

(Объединённая научная сессия Отделения физических наук, Отделение химии и наук о материалах, Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления и Отделения наук о Земле Российской академии наук, 19 января 2021 г.)

Новая парадигма для "мирного атома". Взгляд с точки зрения иерархии источников энергии и фундаментальной безопасности

Н. Ли

Представлен расширенный вариант обзора, основанного на презентации на Форуме УФН по вопросам изменения климата и глобальной энергетики. Для выявления ключевых проблем, связанных с ядерной энергией гражданского назначения, вначале даётся краткий обзор истории, современного состояния и перспектив её использования. Ядерная энергия включается в иерархию основных источников энергии на Земле вместе со всеми типами энергетических систем, действующих на фундаментальной основе, что показывает её уникальные характеристики, качественно отличающие ядерную энергию гражданского назначения от других источников энергии. Дается краткое описание новой парадигмы с совершенно иным набором категорий безопасности, принципов разработки и методов производства, отличных от обычной ядерной энергии, что приводит к решению для глобальной энергетической системы с гораздо более широкими возможностями будущего развития и масштабирования для борьбы с последствиями климатических изменений. Основываясь на концепциях и методах, сформулированных при изучении интеграционных свойств в комплексных адаптивных системах, мы применяем метод масштабирования для анализа безопасности и экономики ядерных реакторов и устанавливаем явную связь между масштабом реактора, ограничениями, связанными с безопасностью и объёмом производства, с кумулятивной стоимостью и производственными возможностями. Одновременное усовершенствование и оптимизация ядерной безопасности и экономичности приводят к созданию малых модульных реакторов (Small Modular Reactor — SMR) и микрореакторов (Micro Reactor — MR) как базовых технологий новой парадигмы. Мы показываем, что необходимо выпускать определённые конструкции SMR и MR, отличающиеся детерминистической фундаментальной безопасностью, которые могут обеспечить существенное снижение стоимости с ростом объёмов производства в соответствии с законом Райта (Wright's law), выполняющимся для большинства существующих технологий. Новая парадигма позволяет сделать ряд необычных и проверяемых предсказаний. Некоторые из этих предсказаний могут быть проверены частично, а для других имеются суррогатные тесты, относящиеся к успешно развивающимся технологиям и отраслям промышленности. Принципы и результаты масштабирования в общем случае являются применимыми к другим энергетическим системам и большинству производимых товаров.

Ключевые слова: ядерная энергия, парадигма, иерархия первичных источников энергии, базовая безопасность, серийно производимые системы, экономия за счёт масштабов производства, единый масштаб, малые модульные реакторы, микрореакторы, глобальное решение энергетической проблемы

PACS numbers: 28.41.–i, 28.50.–k, 89.30.Gg

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039082>

Содержание

1. Введение (1232).
2. Научная парадигма и её теоретическое обоснование (1232).

Н. Ли

Transform Insight Partners, USA
E-mail: powertocw@gmail.com

Статья поступила 24 июля 2021 г.

3. Коммерческая ядерная энергетика (1236).
3.1. Статус. 3.2. История. 3.3. Перспективы.
4. Проблемы, вызовы и происхождение противоречия между ядерной безопасностью и экономичностью (1242).
4.1. Текущие проблемы, высвеченные целями развития.
4.2. Будущие проблемы, вскрываемые рыночной конкуренцией.
4.3. Происхождение противоречия между ядерной безопасностью и экономичностью.
5. Новая парадигма для ядерной энергетики гражданского назначения (1246).

5.1. Иерархия основных источников энергии. 5.2. Основные системы и циклы материалов на Земле. 5.3. Переоценка и переосмысление ядерной энергии и безопасности. 5.4. Новая парадигма с фундаментально безопасными и промышленно производимыми ядерными энергетическими модулями.

6. Тесты и предсказания новой парадигмы (1254).

6.1. Частичные тесты на основе практического опыта. 6.2. Закон Райта и значимость новой парадигмы. 6.3. Внедрение экономии за счёт структурной единицы. 6.4. Сила и эффективность новой парадигмы. 6.5. Ограничение масштаба генерирующей единицы естественной безопасностью. 6.6. Дополнительные тесты и реализации на основе строящихся малых модульных реакторов и микрореакторов. 6.7. Суррогатные тесты и переносимые способности и возможности.

7. Заключение (1269).

Список литературы (1272).

1. Введение

По мере того как мир постепенно оправляется после глобальной пандемии КОВИД-19, которая серьёзно потрясла страны и экономики, борьба с климатическими изменениями возвращается в центр внимания мировой общественности. Многие страны и регионы призывают к "зелёному восстановлению" и уже начали его. Переход к энергетике с малыми выбросами углерода ускоряется во многих частях мира, примером является необычно быстрое развитие возобновляемых источников энергии, систем хранения энергии, а также переход транспорта на электрическую тягу.

В этот критический момент в истории — 10 лет после Фукусимы и 35 лет после Чернобыля — важная и своевременная задача стоит в том, чтобы глобальная отрасль атомной энергетики в частности, и правительства и гражданское общество в целом задались вопросом, должна ли (и может ли) ядерная энергия вносить более существенный вклад в достижение амбициозных климатических целей и облегчение будущего перехода к другим видам энергии и, если да, то каким образом это должно происходить.

Поскольку одной из основных задач *Форума УФН* был совместный поиск ограниченных по времени и масштабируемых решений для рукотворной проблемы планетарного масштаба и высочайшей срочности, а некоторые рассматриваемые здесь вопросы, концепции, разработки и организационные проблемы являются крайне сложными, относительно новыми и постоянно возникающими, настоящий обзор по своему объёму, содержанию и стилю существенно отличается от обзоров, относящихся к более сформировавшимся и зрелым научным областям и исследуемым проблемам, как это будет разъяснено ниже.

Основная часть настоящего обзора разбита на разделы, которые следуют в логической цепочке от открытия и диагностики до разработок по определённому кругу проблем, потребностей, подходов и решений. В разделе 2 даётся развёрнутое теоретическое обоснование для появления новой парадигмы; в разделе 3 содержится краткий обзор состояния, истории и перспектив ядерной энергетики гражданского назначения в контексте ослабления климатических изменений; в разделе 4 исследуются проблемы и вызовы и вскрывается причина существующего долгое время противоречия между ядерной безопасностью и экономичностью; в разделе 5 даются

контуры новой парадигмы для устранения этого противоречия путём использования фундаментально безопасных и производимых в массовом масштабе ядерно-энергетических модулей; в разделе 6 приводятся отдельные тесты и проверяемые предсказания новой парадигмы с использованием практического опыта и универсальных законов, с включением экономии за счёт масштаба структурной единицы и ограничений на размер единичной установки, определяемых требованиями безопасности, а также приводятся суррогатные тесты, которые служат примерами возможностей и способов реализации решений; в разделе 7 кратко рассматриваются основные заключения и даются ссылки на "дорожную карту", основывающуюся на контрольных показателях по достижению нулевых выбросов углерода к 2050 г.

Читатели, знакомые с тематикой ядерной энергии и ядерной отрасли, могут пропустить разделы 3, 4 и перейти непосредственно к разделам 5–7. В разделе 6 представлено систематическое и исчерпывающее исследование возможного разрешения проблемы повышения безопасности при росте затрат в ядерной энергетике в историческом разрезе.

Вся информация, содержащаяся в настоящем обзоре, получена из открытых общественных источников, включая опубликованные отчёты и заявления соответствующих агентств и организаций, рецензируемых журналов, книг, средств массовой информации и отраслевых публикаций, а также баз данных с открытыми источниками. Конкретный анализ и синтез некоторых концепций парадигмы и их происхождения были представлены и обсуждались в различной форме и в разнообразном контексте в академических институтах, национальных лабораториях, отраслевых ассоциациях и аналитических центрах.

Выполненный анализ чётко показывает, почему существующие большие АЭС, построенные на месте, являются единственным исключением из всех энергетических систем с точки зрения затрат с концентрацией рисков. Они также выявляют общее недопонимание и ошибочное позиционирование SMR и MR как нишевых продуктов для малых по масштабу применений на рынках ограниченного размера. После того как конкурирующие, зачастую взаимно противоречащие цели и ограничения на конструкции ядерных реакторов установлены, устранены и пересмотрены, ядерная энергетика гражданского назначения "обречена" на быстрый рост и экспансию для реализации её огромного потенциала, включая расширение со временем масштаба её развёртывания для достижения самых амбициозных целей, связанных с изменением климата. Тройственная задача безопасности энергии, равного доступа к ней и экологической надёжности может быть решена с точки зрения науки и практики за счёт использования энергетических систем с малыми выбросами углерода, которые снимают существующие ограничения, устраняют нынешние непреодолимые барьеры и расширяют будущие возможности.

2. Научная парадигма и её теоретическое обоснование

В своей книге о структуре научных революций [1], увидевшей свет в 1962 г., Томас Кун определяет научную парадигму как "общепризнанные научные достижения, в

данное время представляющие собой проблемы моделирования и решения для сообщества практиков", т.е. объекты, подлежащие изучению и анализу; характер вопросов, которые следует задавать и ответы на которые необходимо искать в связи с определённой темой; возможные предсказания на основе фундаментальной теории в рамках определённой дисциплины; пути интерпретации результатов научных исследований; эксперименты, которые могут быть поставлены, и оборудование, имеющееся для проведения эксперимента.

Кун представляет научные дисциплины как проходящие через чередующиеся периоды традиционной науки и революции, когда сама модель реальности претерпевает внезапные крутые изменения. В основе парадигматических экспериментов лежат универсально разделяемые представления, сформулированные до сбора фактов и обуславливающие их. Эти заранее сформировавшиеся представления воплощают в себе как скрытые допущения, так и то, что Кун называет квазиметафизическими (или транснаучными, как это обсуждается ниже) элементами. Их применимость и значимость для оценки масштаба и характера использования ядерной энергии гражданского назначения для борьбы с климатическими изменениями иллюстрируется и поддерживается в рамках развития естественных наук (с включением в естественные науки наук об искусственном, как обсуждается ниже).

Междисциплинарное исследование будущего цикла ядерного топлива, опубликованное в 2011 г. в рамках проекта Energy Initiative (Энергетическая инициатива) МТИ (Массачусетского технологического института) [2], может рассматриваться в качестве примера, показывающего неотложную потребность и большой потенциал изменения парадигмы в области ядерной энергии. В этом исследовании пересматриваются основания и гипотезы в части ведущих стратегий и идей, изменяющиеся условия и среда, представляются глубоко систематизированные, инновационные и нацеленные на будущее анализ и представления, заключения и рекомендации. Оно предоставляет базу и материалы для осуществления выбора и принятия важных решений относительно путей и стратегий развития технологии.

Допущения в части планирования и проектирования ранних энергетических циклов и будущего атомной энергетики, основанные на ограниченных в то время знаниях и понимании относительно наличия ресурсов и реакторных технологий, формулировались следующим образом: запасы урана крайне ограничены, для удовлетворения будущих потребностей необходим высокий коэффициент воспроизводства ядерного топлива. Эти допущения предопределяли выбор путей и стратегий в развитии технологий ядерной энергетики и топливных циклов по всему миру в течение более чем полувека. Одно из наиболее важных и существенных заключений, сделанных в МТИ, состоит в том, что оба допущения являются неправильными. Этот сенсационный вывод открывает путь к более современному и креативному мышлению и инновационному развитию в области ядерной энергетики гражданского назначения или, другими словами, к новой парадигме.

Столь же фундаментальные размышления о существовавших продолжительное время взглядах на будущее и "здоровом смысле" и изменения в них имеют место и в других странах, обладающих ядерной энергетикой.

Представительный и всесторонний обзор можно найти в недавней статье российского автора В.М. Мурогова [3] с критическими замечаниями относительно истории, состояния, проблематики и перспектив ядерной науки и технологии.

Автор [3] призывает к смене парадигмы для ядерных реакторов с переходом от экономии за счёт масштаба структурной единицы к экономике индустриального производства и смещению фокуса к массовому производству [4]. Он основывается на анализе стоимости АЭС, наиболее исчерпывающие данные по которым имеются для ядерной энергетики в США. В статье подтверждается исторический опыт большинства стран-лидеров в ядерной энергетике и показывается наличие существенной дисэкономии (dis-economy) за счёт масштаба структурной единицы, т.е. чем больше становится энергетическая мощность АЭС, тем более продолжительное время занимает её строительство и тем более высокой получается стоимость энергии в пересчёте на киловатт установленной мощности.

Эта инициатива является частью зарождающегося глобального движения в сторону SMR, которое формируется в течение продолжительного времени, но которому ещё предстоит реализоваться в полном объёме. Такой тренд в признании, осмыслении и действиях становится всё более популярным и принятым в ядерной энергетике, о чём свидетельствует быстрый рост заинтересованности в тематике SMR и MR по всему миру и связанных с этим программ, проектов, политик, планов, общественных и частных инвестиций [5–10].

Необходимость перехода от постройки ядерного объекта на месте к индустриальному производству является общепризнанной и принятой повсеместно. Опубликованы отраслевые исследования, показывающие заметное отсутствие эффективности и отставание роста производительности в строительстве, а также пути к решению проблем, имеющих систематический характер (см., например, [11, 12]). В некоторых исследованиях рассматриваются пути снижения затрат и расширения производства за счёт использования более эффективных платформ, таких как производство на верфях, и анализируются работы и затраты, которые не являются необходимыми и могут быть устранены, а также повторяющиеся работы и затраты, которые могут быть существенно сокращены в контролируемой среде внедрения и постоянного обучения [13].

Значительная доля нынешнего прогресса в SMR и MR основывается на потенциале для более предсказуемого снижения производственных затрат и сроков поставок за счёт заводского производства, повышения безопасности операций, улучшения гибкости при развёртывании объектов, большего разнообразия предложений на новых рынках и в регионах и других инновационных задач и целей. Такое развитие обычно позиционируется как предназначенное для приложений малого масштаба в нишевых рынках, которые ограничиваются или местным уровнем потребностей, или объёмом авансовых капиталовложений. Согласно общепринятым представлениям, при очевидных потерях от экономии за счёт масштаба структурной единицы удельная стоимость SMR и MR будет высока, а их роль и вклад будут ограниченными (см., например, [5]). Такие взгляды являются ошибочными и будут разьясняться и корректироваться далее.

Иногда считают, что определённые проекты обладают потенциалом для обеспечения детерминистической ядерной безопасности на фундаментальных уровнях начиная с наименьшего практически реализуемого размера, и не только за счёт снижения уже крайне низких, но трудно проверяемых вероятностей серьёзных инцидентов; это создаёт новую парадигму ядерной энергетики гражданского назначения. Такие проекты подходят для масштабного развёртывания и, следовательно, пригодны для использования на платформах при серийном или массовом производстве, что является гораздо более эффективным решением, чем строительство объекта на месте, которое в течение прошедшей половины столетия или даже более продолжительного периода характеризуется минимальным или нулевым ростом производительности. Фундаментально безопасные SMR и MR могут в рамках новой парадигмы постоянно улучшать экономические показатели с предсказуемым снижением затрат по мере роста объёмов производства в соответствии с законом Райта, протестированным в наиболее успешных технологиях и отраслях.

Эта новая парадигма вскроет ошибки, дефекты и искажения в некоторых существующих продолжительное время допущениях, восприятии, "здоровом смысле", принципах конструирования и размещения реакторов различных типов, в особенности в связи с определением стоимости единицы мощности и системной экономической эффективности в контексте настоящего обзора. В частности, распространённое ошибочное восприятие и позиционирование SMR и MR приводило к отсутствию интереса и инвестиций для реализации их потенциала, что вызвало затягивание продолжавшейся десятилетиями стагнации и спада в коммерческой ядерной энергетике, усугубление трудностей и проблем, связанных с глобальным энергетическим переходом для ослабления климатических изменений, и нанесение ущерба долгосрочным перспективам для устойчивого и сбалансированного развития. Новая парадигма разрешит существующее долгое время и казавшееся неразрешимым противоречие между ядерной безопасностью и экономичностью.

Принятие новой парадигмы принесёт серьёзные выгоды. Реализация фабричного производства для выпуска фундаментально безопасных модулей реакторов создаст новую институциональную организацию, которая ограничит доступ к ядерным технологиям и специальным материалам на производственной площадке и их распространение, расширив в то же время их наличие и доступность для более широкого и разнообразного использования атомной энергии в мирных целях. Это изменит преобладающие практики, включающие необходимость передачи ядерных технологий и специальных ядерных материалов владельцам и операторам АЭС, связанную с риском для безопасности. Такая парадигма обеспечивает принципиальную возможность разрешения более фундаментальным и систематическим образом ещё одного противоречия между продвижением ядерной энергии для использования в мирных целях и ограничением доступа к технологиям и материалам из соображений безопасности и нераспространения ядерного оружия. Конкретные пути осуществления и потенциал зависят от конструкции реакторов, используемого в них топлива и топливных циклов.

Ключевая позиция в вопросах ядерной энергетики гражданского назначения, сконцентрированная на фун-

даментальной безопасности, была сформулирована Элвином М. Вайнбергом (Alvin M. Weinberg), провидцем и пионером ядерной энергетики [14–16]. Будучи в 1940–1950-х гг. одним из первопроходцев и активным участником разработки ядерных реакторов для производства энергии и использования в качестве судовой двигательной установки, Вайнберг выбрал среди многих конкурирующих конструкций ядерный реактор, охлаждаемый водой под давлением (Pressurized Water Reactor — PWR). Он отмечал, что окончательный успех этого реактора в качестве конструкции, наиболее широко применяющейся во всём мире, был обусловлен не превосходными характеристиками воды, а скорее решением использовать его в качестве основы двигательной установки для атомных подводных лодок, что позднее привело к отказу от всех остальных типов реакторов. В период работы директором Национальной лаборатории в Окридже с 1955 по 1973 гг. Вайнберг первым предпринял институциональные усилия для привлечения внимания к гражданской версии защищённого от неконтролируемого расплавления жидкосолевого реактора (Molten Salt Reactor — MSR), который первоначально разрабатывался в военных целях для использования на воздушных судах с ядерным двигателем.

Вайнберг подсчитал, что с учётом множества вариантов для каждого компонента реактора — топлива, замедлителя, поглотителя и теплоносителя — можно выделить примерно тысячу различных типов реакторов. Фримен Дайсон (Freeman Dyson) считал, что Вайнберг был единственным пионером ядерной энергетики, который положительно оценивал наличие широкого спектра конструкций реакторов. Вайнберг одним из первых начал проводить систематические исследования влияния радиации на живые организмы и возможностей организма к выживанию при радиационном повреждении, а также оценки альтернатив для удовлетворения будущих потребностей в энергии, включая вопросы, связанные с диоксидом углерода и глобальным потеплением [17].

В 1972 г. Вайнберг опубликовал знаковую статью "Наука и транснаука" (Science and Trans-Science), где он изложил своё понимание и анализ многих вопросов, возникающих из взаимодействия между наукой или техникой и обществом, и провёл чёткую границу между наукой и кругом вопросов, на которые наука не может дать ответы, т.е. транснаукой, или трансцендентной наукой [18, 19].

