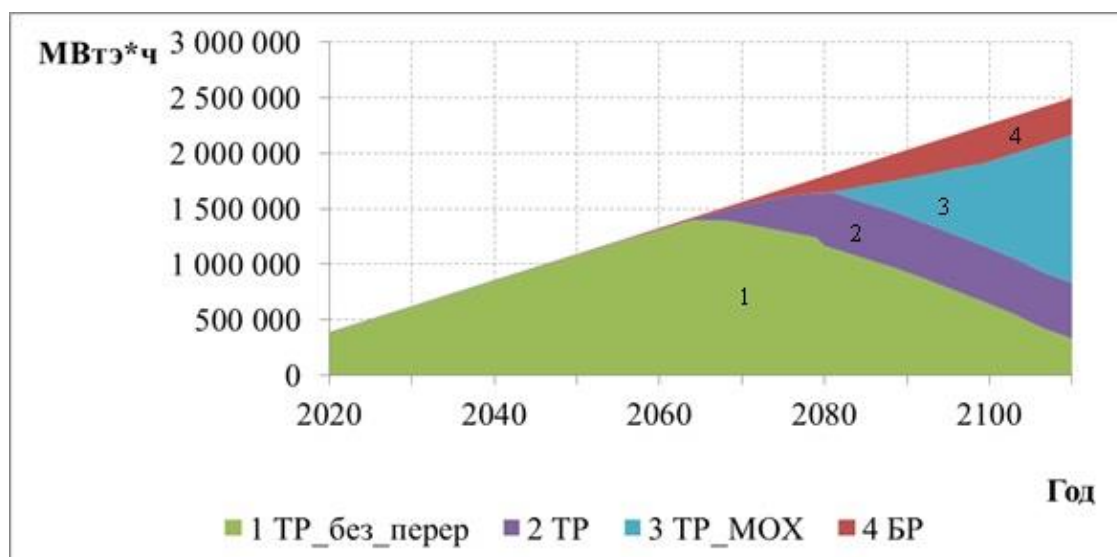


Рис. 6. Базовая структура выработки электроэнергии глобальной ЯЭС

Как показывает детальный анализ данных (рис. 6), тепловые реакторы с переработкой отработавшего УОКС-топлива (область графика закрашена фиолетовым цветом) работают с 2020 по 2065 год на мощности 6,8 ГВт. Далее происходит увеличение мощности до ~ 30 ГВт. С 2066 по 2081 год средний ежегодный рост мощностей реакторов с переработкой на УОКС-топливе составляет 20 %. С 2082 по 2110 год мощности указанных реакторов остаются на уровне 500 ГВт.

Тепловые реакторы с частичной загрузкой МОКС-топливом и полной переработкой всего ОЯТ (область графика закрашена сине-зеленым цветом) начинают вводиться в структуру глобальной АЭ в 2080 году. В последующие 3 года (2081—2083 гг.) происходит существенное увеличение мощностей, а затем на отрезке с 2084 по 2110 год средний ежегодный рост мощностей реакторов с переработкой на МОКС-топливе составляет 11 %.

Быстрые реакторы (область графика закрашена темно-красным цветом) вводятся в 2048 году с мощностью около 3 ГВт и продолжают оставаться на таком уровне до 2056 года. Таким образом, оптимизационная модель указывает на экономически обоснованный ввод отдельных блоков быстрых реакторов для использования плутония, выделенного из ОЯТ тепловых реакторов, работающих на мощности 6,8 ГВт с 2020 по 2065 год. На временном отрезке с 2060 по 2080 год средний ежегодный рост мощностей быстрых реакторов составляет 13 %. С 2081 по 2099 год средний ежегодный рост мощностей быстрых реакторов составляет 4 %. То есть, происходит насыщение быстрыми реакторами структуры глобальной выработки электроэнергии АЭ. С 2100 по 2110 год мощности быстрых реакторов остаются постоянными на установившемся уровне.

В какой-то степени картина ввода в глобальную ЯЭС быстрых реакторов соответствует существующим реальностям, поскольку в мире вводятся или планируются к вводу до середины века отдельные блоки таких реакторов. Однако в оптимизационном комплексе MESSAGE быстрые реакторы вводятся по чисто экономическим условиям в предположении, что необходимые предприятия ЯТЦ созданы и предоставляют топливные услуги по стоимостям, используемым в модели, в то время как в действительности целесообразность включения быстрых реакторов в структуру ЯЭС в значительной степени определяется необходимостью отработки технологии замыкания ЯТЦ.

Как видно в модели, включение в структуру АЭ на базе коммерческих и освоенных технологий дополнительных ядерных технологий, которые продемонстрировали новые качества, осуществляется не одномоментно. Требуется слаженная работа научно-производственной структуры в течение десятилетий [5]. Положительный эффект перехода на новые технологии (через экономику, общественно-политические, экологические индикаторы) может быть замечен на уже сложившейся коммерческой двухкомпонентной системе в долгосрочной перспективе (50, 100 и более лет). В такой ситуации каждый дополнительный год прогнозирования будущего будет плодить растущую неопределенность характеристик ЯЭС.

4 Переход с экономических оценок на многокритериальный анализ

Упрощенные примеры исследований, представленные выше: модель возврата средств, вложенных в НИОКР и базовая структура выработки электроэнергии глобальной ЯЭС, подготовленная с использованием инструмента MESSAGE, позволяют представить масштаб неопределенности экономических оценок в случае рассмотрения инновационной технологии быстрых реакторов. Такая неопределенность, в случае рассмотрения пределов рисунка 1, будет значительно шире неопределенности представленных параметров существующих технологий. В представлении рисунка 2 неопределенность потенциала инновации можно рассматривать в виде столбца *dummy* (правый серый столбец) с потенциалом $[0; 1]$, где:

– 0 рассматривается в качестве полной неудачи, ошибочно вложенных средств в НИОКР, тупиковый путь развития технологии, либо

– 1, как полный успех в виде широкого использования технологии всем человечеством, достижения энергетической системы через ввод данной инновации устойчивого развития на исторически большой отрезок времени.