Пионерская работа Вайнберга по ядерной энергии дала чёткое основание и стартовую базу для той области фундаментально безопасной ядерной энергетики гражданского назначения, которая оказалась провидческой и более востребованной сейчас, чем когда бы то ни было. Стандартная ядерная энергетика находилась в застое и упадке в течение трёх десятилетий, в особенности в экономически развитых странах, хотя борьба с климатическими изменениями и обеспечение сбалансированного роста требуют в этом столетии более чистых и низкоуглеродных источников энергии. Глубокое понимание Вайнбергом науки и транснауки помогает установить, что многие вопросы, относящиеся к изменению климата и глобальной энергии, являются критически важными, но транснаучными, так что мы должны и можем целенаправленно и эффективно их рассмотреть, проанализировать и разрешить соответствующим образом. Для ведущего научного журнала, посвящённого отражению

прогресса в физических науках, этот круг вопросов является расширением тематики, необходимым для того, чтобы соответствовать такой высокоуровневой проблематике, имеющей огромное значение.

Такая точка зрения поддерживается и популяризируется в основополагающих работах других провидцев-мыслителей. К ним относятся "Sciences of the artificial" (Науки искусственного) [20] Герберта А. Саймона (Herbert A. Simon), лауреата Нобелевской премии по экономике, более известного благодаря его теориям ограниченной рациональности выбора и разумной достаточности [21, 22]; "More is different" (Больше значит иначе) [23, 24] Филиппа У. Андерсона (Philip W. Anderson), лауреата Нобелевской премии по физике, первым призавшего сформировать в физических науках новую парадигму, отойдя от чисто редукционистской гипотезы, которая должна быть построена на нарушенной симметрии и природе иерархической структуры науки; а также высказывания Франка Вильчека (Frank Wilczek), лауреата Нобелевской премии по физике, сделавшего заключение о том, что фундаментальные законы природы известны теперь с точностью, достаточной для всех практических инженерных приложений [25, 26].

Такое развитие философии науки и её принципов являлось руководством и источником вдохновения при подготовке настоящего обзора. Их конкретная значимость проявится позднее, когда приложения, в которых используются результаты теории сложности (многие из них были получены в Институте Санта-Фе (Santa Fe Institute — SFI)), облегчат появление и укоренение новой парадигмы фундаментально безопасной ядерной энергетики гражданского назначения, воплощённой в промышленно производимых модульных системах. SFI признан во всём мире как формальное место рождения и ведущий центр передового опыта в междисциплинарных исследованиях и креативном мышлении в области сложных адаптивных систем; Андерсон и Саймон причисляются к его интеллектуальным основателям и основоположникам ведущих направлений исследований [27].

Провидческая и весьма одобрительно встреченная представительная работа сотрудника SFI Джеффри Уэста (Geoffrey West) — трансдисциплинарная книга "Scale" (Масштаб) [28] — начинает возвращать многие вопросы, традиционно считавшиеся транснаучными, в область науки или науки искусственного. Уэст и его коллеги разработали основу для поиска универсальных законов на основе оптимизации фрактальной геометрии сетей, поставляющих энергию, ресурсы и информацию в комплексные адаптивные системы и удаляют из неё отходы. Основными характеристиками такой сети являются заполнение пространства, инвариантность термальных единиц и оптимизация.

К числу инновационных представлений, которым посвящён настоящий обзор, относятся суперлинейное масштабирование характеристик с соответствующим суперэкспоненциальным ростом в направлении сингулярности в конечной временной точке и всё более быстро возникающие потребности в сдвиге парадигмы для поддержания роста в социальных системах. В этом состоит контраст с сублинейным масштабированием, экономией за счёт масштаба и ограниченным ростом, имеющими место в биологических и большинстве физических систем.

В связи с энергетическими проблемами Уэст отмечает, что режим использования ископаемых видов топлива превратил нашу планету в более закрытую систему, являющуюся термодинамически неравновесной, в отличие от открытой системы, использующей возобновляемые источники энергии. При изменении климата экспоненциальное масштабирование метаболизма организмов означает, что при увеличении средней глобальной температуры на 2 °C темп жизни большинства биологических организмов возрастает на 20–30 %. Это приводит к весьма заметным изменениям, происходящим за очень короткое время, адаптация к которым за счёт естественной эволюции становится невозможной.

С позиций, противоположных обычному порядку совершения научных открытий и построения теории, каковым является эмпиризм, для которого стартовая точка — это природа, Адриан Беджан (Adrian Bejan) предложил и обосновал конструкционную (constructal) теорию, развивающуюся в направлении от принципов к природе. Беджан, профессор машиноведения и автор многочисленных публикаций, называет инженерию наукой систем и процессов, обладающих целью. Аналогично понятию энтропии, введённому Рудольфом Клаузиусом (Rudolf Clausius) для формулировки второго закона термодинамики, описывающего комбинированное термомеханическое поведение, он предложил новый принцип построения геометрической формы с новой концепцией, целью или назначением [29].

Беджан изучал принципы проектирования и оптимизации инженерных систем и открыл детерминистический принцип возникновения геометрических форм в свободно развивающихся системах. Форма и структура возникают в результате постоянной борьбы за более высокую эффективность как в инженерном деле, так и в природе. В этом состоит основополагающий принцип конструкционной теории: принцип цели и ограничений в инженерном деле представляет собой тот же механизм, который задаёт геометрию в свободно развивающихся системах.

Основываясь на своей новой теории, Беджан чисто теоретически вывел знаменитые эмпирические соотношения между скоростью метаболизма и размером тела, описываемые степенью $3/4$, и между периодом времени и размером тела, описываемые степенью $1/4$. Этот конечный результат совпадает с итогом исследования масштабирования Уэстом, но он получен сегмент за сегментом на древообразной сети и оптимизирован для обеспечения равномерности распределения несовершенства между областями с разительными различиями. Мы увидим позднее, как подобная экспонента возникает в новой парадигме.

Весьма интересно рассмотреть предложенную Уэстом модель по стиранию сильных различий в простоте и сложности в его подходе к универсальным законам в комплексных адаптивных системах с точки зрения конструкционной теории Беджана. Почти все законы физики отличаются простотой, однако реальный мир крайне сложен и постоянно изменяется. Поскольку законы Ньютона, уравнения Максвелла, теория относительности Эйнштейна и многие другие могут быть сформулированы и элегантно выведены из принципа наименьшего действия, Уэст полагает, что крупномасштабная динамика и структура сложных адаптивных систем могут формулироваться и выводиться исходя из того же принципа. Он достиг прогресса в построении теории масшта-

бирования путём поиска целей и ограничений сети и оптимизации глобальной эффективности.

Подобные трансдисциплинарные идеи и работы ведущих физиков, инженеров и математиков в совокупности с взрывообразным ростом технологии больших данных во всех аспектах социальной активности начинают порождать основанные на первых принципах механистические модели и теории с универсальными законами, поддерживающими развитие и уточнение теорий экономического роста. Теория внутреннего экономического роста (Endogenous Growth Theory), представленная в основополагающих трудах Пола Ромера (Paul Romer), лауреата Нобелевской премии по экономике, включает отказ от конкурентной рыночной структуры в том, что *ad hoc* показатель степени в скорости роста или в уровне технологических действий всегда равен единице (линейное масштабирование, экспоненциальный рост, постоянная отдача) или меньше единицы (сублинейное масштабирование, ограниченный рост, снижающаяся отдача) [30, 31].

Мы воспользуемся этими креативными подходами и глубоко содержательными взглядами для анализа, оценки и разработки возможностей и потенциала новой парадигмы ядерной энергетики гражданского назначения. В частности, мы применим экспоненциальный или суперэкспоненциальный рост в социологических системах для разработки и реализации новой парадигмы ядерной энергетики во временном масштабе для ослабления последствий рукотворного климатического кризиса. Экономия за счёт единичного масштаба, присущая биологическим и физическим системам и составляющая основу существующей парадигмы, не позволяет решать проблемы, созданные (супер)экспоненциальными технологиями и экономиками. Проблемы необходимо решать на более высоком уровне мышления и с применением подходов, более мощных, чем те, которые вызвали указанные проблемы.

Первая половина обзора (разделы 1–4) посвящена вопросам, которые могут считаться транснаучными или относящимися к областям ещё не полностью сформировавшейся науки искусственного, однако их рассмотрение будет ограничено вопросами, смежными с научными, в той степени, в какой это требуется для понимания возможных взаимодействий, ограничений, пределов и результатов и в какой наука может дать ответы или получить результаты с использованием инженерных подходов и разработок. Мы также не будем рассматривать хорошо обоснованные и понятные области ядерной науки и физики реакторов, но обратимся к базовым вопросам энергетики с применением системного подхода, основанного на первых принципах, рассматривая все энергетические системы в совокупности с точки зрения их общности и различий. В ходе этого рассмотрения будет введена некая новая таксономия конструирования и фундаментальной безопасности, способная обеспечить конструктивное обсуждение и кооперативное развитие новой парадигмы.

Во второй половине обзора даётся краткое описание структуры и ключевых аспектов новой парадигмы в подходе, основанном на конструкционной теории. Вместо использования принципа целей и ограничений для понимания того, как геометрия формируется в свободно развивающихся системах, мы разработали новую парадигму ядерной энергетики гражданского назначения, в

которой борьба с климатическими изменениями во временном масштабе является глобальной целью, а фундаментальная ядерная безопасность, экономика, устойчивость и прочие принципиально важные характеристики представляют собой ограничения. Эта парадигма сконструирована и разработана для того, чтобы сделать огромный шаг от в миллионы раз более высоких уровней энергии и интенсивности ядерных взаимодействий к химическим и тепловым взаимодействиям, расширить возможности и пространство использования ядерной энергетики для ограниченной поставки электроэнергии с целью удовлетворения основной потребности больших сетей к разнообразным приложениям, отраслям и рынкам. Уже проводятся отдельные тесты, новые предсказания для будущих тестов находятся в стадии разработки. В силу ограниченного объёма публикации эта часть сокращена до уровня, достаточного для иллюстрации методологии масштабирования и приложений к интеграции ядерной безопасности и экономики.

3. Коммерческая ядерная энергетика

Отрасль и рынки ядерной энергетики гражданского назначения существенно отделены от прочих отраслей и рынков, отличаются высокой прозрачностью и ограниченностью объёмов, находятся под пристальным мониторингом и сравнительно неизменны, благодаря чему их обзор может быть произведён с высокой степенью качественной и количественной надёжности. Поскольку настоящий обзор предназначен для оценки потенциала с целью ограничения климатических изменений в предстоящие десятилетия, ядерная энергетика в максимально возможной степени рассматривается в совокупности с другими формами энергии, а тренды анализируются по отдельности для каждого десятилетия.

3.1. Статус

С точки зрения всестороннего обзора того множества аспектов, по которым ядерная энергия влияет на жизнь общества, запланированный выход в свет четырёхтомной "Энциклопедии ядерной энергии" (Encyclopedia of Nuclear Energy) [32] — своевременное и важное событие. Это издание охватывает такие темы, как генерация чистой электроэнергии, совершенствование медицинской диагностики и лечения рака, повышение урожайности, увеличение срока хранения пищевых продуктов и, что крайне важно, применение ядерной энергии в качестве альтернативного источника энергии; последнее является существенным фактором в борьбе с глобальным потеплением.

Наиболее полным источником данных по коммерческой ядерной энергетике является Информационная система по энергетическим реакторам МАГАТЭ (Power Reactor Information System — IAEA PRIS) [33]. Она содержит всю информацию по этой тематике и статистику по миру в целом, каждой стране, каждому типу реакторов и подробную историю каждого реактора. МАГАТЭ публикует ежегодные отчёты по ядерным энергетическим реакторам по всему миру.

Всего в мире в 2020 г. в эксплуатации находилось 443 энергетических ядерных реактора с суммарной чистой установленной мощностью 393084 МВт электрической энергии; 50 реакторов с мощностью 53163 МВт электрической энергии находилось в стадии строитель-

ства, а суммарная наработка реакторов с самого начала ядерной энергетики составила 18837 лет [34].

У МАГАТЭ также имеется достаточно полная база данных в Информационной системе по усовершенствованным реакторам (Advanced Reactors Information System — IAEA ARIS) [35]. В ней содержится информация по 10 типам реакторов, разделённых на 12 категорий. Некоторые из них представляют собой интегрально смонтированную конструкцию или конструкцию, состоящую из малых модулей, сильно отличающуюся от обычных больших монолитных конструкций, среди которых 78 имеют индивидуальные проекты и находятся на стадии разработки, в состоянии ожидания, на этапе конструирования, лицензирования, строительства или эксплуатации.

Среди этих усовершенствованных реакторов 22 относятся к типу PWR (Pressurized-Water cooled, охлаждение водой под давлением), 4 — к BWR (Boiling-Water cooled, охлаждение кипящей водой), 5 — к HWR (Heavy-Water cooled, охлаждение тяжёлой водой), 3 — к SCWR (Super-critical-Water cooled, охлаждение водой сверхкритического давления), 3 — к iPWR (integral PWR, интегрально смонтированный PWR), 4 — к GCR (Gas Cooled, охлаждение газом), 3 — к GFR (Gas cooled Fast Reactor, реактор на быстрых нейтронах с газовым охлаждением), 10 — к SFR (Sodium cooled; охлаждение натрием), 12 — к LFR (охлаждение свинцом или смесью свинца и висмута), 8 — к MSR (Molten-Salt cooled, охлаждение расплавленными солями), 26 — к FR (зачастую перекрывающемуся с SFR, LFR и GFR) и 48 относятся к типу SMR (включая реакторы всех типов). Разрабатывается также большое количество реакторов на быстрых нейтронах, о многих из которых известно уже в течение десятилетий. Однако достойным внимания фактом является преобладание SMR, общим числом 48 из перечисленных 78. Одна из новейших конструкций SMR — российский реактор KLT-40, являющийся первой в мире плавучей мини-АЭС, был построен, поставлен, запущен и подключён к сети в период с 2007 по 2019 гг. (более подробно она обсуждается ниже).

За исключением усовершенствованных реакторов с охлаждением обычной и тяжёлой водой, которые часто относят к системам поколения III или III⁺, большинство реакторов, включённых в ARIS, является ядерными энергетическими системами поколения IV. При их конструировании ставилось восемь технологических задач в следующих четырёх областях: экологическая устойчивость, экономичность, безопасность и надёжность, предотвращение распространения ядерных материалов и физическая защита, более эффективное использование топлива, сокращение отходов, экономическая конкурентоспособность и соблюдение строгих стандартов в области безопасности и предотвращения распространения ядерных материалов.

Первоначальная технологическая дорожная карта для ядерных энергетических систем поколения IV была разработана в 2001–2002 гг. более чем 100 экспертами (включая автора настоящего обзора), представляющими десять стран, МАГАТЭ и Агентство OECD/NEA по ядерной энергии ОЭСР [36]. Рабочая группа рассмотрела 130 концепций реакторов, представленных со всего мира, с точки зрения указанных выше целей. Международный форум по поколению IV (Generation IV International Forum — GIF) выбрал шесть технологий реак-

торов для дальнейшего изучения и разработки. К ним относятся GFR, LFR, MSR, SCWR, SFR и VHTR (Very High Temperature Reactor — сверхвысокотемпературный ядерный реактор). Дорожная карта, которая была обновлена в 2014 г., предусматривает демонстрацию некоторых конструкций в 2020-е годы и начало коммерческого развёртывания проектов с 2030-х гг. [37].

Параллельно с программой поколения IV в 2000 г. МАГАТЭ открыло Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам [38] по обеспечению доступности атомной энергии для удовлетворения глобальных потребностей в энергии до конца XXI в. Этот проект предполагает долгосрочное планирование и сотрудничество в области инноваций в реакторах, топливных циклах и институциональных подходах, которые способствовали бы устойчивому развитию ядерной энергетики. С использованием методологии INPRO в его рамках проводится работа в четырёх основных областях: глобальные сценарии, инновации, оценки устойчивости и стратегий, диалог и информационно-просветительская работа [39].

В Китае только что завершились испытания перед физическим пуском ядерного реактора и близок к запуску прототип высокотемпературного реактора (High Temperature Reactor — HTR-PM), являющегося первым шагом к созданию VHTR. Россия, Китай и Индия разрабатывают и строят реакторы на быстрых нейтронах с охлаждением натрием, демонстрация которых предполагается в ближайшем будущем. Франция закрыла свою программу работ по прототипу SFR, но продолжает сотрудничество с Японией с целью технической демонстрации. У России также имеются планы строительства реактора на быстрых нейтронах с охлаждением свинцом или смесью свинца и висмута в 2020-х гг.

В последние годы в США активизировалось развитие ядерной энергетики гражданского назначения в результате принятия многих законодательных инициатив, регуляторной реформы и программ по демонстрации и снижению рисков, связанных с усовершенствованными реакторами [40]. В 2020 г. Министерство энергетики США опубликовало список государственно-частных партнёрств, выбранных для строительства двух усовершенствованных реакторов — SFR и GCR, которые должны вступить в строй в течение семи лет; пять программ по снижению рисков в MSR, GCR, реакторах на быстрых нейтронах с охлаждением расплавленными хлоридами, ядерном микрореакторе канального типа и SMR с охлаждением обычной водой; а также три концепции усовершенствованных реакторов SMR с естественной безопасностью, модульного реактора на быстрых нейтронах и горизонтального компактного HTGR (High-Temperature Gas Reactor — высокотемпературный газоохлаждаемый ядерный реактор, ВТГР) [41]. В стадии разработки и конструирования находится Национальный испытательный комплекс с переналаживаемым тестовым реактором (Versatile Test Reactor — VTR), который будет использоваться Национальной лабораторией в Айдахо для исследовательских целей; начало его работы запланировано на 2031 г. [42].

Наряду с проектированием и разработкой технологий усовершенствованных реакторов имеются программы НИОКР, которые предусматривают создание ядерного топлива, устойчивого к авариям, топлива с высоким содержанием низкообогащённого урана (High-

Таблица 1. Всемирная история строительства реакторов и подключения их к сети за последние пять десятилетий

Декада	1970–1979		1980–1989		1990–1999		2000–2009		2010–2019	
Год	Начало строительства	Подключение	Начало строительства	Подключение	Начало строительства	Подключение	Начало строительства	Подключение	Начало строительства	Подключение
0	37	6	20	21	5	10	7	6	16	5
1	18	16	17	23	2	4	1	3	4	7
2	28	16	19	19	3	6	6	6	7	3
3	30	20	14	23	4	9	1	2	10	4
4	38	26	13	33	2	5	2	5	3	5
5	38	15	19	33	0	5	3	4	8	10
6	43	19	8	27	1	6	4	2	3	10
7	23	18	13	22	5	3	8	3	4	4
8	23	20	7	14	3	4	10	0	5	9
9	27	8	6	12	4	4	12	2	5	6
Суммарное значение за десятилетие	305	164	136	227	29	56	54	33	65	63
Средний показатель за год	30,5	16,4	13,6	22,7	2,9	5,6	5,4	3,3	6,5	6,3

Assay Low Enriched Uranium — HALEU) и расширение мощностей по производству и поставке топлива [43].