Эволюционирование любой технологической инновации с достижением высоких экономических показателей через создание линейки, согласно рисунку 3 (этапы развития НИОКРа), а затем серии идет поэтапно и зависит от созданной производственной инфраструктуры и уровня востребованности

у потребителя. Развитие инновации происходит, прежде всего, благодаря качественно новым свойствам технологии, которые положительно воспринимаются потребителем в широком смысле этого слова. Эта ситуация частично представлена моделью глобальной ЯЭС быстрых реакторов в программе MESSAGE (раздел 3).

Обращаясь снова к рисункам 1 и 2, можно заметить, что не только экономические характеристики представлены на соответствующих диаграммах. Для лиц, принимающих решения, аналитиков подобного рода информации важны и дополнительные свойства технологий: какой вид топлива используется, возобновляемый либо ископаемый невозобновляемый ресурс, какое воздействие на окружающую среду оказывает и т. д.

Итак, переход в системном анализе от экономических характеристик к рассмотрению сразу нескольких критериев оценки и учет их значимости в конечном сравнении потенциалов обусловлен:

- математическим снижением неопределенности экономического критерия через снижение его значимости в учете итогового потенциала, добавление дополнительных критериев, которые можно посчитать физически с меньшей неопределенностью (балансные характеристики ЯТЦ);

- учетом дополнительных критериев, кроме экономических, которые, косвенно учитываются и в экономической оценке, но математически не формализованы и не измерены.

При этом следует учесть, что как экономическая оценка, так и многокритериальная, по сути является одним и тем же инструментом системной оценки.

5 KIND

Совместный проект ИНПРО Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems (KIND) [13] был создан для разработки руководств и инструментов для сравнительной оценки состояния, перспектив, выгод и рисков, связанных с развитием инновационных ядерных технологий.

Для достижения данной цели проект KIND был направлен на решение следующих задач:

- разработку ограниченного числа ключевых индикаторов для оценки состояния, перспектив, преимуществ и рисков, связанных с инновационными реакторными технологиями и ЯЭС на их основе;

- применение адаптированных методов объединения экспертных оценок, расчетных данных и анализа неопределенностей для сравнительной оценки выбранных инновационных ядерных технологий с учетом сценариев развития

Таким образом, в проекте KIND напрямую применяется метод многокритериальной сравнительной оценки ядерно-энергетических систем с использованием многоуровневой иерархии индикаторов и системы их весов. Использование такого подхода, среди прочего, дает необходимую информацию для установления диалога между стейкхолдерами, преследующими различные интересы, но в тоже время требует ответственного подхода к выбору набора критериев и расстановке весов.

Несмотря на то что в рамках проекта был подготовлен инструмент многокритериальной оценки, остается нерешенным вопрос о формировании сравниваемых альтернатив и критериев, по которым идет сравнение, значимости критериев. Поэтому, в зависимости от контекста задачи, критерии, альтернативы и веса остаются всегда уникальными.

Существует несколько типов подходов многокритериальной оценки и сценариев, локальных технологий либо проектов (табл. 3).

Таблица 3 – Существующие подходы по многокритериальному сравнению альтернатив в ядерной энергетике

Критерии	Подходы		
	технологический	сценарный	проектный
Безопасность	+	—*	+
Удельные ограничения по ресурсам	+	+	+
Интегральные ограничения по ресурсам	—	+	—
Привязка по времени	—	+	+
Географическая привязка	—	—	+
Учет экспортного потенциала технологий и услуг	—	+	+
Масштаб потребления	—	+/-**	+
Связь с существующей промышленной инфраструктурой и логистикой	—	—	+
Наименьшая неопределенность экономического критерия	—	—	+
Освоенность	+	—	—
+/- — применимо/нет			
* Считается, что все технологии, которые участвуют в сценарии, удовлетворяют существующим требованиям безопасности.			
** С точки зрения масштаба потребления конечного продукта в сценарном анализе может возникнуть двойственная ситуация: с одной стороны, сценарий строится на основе некоего прогноза потребления, с другой — он часто сильно расходится с фактическими данными, и такой масштаб сам является неопределенностью развития энергетической системы.			

Рассмотрим более подробно предлагаемые подходы (табл. 3):

– **технологический:** в качестве альтернатив участвуют локальные технологии. Вопросы ядерного топливного цикла рассматриваются только в контексте обеспечения проектных технико-экономических характеристик. Такое сравнение похоже на разделение целого на большие «куски», которые связаны между собой только неким общим рынком либо экономически через стоимости топлива, капитальных затрат и др. Подход не учитывает синергетический эффект, который появляется через топливный цикл и объединение в общую систему.

– **сценарный:** в качестве альтернатив рассматривается комплекс технологий пред- и послереакторной части ядерного топливного цикла. Математически описана вся производственная цепочка от добычи ресурсов до производства вторичной электроэнергии и система обращения с отработавшим топливом. Берется в расчет выбранный интервал времени, который учитывает исторические технико-экономические характеристики ядерно-энергетической системы (ЯЭС), ближайшие планы по вводу предприятий ядерного топливного цикла и реакторов и стратегические перспективы развития ЯЭС, в т. ч. ввод инноваций для устойчивого развития рассматриваемой ЯЭС. Минимальная, но крайне важная функция сценариев развития — они фиксируют запрещенные маршруты, т. е. то, чего ни в коем случае не должно быть. Активная работа с будущим, в том числе отдаленным, вынуждает отвечать на вопросы, которые часто хотелось бы обойти, заставляет проговаривать то, о чем хотелось бы умолчать: накопление ОЯТ, исчерпание природных ресурсов при наличии спроса на электроэнергию, ухудшение экологической обстановки с существующей технологической базой и ростом потребления и др.

– **проектный:** в качестве альтернатив рассматриваются бизнес-проекты с привязкой к площадке. В отличие от описанных ранее подходов, экономические характеристики обладают наименьшей неопределенностью в таких альтернативах и экономический критерий обладает наибольшим весом.

Переходя от методологических вопросов многокритериального анализа развития атомной энергетики, развития технологий к описанию предметной области ядерно-водородной энергетики, рассмотрим концептуальную схему выработки водорода с использованием существующих технологий ядерно-водородной энергетики (рис. 7).

Указанная схема содержит следующие технологии производства водорода: ПКМ, ВТГР, электролиз, пиролиз. Кроме того, на схеме расположен блок выработки электроэнергии ЯЭС. На нижней оси «ресурсы» расположены следующие природные ресурсы по степени их доступности на Земле, от большей к меньшей: вода, уран-8, уран-5, природный газ. Средняя шкала температуры показывает относительный порядок температур для названных выше

технологий производства водорода. Кроме того, на схеме присутствует шкала «Инновации», которая показывает степень освоенности указанных технологий. Например, электролиз расположен в левом верхнем углу как более освоенная технология, а пиролиз в правом — как менее освоенная.

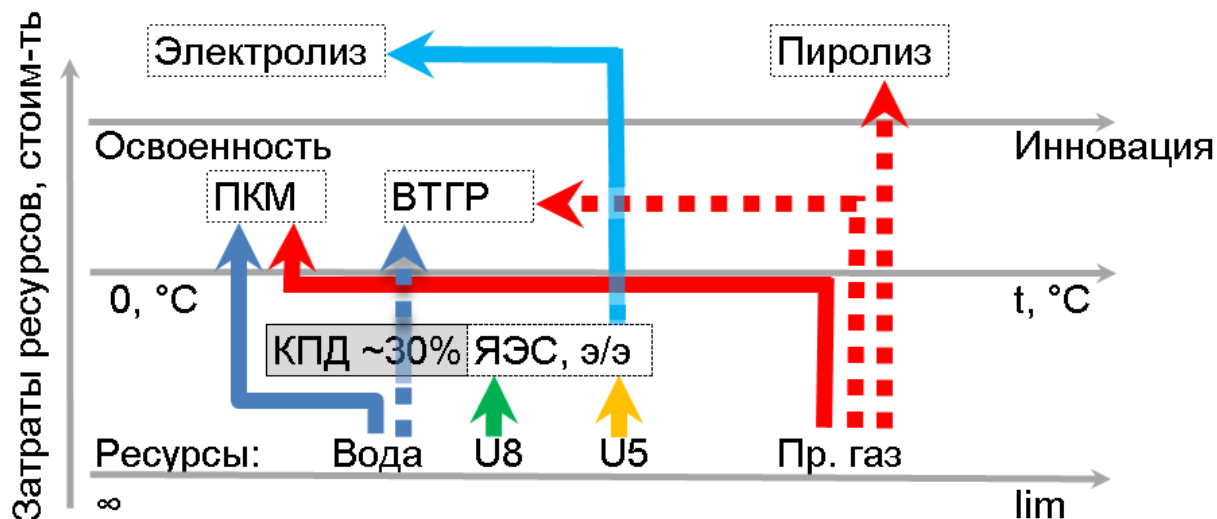


Рис. 7. Базовая структура выработки водорода глобальной ЯЭС

Еще есть вертикальная шкала «Затраты ресурсов», которая показывает концептуальную разницу затрат на производство водорода, например, с использованием технологии ВТГР или электролиза. Электролиз является наиболее технологически затратным способом, т. к. требует сначала производства электроэнергии, а потом водорода с потерей КПД на каждой стадии перехода энергии от тепловой в электрическую, а затем выработки водорода.

Исходя из предложенной концептуальной схемы, альтернативами служат рассмотренные технологии, а естественными ограничениями выступают перечисленные ресурсы. Для упрощения предполагается, что ресурсы равномерно распределены по планете.

В промышленных масштабах часто используется метод паровой конверсии с метаном (ПКМ) или природным газом. Затем с помощью угольных фильтров достигается концентрация водорода 99,9 %. Такой подход требует наличия крупных установок, но считается одним из самых эффективных.

В местах с дешевым электричеством может использоваться электролиз — разложение воды на водород и кислород. Технология позволяет получить не только водород, но и кислород, который также имеет большое значение в промышленном производстве. Основной недостаток — большие затраты электроэнергии.

Эффективным по энергетическим затратам и отсутствием выбросов CO_2 методом получения водорода является пиролиз метана. Однако в настоящее время он находится в стадии научных исследований.

6 Технологии АВЭ, рассматриваемые в системном анализе производства водорода

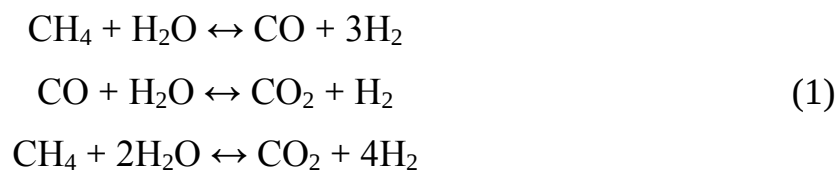
ПКМ: технология, уравнения, затраты энергии и выбросы

Технология ПКМ требует подведения извне природного газа, воды и высокотемпературного тепла [14]. Как правило, для получения этого тепла сжигают часть природного газа (около половины) со сбросом дымовых газов, содержащих CO_2 и окислы азота, в атмосферу.

Паровую конверсию осуществляют в химических паровых риформерах (трубчатых печах) при температурах 750—850 °С. Процесс паровой конверсии протекает в соответствии с реакциями (1), описывающих процесс ПКМ.

При огневом нагреве на тонну производимого водорода потребуется уже четыре тонны природного газа. При этом существенно увеличивается и выброс углекислого газа по сравнению с приведённой формулой (1). Таким образом, самый дешёвый способ получения водорода — из ископаемых ресурсов (уголь, газ) — наносит ощутимый вред экологии.