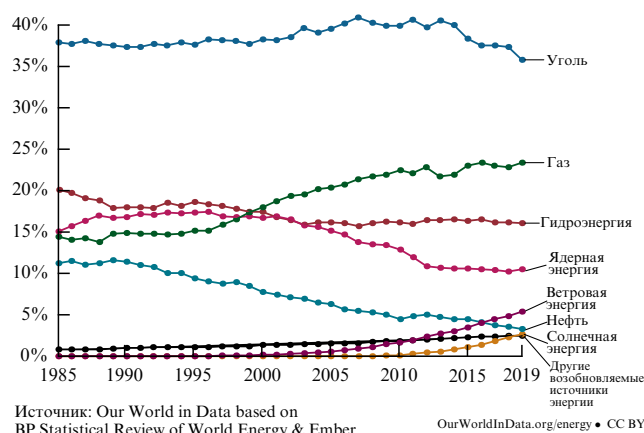
Помимо разработок, включённых в базы данных МАГАТЭ, информация о которых предоставляется странами-участницами, проводятся и другие исследования, из них большая часть осуществляется в США компаниями-стартапами и финансируется за счёт частных инвестиций; за ними следует несколько проектов в Европе, Азии, России, Канаде и других регионах. Американский аналитический центр Third Way (Третий путь) отслеживает многие из этих проектов [44]. Большинство указанных разработок относится также к категории SMR.

3.2. История

Переходя к истории, обратимся сначала к ядерной отрасли. Данные по ежегодному количеству вновь строящихся энергетических реакторов и их подключению к сети за последние пять десятилетий приведены в табл. 1 [45] вместе с суммарными цифрами по каждому десятилетию и средними показателями за год. Эти данные составляют исторический уровень отсчёта.

Важной тенденцией, на которую следует обратить внимание, является постепенное снижение ежегодного количества вновь строящихся реакторов после 1979 г., когда произошла авария на АЭС "Three Mile Island" (США). Отмеченное снижение усугубилось вследствие Чернобыльской катастрофы в 1986 г. и превратилось в падение после катастрофы в Фукусиме в 2011 г. — спустя несколько лет после того, как объём строительства АЭС стал, наконец, увеличиваться после двух десятилетий застоя и падения. Серьёзные глобальные последствия ядерных инцидентов и сильная реакция на них по всему миру, наглядно отражённые в высказывании, что "локальный ядерный инцидент является глобальным ядерным инцидентом" [46], и воспринимаемые как прото-

Доля различных источников в производстве электроэнергии в мире



Источник: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Рис. 1. Доля производства электроэнергии разными источниками в мире в период 1985–2019 гг. (Our World in Data.)

"чёрный лебедь" в финансовой отрасли и в поп-культуре [47], являются отличительной чертой и серьёзной слабостью нынешней парадигмы, указывают на крайнюю шаткость и хрупкость системы, в которой отсутствует гибкость, и представляют собой существенные системные риски.

В связи с этим весьма полезным представляется рассмотрение указанных трендов в более широкой перспективе вместе с другими видами энергии, а также оценка их относительной эффективности и значимости. Поскольку наиболее важной целью декарбонизации является электрический сектор, мы начнём с него.

Рисунок 1 показывает, что глобальная доля электричества, произведённого из энергии атома, снижается

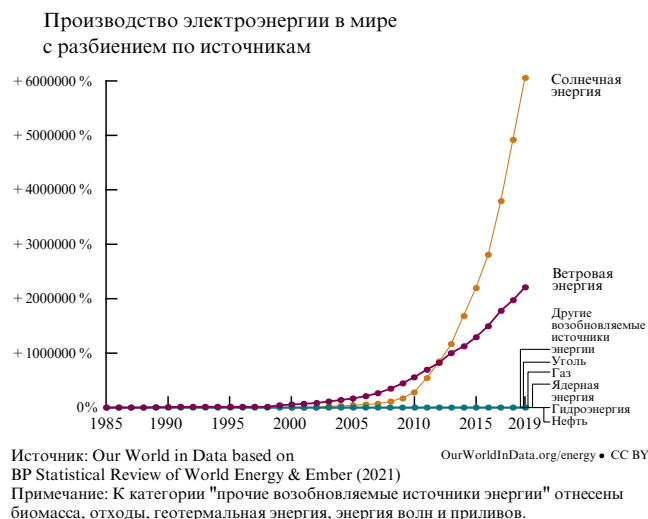


Рис. 2. Относительный рост производства электроэнергии с 1985 г. с разбиванием по источникам (Our World in Data, 2021).

вместе с вкладом угля, нефти и гидроэнергии, тогда как доля газа, энергии ветра, солнечной энергии и других возобновляемых видов энергии возрастает. Доля ядерной энергии достигла максимума в 17,45 % в 1996 г. и снизилась до 10,43 % в 2019 г. [48].

На рисунке 2 иллюстрируется рост производства электроэнергии с разбиванием по источникам с 1985 по 2019 гг. На этом временном интервале некоторые траектории ведут себя поразительным образом: доля солнечной энергии выросла более чем на 6000000 %, ветровой энергии — более чем на 2200000 %, прочих возобновляемых источников энергии — на 756 %, газа — на 335 %, угля — на 152 %, гидроэнергии — на 114 %, ядерной энергии — на 85,1 % и нефти — на –22,37 %. Эти цифры являются бесспорным доказательством и необычайным триумфом, в частности, высокоэффективной и быстро совершенствующейся производственной парадигмы в соответствии с законом Райта, согласно которому стоимость солнечных батарей и ветровых турбин снижается до предсказуемого уровня с предсказуемой скоростью (этот вопрос подробнее обсуждается далее). Доля газа, скорость роста которой хотя и была ниже, чем у возобновляемых источников энергии в силу более высокого стартового уровня, быстро возрастала с 1995 по 2010 гг. Это сначала было обусловлено усовершенствованными газовыми турбинами, массово производившимися в заводских условиях, а затем прорывом в технологии гидравлического разрыва, приведшим к революции в области добычи нефти и газа. Застой и падение в ядерной энергетике особенно четко видны при сравнении с возобновляемыми источниками энергии и газом.

Показатели роста производства электроэнергии за последние три десятилетия с разбиванием по десятилетиям и источникам приведены в табл. 2. Из неё следует, что производство солнечной энергии увеличивается с необычайной скоростью, производство ветровой энергии достигло пика, хотя по-прежнему остаётся на высоком уровне, как и производство других возобновляемых видов энергии; рост производства энергии, получаемой из угля и газа, замедлился, производство гидроэнергии находится на стабильном уровне, нефть никогда не была заметным источником электроэнергии и её роль продол-

Таблица 2. Скорость роста производства электроэнергии с разбиванием по десятилетиям и источникам

Источник	1990 – 1999	2000 – 2009	2010 – 2019
Солнечная энергия	135,95 %	1727,76 %	2111,36 %
Ветровая энергия	484,07 %	780,90 %	309,45 %
Прочие возобновляемые источники энергии	51,67 %	72,31 %	68,93 %
Газ	44,92 %	59,33 %	29,93 %
Уголь	26,15 %	36,26 %	11,91 %
Гидроэнергия	20,69 %	22,36 %	24,08 %
Ядерная энергия	26,19 %	4,60 %	1,14 %
Нефть	–7,16 %	–15,89 %	–9,05 %

жает уменьшаться, а развитие ядерной энергетики за последние два десятилетия практически прекратилось.

Доля ядерной энергетики среди основных источников энергии достигла пика, равного 6,62 %, в 2001 г., после чего постепенно сократилась до 4,27 % к 2019 г. В совокупности источников электроэнергии ядерная энергия остаётся вторым по величине (после гидроэнергии) источником с малыми выбросами углерода, однако в 2020-е гг. её могут обогнать ветровая и солнечная энергия. По существу ядерная энергетика поставляет электроэнергию только для удовлетворения основной нагрузки в большие сети при очень малом вкладе в промышленность и транспорт.

В глобальной первичной энергии возобновляемые источники энергии составляли в 2019 г. 11,4 % от источников с малым выбросом углерода. Вместе с 4,27 % от ядерной энергии суммарная доля источников с низкими выбросами углерода составляет 15,7 %, тогда как остальное, 84,3 %, по-прежнему поступает от ископаемых видов топлива: 33,1 % от нефти, 27 % от угля и 24,3 % от газа. Задача глобальной декарбонизации выглядит обескураживающе трудной, но всё же не безнадежной; в некоторых странах доля источников энергии с низкими выбросами углерода весьма высока: 79 % в Исландии, 69 % в Швеции, 66 % в Норвегии, 49 % во Франции и 49 % в Швейцарии. Среди этих стран во Франции, Швеции и Швейцарии существенный вклад даёт ядерная энергетика; во Франции в 2019 г. 71,26 % электроэнергии поступало от ядерной энергетики. Эти страны могут служить моделями перехода к энергетике с низкими выбросами углерода.

Необычайно высокие показатели роста солнечной и ветровой энергетики и очень высокая скорость возрастания доли газовых турбин ясно демонстрируют, что энергетические системы, основанные на массовом производстве, могут проявлять гораздо более быстрый рост, чем возводимые на месте энергетические станции, несмотря на (значительно) меньшие размеры структурных единиц. Такие системы наряду с самолётостроением и судостроением могут служить моделями для новой парадигмы ядерной энергетики гражданского назначения.

3.3. Перспективы

Имея такую масштабную картину текущего состояния и недавней истории ядерной энергетики, мы обратимся

теперь к её перспективам с упором на роль и потенциал ядерной энергетики в борьбе с климатическими изменениями. Мы сконцентрируемся в первую очередь на вопросах, изучаемых международными организациями, которые занимаются проблемами изменения климата и производства энергии.

В 2018 г. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change — Межправительственная комиссия по климатическим изменениям) опубликовала специальный доклад о глобальном потеплении на 1,5 °C, во всех сценариях которого требовалось увеличение производства ядерной энергии [49]. Конкретно в четырёх стратегиях (P1–P4), изученных IPCC, требуется увеличение производства ядерной энергии по сравнению с 2010 г. на 59–106 % к 2030 г. и 98–501 % к 2050 г. В стратегии P3, предполагающей продолжение исторического тренда в развитии технологии и общества, требуется ещё более значительный рост (+501 %) производства ядерной энергии к 2050 г. Для этого необходимо решительное ускорение развития ядерной энергетики после периода низкого роста и стагнации, продолжавшегося три десятилетия.

IEA (International Energy Agency — Международное энергетическое агентство) ежегодно публикует всегда ожидаемый и авторитетный доклад по перспективам мировой энергетики. Согласно сценарию, основанному на установленных правилах, который был опубликован в 2020 г., объём ядерной энергетики в 2019–2040 гг. будет на 210 % больше, чем в 2000–2019 гг. [50].

В предыдущем докладе IEA от 2019 г. по ядерной энергетике в системе "чистой" энергии указывалось, что ядерная энергетика может внести существенный вклад в достижение целей устойчивого энергетического развития и повышения энергетической безопасности наряду с возобновляемыми источниками энергии, возрастанием эффективности использования энергии и другими инновационными технологиями [51]. В этом заявлении отражается изменение восприятия и отношения к атомной энергии в рамках ядерной отрасли, более широкого круга энергетических отраслей и общества в целом. Атомная энергия не является конкурентом для других источников энергии с низкими выбросами углерода, но должна рассматриваться вместе с ними в рамках глобального энергетического перехода и борьбы с климатическими изменениями. В то же время для повышения надёжности и безопасности энергетических систем с низкими выбросами углерода требуется большая гибкость ядерной энергетике.

В том же докладе отмечается, что ядерная энергетика за последние 50 лет позволила сократить выбросы CO₂ почти на 55 Гт, что примерно эквивалентно размеру выбросов CO₂ глобальной энергетики за два года. (В 2020 г. МАГАТЭ сообщило о снижении выбросов на 74 Гт за период 1971–2018 гг., что эквивалентно суммарным выбросам всего энергетического сектора с 2013 по 2018 гг. и является вторым показателем после гидроэнергии, вклад которой в сокращение выбросов составил 98 Гт.) Этот весьма ценный вклад ядерной энергетики до появления возобновляемых источников энергии (кроме гидроэнергии) представляет собой достаточно надёжную и экономически обоснованную базу для значительного увеличения масштаба.

Однако оценка состояния и проблем отрасли ядерной энергетики в США, Европейском Союзе и Японии, в которых доля энергии, производимой АЭС, существенно

превышает средний мировой показатель, показывает, что эта отрасль может испытать глубокий спад. В случае "увядания" атомной энергетики ядерные мощности в развитых экономиках могут сократиться к 2040 г. на две трети — с примерно 280 ГВт электрической энергии в 2018 г. до всего лишь чуть более 90 ГВт электрической энергии в 2040 г. Такая перспектива создаёт серьёзную угрозу для возможной энергетической безопасности и делает переход к "чистой" энергии более трудной и дорогостоящей задачей.

В последние годы перспективы ядерной энергетики постоянно улучшались, в особенности после подписания Парижского соглашения и выхода специального доклада IPCC с целевым показателем в 1,5 °C. NEA (Nuclear Energy Agency — Агентство по ядерной энергии) опубликовало доклад о роли и потенциале ядерной энергетики в борьбе с климатическими изменениями [52]. В сценарии "2 °C" предполагается, что валовая выработка электроэнергии вырастет к 2050 г. с 390 до 930 ГВт электрической энергии, т.е. на 138 %. Для реализации этого сценария требуется показатель ежегодного подключения к сетям свыше 12 ГВт электрической энергии в 2010-е гг. и существенно более 20 ГВт электрической энергии в 2020-е гг. Хотя такие показатели были достигнуты в 1970–1980-х гг., для них потребуются существенный рывок после трендов середины 1990-х гг. В недавно опубликованном 14-м пятилетнем плане развития КНР национальная политика пересмотрена в сторону более активного и планомерного развития ядерной энергетики с ежегодным началом строительства шести-восьми объектов, что является серьёзным шагом в реализации запланированной углеродной нейтральности к 2060 г.

Недавно МАГАТЭ обновило результаты своего анализа климатических изменений и ядерной энергетики [53]. Этот документ является одним из наиболее полных, систематических и детальных институциональных докладов по данной тематике, содержащим ключевые научные и технологические выводы, относящиеся к новой парадигме, которые в силу своей важности заслуживают более подробного рассмотрения в настоящем обзоре. Доклад начинается с синтеза более 400 недавно разработанных долгосрочных сценариев спроса на энергию, представленных международным, государственным, негосударственным и частным секторами и научными организациями, в нём иллюстрируются проблемы и возможности снижения выбросов при производстве энергии для экономического и социального развития. Электричество является центральным элементом в декарбонизации энергии и должно играть более важную роль в обеспечении декарбонизации транспорта и промышленности, тогда как остальные низкоуглеродные носители энергии — такие как водород и тепло — будут играть постоянно возрастающую роль в полной декарбонизации этих секторов.

В условиях возрастающей важности роли электричества в центре внимания оказываются технологические варианты генерации энергии с низкими выбросами углерода. Хотя все эти виды энергии: атомная, гидро-, ветровая и солнечная — за свой жизненный цикл дают наименьшие выбросы парниковых газов, их требования к материалам и связанное с ними влияние на окружающую среду различны — от низкого для ядерной и гидроэнергии и комбинированного цикла газа до высокого для ветровой и солнечной энергетики. Указанные заметные

различия будут приводить к важным развилкам при реализации проектов в больших масштабах.

В таких сценариях, предусматривающих значительный рост ядерных мощностей, выделяются факторы, потенциально важные для их реализации: 1) значительное ослабление климатических изменений и соответствующие устойчивые политические сигналы, 2) контроль расходов на ядерную энергетику и доступность финансов, 3) умеренная степень одобрения обществом, 4) признание важности атомной энергии для стабильности эксплуатации электрических систем или сетей и управления ими.

Для перехода к будущей энергетической системе с низкими выбросами углерода, в которую будут входить различные технологии и ресурсы, потребуются радикальная трансформация производства, распределения и использования энергетических услуг. Электрические системы будут становиться всё более сложными и высоко интегрированными со всё более распределёнными системами генерации и хранения, а также более тесной связью с транспортом и более широким спектром энергетических предприятий. В результате увеличения доли переменных возобновляемых источников энергии неудовлетворённые потребности будут становиться всё более волатильными и непредсказуемыми, что потребует организации краткосрочного и сезонного хранения энергии.

Повышение волатильности неудовлетворённых потребностей и результирующих рыночных цен значительно увеличило риски для инвестиций в капиталоемкие технологии с низкими выбросами углерода. Оно также потребовало от операторов АЭС большей гибкости в эксплуатации, а от разработчиков — рассмотрения путей гибкой совместной генерации водорода, дающего малые выбросы углерода, и тепла при постоянной эксплуатации ядерного реактора на полной мощности.

Было предложено несколько решений для оказания поддержки или мотивирования перехода к надёжным энергетическим системам с низкими выбросами углерода на свободных рынках: 1) конкурентные краткосрочные рынки электричества для эффективного распределения, 2) адекватное предоставление мощностей, обеспечение гибкости и инфраструктуры для передачи и распределения электроэнергии, 3) меры поощрения долгосрочных инвестиций в технологии с низкими выбросами углерода, 4) интернализация системных затрат, 5) формирование стоимости выбросов углерода. Крупные энергетические инфраструктурные проекты, включая проекты в ядерной энергетике, по-прежнему характеризуются высоким риском для инвесторов и требуют определённых форм государственной поддержки и рыночных мер для управления рисками и их распределения. Однако АЭС продемонстрировали сравнительно высокую устойчивость к погодным явлениям, в большинстве случаев с крайне ограниченными вынужденными отключениями электроэнергии, несмотря на высокую частоту возникновения экстремальных погодных условий в некоторых регионах.

Некоторые дополнительные факторы могут раскрыть потенциал ядерной энергетики для борьбы с климатическими изменениями. Проекты по ядерной энергетике характеризуются большими инвестициями и длительным сроком строительства, составляющего обычно семь лет (и гораздо больше с большим разбро-

сом по странам и регионам). Инвестиционные затраты можно ограничить за счёт конструкции мультиобъектов, что со временем позволит девелоперам, поставщикам, рабочим коллективам и регуляторным органам накапливать опыт. Для больших, сложных и капиталоемких проектов ядерной энергетики можно использовать появляющиеся модели финансирования и распределения рисков. Необходимо формировать и поддерживать надёжные цепи поставок для получения оборудования, систем и сервисов высочайшего качества. Срок эксплуатации существующих АЭС следует увеличить. Необходимо развивать и реализовывать усовершенствованные и новые энергетические технологии, включая малые модульные реакторы для рынков и приложений, менее подходящих для иных технологий с низкими выбросами углерода (включая обычные АЭС) в силу географических, технических или финансовых ограничений (ниже будет показано, что такое ограниченное позиционирование SMR является ошибочным).

В докладе МАГАТЭ отмечается, что культура прозрачности и открытости является существенной для устранения естественной обеспокоенности заинтересованных сторон относительно ядерной энергетики, включая вопросы безопасности, ядерные отходы и роль ядерной энергии в ограничении климатических изменений.

Многие из основных вопросов и ключевых элементов, рассмотренных в докладе, так же как и в большинстве исследований на эту тему, с очевидностью являются транснаучными. Научные изыскания обычно концентрируются на вопросах внешних по отношению к ядерным реакторам и АЭС, таких как жизненный цикл углеродных выбросов, требования к материалам и их воздействие на окружающую среду, надёжность и стабильность энергетических систем с низкими выбросами углерода, экономическая эффективность развёртывания SMR и др. Сама по себе ядерная технология, равно как и поставляемые ею продукты и услуги, представляются установленными более точно. В таком качестве доклад может рассматриваться как сводка существующих парадигм и отправная точка для введения и оценки новой парадигмы, при этом транснаучные условия и тенденции выполняют роль внешних сил и эволюционирующих ограничений, влекущих за собой требуемые изменения в технологиях ядерной энергетики гражданского назначения, продуктах и услугах. Дополнительные перспективы, обзор которых даётся ниже, служат тем же целям и выполняют те же функции.