Энергозатраты на ПКМ составляют 15,3 кВт·ч (тепл.)/кг H_2



Пиролиз: уравнения, энергетические затраты

Пиролиз является самым привлекательным подходом получения водорода из природного газа. К сожалению, пока не на промышленном уровне. В формуле (2) приведено соотношение, описывающее процесс пиролиза метана.



Выбросы углекислого газа и потребление воды в данном методе получения водорода отсутствуют. Образующийся при этом углерод может использоваться в качестве наполнителя или армирующего агента при производстве резиновых изделий, автомобильных шин, а также в качестве пигмента для различных технологий. Мировой рынок углерода составляет около 18 млн тонн в год и продолжает свой рост.

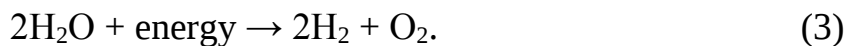
В теории пиролиз позволит решить проблему выброса углекислого газа, но пока общепринятого промышленного способа получения водорода методом пиролиза метана не существует.

Электролиз: уравнения, затраты энергии

В формуле (3) приведено соотношение, описывающее процесс электролиза для получения водорода [15].

Достоинствами подхода является отсутствие потребностей в природном газе и выбросов углекислого газа — неисчерпаемый природный ресурс сырья для получения водорода. Недостаток состоит в очень больших энергетических затратах.

$$\text{Энергозатраты} = 151 \text{ кВт} \cdot \text{ч (тепл.)} / \text{кг H}_2$$



6.1 Запасы природных ресурсов

На рисунках 8—10 приводятся оценённые запасы, соответственно, природного газа [16], воды [17] и природного урана [18].

Общие водные ресурсы в мире оцениваются величиной порядка 43 750 м³/год, распределенные по всему миру в соответствии с разнообразием климатических условий и физико-географических структур. На континентальном уровне наибольшая доля мировых запасов пресной воды приходится на Америку — 45 %, за ней следуют Азия — 28 %, Европа — 15,5 % и Африка — 9 %. С точки зрения водных ресурсов на одного жителя в Америке приходится 24 000 м³/год, в Европе — 9 300 м³/год, в Африке — 5 000 м³/год и в Азии — 3 400,1 м³.

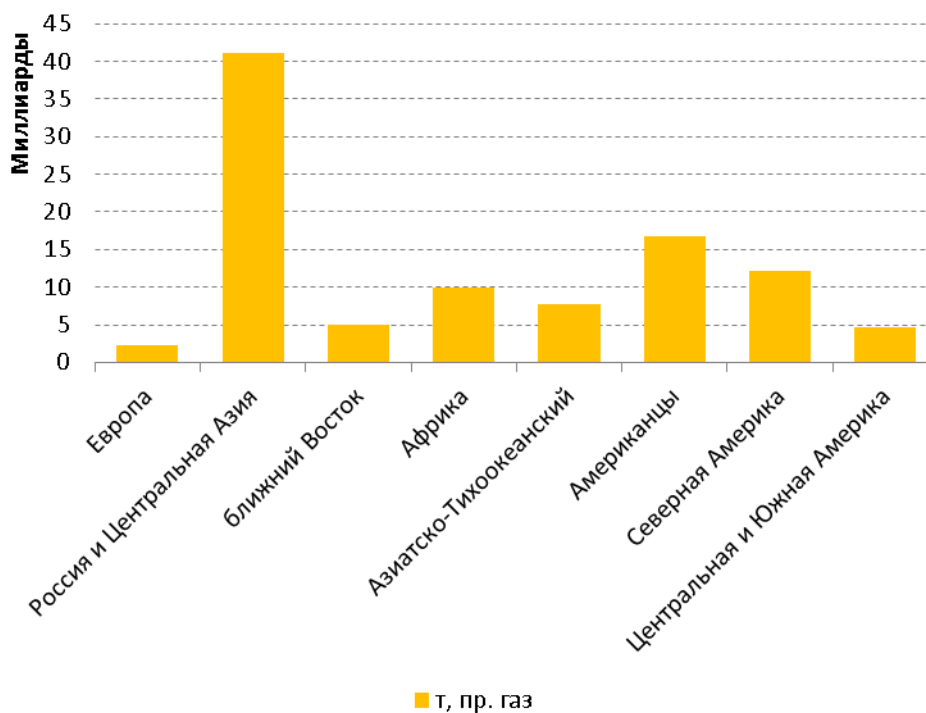


Рис. 8. Запасы природного газа по регионам мира

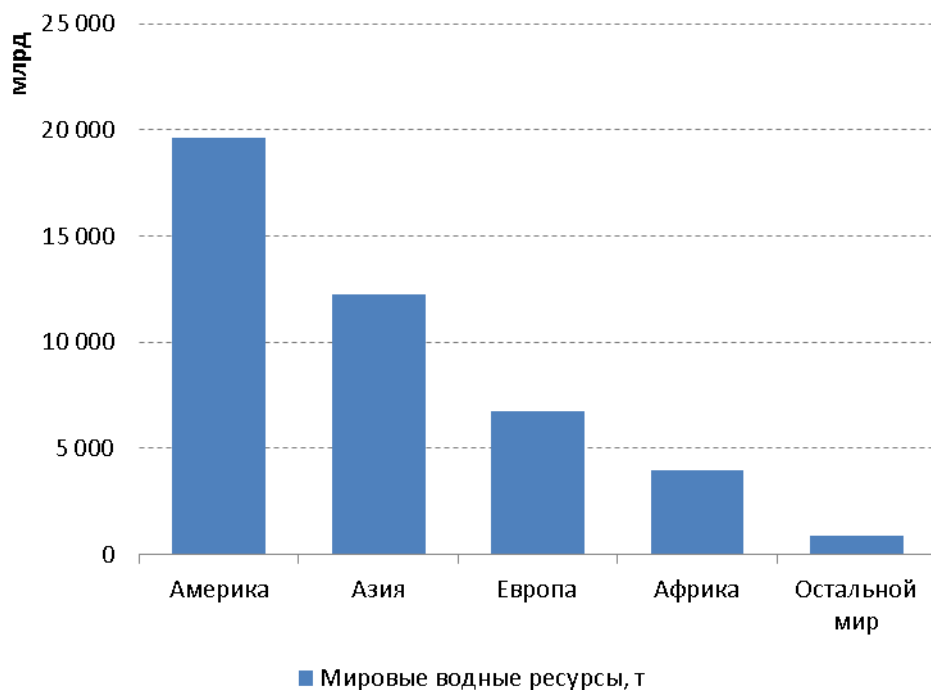


Рис. 9. Запасы воды по регионам мира

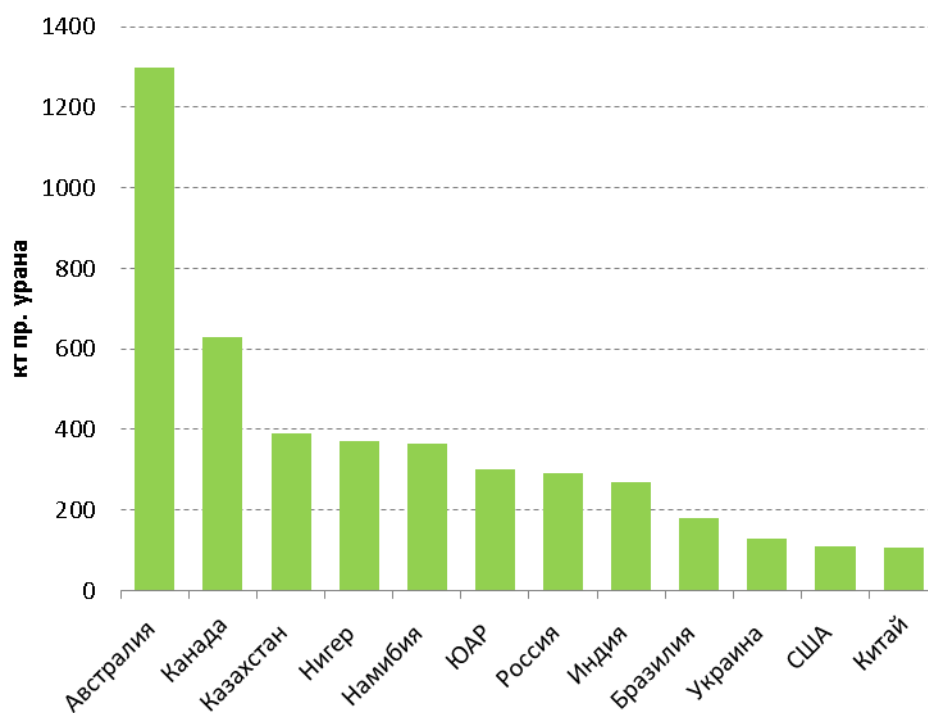


Рис. 10. Распределение извлекаемых запасов природного урана среди отдельных стран со значительной долей ресурсов

Далее, исходя из оценённых запасов ресурсов, представлены предельные возможности производству водорода методом ПКМ (рис. 11) и электролизом (рис. 12) по регионам мира.



Рис. 11. Предельные возможности по производству водорода методом ПКМ по регионам мира

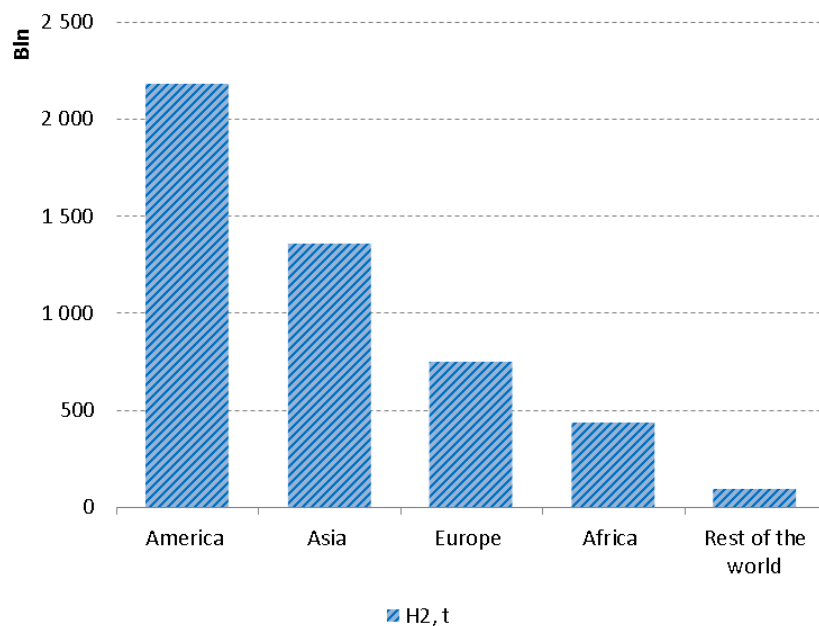


Рис.12. Предельные возможности по производству водорода методом электролиза по регионам мира

Ресурс воды для производства водорода методом электролиза практически не ограничен в отличие от ресурса газа.

Главной задачей системного анализа является построение возможного облика атомно-водородной энергетики в его многообразии, подготовка и структурирование исходных данных, формирование критериев, альтернатив,

областей сравнения, а также настройка аналитических и методических подходов к многокритериальному анализу (МКА), определение возможных путей перехода к водородной экономике с применением ядерных технологий.

Многокритериальный анализ, как уже отмечалось выше, предназначен для проведения оценки альтернатив, характеризующихся многочисленными и противоречивыми факторами, влияющими на выбор эффективных путей развития атомно-водородной энергетики.

В рамках данной работы будет представлен набор ключевых натуральных показателей, необходимых для анализа технологий АВЭ производства водорода.