В контексте энергетических систем с низкими выбросами углерода в рамках проекта MIT Energy Initiative опубликован доклад о ядерной энергетике в мире с жёсткими ограничениями на выбросы углерода [54]. В нём исследуются возможности ядерной энергетики по сокращению полных системных затрат в сценариях с сильным ограничением выбросов углерода и устанавливается, что ядерная энергия с контролируемыми или сниженными затратами может стать основным компонентом. В исследовании моделируется ряд стран и регионов с различными энергетическими ресурсами, включая некоторые области в США, ЕС и Китае, анализируются и сравниваются отдельные сценарии различных уровней декарбонизации и делается ряд содержательных и конструктивных заключений. В докладе отмечается, что одним из ключевых ограничений на развитие ядерной энергетики являются высокие капитальные затраты

и рекомендуется несколько вариантов решения проблемы, включая переход от строительства на месте громоздких станций, сильно привязанных к их местоположению, к более массовому производству стандартизованных станций и к конструкциям реакторов, которые обеспечивают естественную и пассивную защиту.

В настоящее время имеется ряд моделей для анализа сценариев и стратегического планирования. Симулятор En-ROADS, разработанный компаниями Climate Interactive, Ventana Systems и MIT Sloan (США), является прозрачной и предоставляемой бесплатно онлайн-системой для моделирования [55]. Продукт, основанный на наиболее качественных научных данных, откалиброван с использованием широкого спектра существующих интегрированных оценок и моделей климата и энергетики. При использовании моделирования быстро становится понятным, что без существенного роста ядерной энергетики или без значительного прогресса в технологиях удаления углерода большинство мер, включая расширение использования возобновляемых источников энергии, повышение эффективности использования энергии и электрификацию, окажется недостаточным для достижения амбициозной цели $1,5^{\circ}\text{C}$.

В настоящем обзоре, который является интернациональным по тематике и контексту, ещё один аспект заслуживает особого внимания. Зигфрид С. Хеккер (Siegfried S. Hecker), занимавший ранее пост директора Лос-Аламосской национальной лаборатории, является автором и редактором двухтомного издания "Doomed to Cooperate: How American and Russian Scientists Joined Forces to Avert Some of the Greatest Post-Cold War Nuclear Dangers" (Обречённые на сотрудничество: как американские и российские учёные объединили свои усилия для предотвращения одной из величайших ядерных опасностей после "холодной войны") [56]. В 2016 г. он основал и по настоящее время возглавляет U.S. – Russia Young Professionals Nuclear Forum (Российско-американский форум молодых специалистов по ядерной энергетике), который должен способствовать диалогу по критически важным темам, связанным с ядерной энергией, вызывающим беспокойство у обеих стран. Форум был организован Центром международной безопасности и сотрудничества (Center for International Security and Cooperation — CISAC) при Стенфордском университете в сотрудничестве с Московским инженерно-физическим институтом. Одна из встреч форума была посвящена обсуждению вопроса о том, является ли развитие ядерной энергетики необходимым для ограничения опасности климатических изменений. Выводы молодых профессионалов отражены в восьми статьях, опубликованных в специальном выпуске *Bulletin of the Atomic Scientists* (Бюллетень учёных-атомщиков) [57].

Вайнберг отмечал, что необходимо устанавливать границы научных фактов — тот водораздел, где заканчивается наука и начинается транснаука. Он считал инженерное дело транснаукой, в особенности в быстро развивающихся областях, где неполные данные являются нормой, а инженерное суждение используется в качестве руководящего принципа. Перед переходом к транснаучным проблемам должны быть исчерпаны все научные элементы и даны ответы на все вопросы. Существуют два институциональных механизма для разрешения транснаучных вопросов: обычный политический процесс и юридические состязательные процедуры.

Кроме того, существует ещё один способ разрешения не получивших ответа вопросов, связанных с риском для общества или окружающей среды, которые вызваны новой технологией — усовершенствование технологии для сведения риска к минимуму. В этом состоит главный приоритет новой парадигмы.

В течение более чем семидесяти лет исследований, разработок и практической реализации ядерной энергетики гражданского назначения был накоплен и осознан немалый опыт, факты, данные и знания, в особенности в том, что касается трёх крупных ядерных инцидентов, их серьёзных последствий и отклика на них общества и рынка, — всё это представляет собой ценный материал для будущих разработок, инженерных исследований, конструкций, их установки и эксплуатации. На некоторые из этих ранних транснаучных вопросов можно теперь дать более научный ответ или считать их разрешёнными на основе транснаучных механизмов (механизмов, наполненных содержанием на основе реального жизненного опыта или аварий, которые обернулись незапланированными экспериментами). В настоящем обзоре такие вопросы рассматриваются наряду с продолжением совершенствования технологии и систем для минимизации существующих и защиты от возникающих рисков.

4. Проблемы, вызовы и происхождение противоречия между ядерной безопасностью и экономичностью

4.1. Текущие проблемы, высвеченные целями развития
Требования к энергетическим системам поколения IV во многих аспектах выявляют основные недоработки, проблемы и риски, связанные с существующими технологиями и системами, анализируемыми в комплексном подходе со стороны ядерной энергетики и промышленности (табл. 3).

Опыт десятилетий чётко продемонстрировал, что соблюдение всех условий является крайне сложной задачей, требующей длительного времени, о чём также свидетельствуют измеряющиеся десятилетиями сроки разработки, демонстрации и реализации, на которые ориентируются институты ядерной энергетики и вся отрасль в целом.

Увидевшая недавно свет редакционная статья в ведущем научном журнале *Nature*, посвящённая годовщинам аварий в Чернобыле и Фукусиме, является весьма представительной с точки зрения отражения взглядов и ощущений научного сообщества [58]. Череда катастроф истощила общественный оптимизм, с которым была встречена речь Эйзенхауэра "Atoms for Peace" (Атом для мира) [59]. Сейчас эта речь звучит скорее напоминанием о том, что ядерная энергетика и оружие массового поражения имеют общего предшественника. Оба фактора торпедировали великие перспективы атомной энергии как источника топлива.

Хотя число погибших в авариях на АЭС невелико, а степень риска для здоровья остаётся неопределённой или даже оспаривается, цена разрушений весьма значительна, варьируется от 200 млрд долл. США в случае Чернобыля до суммы между 470 и 600 млрд долл. в случае Фукусимы и не перестаёт возрастать из-за продолжающегося отключения АЭС и досрочной остановки

Таблица 3. Требования к ядерным энергетическим системам поколения IV как ключевые индикаторы препятствий и вызовов

Устойчивость-1	Обеспечение устойчивой генерации энергии, отвечающей требованиям чистоты воздуха, и долгосрочного наличия систем эффективной утилизации топлива для производства энергии в мировом масштабе
Устойчивость-2	Сведение к минимуму ядерных отходов и обеспечение управления ими, значительное сокращение груза долгосрочного планирования и управления и улучшение тем самым защиты общественного здоровья и окружающей среды
Экономика-1	Явное преимущество по сравнению с другими источниками энергии по показателю стоимости жизненного цикла
Экономика-2	Уровень финансовых рисков сравним с показателем для других энергетических проектов
Безопасность и надёжность-1	Превосходные показатели эксплуатационной безопасности и надёжности
Безопасность и надёжность-2	Крайне низкая вероятность и степень повреждения активной зоны ядерного реактора
Безопасность и надёжность-3	Устранение необходимости аварийных работ за пределами места возникновения инцидента
Предотвращение неконтролируемого распространения ядерных материалов и физическая защита	Повышение уверенности в том, что системы являются объектами непривлекательными и не представляющими интереса с точки зрения диверсии или хищения материалов, пригодных для изготовления оружия, и обеспечивают усиленную физическую защиту от террористических нападений

других реакторов. Широкомасштабный и долгосрочный ущерб локальной и региональной окружающей среде и экосистемам, а также воздействие на население, экономику и общество являются разрушительными.

Исследования всё больше показывают, что по смертности на единицу произведённой мощности ядерная энергетика с большим запасом имеет самые низкие показатели по сравнению с другими классическими источниками энергии и даже с некоторыми возобновляемыми источниками [60, 61].

Однако высокая стоимость и серьёзные последствия аварий (от мелких инцидентов до катастроф), сохраняющаяся неспособность большинства стран с ядерной энергетикой обеспечить долгосрочное решение проблемы ядерных отходов, непреходящие опасения и оппозиция общественности, большие задержки с одобрением проектов регуляторными органами и значительные сроки завершения строительства, а также всё возрастающее число случаев отмены проектов и досрочного закрытия станций демонстрируют, что прочие существенные риски для различных заинтересованных сторон не были должным образом рассмотрены, снижены или устранены.

Подход к решению этих проблем в духе "латания дыр" постепенно приводит к усугублению осложнений и росту затрат, что существенно ослабляет рыночные позиции и снижает потенциал отрасли, не устраняя при этом наиболее вредоносные фундаментальные риски. Как будет показано ниже, некоторые решения способствуют большей концентрации рисков, и номинальное снижение и без того низких вероятностей серьёзных инцидентов и ущерба не может быть проверено и подтверждено научными методами или же такая про-

верка является слишком дорогостоящей для реализации иначе, чем в другом крупном инциденте, что увеличивает количество факторов в восприятии рисков общественностью.

Целесообразно сделать здесь остановку и рассмотреть три основные парадигмы в восприятии рисков, помогающие высветить сложные проблемы, с которыми сталкиваются ядерные технологии, но одновременно с этим указывают потенциальные пути к их конструктивному и эффективному разрешению. Мы будем в основном опираться на ключевые результаты Пола Словица (Paul Slovic), ведущего специалиста в формирующейся науке о рисках, который проводит систематические исследования восприятия рисков, связанных с экстремальными событиями и их влиянием на технологию, в частности на ядерную энергетику (см. также связанную с этими исследованиями литературу [62–65]).

Словиц отмечает, что, хотя промышленно развитые страны приложили большие усилия для того, чтобы сделать жизнь своих граждан более безопасной и здоровой, многие члены общества становятся более (а не менее) озабоченными в связи с рисками. Восприятие обществом рисков было использовано для определения приоритетов и законодательных инициатив регуляторных органов. Поляризация взглядов, разногласия и открытые конфликты стали повсеместным явлением при оценке рисков и управлении ими. Растущую неудовлетворённость в управлении рисками можно отчасти проследить по неспособности оценить сложную и социально детерминированную природу концепции риска.

Исследования показали, что у общественности имеется широкая, качественная и сложная концепция риска, которая включает такие аспекты, как неопределённость, страх, потенциальные катастрофические последствия, контролируемость, баланс интересов, риск для будущих поколений и т.д. Эксперты, напротив, стремятся рассматривать риски в терминах вероятности ущерба или ожидаемого уровня смертности. Сильное расхождение взглядов является источником многих конфликтов, связанных с рисками, а соответствующие статистические данные по рискам и заявления являются средствами, малоэффективными для изменения отношения и восприятия людей.

Риск несёт с собой опасность, имеет вероятность, приводит к последствиям и связан с угрозами. Восприятие рисков связывает эмоции и рациональные соображения людей; они изучаются в трёх основных парадигмах: аксиоматической (последствия и влияние), социокультурной (эффекты группового или культурного уровня) и психометрической (эмоциональная реакция, влияющая на суждения).

В психометрической парадигме особняком стоит один главный фактор — риск страха, определяемый на верхнем участке шкалы восприятия как отсутствие контроля, ужас, потенциальная катастрофа, фатальные последствия и неравное распределение рисков и выгод. Ядерное оружие и ядерная энергетика получают по этой шкале высочайшие оценки. Другой важный фактор — риск неизвестности, который определяется на верхнем участке шкалы как опасность, воспринимаемая как ненаблюдаемая, неизвестная, новая и характеризующаяся задержкой в проявлении вреда. Химические и ДНК-технологии имеют по этому показателю особенно высокие оценки, но оценки радиоактивных отходов и инци-

дентов с ядерными реакторами также достаточно высоки. Подобные типы восприятия сопровождаются серьёзными последствиями, например социальное опасение рисков, как это произошло в результате трёх крупных ядерных аварий и значительного выпадения радиоактивных осадков, что оказало влияние на ядерную отрасль во всём мире и национальные политики в области энергетики и планов развития.

Известны технические и ориентированные на процесс решения конфликтов, связанных с рисками, но в настоящее время такие решения для многих являются недостаточными. Конфликт ценностей и упорное недоверие к управлению рисками не могут быть легко устранены с помощью технического анализа. Попытка разрешения противоречий по рискам, в первую очередь за счёт более активного вмешательства науки, с большой долей вероятности приведёт к усугублению конфликта. Некоторые из нынешних социальных и демократических институтов воспитывают недоверие к области рисков, в особенности при управлении рисками в рамках состязательной юридической системы, в которой один эксперт выступает против другого, противореча ему в оценке рисков и разрушая тем самым в ещё большей степени доверие общества. Однако серьёзное отношение к участию в процессе и к самому процессу может привести в долгосрочной перспективе к более удовлетворительным и успешным способам управления рисками. Наука о рисках развивается как ветвь формирующейся науки искусственного в непосредственной близости с естественными науками и в тесном взаимодействии с ними. Этот фактор крайне важен для разработки и реализации новой парадигмы ядерной энергетики гражданского назначения.

В дополнение к весьма строгим и уникальным запросам на основании технологических, конструкционных, финансовых, экономических и институциональных требований [66] двойная роль МАГАТЭ состоит в мониторинге и инспектировании АЭС и в попытках предотвращения использования странами делящихся материалов для производства вооружения, что также является примером препятствия к принятию атомной энергии. Этот аспект становится более явно и сильно выраженным на национальном уровне, как, например, говорится в докладе, который опубликовала Nuclear Energy and National Security Coalition (Коалиция по атомной энергии и национальной безопасности), организованная Atlantic Council Global Energy Center (Центр по глобальной энергии Атлантического совета) [67]. Продолжающийся вялый подъём ядерной энергетики показывает, что по мнению ряда стран риски перевешивают выгоды.

4.2. Будущие проблемы, вскрываемые рыночной конкуренцией

Хотя новые ядерные реакторы запланированы и строятся в Китае, Индии и нескольких других странах, они в основном являются частью соответствующих национальных программ, а не рыночными решениями. По мере того как всё большее число экономик по всему миру движется в сторону свободного рынка или режима, при котором рынки становятся решающим фактором, разрешимость мириад проблем, с которыми сталкивается нынешняя парадигма ядерной энергетики, неуклонно усложняется.

По сравнению с другими формирующимися современными энергетическими системами для стандартных

АЭС постоянное улучшение экономических показателей оказалось крайне трудной задачей. Хотя серийное строительство одних и тех же конструкций на одних и тех же местах привело к сокращению капитальных затрат и времени строительства на объектах, возводимых в более поздние сроки, эти эффекты не накапливаются, не распространяются по отрасли и не применяются впоследствии (см., например, [4, 68, 69]). Данное обстоятельство в комбинации с другими мешающими факторами привело к ослаблению развития ядерной энергетики в странах с высоким доходом [51]. Потеря привлекательности и доли в развитых экономиках — очень тревожный сигнал для источника энергии, который является чистым, представляется перспективным и обеспечивает очень низкие выбросы углерода.

Ещё более тревожным является тот факт, что в результате быстрого и предсказуемого снижения стоимости некоторых технологий получения возобновляемой энергии (таких как солнечные батареи и ветровые турбины) и взрывообразного роста этих работающих периодически и переменных источников критически важные потребности в стабильности сети и надёжности поставок электроэнергии привели к повышению использования ископаемых видов топлива. В некоторых случаях, как, например, *Energiewende* (энергетический переход (нем.) — *прим. перев.*) в Германии, это привело к увеличению стоимости электроэнергии и замедлению снижения выбросов углерода, что сделало маловероятным достижение декарбонизации энергетики к 2050 г. [70]. Такая тревожная тенденция усугубляется выводом из эксплуатации существующих АЭС.

Расширение хранения энергии, в особенности с использованием аккумуляторов, стало в настоящее время лучшим решением и начало применяться ещё шире в связи с электрификацией транспорта за счёт внедрения электрических транспортных средств. Такой путь к решению проблемы имеет много преимуществ с точки зрения перехода к чистой энергии с малыми выбросами углерода и всё более широко демонстрирует потенциал для экспоненциального роста. Однако в силу гораздо более низкой плотности энергии, растущего спроса на ресурсы и, вероятно, очень сильного влияния масштаба на основные системы и циклы материалов на Земле полный энергетический переход на базе только данного решения может привести к возникновению совершенно иного комплекса трудноразрешимых проблем. Этот вопрос разъяснится далее при рассмотрении иерархии основных видов энергии и основных систем и циклов материалов на Земле.

Многоуровневые и резервные системы безопасности, реагирования и защиты, обоснованные уроками ядерных катастроф и требованиями общественности и регуляторных органов, не только приводят к увеличению сложности и стоимости существующих АЭС, но и значительно снижают потенциал для их усовершенствования и замедляют технологический прогресс. Новые исследования и модели (см., например, [72]) раскрывают влияние сложности конструкции на эволюцию стоимости: чем сложнее конструкция, тем медленнее темп изменений. При изменении связности между компонентами системы "узкие места" могут возникнуть там, где несколько компонентов ограничивают прогресс и могут определять, будет ли прогресс постоянным, или же периоды остановки будут перемежаться со случайными значительными измене-

ниями. Это обстоятельство становится особенно важным, когда речь идет о топливе и теплоносителях для ядерных реакторов.

При опоре на исторические данные и тенденции экстраполяции их на перспективу, что может быть более убедительным и надёжным подходом для ближайшего будущего вместо вызванных сегодняшними потребностями сценариев борьбы с климатическими изменениями, перспективы ядерной энергетики гражданского назначения видятся весьма мрачными, если "бизнес-как-обычно" будет продолжаться даже при улучшении отношения и восприятия со стороны тех кругов, которые считаются "антиядерными". Не вызывает сомнения, что простая экстраполяция истории не учитывает роль и потенциал новых технологий и революционных инноваций, но нельзя также и утверждать, что их появление является предопределённым или гарантированным, в особенности если требуется своевременное обращение вспять многих нынешних тенденций. Как отмечает Ромер, "держать руль важнее, чем нажимать на газ, когда речь идёт об управлении инновациями и предвидении их исходов" [30, 31].

В недавнем исследовании, проведённом в Institute of New Economic Thinking (Институт нового экономического мышления) при Oxford Martin School [71], оценивается стоимость четырёх различных сценариев для глобальной энергетической системы в период с 2020 по 2070 гг. С применением эмпирически проверенного метода прогнозирования технологий на основании обширного массива исторических данных по множеству отраслей промышленности [69] это исследование показало, что ядерный сценарий является существенно более дорогостоящим. Сценарий ускоренного перехода с быстрым развёртыванием солнечных батарей и ветровых турбин и использованием аккумуляторов для краткосрочного хранения энергии и топлива на основе водорода для долгосрочного хранения и неэлектрифицируемых приложений даёт самую высокую чистую экономию по сравнению со сценарием без перехода или сценарием медленного перехода. В этом исследовании изучались только затраты, так что потенциальные ограничения и влияние на ресурсы, окружающую среду и экологию, а также требования стабильности сети, надёжности поставок энергии и устойчивости системы не рассматривались.