6.2 Набор ключевых натуральных показателей для анализа вариантов производства водорода

В таблице 4 приведён набор ключевых «измеренных» данных, используемых для системного анализа [19]. Предварительный набор ключевых данных не содержит пока информацию по готовности технологий и затратах на производство водорода в АВЭ. В системном анализе технологий на предварительном этапе будем предполагать отсутствующие данные одинаковыми для всех технологий.

В таблице 5 приведены нормированные данные на мегаватт тепловой мощности и на тонну произведенного водорода. Это сделано для приведения их к одинаковой базе, что важно при подготовке из них безразмерных индикаторов для системного анализа.

Таблица 4 – Исходные данные по технологиям, используемым в системном анализе

	ВВЭР	БН-1200	ВТГР
Р(эл.), МВт	1260	1220	–
Р(тепл.), МВт	3200	2800	200
КПД, %	39	44	–
КИУМ, %	91	90	90
Загрузка ^{nat} U, т/год	190	–	21
Выгрузка ОЯТ, т/год	23	14	3,78
Избыток Pu, т/год	0,25	0,22	0,011
Наработка H ₂ тыс. т/год	183	175	110
Потребление воды, млн т/год	1,65	1,28	2,7
Наработка CO ₂ , млрд м ³	–	–	0,53
Наработка H ₂ тыс. т/т ^{nat} U	0,96	–	5
Наработка H ₂ тыс. т/МВт (тепл.)	0,057	0,062	0,55
Готовность, баллы	1	2	3
LCOH, \$/кг H ₂	6	6	1,45

Таблица 5 – Натуральные показатели для получения критериев

	На тонну водорода		
	ВВЭР	БН	ВТГР
W(эл.), ГВт	1,26	1,22	
КПД	39	44	
КИУМ	0,91	0,9	0,9
W(тепл.), ГВт	3230,769	2800,61	200
H ₂ т/год	182622,1	176824,6	110000
Показатели для вычисления индикаторов			
H ₂ т/год	56,52589213	63,13788782	550
Нормировка на тонну водорода			
U _{пр} т/год	0,0010404	0	0,0001909
ОЯТ т/год	1,26E-04	7,92E-05	3,44E-05
P _и т/год	1,37E-06	1,24E-06	1,00E-07
H ₂ O т/год	9	9	4,5
Газ, т/год	0	0	2
CO ₂ , т/год	0	0	5,5
Готовность, баллы	1	2	3
LCOH, \$/кг H ₂	6000	6000	1450

На рисунке 13 показаны объёмы наработки водорода для разных технологий, нормированные на мегаватт тепловой мощности.

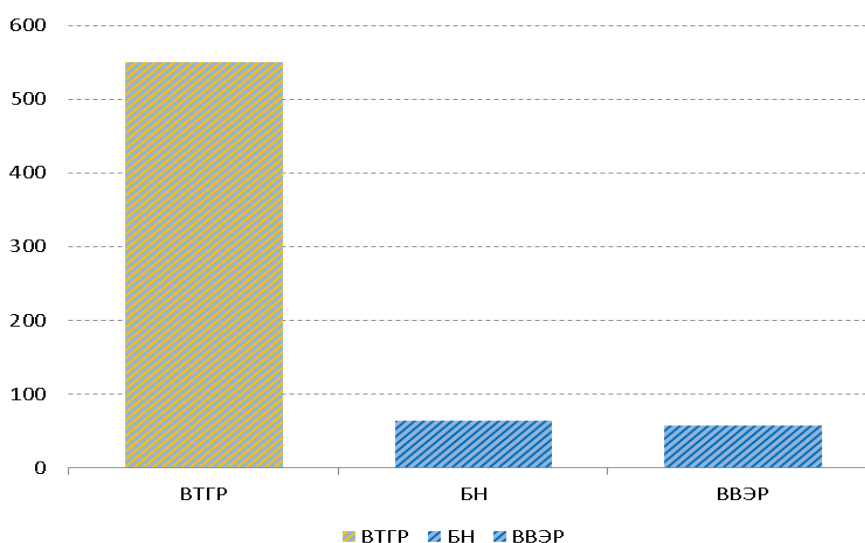


Рис. 13. Производство водорода в год на 1 мегаватт тепловой мощности

6.3 Рейтинги технологий

В таблице 6 приведён набор индикаторов, полученных из набора показателей, приведенных выше. В таблице 7 показаны модельные наборы весов для определения вариантов рейтингов технологий.

Таблица 6 – Индикаторы для проведения анализа

	Индикаторы		
	ВВЭР	БН	ВТГР
H ₂ т/год/МВт	1,03E-01	1,16E-01	1,00E+00
U _{пр} т/год	0,00E+00	1,00E+00	7,00E-01
ОЯТ т/год	2,73E-01	4,34E-01	1,00E+00
P _и т/год	7,30E-02	1,00E+00	1,00E+00
H ₂ O т/год	5,00E-01	5,00E-01	1,00E+00
Газ, т/год	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
CO ₂ , т/год	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
Готовность, баллы	1	0,5	0
LCON, \$/кг H ₂	0	0	1

Таблица 7 – Предварительный набор весов

	w1	w2
H ₂ т/год/МВт	0,1111	0,5
U _{пр} т/год	0,1111	0,0625
ОЯТ т/год	0,1111	0,0625
P _и т/год	0,1111	0,0625
H ₂ O т/год	0,1111	0,0625
Газ, т/год	0,1111	0,0625
CO ₂ , т/год	0,1111	0,0625
Готовность, баллы	0,1111	0,0625
LCON, \$/кг H ₂	0,1111	0,0625

На рисунках 14 и 15 приведено сравнение рейтингов технологий АВЭ с разными модельными наборами весов — значимостей критериев. На рисунке 14 приведены результаты сравнения рейтингов для одинаковой значимости критериев оценки. На рисунке 15 рассматривался вариант с увеличением значимости критерия объёма нарабатываемого водорода до 50%. Показано, что рейтинг ВТГР возрастает, что и понятно. Производство водорода на единицу мощности в ВТГР в десять раз выше, чем ВВЭР и БН.