Перспективы своевременного глобального решения проблемы изменения климата становятся ещё более туманными при рассмотрении планов в отношении развития усовершенствованных ядерных технологий и систем. Ранее уже отмечалось, что сроки разработки ядерных энергетических систем поколения IV исчисляются десятилетиями. Мы теперь взглянем на этот вопрос с точки зрения парадигмы.

4.3. Происхождение противоречия

между ядерной безопасностью и экономичностью

Нынешние стандартные технологии ядерной энергетики основываются на охлаждении водой; они развились на раннем этапе из потребностей военных в производстве специальных ядерных материалов и ядерных двигательных установок. Этот выбор определялся скорее соображениями, связанными с ограниченностью времени и ресурсов, а не превосходными характеристиками воды. Наиболее вероятно, что он также поддерживался факто-

ром компактности таких конструкций, которые высоко ценятся за свою мобильность и экономичное использование материалов, а также знанием и широкой доступностью технологий, компонентов и оборудования, предназначенных для работы с водой и паром. Двойная функция воды — как теплоносителя и замедлителя — способствовала упрощению конструкции в те ранние годы, когда проблемы безопасности и их последствия ещё не были достаточно поняты. Адмирал Хайман Риквер (Human Rickover) выбрал вариант PWR для атомного флота. Сочетание указанных факторов позволило остановиться на решении, быстро продемонстрировавшем непревзойдённые преимущества, когда потребовалось использование атомной энергии в мирных целях, и попало в колено доминирующей парадигмы почти на три четверти века, оттеснив все остальные варианты.

Конструкция коммерческого ядерного реактора, которая доминирует сейчас во всём мире и будет преобладать в ближайшем будущем, — PWR — является результатом адаптации конструкции, разработанной в Национальной лаборатории в Окридже в качестве ядерной установки для атомной подводной лодки. Полностью работоспособная установка была смонтирована в Национальной лаборатории Айдахо, а последующие работы производились в Лаборатории атомной энергии Беттис Вестингауз (Westinghouse Bettis Atomic Power Laboratory). Первый чисто коммерческий ядерный реактор в Шиппингпорт (Shippingport Atomic Power Station), первоначально разработанный как PWR для атомного авианосца, вышел на уровень критичности в 1957 г. Более поздние изменения в конструкции были связаны в основном с увеличением мощности, многократным усилением безопасности и установкой систем реагирования в аварийных ситуациях и систем и оборудования для ограничения распространения радиации (активных, пассивных или гибридных), зачастую с резервированием. Эти системы были реализованы в модели, по сути предназначенной для военного использования. У одного реактора PWR произошло частичное расплавление при аварии на АЭС Три-Майл-Айленд (Three Mile Island) в 1979 г. из-за потери теплоносителя, что по существу остановило развитие строительства новых АЭС в США на три десятилетия.

Реактор РБМК в Чернобыле был создан в рамках советской программы разработки энергетических реакторов с водяным охлаждением и возможностью двойного использования для наработки плутония. Реакторы проектировались в первую очередь в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова и НИКИЭТ (Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники им. Н.А. Доллежалея). Первый такой реактор, Обнинск АМ-1, был запущен в 1954 г. и эксплуатировался по 1959 г. При использовании минималистской конструкции с водой в качестве теплоносителя и графитом в качестве замедлителя топливом мог служить природный уран. Благодаря простоте конструкции необычайно большой реактор был чрезвычайно дешёвым, что позволило строить его в больших количествах, и достаточно простым, чтобы его мог обслуживать и эксплуатировать местный персонал, в результате чего он стал общенациональным реактором Советского Союза. Однако конструкция РБМК страдает фундаментальным дефектом безопасности из-за высокого парового коэффициента ре-

активности, который создаёт условия для бесконтрольного усиления производства нейтронов и разгона реакции в петле тепловой обратной связи с закипанием воды и её испарением с последующим взрывом пара и водородом. Отсутствие достаточной защиты, систем аварийного реагирования и полной физической герметизации усилило и расширило последствия и эффекты катастрофы. Эта комбинация факторов в конечном счёте привела к крупнейшей ядерной катастрофе в мировой истории, которая произошла в Чернобыле в 1986 г.

Реактор BWR, концепция которого была разработана позднее, чем PWR, стал вторым по распространённости типом реактора. Он был создан в результате сотрудничества компании "Дженерал Электрик" с несколькими национальными лабораториями в США, в частности Аргоннской национальной лабораторией, после серии экспериментов BORAX, которые подтвердили концепцию безопасности BWR. Ещё первые разработки показали, что закипание воды в реакторе может приводить к его остановке, что является полезной характеристикой саморегулирования в случае возникновения чрезвычайной ситуации. В 2011 г. из-за потери теплоносителя и выделения водорода оболочкой тепловыделяющего элемента на основе циркониевого сплава вместе с высокотемпературным паром на трёх BWR-блоках в Фукусиме произошёл катастрофический взрыв водорода и расплавление активной зоны реактора с автоматическим отключением реактора.

В ответ на ядерную катастрофу и требования общестественности регуляторные рамки ядерной энергетики стали более строгими и регламентирующими с уклоном в сторону общепринятых конструкций больших монолитных АЭС. Этот однонаправленный тренд в совокупности с необычным стремлением отрасли к экономии за счёт масштаба структурной единицы путём повышения мощности реактора (и усиленный им) вверг ядерные технологии в порочный круг. Для улучшения безопасности и экономичности в рамках той же парадигмы с уже ничтожными вероятностями разрушения активной зоны реактора и крупномасштабных выбросов потребовались дополнительные системы и расходы, которые привели к росту общей мощности в стремлении распределить и сократить специфические затраты, но это также привело и к увеличению сроков и стоимости строительства и усилило последствия серьёзных инцидентов за пределами технического задания на проектирование, что в свою очередь потребовало усиления безопасности и дополнительных систем реагирования на чрезвычайные ситуации и ограничения распространения радиоактивных материалов и т.д.

Для масштабирования в сторону увеличения в таких разработках, с которыми связаны риски для безопасности, требуется реализация множества осторожных шагов — от реакторов с нулевой мощностью, экспериментальных, прототипных, коммерческих, демонстрационных до полноценного развёртывания реактора. Поскольку для каждого этапа требуется период времени в десять и более лет, продолжительность полного цикла для технологий и проектов таких систем растягивается на много десятилетий. Из-за опасений, связанных с безопасностью, и результирующего замедления развития ядерные технологии лишились множества разнообразных возможностей для внедрения быстрых инноваций, доступных другим технологиям и отраслям; осо-

бенно это относится к тем экспоненциально растущим отраслям, в которых революционные технологии стали возможными благодаря сетевым эффектам и комбинаторному "взрыву".

Они также привели к продолжавшемуся десятилетиями застою и падению в первую ядерную эпоху. Вайнберг ещё за несколько лет до инцидента в Три Майлс, имевшего место в 1979 г., указывал, что системы безопасности и аварийного реагирования почти доминируют в технологиях ядерной энергетики [18, 19]. С той поры отмеченное доминирование усилилось до такой степени, что заставляло прозорливых людей с опытом работы в отраслях высоких технологий, не относящихся к ядерной энергетике (таких как Билл Гейтс, который инвестировал средства в развитие усовершенствованных технологий ядерной энергетики), изумляться тому, как подобные технологии могут конкурировать и выживать на рынке, поскольку последовательно сменяющиеся "поколения" технологий и продуктов предоставляют те же самые услуги (электроэнергия для удовлетворения основной нагрузки) с большими сложностями и за большую цену. По мнению провидцев — пионеров ядерной энергетики — открывается вторая эпоха, и естественная безопасность является ключом к перезапуску роста и экспансии ядерной энергетики [14].

Если поиск технологий и систем ядерной энергетики и их внедрение приводятся в движение причинами и стратегиями, иными, нежели экономическая эффективность использования, то опасения и риски, связанные с безопасностью и распространением радиоактивных материалов, заметно усиливаются (см., например, [73]), дополнительно ограничивают существенную роль и обширный потенциал ядерной энергетики и создают препятствия для быстрой экспансии ядерной энергетики гражданского назначения в борьбе с климатическим кризисом.

5. Новая парадигма для ядерной энергетики гражданского назначения

Вторая эпоха ядерной энергетики гражданского назначения требует новой парадигмы. Она необходима для предоставления фундаментально безопасных, конкурентоспособных и инвестиционно привлекательных продуктов и сервисов, которые имеют разнообразные приложения, вызывают широкий интерес, могут реализовываться и эксплуатироваться с простотой и гибкостью и способны обеспечивать минимальные риски, связанные с безопасностью и распространением радиоактивных материалов. Самое важное, что эта парадигма должна появиться на рынке быстро, постоянно набирать импульс и с большой скоростью — по возможности экспоненциально — масштабировать свою реализацию.

5.1. Иерархия основных источников энергии

Для того чтобы понять и оценить особую роль, потенциал и опасность ядерной энергетики, необходимо дать краткий обзор иерархии основных источников энергии. Многие сложные проблемы, связанные с нынешними конструкциями ядерных энергетических систем и их эксплуатацией, проистекают из фундаментального несоответствия между крайне мощными ядерными силами и материалами, образованными сравнительно слабыми химическими силами, и неправильного распре-

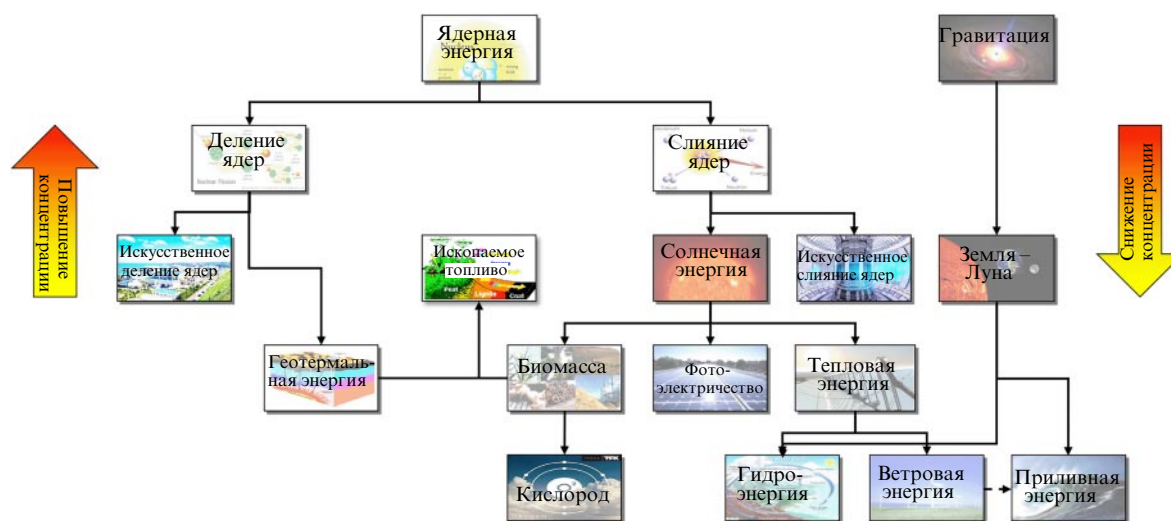


Рис. 3. Иерархия основных видов энергии на Земле с указанием их происхождения и превращения.

деления ресурсов и усилий в силу устаревших и ошибочных допущений. Хотя базовая наука является простой и прозрачной, нахождение практических инженерных решений с должными конструкциями — значительно более трудная задача, оставляющая простор для усовершенствований.

Мы используем несколько основных форм энергии, включая ископаемое топливо, ядерную энергию и возобновляемые виды энергии. У каждой из них имеются отличительные характеристики, уникальные преимущества и недостатки, поставщики и потребители, сторонники и противники. Систематическое понимание их роли и объективная оценка их нынешнего и потенциального вклада и последствий остаётся трудной задачей, в особенности когда речь заходит об ускорении глобального энергетического перехода для борьбы с климатическими изменениями.

Для того чтобы поставить изыскания и обсуждения на некоторую единую научную базу, снабдить их метрикой и избежать появления слишком узкосфокусированных и зачастую тенденциозных аргументов и решений, здесь используется иерархия основных источников энергии, базирующаяся на их физической природе или искусственных трансформациях с набором метрик для размещения их на некоей общей платформе с целью получения более детальных и конкретных оценок. В данном контексте это расширит область науки и сузит область транснауки или, иными словами, превратит транснауку в большей степени в науку искусственного.

В энергетической иерархии источником основных видов энергии на Земле считаются слияние и деление ядер и гравитация. При этом все формы энергии, с которыми мы сталкиваемся и которые нами используются, являются их многоуровневыми природными или искусственными превращениями, происходящими в физических и химических процессах (рис. 3). Параметрами являются поток энергии на поверхности, доля используемой поверхности земли с определёнными последствиями для окружающей среды и экосистем, плотность энергии носителя, степень транспортабельности или географические ограничения, наличие (в случае не-

возобновляемых источников энергии), подтверждённые запасы и соответствующий показатель для возобновляемых источников энергии. Конкретные детали выходят за рамки настоящего обзора, однако можно надеяться, что перечисление основных моментов концепции облегчит общее понимание проблемы.

Принципы работы ядерного источника энергии можно подразделить на слияние и деление ядер. Энергия слияния ядер, излучаемая Солнцем, проявляется во множестве форм. Биосфера преобразует полученную солнечную энергию в основном с помощью фотосинтеза, превращая её в биоэнергию. Биоэнергия, сформированная в течение миллионов и миллиардов лет в результате движений земной коры и связанных с ними термических, биологических, химических и физических процессов, превращается в ископаемую энергию, которая содержится в угле, нефти, природном газе и иных нестандартных ископаемых источниках энергии. Что касается прочих углеводородов небиологического происхождения, то их формирование, по-видимому, происходит под действием тепла от ядерных распадов в ядре Земли.

Солнечная энергия, преобразованная с помощью фотоэлектрического (PhotoVoltaic — PV) процесса, является солнечной PV-энергией. Солнечное тепло рассматривается как источник термальной энергии (при низких температурах применяется для нагрева, а при высоких температурах — для генерации электричества с использованием пара). Здесь перечислены искусственные формы прямого преобразования энергии, и они могут классифицироваться как вторичное использование энергии слияния ядер или первичное использование солнечной энергии на Земле.

Природные преобразования и использование солнечной термической энергии порождают иные формы основной энергии. Под действием термического и гравитационного взаимодействия вода испаряется, переносится в атмосферу и выпадает в виде осадков, превращаясь в гидроэнергию; воздух поднимается, движется и опускается, превращаясь в ветровую энергию; вода расходится кругами, циркулирует, поднимается и опускается, превращаясь в энергию волн или приливов. Эти формы

можно классифицировать как вторичное или третичное использование солнечной энергии на Земле.

Кислород зачастую не относят к источникам первичной энергии. Будучи генерируемым в реакции фотосинтеза, он абсолютно необходим для предоставления биоэнергии для жизни, требуется для сжигания химического топлива и вносит существенный вклад в высвобождение энергии. Такое упущение, скорее всего, объясняется теми же причинами, что и длительное забвение выбросов диоксида углерода как отхода процесса генерации энергии, поскольку оба газа не являются непосредственно наблюдаемыми, но присутствуют повсюду.

Водород часто считается источником энергии, не содержащим углерода. Он, однако, служит не первичным источником энергии, а молекулярным носителем, в котором хранится энергия, использованная для его создания. Его следует рассматривать на том же уровне, что и электричество, аккумуляторы и прочие виды топлива и систем хранения энергии, которые относятся к искусственным или вторичным.

В приведённой иерархии концентрация энергии заметно снижается при спуске на каждый уровень преобразования с соответствующим серьёзным уменьшением плотности или потока переносчика энергии. Поскольку на малых масштабах силы тяготения очень слабые, первичные виды энергии, образующиеся в результате преобразований посредством гравитационного взаимодействия, например гидро-, ветровая, приливная и волновая энергия, являются сильно рассеянными, на много порядков величины — от сотен до сотен тысяч раз — по сравнению с полным потоком солнечного излучения, примерно равным 1360 Вт м^{-2} . Для их эффективного использования требуются значительные масштабы с точки зрения необходимых ресурсов, в особенности вовлечения поверхности земли.

Все перечисленные виды энергии представляют собой различные формы преобразования полученной на Земле энергии слияния ядер на Солнце. Поскольку такие циклы являются быстротекущими и постоянно пополняются Солнцем, соответствующие виды энергии являются возобновляемыми.

Исключением из таких процессов с понижением концентрации энергии является ископаемое топливо. Геологическое время и движение коры привели к переработке и концентрации биоэнергии, трансформированной из солнечной энергии, превратив в результате ископаемое топливо в высококонцентрированный и богатый источник энергии. В иерархии основных источников энергии такая природная трансформация приводит к повышению, а не к понижению концентрации в миллионы раз по сравнению с возобновляемыми источниками энергии.

Ископаемое топливо также в принципе является возобновляемым, однако скорость и циклы возобновления являются слишком медленными для того, чтобы человеческая цивилизация могла ими воспользоваться. Фундаментальная проблема интенсивного антропогенного использования ископаемого топлива состоит в его быстром исчерпании — за несколько сотен лет перерабатываются ресурсы, накопленные в течение десятков и сотен миллионов лет; при этом быстро истощаются энергетические резервы и, что более важно, природные системы и циклы материалов изменяются настолько

быстро, что природная эволюция не успевает адаптироваться к ним. Это, в частности, относится к углероду — основному строительному кирпичику жизни и ключевому компоненту баланса тепла на Земле.

Единственным основным видом энергии чисто земного происхождения служит ядерная энергия. Геотермальная низкоконцентрированная энергия является результатом преобразования энергии в форме нагревания при распаде ядер; этот вторичный источник даёт примерно половину теплового потока Земли. Искусственной формой этой энергии, применяющейся в настоящее время, является энергия деления ядер, проявляющаяся в основном в виде электричества, генерируемого АЭС. Поскольку при этом происходит непосредственное преобразование энергии ядерных реакций, в которых участвуют необычайно мощные ядерные силы, плотность носителя ядерной энергии в миллион раз превышает плотность всех носителей химической энергии, т.е. ископаемого топлива и энергии биомассы, и на много порядков величины больше концентрации всех прочих возобновляемых источников энергии, не основывающихся на химическом преобразовании молекул. Отмеченное выше с очевидностью показывает, что архитектура систем ядерной энергетики, соответствующая таким её уникальным характеристикам, должна отличаться от архитектуры систем для всех прочих форм энергии.

В космическом масштабе делящиеся и воспроизводящиеся изотопы, используемые в ядерной энергетике, произошли в результате быстрого нуклеосинтеза в сверхновых или при слиянии нейтронных звёзд с последующим обогащением в континентальной коре. Хотя их распространённость на Земле и в солнечной системе ниже, чем в случае водорода, кислорода, углерода, кремния и т.п., она близка к таковой для редкоземельных элементов и существенно превышает распространённость драгоценных металлов, суммарное количество содержащейся в них энергии довольно большое. На Земле имеется примерно $40 \times 10^{12} \text{ т}$ урана, а $4 \times 10^9 \text{ т}$ (4 Гт) содержится в морской воде с концентрацией примерно $3,3 \text{ млрд}^{-1}$ (частей на миллиард). Уран может селективно экстрагироваться из морской воды, как показали лабораторные эксперименты, и его концентрация поддерживается на постоянном уровне в результате контакта с корой [74–77]. Для справки: мировая отрасль ядерной энергетики с суммарной мощностью 400 ГВт электрической энергии, которая производит более 10 % электроэнергии, потребляет примерно 67500 т урана в год, при этом в 2019 г. зарегистрированные запасы составили $6,1 \times 10^6 \text{ т}$ (6,1 Мт).