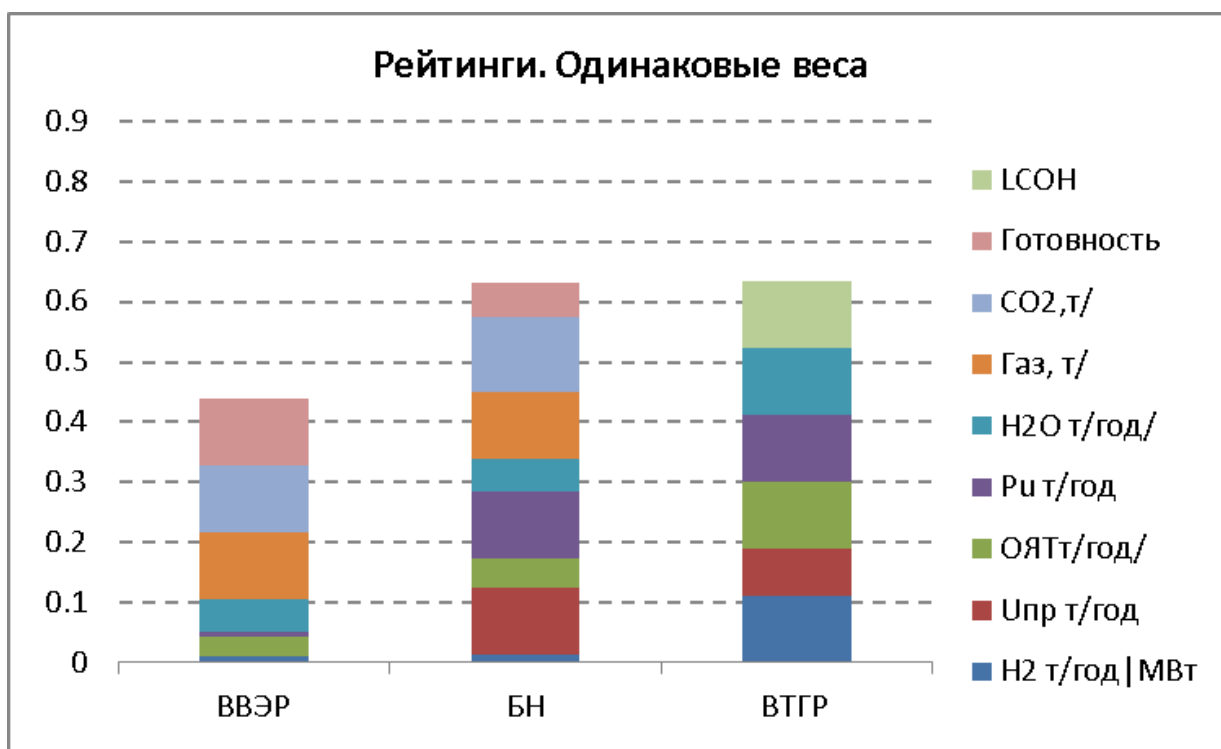


Рис. 14. Рейтинги технологий для АВЭ при одинаковой значимости критериев оценки (одинаковые веса)

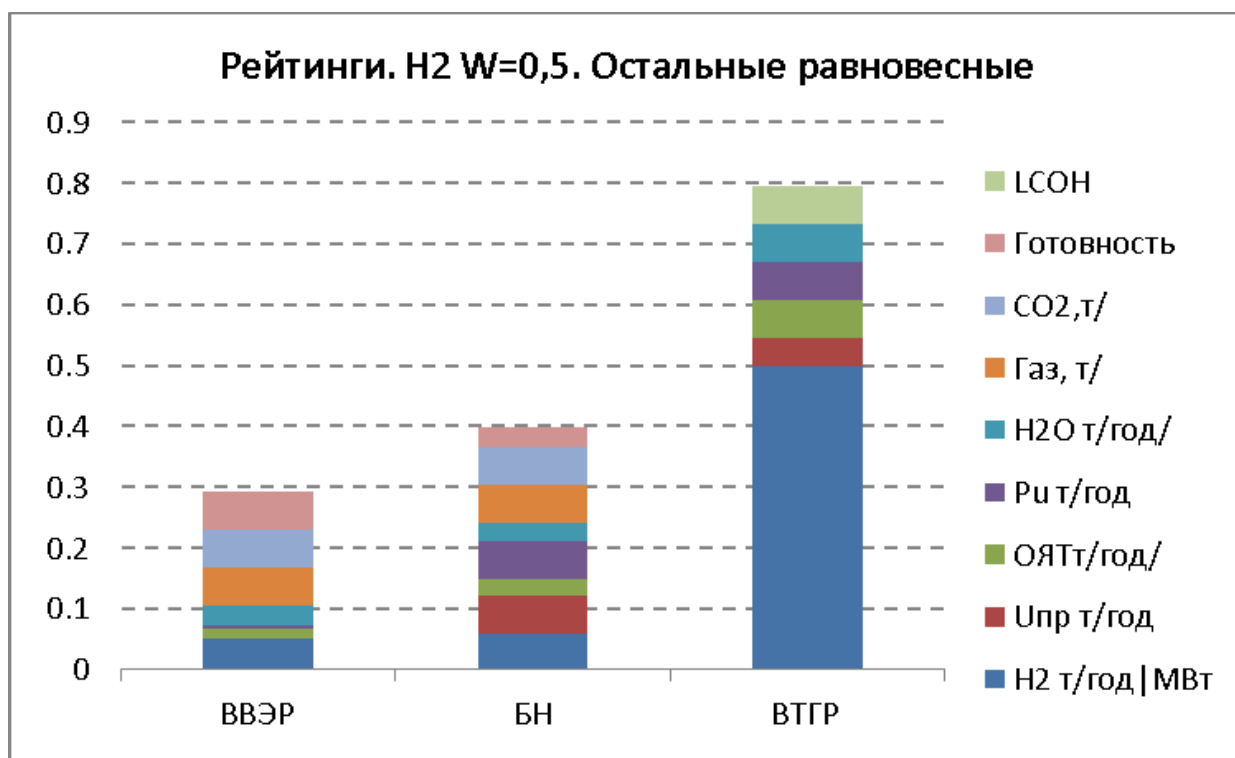


Рис. 15. Рейтинги технологий для АВЭ при наборе весов w_2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В препринте представлена постановка задач многокритериального анализа (МКА) для анализа атомно-водородной энергетики, формулируются принципы и алгоритмы сравнительного анализа возможных альтернатив развития АВЭ, рассматривается переход от экономической оценки к многокритериальной.