В настоящее время нет недостатка в уране, как и не будет его в долгосрочной перспективе, а рыночные цены (в пересчёте на выход тепловой энергии) гораздо более низкие или примерно такие же, как и для остальных видов топлива, даже в случае самой низкой степени использования топлива в реакторах теплового спектра (с охлаждением водой или газом). Эти факты требуют тщательного пересмотра ключевого допущения в установившейся парадигме ядерной энергетики и связанных с ней принципов и методов проектирования, которое состоит в том, что имеет место недостаток урана, и его использование необходимо оптимизировать для повышения эффективности и обеспечения устойчивого роста в кратко- и среднесрочной перспективе.

5.2. Основные системы и циклы материалов на Земле

Система Земли состоит из четырёх подсистем, часто называемых сферами: геосферы, атмосферы, гидросферы и биосферы. Они связаны друг с другом потоками энергии и материалов. Основные энергетические потоки поддерживаются внутренним (тепло от радиоактивного распада) и внешним (солнечная радиация) источниками. Энергия передаётся через излучение, конвекцию и теплопроводность. Ключевые потоки материалов, проходящие через основные биогеохимические циклы, состоят из углерода, кислорода, водорода, воды, азота, фосфора и серы — все они важны для жизни.

Существенные модификации этих систем и циклов в результате деятельности человека приводят к быстрым изменениям в окружающей среде Земли, экосистеме и климате. Если мы разрабатываем и реализуем глобальные решения для борьбы с климатическими изменениями на фундаментально устойчивой основе, то необходимо сократить или исключить влияние на такие системы и циклы некоторых важных факторов, в особенности касающихся базовой силы, движущей изменениями, — энергии.

В качестве примеров потребностей и влияния основных видов энергии на ресурсы и окружающую среду рассмотрим потоки связанных с ними отходов. Величина выбросов углекислого газа, присущая глобальной энергетике, составила 33,4 Гт в 2019 г. и снизилась до 31,5 Гт в 2020 г. из-за пандемии. Детальная статистика и модели широко представлены во многих заслуживающих доверия источниках (см., например, [78]).

Количество использованного ядерного топлива, выгруженного из реакторов по всему миру, составило с момента появления ядерной энергетики примерно 0,4 Мт, примерно одна треть из которых была переработана [79]. Крупный энергетический реактор (1 ГВт электрической энергии) производит около 25–30 т отработанного топлива в год. В США ежегодно производится примерно 2 кт отходов, что с 1950-х гг. составило в сумме 83 кт; все они уместятся на одном футбольном поле в слое толщиной менее 10 ярдов (примерно 9,1 м — *прим. перев.*); эти отходы возникли в результате производства 20 % электроэнергии [80]. Хотя исследования, разработки и усовершенствования решений по управлению отходами и их уничтожению продолжаются, хранение в сухих контейнерах пока остаётся весьма практичным, безопасным и экономически приемлемым решением. Были предложены и изучены многие варианты. В любом случае, в силу того что в отработанном топливе и высокорadioактивных отходах всё ещё остаются обширные запасы энергии, их можно использовать для производства энергии, если удастся найти подходящие технологии, в особенности если станет возможным их накопление в количествах, достаточных для экономического развития и применения. Потребуется время и инвестиции, которые станут более доступными, если ядерная энергетика гражданского назначения возродится и снова будет представлять ценность для экономики и общества.

Данные по возобновляемым источникам энергии быстро изменяются. Например, выводимые из эксплуатации PV-панели могут дать в США к 2030 г. в сумме 1 Мт отходов или 1 % отходов мировой электроники [81]. Этот показатель с точки зрения объёма и веса значительно превосходит показатель ядерной энергетики, поскольку эти отходы относятся к отходам электроники, ими

можно управлять и их можно удалять в рамках той же широкой категории, в силу чего они становятся более приемлемыми и легче управляемыми. Связанные с этим проблемы и циклы переработки находятся в стадии изучения (см., например, [82]).

Ключевые элементы и материалы для ядерной энергетики и некоторых воспроизводимых видов энергии — уран, кремний, литий и др. — не только не выделяют диоксида углерода или других парниковых газов в процессе нормального использования, но и не входят в биогеохимические циклы Земли. Таким образом, их производство и потребление, скорее всего, будут меньше влиять на экосистемы в случае должного отделения, локализации и переработки в технологически реализуемых и экономически эффективных системах.

В этом смысле возобновляемая энергия, поступающая непосредственно от Солнца без преобразования в природе, такая как солнечная фотоэлектрическая энергия или находящаяся под контролем и локализованная ядерная энергетика являются внешними для экосистем, и их использование может быть экологически устойчивым. Прочие источники и способы применения энергии являются внутренними для экосистем и тесно связанными с ними, они не могут быть устойчивыми в силу второго закона термодинамики.

Такая системная точка зрения позволяет не только легче понять и осознать причины и последствия выбросов углерода, но и определить более естественным образом потенциальные решения, вероятные последствия и устойчивость. Исторические решения в области энергетики начиная от возобновляемых источников в прошлом и до ископаемого топлива, которые подготавливали и поддерживали последовательность промышленных революций, а теперь приводят к климатическому кризису, предлагают обращённые в прошлое тесты и доказательства.

Следуя этой линии научного исследования и анализа с использованием подхода, основанного на системах и циклах, можно сделать определённые предсказания относительно устойчивого развития. Например, хотя использование возобновляемых источников энергии и хранилищ энергии будет в значительной степени и быстро способствовать декарбонизации, опора только на них будет влиять на системы и циклы Земли скорее в направлении неустойчивых изменений, как это показывает случай гидроэнергетики, которая является возобновляемой и позволяет хранить энергию (см., например, [83]).

Увеличение доли возобновляемых источников энергии в энергетических системах с непостоянным характером генерации потребует дополнительных ресурсов, приведёт к более сильным последствиям и создаст более высокие риски для стабильности и надёжности системы. Для того чтобы обеспечить постоянный прогресс человечества в сторону пребывания в гармонии с Природой, а не существования по капризу Природы, имеются эффективные и интересные технологические решения, такие как аккумуляторы для краткосрочного хранения и гидроэнергия, а также водород и другие молекулы для долгосрочного хранения энергии.

Среди всех имеющихся или разрабатываемых технологий и систем возобновляемых источников энергии солнечная PV-энергетика выделяется как наиболее устойчивое крупномасштабное глобальное решение, поскольку она представляет собой непосредственный захват и

передачу солнечной энергии от фотонов к электронам. Солнечная PV-энергетика — это и оптимальное решение, поскольку она основана на фундаментальных взаимодействиях, использовании материалов, наиболее далеко отстоящих от систем и циклов Земли, связанных с биологией и экологией, а циклы могут быть замкнуты при изобилии внешней солнечной энергии. Кроме того, некоторые аккумуляторы, по-видимому, являются самым эффективным решением для краткосрочного хранения энергии.

5.3. Переоценка и переосмысление ядерной энергии и безопасности

Описанная базовая логика, научные знания и исторический прогресс могут сделать ядерную энергию одним из наиболее устойчивых решений для глобальной энергетики, открывающим обширные перспективы для исследований, изобретений, роста, мира и процветания с запасом на многие порядки величины. Эти возможности систематически рассматриваются ниже.

На рисунке 4 показаны уровни первичной энергии, упорядоченные слева направо по мере уменьшения энергии, выделяющейся в единичной реакции. Показаны также энергетические пороги, которые нужно преодолеть для запуска реакции, и уровни тепловой энергии, требуемые для протекания реакции.

Горизонтальная полоска силы связей в материалах (функциональных, структурных или применяемых для локализации) относится к энергетическим системам, имеющимся на практике. Выделение энергии и пороги реакций для всех систем, основанных на электромагнитном или гравитационном взаимодействиях, — ископаемое или химическое топливо (включая водород и биомассу), солнечная PV-энергетика, огонь (включая тепловую солнечную энергию), ветровая и гидроэнергия — располагаются значительно ниже полосы прочности связей. Это означает, что такие системы могут функционировать, поддерживаться и оставаться локализованными постоянно даже при временном нарушении целостности, состояния или состава в случае инцидента.

Хотя выход энергии и порог реакции деления ядер в миллионы раз больше, деление ядер может происходить в условиях, которые находятся на графике гораздо ниже уровня прочности связей в материалах. Природный протореактор уже существует в Окло (Габон, Западная Африка). Он представляет собой удивительный подарок природы, который позволяет конструировать, строить и эксплуатировать реакторы, основанные на делении ядер, с использованием материалов и систем, имеющих в наличии и не являющихся радиоактивными. Под действием нейтронов чрезвычайно высокой энергии и радиации окружающие материалы изменяются со временем в результате микроструктурных повреждений, ядерной активации и превращения элементов, что представляет собой явление совершенно новое по сравнению с неядерными системами, но которым можно управлять в течение определённого времени.

Однако наиболее серьёзное ограничение состоит в том, что в силу чрезвычайно больших количеств энергии, выделяемой даже при её значительном снижении после остановки цепных реакций, и огромной энергии, запасённой в загруженном топливе, системы, основанные на энергии деления, могут повреждать или разру-

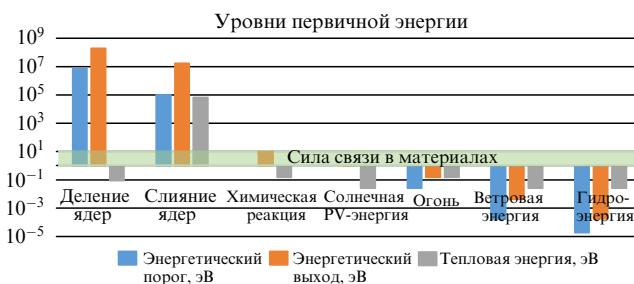


Рис. 4. Уровни первичной энергии — порог реакции, энергетический выход, термический эффект — в пересчёте на одну реакцию и один атом или молекулу.

шать любой материал при наличии достаточной плотности энергии, полной энергии и времени воздействия. Поскольку интенсивное облучение и невидимая радиоактивность (которая, однако, легко детектируется датчиками) могут наносить серьёзные острые и хронические повреждения всем биологическим материалам и жизни, такие сбои должны быть устранены в строящихся системах ядерной энергетики гражданского назначения и в практических приложениях на детерминистическом уровне, а не только как события с очень низкими и непроверяемыми вероятностями или частотами проявления. При серьёзных и обширных последствиях аварии это требование является особенно важным. К счастью, такое решение возможно, и оно становится конкурентоспособным по стоимости в новой парадигме. Основная проблема связана с дальнейшим прогрессом не в ядерной физике, а в инженерной проработке реакторов и АЭС, которая перебросят надёжный и экономичный мостик через огромный промежуток, отделяющий уровень МэВ в делении ядер от уровня эВ в материалах.

Как уже отмечалось, слияние ядер является единственной реакцией, которая не может начаться или поддерживаться в условиях ниже полосы на диаграмме (см. рис. 4), а лишь выше её на много порядков величины. Слияние ядер в звёздах инициируется и поддерживается в условиях чрезвычайно высоких температур и давлений и локализуется мощной гравитацией в масштабах звёзд. Нам же необходимо создать такие условия с помощью искусственного магнитного или инерциального удержания или каких-либо альтернатив, таких как синтез замагниченной мишени или инерциальное электростатическое удержание, а также новые версии стелларатора. Ни одного из этих условий или протосистем в природе не существует. Они представляют собой совершенно новую категорию научных задач и инженерных проблем.

Вначале приоритетами в подходах к конструированию энергетических реакторов на основе деления ядер были использование топлива и энергетическая эффективность. Проблемы, связанные с безопасностью и последствиями инцидентов, появлялись и становились лучше понимаемыми в результате экспериментов, тестов, эксплуатации и самих инцидентов; возникли новые (и выросло число имеющихся) системы безопасности и реагирования на чрезвычайные ситуации, структуры локализации, зоны отчуждения и зоны проектных аварий; регуляторные требования были ужесточены, а требования общественности к безопасности и оппозиция ядерной энергетике усилились.

Первоначальные приоритеты, основанные на ложных допущениях относительно скудности ресурсов [2], на которых сказалось стремление в то время к экономии за счёт масштаба на тепловых станциях [84], в совокупности с ростом требований к безопасности сформировали петлю обратной связи по увеличению мощности и сложности ядерного реактора при одновременном возрастании капитальных затрат и сроков строительства [4]. Указанное обстоятельство привело к увеличению стоимости ядерной энергии с поправкой на инфляцию, что является уникальным явлением среди более 60 технологий, проанализированных с использованием исторических данных [69]. Стоимость энергии, производимой из угля, возросла и снижалась в определённом диапазоне, и это вторая технология, цены в которой не испытывали систематического падения. Данное наблюдение является чётким указанием на то, что АЭС проектировались и строились, как станции, работающие на угле, поскольку они имеют много общего во вспомогательных системах и оборудовании.

Ключевое отличие состоит в том, что стремление к экономии за счёт масштаба структурной единицы в ядерной энергетике непропорционально увеличивает сложность и затраты из-за усиления рисков, связанных с безопасностью, и регуляторных требований. Цена ядерной энергии отличается от цены во всех прочих технологиях в силу большого размера и высокой сложности станции, строящейся из монолитного бетона, она может возводиться только на месте (аналогично станции, работающей на угле). Все прочие энергетические установки производятся в заводских условиях с предсказуемым снижением стоимости при увеличении объёма производства, как это следует из закона Райта, который иногда представляется во временной развёртке и в таком случае называется законом Мура [68].

В производственном секторе наблюдается постоянный рост производительности со временем, тогда как в строительной отрасли имеют место застой или падение [11, 12]. В США производительность, измеряемая как добавка валовой стоимости за 1 ч работы, была в производственных отраслях в 2010 г. в восемь раз выше, чем в 1947 г., а общая производительность была в три раза выше, тогда как в строительстве она поднялась почти вдвое до 1970-х гг., а затем постоянно уменьшалась вплоть до полного прекращения роста к 2010 г.

Такие различия не только привели к увеличению общей стоимости ядерной энергетiki, но и исказили стоимостную структуру распределения ресурсов в сторону усилий и систем, которые не требуются в реакторах с фундаментальной безопасностью и стандартной конструкцией. Из-за усиления роли безопасности и регуляторного контроля все дополнительные системы и операции стали более сложными и дорогостоящими. Это зачастую приводило к ложному заключению: поскольку явная доля стоимости радиационной части АЭС не является доминирующей и составляет примерно 28 %, а стоимость реактора и того меньше, усовершенствование реакторов не даёт большого выигрыша. Так как ядерные реакторы являются центральным элементом АЭС и основным источником энергии и радиоактивности, почти все материалы, оборудование и системы становятся гораздо более дорогостоящими, зачастую в несколько раз, даже в случае более низкой функциональной эффек-

тивности или использования менее усовершенствованных материалов и компонентов.

Оценки показывают, что в АЭС на стоимость материалов приходится всего лишь несколько процентов от капитальных затрат. Этот показатель сильно отличается от большинства промышленно производимых продуктов, в которых он может составлять до 70 % полной стоимости; он указывает, что в экономике ядерной энергетiki имеется значительный простор для усовершенствований в рамках новой парадигмы.

Следуя парадигматическим вопросам и ответам (они здесь не рассматриваются, но по существу присутствуют: почему используется ядерная энергетика гражданского назначения, как лучше избежать известных проблем и достичь конкурентной рыночной эффективности при более детерминистических уровнях безопасности), мы приходим к архитектуре высокоуровневого решения для системы, снимающей кажущееся неразрешимым противоречие между ядерной безопасностью и экономичностью.

Прогресс в естественных науках и науках искусственного может поднять ядерную безопасность до уровня, невозможного или недоступного в прошлом. На базе значительно расширившихся знаний о ядерной безопасности и инцидентах, ошибочных действиях людей и институтов и неприемлемости последствий катастрофических аварий в совокупности с общим усилением тенденций к устранению рисков в современном обществе и с новыми технологиями и системами с низким выбросом углерода возникает потребность в фундаментальной ядерной безопасности, которая на детерминистическом, а не вероятностном уровне исключает большие выбросы радиоактивных материалов.

По фундаментальным причинам большие количества концентрированных и высокорadioактивных материалов не могут естественным образом образовываться в системах и циклах на Земле. Экстремально высокая плотность ядерной энергии, протекающая из сильных и слабых взаимодействий, представляет собой силу, которой материалы, сформировавшиеся или связанные в результате химических реакций, не могут противостоять и которую они не могут локализовать при высоких концентрациях или в случае больших количеств таких материалов. Мы можем и должны использовать ядерную энергию для мирных целей путём распределения и снижения концентрации энергии и радиоактивности до уровней, при которых может производиться полезная работа, однако они недостаточны для разрушения локализации в любых сценариях с правдоподобными стартовыми событиями.

Ядерная энергия — от научного открытия через инженерное внедрение и до промышленного использования — была освоена в течение всего лишь нескольких десятилетий с начала XX в. до его середины. Эта система, которая фундаментально базируется на природных силах и законах, является полностью рукотворной; она была разработана и применена в условиях ограниченного времени и ресурсов на основе неполной, а зачастую и ошибочной информации и представлений. С другой стороны, у живых организмов, людей и общественных институтов не было достаточного времени для эволюционной выработки адекватных стратегий и механизмов противодействия высоким уровням радиации, как не было времени у отрасли и институтов ядерной энерге-

тики для испытания и тестирования приемлемых комбинаций и конфигураций, для того чтобы стать устойчиво конкурентоспособными и реализовать свой экстраординарный потенциал.

Анализ надёжности людей в рамках вероятности оценки рисков (Probability Risk Assessment — PRA), применяющийся в ядерной отрасли и регуляторными органами (см., например, [85, 86]), показывает, что вероятность аварии, вызванной ошибками человека, не очень велика и может иногда быть доминирующей в полном показателе вероятности, если вероятность механической аварии на АЭС запроектирована на чрезвычайно низком уровне (который, однако, не может быть проверен каноническими научными методами, а основывается на транснаучных суждениях).

Щедрый подарок природы состоит в том, что деление ядер может спонтанно начаться в легкодостижимых условиях. Это, однако, не только делает ядерную энергетику возможной, но и представляет реальную угрозу катастрофических аварий, при которых достаточные количества делящихся материалов оказываются вне контроля. Следовательно, необходимо предотвращать распыление ядерных материалов и радиационное заражение. Кроме того, делящиеся материалы должны постоянно находиться в субкритических условиях, за исключением тех периодов времени, когда они поддерживаются в критическом состоянии во время работы и находятся под строгим контролем. Это означает, что при использовании в мирных целях реактор ни при каких обстоятельствах не должен в значительной степени терять свою структурную целостность. Если такая авария происходит в некоторых конструкциях специального назначения, например, в компактных системах для перемещения, при продолжении или расширении использования уже построенных АЭС, то проект должен предусматривать эффективную борьбу с распространением радиоактивных материалов и их локализацию на основе реализации и использования адекватных допусков и систем резервирования, полностью построенных на непровержимых законах природы [87].

Исходя из приведённых рассуждений уровни безопасности ядерных энергетических систем можно определить следующим образом:

I. Фундаментальная безопасность: отсутствие неуправляемых цепных реакций, разрушения топлива или активной зоны реактора, значительных выбросов радиоактивности, радиологических последствий за пределами АЭС. В более простых терминах: безопасность в части реактивности и радиоактивности детерминистическим образом обеспечиваются конструкцией в любой момент времени.