Отмечено следующее:

1) Производство водорода во многих странах мира уже давно освоено в промышленном масштабе без использования ядерных технологий, однако оно обладает рядом недостатков, связанных, прежде всего с проблемами экологии и расточительными расходами природного газа. Поэтому использование более экологичной и экономичной АВЭ является актуальным.

2) В условиях экономической неопределенности целесообразно рассматривать дополнительные к экономике критерии и сравнивать потенциалы альтернатив на основе многокритериального анализа.

3) МКА является математической формализацией процедуры принятия решений и широко применяется во многих отраслях промышленности и науки. Математическое описание процедуры позволяет понять сам механизм принятия решения, и использовать возможности современной вычислительной техники.

4) Проведено определение предварительных наборов критериев и альтернатив для анализа эффективностей технологий и установок производства водорода. Приводится предварительное сравнение рейтингов технологий АВЭ с разными модельными наборами весов – значимостей критериев.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Nuclear Power Economics and Project Structuring, 2017 Edition. — URL: https://world-nuclear.org/getmedia/84082691-786c-414f-8178-a26be866d8da/REPORT_Economics_Report_2017.pdf.aspx (дата обращения 13.05.2024).

2 The Economics of Nuclear Power: Current Debates and Issues for Future Consideration. — URL: https://www.cigionline.org/static/documents/economics_of_nuclear_power.pdf (дата обращения 13.05.2024).

3 Nuclear Development 2012 The Economics of Long-term Operation of Nuclear Power Plants. — URL: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7054-long-term-operation-npps.pdf> (дата обращения 15.05.2024).

4 IEA analysis based on data from McKinsey& Company and the Hydrogen Council: IEA GHG (2014); NREL (2022); IEA GHG (2017); E4Tech (2015); Kawasaki Heavy Industries.

5 V. Usanov, A. Jalal, G. Fesenko, Transition costs to the closed nuclear fuel cycle with fast reactors and their impact on the strategies of its introduction, Proceedings of Global 2009 Paris, France, September 6-11. — 2009. — Paper 9421.

6 Оценка эффективности бюджетных расходов на НИОКР. — [URL:http://www.kylbakov.ru/page110/page135/index.html](http://www.kylbakov.ru/page110/page135/index.html) (дата обращения 18.05.2024).

7 BASIC RESEARCH NEEDS FOR ADVANCED NUCLEAR ENERGY SYSTEMS. — [URL:http://li.mit.edu/Archive/Papers/06/ANES_rpt.pdf](http://li.mit.edu/Archive/Papers/06/ANES_rpt.pdf) (дата обращения 01.06.2024).

8 Кристенсен Клейтон М. Дилемма инноватора: Как из-за новых технологий погибают сильные компании; пер. с англ. — 2-е изд. — М.: Альпина Пабlishер. — 2012. — 239 с. — URL: <https://alpinabook.ru/catalog/book-dilemma-innovatora/> (дата обращения 05.06.2024)

9 Усанов В. И. «Системная конкурентоспособность ядерных энергоисточников» // Ядерная энергетика. Изв. ВУЗов. — 2014. — №4. — С. 119—132.

10 Nuclear Economics Support Tool (NEST). — URL:https://www.iaea.org/OurWork/NE/NENP/INPRO/Task3/NEST_web_draft_rev_04-2013.xls (дата обращения 10.06.2024)

11 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2, Vienna (2016). — URL: <http://www.iaea.org/books> (дата обращения 13.06.2024)

12 Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES. — URL:<https://www.iaea.org/publications/12200/enhancing-benefits-of-nuclear-energy-technology-innovation-through-cooperation-among-countries-final-report-of-the-inpro-collaborative-project-synergies> (дата обращения 16.06.2024)

13 Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND. — URL: <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> (дата обращения 20.06.2024)

14 Суфиянов Р.Ш. Конверсия природного газа // Тенденции развития науки и образования. 2021. — № 1. — Т. 69. — С. 142—145.

15 Полякова Т.В. Состояние и перспективы водородной энергетики в России и мире. Аналитическая записка. — URL: <https://mgimo.ru/files/120132/>

polyakova_vodorod.pdf?ysclid=la9l86n4pk121736061 (дата обращения 24.06.2024).

16 Natural Gas – Supply and Demand. — URL:https://www.eni.com/assets/documents/eng/topic/global-energy-scenarios/world-energy-review/2023/03_GAS.pdf (дата обращения 24.06.2024).

17 Top 10 Countries with Freshwater Resources. — URL:<https://www.jagranjosh.com/general-knowledge/top-10-countries-with-freshwater-resources-1537440475-1> (дата обращения 25.06.2024).

18 Совместный отчет Агентства по ядерной энергии и Международное агентство по атомной энергии 2023, №7634. — URL: [https://nucleus.iaea.org/sites/connect/UPCpublic/Documents/Uranium%202022 %20Re-sources,%20Production%20and%20Demand.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/connect/UPCpublic/Documents/Uranium%202022%20Re-sources,%20Production%20and%20Demand.pdf) (дата обращения 27.06.2024).

19 Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives // New York: Wiley 1976. — URL:<https://psycnet.apa.org/record/1993-98135-000>

Подписано к печати 30.07.2024.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,3.
Тираж 40 экз. Заказ № 218.

Отпечатано в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» методом прямого репродуцирования
с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.