II. Радиационная безопасность: отсутствие расплавления топлива, низкая вероятность повреждения топлива или расплавления активной зоны реактора, отсутствие самоорганизующихся конфигураций для повторного возникновения критичности, отсутствие больших неконтролируемых выбросов радиоактивности и ограниченные радиологические последствия за пределами АЭС.

III. Вероятностная безопасность: низкая вероятность разрушения топлива или активной зоны реактора, расплавления активной зоны реактора или серьёзного досрочного отключения, потенциальные запроектные аварии (Beyond Design Basis Accident — BDBA) с возможными крупномасштабными выбросами радиоактивно-

сти и обширные радиологические последствия за пределами АЭС (уровень безопасности, предусмотренный нынешней парадигмой).

С точки зрения науки и транснауки или науки искусственного мы признаём, что высокая плотность ядерной энергии и критическая масса определяются природой и могут быть установлены наукой, но не могут быть ею изменены, тогда как плотность мощности и полная мощность реактора являются рукотворными величинами и могут выбираться при проектировании. В прошлом мы выбирали определённые конструкции и смогли использовать ядерную энергию для получения значительной части электричества за низкими выбросами углерода в течение почти трёх четвертей столетия, накопив на этом пути знания и достижения. Однако опыт показывает, что этот выбор более не является адекватным или пригодным для общества и рынков как в настоящее время, так и в обозримом будущем.

Мы можем и должны сейчас произвести иной выбор конструкций, основываясь на текущем состоянии и предсказуемом прогрессе в естественных науках и науках искусственного, чтобы идти в ногу с прогрессом и потребностями нашего времени. Принимая во внимание ограниченность времени и ресурсов, нам следует начать с удовлетворительного выбора, который сможет оживить ядерную энергетику гражданского назначения с широкой перспективой и возможностями для будущего развития, поставить высокие цели и вдохновляющие задачи, набрать импульс и расти в размерах со скоростью, соответствующей амбициозным климатическим целям для нескольких последующих десятилетий. Мы получим тогда больше времени и ресурсов для дальнейшего продвижения науки и постепенной разработки всё более оптимизированных комплексных устойчивых решений, идя по пути инновационных комбинаций.

В этом состоит рациональное применение байесовского подхода к обновлению выбора на базе открытий и появления новой информации. К сожалению, ядерная отрасль проявляла чрезмерную консервативность при встрече с множеством постоянно возникающих новых фактов и медлительность в корректировке конструкций для отражения в них нового знания. Отдача от многих постепенных и аддитивных усовершенствований давно уже уменьшилась и стала отрицательной.

В связи с введением понятия фундаментальной безопасности вместо общеизвестного и общепринятого термина "естественная безопасность" (inherent safety) требуются определённые разъяснения. Система или процесс обладают естественной безопасностью, если уровень опасности в случае отклонения от нормы не высок. Но что такое невысокий уровень? Нам известны конструкции реакторов с крайне низкой вероятностью повреждения активной зоны реактора, с большими выбросами радиоактивности, которые претендуют на то, чтобы считаться обладающими естественной безопасностью. Очевидно, что при таком подходе к проектированию потеря материальных ценностей или деградация окружающей среды считались видами опасности низкого уровня. В соответствии с приведённым определением фундаментальная безопасность устанавливает, что полная потеря материальных ценностей и обширное радиоактивное загрязнение должны быть исключены самой конструкцией, и это достигается путём обеспечения целостности конструкций, а также локализации радио-

активности на принципиально самом низком возможном масштабе с помощью тщательного учёта действующих фундаментальных взаимодействий и сил.

5.4. Новая парадигма с фундаментально безопасными и промышленно производимыми ядерными энергетическими модулями

В рамках новой парадигмы будут проведены конкретные испытания и созданы эталонные технологии и системы, которые дадут ответы на парадигматические вопросы с новыми системными перспективами и задачами, перестроенными конфигурациями реакторов, АЭС, приложений, отраслей, цепочек поставок и рынков и значительно расширенными конкурентными предложениями. Они включают следующие позиции:

1. Прочное топливо:

- целостность механизма локализации поддерживается при всех разумно вообразимых нештатных ситуациях для большинства делящихся материалов и продуктов деления "от колыбели до могилы", если эта задача является достижимой;

- отсутствие реалистичных механизмов или путей для крупномасштабных утечек радиоактивных материалов в случае серьёзных инцидентов.

2. Реакторы, защищённые от расплавления:

- целостность активной зоны реактора сохраняется при всех разумно вообразимых нештатных ситуациях и реалистичных иницирующих событиях;

- обеспечение безопасности людей, окружающей среды и материальных ценностей;

- гибкость работы с разнообразными видами генерации энергии, обеспечивающими различные приложения для расширения охвата рынка.

3. Дифференцированные конструкции:

- минимизированный доступ к специальным ядерным материалам и технологиям на физическом и институциональном уровнях;

- выбор целей, направленных только на гражданское применение, с исключением функций и применений двойного назначения.

4. Промышленное производство систем:

- стандартные модульные конструкции, пригодные для серийного или массового производства, включая широкое использование источников материалов и компонентов, относящихся к общим цепочкам поставок;

- производство модулей на заводах, транспортировка и сборка на месте с использованием легкодоступного оборудования и инфраструктуры.

5. Проектирование систем:

- детерминистическое исключение аварий с локализацией всех реалистичных серьёзных инцидентов (внешняя локализация в том виде, в каком она разрабатывается в настоящее время, или локализация источника при использовании новых форм топлива);

- высокоэффективная платформа строительства, внедряемая в совокупности с соответствующими технологиями, рабочей силой, институтами и цепочками поставок (такая всесторонняя приёмка равноценна превращению строительной отрасли в производственную).

6. Продукты и услуги или привлекательные предложения:

- гибкое производство мощности с электрической нагрузкой от базисной до пиковой;

- теплота, используемая для промышленных целей, "зелёный" водород, опреснение и прочее;

- хранение энергии в течение суток, квартала, года и десятилетия (в качестве стратегического резерва).

Принципы конструирования реактора, обладающего фундаментальной безопасностью (в отличие от характеристик конструкции, построенной на наработке на отказ), которые основываются на ключевых отличиях ядерной энергии от химической, можно кратко сформулировать следующим образом:

- 1) после выключения реактора остаточное тепло должно отводиться неопределённое время без разрушения топлива;

- 2) коэффициент реактивности должен быть отрицательным или близким к нулю во всех эксплуатационных и переходных условиях;

- 3) уровни безопасности выбираются приемлемыми для владельцев, пользователей, инвесторов и приложений.

Такие требования означают следующее:

- 1) ограничение плотности мощности реактора и полной мощности, их снижение по сравнению с нынешними уровнями;

- 2) конструкции с большой мощностью и значительно ослабленными параметрами активной зоны реактора должны обеспечивать естественную безопасность, которая не может подвергаться риску в результате сбоя в работе оборудования или вмешательства человека;

- 3) реакторы разрабатываются, строятся и работают в качестве генераторов мощности как при нормальной эксплуатации, так и после выключения, а также в качестве системы для хранения энергии со сроками службы, исчисляемыми годами или десятилетиями, при наличии и соблюдении мер безопасности и средств обеспечения.

Смена парадигмы может привести к существенному снижению или устранению рисков и к росту выгод и отдачи. Обычные АЭС характеризуются очень неблагоприятным финансовым профилем с большими авансовыми вложениями капитала, длительным сроком до получения доходов и всё более неблагоприятными нормами прибыли, тогда как появление конкуренции может предсказуемым и быстрым образом снизить затраты. Более важно, что профиль рисков и отдачи имеет тенденцию к появлению "чёрных лебедей", а именно, отличается ограниченными позитивными результатами в периоды нормальной эксплуатации и очень глубокими катастрофическими последствиями в случае негативного развития ситуации, которые намного перевешивают общую экономическую ценность.

Реакторы новой парадигмы, сконструированные на уровне безопасности I или II, могут резко изменить неблагоприятный профиль рисков и вознаграждений. Риски, связанные с такими новыми реакторами, ограничиваются в случае нежелательной ситуации обычными промышленными инцидентами и авариями, однако, благодаря их повышенной надёжности и стабильности в предоставлении чистой и низкоуглеродной энергии, тепла и тяги, а также водорода с встроенным долгосрочным хранилищем энергии, они могут обеспечить очень высокую финансовую отдачу. Ядерная энергия превратится из неповоротливой и трудной в гибкую и лёгкую в использовании, устраняя риск, вызванный явлением "толстых хвостов", которые приводят к инцидентам, имею-

щим характер "чёрных лебедей", и, возможно, стать "антихрупкой" (antifragile) [88].

Например, при стихийных бедствиях, когда другие энергетические источники, поставки топлива или сетевые соединения прерываются и становятся недоступными или спрос "взлетает", ядерно-энергетические системы, основанные на новой парадигме, в состоянии предоставить требуемую мощность и тепло, в силу того что они продолжают функционировать в течение весьма длительного времени, поскольку в загруженном в них топливе хранятся большие запасы энергии, а сами АЭС находятся вблизи от конечных потребителей. Если при глобальном переходе к низкоуглеродной энергетике отказ от станций с генерацией электроэнергии на основе угля или газа и их закрытие наберут достаточный импульс для преодоления некоторой критической точки, то генерация и поставки мощности могут претерпеть внезапный коллапс. Новые ядерные АЭС, которые легко развёртываются и работают в гибком режиме, могут быстро заменить тепловые источники энергии с продолжением использования их инфраструктуры, для того чтобы удовлетворять существующие потребности и предотвращать "блокировку активов" и возникновение неудовлетворённых потребностей клиентов. В дополнение к исследованиям таких перспектив компании NuScale Power и TerraPower (поддерживаемые Биллом Гейтсом (Bill Gates) и Уорреном Баффетом (Warren Buffet)) планируют развернуть SMR новой конструкции для замены угольных электростанций или на тех местах, где они располагались ранее.

Используя слова Нассима Талеба (Nassim Taleb), можно сказать, что ядерные энергетические системы новой парадигмы потенциально могут стать антихрупкими и способными получать выгоду от возникающего беспорядка.

При учёте принципов конструирования, скорректированных в соответствии с уровнями безопасности I или II, АЭС могут отказаться от введения зоны отчуждения и зоны проектных аварий и сузить границы безопасности до территории ядерного объекта. Тем самым будет реализован исторический тренд повышения плотности мощности и полной мощности и уменьшения размеров реактора с добавлением и расширением структур локализации, зон отчуждения и зон проектных аварий. Эти усилия, направленные в противоположные стороны, взаимно компенсируют друг друга, так что они оказываются вдвойне бесполезными. Новые принципы конструирования позволят упорядочить распределение рисков и отдачи среди различных заинтересованных сторон — разработчиков, инвесторов, владельцев и пользователей, с одной стороны, и граждан и компаний, с другой, а также общества в целом. Это также поможет уменьшить эффективную поверхностную плотность мощности ядерной энергии, радикальным образом сниженную из-за потребностей в больших зонах отчуждения и зонах проектных аварий до величины, которая будет ниже такого показателя для возобновляемых источников энергии.

В нынешних и новых энергетических реакторах в ближайшем будущем проектная плотность мощности и полная мощность будут слишком высоки, чтобы детерминистическим образом исключить расплавление активной зоны реактора. Однако топливо в них может быть заменено с надёжной локализацией радиоактивности, а

не только на основе допусков для аварий с целью усиления безопасности с уровня III до уровня II. Это позволит использовать существующие АЭС в течение всего их срока службы или расширить эксплуатационный период при более низких затратах и за время, требуемое для проведения необходимой модернизации, более короткое, чем это возможно сейчас.

Выделение задачи повышения эффективности для ядерной энергетики гражданского назначения может следовать успешным примерам в других технологиях. Здесь можно упомянуть разделение пассажирских автомобилей и броневых автомобилей, коммерческих авиалайнеров и боевых реактивных самолетов, круизных лайнеров и авианосцев, ракет-носителей и баллистических ракет и др. Однако, как уже отмечалось, подавляющее большинство коммерческих энергетических реакторов было непосредственной адаптацией реакторов военного назначения и ядерных реакторов для получения ядерного горючего, в конструкции которых сохранялись значительные риски для безопасности и распространения ядерных материалов. Чёткое разделение должно и может быть произведено, и это необходимо сделать немедленно. По сути дела, именно к этому призывал Эйзенхауэр в своей речи "Атом для мира" [59]: "Недостаточно вырвать это оружие из рук военных. Оно должно быть поручено тем, кто знает, как оно может быть освобождено от военного назначения и приспособлено для целей мирного строительства". Нам всем следует прислушаться к этому провидческому призыву.

Как известно, ядерные материалы потенциально имеют двойное назначение. В случае применения в фундаментально безопасных реакторах они могут генерировать "чистую" электроэнергию без выбросов углерода, поставлять высококачественное технологическое тепло и производить "зелёный" водород, что в конечном счёте приведёт нас к миру и процветанию. Однако, если конструирование произведено иными способами, они могут сопровождаться катастрофическими авариями, производить радиоактивное отработанное топливо без полной защиты и локализации и оставаться открытыми для диверсий и неконтрольного распространения делящихся материалов, что закончится войной и страданиями. Мы можем сделать выбор в пользу конструирования систем ядерной энергетики гражданского назначения в новой парадигме, что обеспечит фундаментальную безопасность в промышленных системах, которые будут успешно конкурировать на рынке.

6. Тесты и предсказания новой парадигмы

У нас теперь имеется всё необходимое для проверки корректности, действенности и эффективности новой парадигмы. Мы воспользуемся примерами некоторых энергетических реакторов, запущенных в эксплуатацию, в качестве тестовых случаев и затем проведём ряд мысленных экспериментов и суррогатных тестов для получения предсказаний, которые могут быть проверены в будущем.

6.1. Частичные тесты на основе практического опыта

Плавучая АЭС (Floating Nuclear Power Plant — FNPP) "Академик Ломоносов", запущенная в декабре 2019 г., представляет собой один из новейших тестов одного типа SMR. На этой уникальной в своем роде (по

утверждению госкорпорации "Росатом") станции используются два реактора КЛТ-40С с электрической мощностью 35 МВт каждый, разработанных и спроектированных для генерации тепла и электроэнергии на основе хорошо зарекомендовавших себя ледокольных реакторов с использованием кораблестроительных технологий [89]. За реализацию проекта отвечает "Росэнергоатом", подразделение электроэнергетики "Росатома".

На двухконтурной станции используется корпусный PWR с принудительной циркуляцией теплоносителя в петлях первого контура. Топливом служит уран, обогащённый до уровня менее 20 %, в дисперсионных элементах типа гладких стержней в оболочке из циркониевого сплава, а в топливной сборке имеются стержни из выгорающего поглотителя (гадолиний) для компенсации чрезмерной реактивности на ранней стадии. Активная зона реактора характеризуется отрицательными коэффициентами реактивности по мощности и температуре во всём диапазоне изменения рабочих параметров в течение срока службы. На станции используются активная и пассивная системы защиты, включая автоматизированную систему с электроприводом и пассивную систему, в которой управляющие стержни в случае внештатных ситуаций вводятся в активную зону реактора под действием силы тяжести [90].

Основываясь на такой конструкции и мерах защиты с экспертной вероятностной оценкой безопасности, "Росатом" утверждает, что вероятность серьёзной аварии на FNPP составляет менее 10^{-7} на один год работы реактора, что на два порядка ниже величины 10^{-5} , принятой на ранее запущенных АЭС.

Интервал дозаправки ядерного реактора составляет три года; отработанное топливо хранится в бассейнах на палубе. Вся станция буксируется каждые 12 лет на верфь, где она была построена, для проведения её капитального ремонта. Срок службы станции составляет 35–40 лет.

Как сообщалось, полная стоимость станции возросла с первоначальной оценки примерно в 232 млн долл. США до 740 млн долл. США к 2015 г. Перед началом строительства объявленной датой пуска был октябрь 2010 г. Строительство станции было завершено, она была передана в эксплуатацию, отбуксирована на 5000 км по Северному морскому пути к пункту назначения, маленькому арктическому порту Певек, где и начала свою работу в 2019 г. Станция будет поставлять электроэнергию и тепло посёлкам и горнодобывающим предприятиям Чукотского региона.

Из-за сильного перерасхода бюджета и затягивания сроков "Росатом", согласно некоторым сообщениям, принял решение больше не развивать эту конструкцию и рассматривать модифицированную версию ледокольного реактора РИТМ-200. Является ли такая ситуация неудачным примером новой парадигмы?

Конструкция реактора КЛТ-40С обеспечивает безопасность по реактивности, но не детерминистическую безопасность по радиоактивности. Согласно приведённой классификации он относится к уровню безопасности II. В данном случае согласно российским стандартам и рекомендациям МАГАТЭ наличие гибридных резервных систем безопасности и систем аварийного реагирования и полной локализации является необходимым.

Станция была построена с применением судостроительных технологий на специализированной верфи, которая по идее является гораздо более производительной,

чем строительная площадка на месте. Является ли это проблемой первой в своём роде установки или системной проблемой проектирования?

Более подробный анализ и глубокое размышление позволяют выявить множество мест в проектировании и строительстве с существенно недостаточной эффективностью. Для реактора такого класса мощности гибридные резервные системы безопасности являются слишком тяжёлым довеском к сложности и стоимости. Вполне возможно было бы обойтись одной лишь пассивной системой защиты, как показывают — по крайней мере на концептуальном уровне — некоторые конструкции PWR и BWR гораздо более высокого класса мощности, такие как AP1000, ESBWR или SMR компании NuScale.

В случае АЭС, предназначенной для стационарного использования, привязка к плавучей платформе и локальная инфраструктура, сконструированная с целью предотвращения и снижения рисков, связанных с морскими условиями, увеличивают сложность и стоимость тех функций, которые вряд ли необходимы и редко используются.

Буксировка всей станции "туда и обратно" между местами постройки и использования для перезагрузки топлива и проведения капитального ремонта серьёзно усложняет логистику, увеличивает затраты и потенциально может лишить клиентов услуг в течение продолжительных периодов времени. В более специализированной и эффективной архитектуре транспортировке подлечит свежее и отработанное топливо, а также некоторые компоненты и материалы, требуемые для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, но не вся станция целиком. В силу этого функции и системы, необходимые для транспортировки и временной локализации, могут использоваться для обслуживания многих станций и площадок, что будет повышать уровень загрузки и снижать системные расходы.

Представляется, что такие источники неэффективности с крайне низкими уровнями загрузки, предназначенные для дорогостоящей транспортировки, и связанные с безопасностью функции и системы обрекают рыночные перспективы подобных конструкций на неудачу. Однако, как будет показано ниже, при анализе этой конструкции в новой парадигме можно выявить существенный потенциал для усовершенствования и роста.

Другими достойными внимания примерами промышленной демонстрации SMR, близких к завершению строительства, являются HTR-PM (HTGR) в Китае и CAREM (интегральный PWR) в Аргентине. Они в скором времени послужат новыми тестами концепции. Строительство небольшого реактора Linglong One с охлаждением обычной водой недавно началось в Китае.

Компания NuScale Power [91] впервые в истории получила одобрение Национальной регуляторной комиссии США (U.S. NRC) своей конструкции SMR для собственной АЭС. Каждый энергетический модуль, основанный на передовой PWR-технологии и топливе, генерирует 77 МВт электрической энергии в составе 12-модульной АЭС, полная мощность которой равна 924 МВт электрической энергии. Первая такая АЭС будет построена в Айдахо Фоллз в 2020-е гг., а получение мощности от первого модуля ожидается в 2029 г. Поскольку станция ещё не построена, оценка её экономичности была бы преждевременной. Тем не менее анализ, аналогичный тому, что был проведён для КЛТ-40С, может быть при-

менён к концепции станции, и сделанные заключения могут быть различными в силу значительных различий между проектом и его реализацией.

Во-вторых, реактор AP1000, впервые запущенный в 2018 г., представляет собой тестовый случай совершенно иного типа модульной конструкции АЭС, которая всё ещё сильно привязана к технологии строительства на месте.

Реактор AP1000 разработан и предлагается на рынке компанией "Вестингауз Электрик" (см., например, [92]). Он представляет собой PWR ведущего поколения III⁺ с чистым выходом 1117 МВт электрической энергии и улучшенным использованием пассивной защиты и многих проектных решений для упрощения конструкции, снижения капитальных затрат и повышения экономичности. Согласно сведениям компании "Вестингауз" количество компонентов в AP1000 уменьшено более чем на 85 % по сравнению с PWR той же компании поколения II, а теоретически максимальная вероятность разрушения активной зоны составляет $5,09 \times 10^{-7}$ на одну станцию в год.

В 2006 г. правительство Китая после проведения международного конкурса, продолжавшегося два года, выбрало AP1000 в качестве модели будущего национального энергетического реактора. В 2008 г. компания "Вестингауз" и её китайский партнер — Государственная корпорация ядерно-энергетических технологий (State Nuclear Power Technology Corporation — SNPTC) — начали строительство первых четырёх блоков, по два в Хайянь (Haiyang) и Саньмэнь (Sanmen), которые будут принадлежать двум национальным компаниям по ядерной энергетике и эксплуатироваться ими. Первый блок согласно планам того времени должен был быть закончен в 2013 г.

Ряд событий, включая ядерную катастрофу в Фукусиме в 2011 г., вызвал большие задержки и перерасход бюджетных средств, а многие проблемы, типичные для первых в своём роде конструкций и мегапроектов, включая постоянные изменения в конструкции, не имеющую опыта рабочую силу, неустановившиеся цепочки поставок и плохо функционирующее оборудование, приобрели невиданные масштабы. Как сообщалось, первый блок был запущен в 2018 г. с превышением стоимости на 1,46 млрд долл. США по сравнению с первоначальной сметой в 5,84 млрд долл. В 2019 г. второй блок был остановлен вскоре после запуска из-за сбоев в работе насоса теплоносителя реактора. Такое множество нештатных ситуаций серьёзно ухудшило рыночные перспективы AP1000 и привело к изменению выбора конструкции на многих запланированных объектах.

Строительство еще четырёх AP1000 началось в США в 2012 и 2013 гг., по два блока в местечке Вогтль (Vogtle) в штате Джорджия и Самнер (Sumner) в штате Южная Каролина. Превышение сметы и нарушения графика в конечном счёте заставили владельцев остановить проект Самнер в 2017 г. Сметные капитальные затраты по проекту Вогтль возросли с первоначальных 14 млрд долл. США до примерно 25 млрд долл. в 2018 г. После череды многочисленных задержек недавно было объявлено о новой задержке, в результате чего срок завершения с первоначально запланированных 2016 и 2017 гг. был перенесён на 2022 г. Компания "Вестингауз" в 2017 г. подала прошение о защите от кредиторов согласно закону о банкротстве из-за потери в этих двух проектах

9 млрд долл., что вынудило её материнскую компанию "Тошиба" списать миллиардные убытки и продать ценные активы и бизнес.

Широко разрекламированная система пассивной защиты и упрощённые модульные конструкция и строительство AP1000 не возродили к жизни существующую парадигму ядерной энергетики. Однако эти проекты дали несколько ценных уроков относительно того, чего не должно быть в новой парадигме.

Система пассивной защиты AP1000 является гораздо более усовершенствованной по сравнению с активными системами в конструкциях поколения II. При этом компактная конструкция активной зоны реактора с высокой плотностью мощности и большой полной мощностью характеризуется низкой вероятностью ошибки. Ресурсы и усилия, потраченные на повышение эффективности АЭС, в особенности её экономичности, сводятся на нет ресурсами и усилиями, направленными на предотвращение сбоев, обусловленных проектированием и эксплуатацией вблизи предельных значений, а затем на ослабление и локализацию последствий в случае возникновения необратимой последовательности инцидентов. Продолжительность интервала в 72 ч без необходимости вмешательства оператора после аварии в AP1000 представляет собой огромный шаг вперёд после минут или часов, которые обеспечивались более старыми конструкциями, и всё же реактор AP1000 мог выйти из строя или быть необратимо повреждён при аварии в Фукусиме, где электроэнергия за пределами площадки отсутствовала от 11 до 15 суток. Риск, присущий конструкциям с уровнями защиты II или III, мог бы быть сбалансирован потенциальными выгодами и соглашением среди заинтересованных сторон. Представляется, что до настоящего времени такой подход не является широко принятым на рынке, а ограничивается в основном несколькими решениями национальных правительств, государственных компаний или поставщиков ресурсов на регулируемых рынках.

Модульная конструкция и проект этого реактора не смогли обеспечить ни нужного результата, ни эффективности. При построении систем общего назначения со структурами, выполняющими сложные функции, модульность служит важной цели упрощения и ускорения проектирования и внедрения путём выделения вспомогательных функций в модули с хорошо определёнными входами, выходами и интерфейсами. Такой подход является экономически эффективным, если он воспроизводится и применяется многократно.

АЭС, напротив, выполняют сравнительно простую и очень конкретную функцию поставки электроэнергии, обычно в сетевые соединения, что может производиться многими простыми системами. Крайне сложные энергетические системы по своей природе не являются эффективными, поскольку каждый компонент или система может приводить к потерям без добавления стоимости. Крупные АЭС с очень большими компонентами не могут производиться в больших количествах и транспортироваться в значительное число мест без крупномасштабной транспортной инфраструктуры и средств транспортировки, что и не требуется ввиду ограниченности общего спроса.

Если быстрое воспроизведение в больших количествах в реальности невозможно, то модульность конструкции осуществляется путём построения на месте

фабрики модулей, которая используется только один или два раза. Такой подход является крайне неэффективным и расточительным. Подобные концепции проверялись в различных странах несколькими компаниями, и пока все результаты оказались обескураживающими.

Хотя такие частичные тесты ещё не подтвердили правильность новой парадигмы, они высветили некоторые существенные дефекты в парадигме нынешней.

6.2. Закон Райта и значимость новой парадигмы

Влияние объёма выпуска изделий при промышленном производстве и зависимость прибыли за счёт эффекта масштаба в системах генерации от технической производительности и экономической эффективности можно оценить в количественных терминах с использованием закона Райта и экономии за счёт масштаба структурной единицы или модуля. Этот подход кратко описывается и применяется ниже, начиная с объёма производства.

В 1920-е гг. авиационный инженер Теодор Райт (Theodore Wright) установил, что при каждом суммарном удвоении числа выпущенных самолётов происходило постоянное снижение издержек, в процентном выражении на примерно 15 % [93]. Толчком, побудившим его опубликовать результаты исследования, начатого в 1922 г., стала спонсируемая программа разработки маленького двухместного самолёта, который мог бы продаваться по очень низкой цене при условии, что возможный объём его производства составит 10 тыс. штук. Такая связь, как будет показано ниже, и является основным моментом и законом, необходимым для новой парадигмы ядерной энергетики гражданского назначения.

Одной из разновидностей закона Райта, представленного в терминах времени, а не объёма производства (применимого, хотя и ошибочно, когда скрытый спрос заметно превосходит предложение, и за ним соответственно следуют капиталовложения), стал самый известный закон для понимания будущего. В 1965 г. Гордон Мур (Gordon Moore) обратил внимание на количество транзисторов в чипах, производимых компанией Fairchild Semiconductors, и заметил, что их количество удваивается каждый год. Он предсказал, что такой экспоненциальный рост будет продолжаться не менее 10 лет с сокращением вдвое стоимости компьютерных вычислений при каждом удвоении плотности транзисторов. Отмеченная закономерность, которая стала известна как закон Мура, продолжает действовать в течение гораздо более продолжительного времени. Начиная с 1971 г. количество транзисторов в чипе действительно удваивается каждые два года, увеличившись в результате с одной штуки до невообразимого числа 19,2 млрд.

Закон Райта может быть представлен математически в виде

$$c = c_1 N^{-w}, \quad (1)$$

где c — кумулятивная средняя стоимость (или время) в пересчёте на единицу продукции, N — кумулятивное число произведённых единиц, c_1 — затраты (или время), необходимые для производства первой единицы продукции, w — обратный наклон функции издержек в дважды логарифмических координатах, который определяется по величине процента снижения при каждом удвоении и составляет 0,15 для 10%-ного снижения при каждом

удвоении и 0,23 при 15%-ном снижении. В законе Мура, согласно которому затраты уменьшаются вдвое при каждом удвоении производства, $w = 1$. Все данные по затратам приводятся с поправкой на инфляцию.

Рассмотрим теперь пример КЛТ-40С с удельными капитальными затратами $c_1 = 10,57$ долл. США за Вт (740 млн долл. за 70 МВт). Этот показатель не является конкурентоспособным на нынешнем рынке. Однако если целевую стоимость установить равной 4 долл. за Вт, аналогично стоимости электроэнергии на газотурбинных электростанциях, то она становится конкурентоспособной из-за гораздо более высокого коэффициента использования оборудования (примерно в два раза) и низкой стоимости топлива, которая составляет крайне малую долю в общей стоимости электроэнергии, даже до включения стоимости выбросов углерода. Можно определить, сколько блоков должен выпустить госконцерн "Росатом", чтобы достичь уровня безубыточности и выйти на прибыль.

Для простоты при объяснении центрального момента мы используем статические расчёты издержек (все с поправкой на инфляцию) и отдачи и устанавливаем снижение затрат на 10 % при удвоении объёма производства, что является консервативной оценкой на нижнем конце шкалы по более чем 60 технологиям.

В соответствии с законом Райта при числе блоков 1024, или после 10 удвоений объёма производства, линия по выпуску КЛТ-40С выйдет на прибыль с кумулятивными средними затратами 3,69 долл. за Вт, что составляет снижение на 65 % по сравнению со стартовым уровнем издержек. Полная установленная мощность будет составлять 71,68 ГВт электрической энергии с полной стоимостью в 264 млрд долл. и чистой прибылью в 22,5 млрд долл. Кумулятивные издержки вначале будут возрастать, достигнут пика (при числе блоков 256), равного 9,87 млрд долл., после чего начнут быстро снижаться. Для крупной корпорации с хорошей капитализацией такая задача вполне решается.

При применении того же подхода к реактору AP1000 в США с $c_1 = 11,19$ долл. за Вт (25 млрд долл. за 1117 МВт) выход на рентабельность произойдёт при числе блоков 1024 с кумулятивными средними затратами 3,90 долл. за Вт. До этого момента все показатели выглядят так же, как и для реактора КЛТ-40С. Однако полная установленная мощность будет составлять 1144 ГВт или 1,144 ТВт при полной стоимости в 4463 млрд долл., при которой полная выручка равна 112 млрд долл. на уровне 3 %, а пик кумулятивных убытков, составляющий 234 млрд долл., достигается при числе блоков 256. Эти значения могут показаться нереалистичными даже для самых крупных и богатых стран в мире. Однако они могут быть реализованы в рамках целенаправленной и последовательной национальной или международной программы декарбонизации, когда на кону стоят триллионы.

Такой сценарий может быть значительно улучшен при гораздо более низком уровне издержек, достигнутом в Китае, с показателем $c_1 = 6,54$ долл. за Вт. Полные издержки для получения 1144 ГВт составляют 2606 млрд долл. при кумулятивной средней стоимости 2,28 долл. за Вт, прибыли — 1969 млрд долл. на уровне 76 % и пике кумулятивных убытков при количестве блоков, равном двум, после всего лишь одного удвоения, на уровне 3,474 млрд долл. — если такое количество АЭС будет запланировано, одобрено и построено.

На практике в текущей парадигме строительства невозможно последовательное или широкое обучение. Снижение издержек в результате обучения или накопления опыта прекращается при переходе к каждому новому проекту на новом месте с использованием другого менеджмента и другой рабочей силы. На одной площадке может и должно строиться и эксплуатироваться лишь несколько блоков гигаваттного уровня в силу соображения безопасности, регуляторных ограничений, локального перепроизводства энергии и падения цен, а также большой нагрузки и убытков, связанных с передачей электроэнергии. Таким образом, хотя в ряде национальных ядерных программ при строительстве на одной площадке нескольких блоков было достигнуто снижение издержек до уровня 20–40 % для более поздних блоков, которые строились практически одновременно с использованием той же конструкции, экономия за счёт масштаба структурной единицы или строительства исторически не была достигнута ни в одной национальной отрасли ядерной энергетики в мире. Это заключение также даёт определённое обоснование для ожидаемого снижения затрат в новой парадигме.

Более экономичным и реалистичным вариантом представляется производство и развёртывание гораздо большего количества реакторов КЛТ-40С (после определённого улучшения полной эффективности системы). В случае справедливости закона Райта вплоть до числа блоков 16384, или после 14 удвоений объёма производства, полная установленная мощность достигнет 1147 ГВт аналогично сценарию с AP1000, описанному выше. При этом полные издержки составят примерно половину при величине 2294 млрд долл., с кумулятивной средней стоимостью 2,42 долл. за Вт, в результате чего полная прибыль составит 1814 млрд долл., или 65 %, что является огромным достижением по сравнению с вариантом для AP1000 с всего лишь 3 % прибыли в этой точке. Описанная ситуация служит отражением более быстрого обучения и усовершенствования на таких существенно меньших блоках.

При данном масштабе развёртывания блоков вероятность аварий с разрушением активной зоны реактора становится существенной. В случае КЛТ-40С со сроком службы каждого реактора в 40 лет 1024 блока дадут в сумме 40960 лет работы станций и вероятность аварии $4,1 \times 10^{-3}$ для всего парка за полное время службы реакторов. Источник радиоактивности при этом будет существенно меньше, поскольку мощность каждого блока составляет всего лишь 70 МВт, в отличие от мощности 1000 МВт, типичной для предлагаемых на рынке и строящихся сейчас коммерческих энергетических реакторов. При полном числе блоков 16384 полная вероятность серьёзной аварии составляет $6,6 \times 10^{-2}$, или 6,6 %.

В случае AP1000 с несколько более высокой вероятностью разрушения активной зоны реактора вероятность серьёзной аварии для парка из 1024 реакторов в течение срока службы в 60 лет составляет 3×10^{-2} , или 3 %. Источник радиоактивности при этом значительно больше.

В случае реализации и развёртывания такого большого количества реакторов вероятностная оценка безопасности может быть проверена и подтверждена на более научной базе.

Таким образом, реакторы SMR продемонстрировали значительные преимущества в части одновременного

улучшения как безопасности, так и экономичности ядерной энергетики по сравнению с крупными АЭС при существенно более низких издержках и высоких прибылях, системной безопасности более высокого уровня, а также гораздо меньшими по масштабу последствиями аварий.

Применяя этот подход и далее, мы оценим вариант АЭС с 10-МВт микрореактором (MR). Сначала мы зададим для него "плохие" стартовые условия с $c_1 = 15$ долл. за Вт, но качественно иным профилем безопасности с нулевой вероятностью разрушения активной зоны реактора или крупного выброса радиоактивности, который обеспечивается его конструкцией с фундаментальной безопасностью уровня I. В зависимости от местных условий такие реакторы могут устанавливаться в виде отдельных блоков или больших кластеров. Им не требуется зона отчуждения или зона проектных аварий даже в случае крупных АЭС со многими модулями: если такие зоны не требуются для одного модуля, то они не нужны и при любом числе модулей.

При количестве блоков 114400, или между 16 и 17 удвоениями объёма производства, полная установленная мощность составит 1144 ГВт, аналогично сценарию с КЛТ-40С и AP1000, рассмотренным выше. Полная стоимость составит 2943 млрд долл. при кумулятивной средней стоимости 2,55 долл. за Вт, прибыли 1633 млрд долл. на уровне 55,5 % и пике кумулятивных убытков в размере 14,5 млрд долл. при 2048 блоках после 11 удвоений объёма производства. Вероятность серьёзной аварии равна нулю. Такая схема даёт возможность построить большую новую отрасль с ежегодным доходом свыше 100 млрд долл. США в течение двух десятилетий.

Если стартовую точку улучшить до показателя $c_1 = 10$ долл. за Вт (аналогично КЛТ-40С и AP1000) за счёт усовершенствования после демонстрации, то перспективы станут ещё более радужными. Полная мощность будет по-прежнему составлять 1144 ГВт, однако суммарные издержки упадут до 1962 млрд долл. при кумулятивной средней стоимости, снизившейся до 1,70 долл. за Вт, прибыли, возросшей до 2614 млрд долл., или 133 %, и пике кумулятивных убытков 1 млрд долл. при 128 блоках после семи удвоений объёма продукции.

При возможности обеспечения 15%-ного снижения затрат на каждом удвоении объёма производства, что соответствует среднему или высокому показателю исторического диапазона для других технологий аналогичного масштаба и степени сложности, результат становится энергетическим чудом. Суммарные издержки для достижения мощности 1144 ГВт снижаются до 1132 млрд долл. с падением кумулятивной средней стоимости до 0,65 долл. за Вт, ростом прибыли до 3444 млрд долл., или 304 %, и пике убытков в размере всего лишь 1,06 млрд долл. при 64 блоках после шести удвоений объёма производства. Своевременная декарбонизация больших сегментов глобальной экономики уже представляется достижимой.

Следуя описанному подходу, можно произвести более детальный, систематический, весторонний и динамический анализ. Однако общий качественный вывод уже ясен. Появился уверенный путь глобального решения для борьбы с климатическими изменениями в требуемом масштабе и за необходимое время. Он стал возможным и реализуется при массовом промышленном

производстве модульных систем, разработанных с гарантированной фундаментальной безопасностью в рамках новой парадигмы ядерной энергетики гражданского назначения.

Новая парадигма позволяет значительно ускорить освоение достижений в технологии и материалах, скорее выходить на новые приложения и рынки и гораздо быстрее и предсказуемым образом снижать затраты и расширять мощности. Малые блоки делают возможным установление всех связей в цепочках поставок и в инфраструктуре, масштабирование параллельным и непрерывным образом и извлечение выгоды из позитивного и выигрышного укрепления обратной связи. Говоря проще, парадигма будет укрепляться и органически развивать экосистему. Она может стать поистине великой инновацией, направляемой действующими и эффективными законами в требуемом направлении; при этом она строится шаг за шагом для продолжения открытий и достижений с целью предотвращения потенциально катастрофических событий, которые с неизбежностью проистекают из неполноты знаний, ограниченности навыков и подверженности человека ошибкам.

6.3. Внедрение экономии за счёт структурной единицы

Мы можем в ещё большей степени уточнить и усовершенствовать ряд конкретных аспектов и подходов в новой парадигме. Можно рассмотреть две её стороны — масштаб структурной единицы и содержание конструкции. Для того чтобы ограничить объём настоящего обзора, мы сконцентрируемся на масштабе структурной единицы.

К экономии за счёт роста масштаба производства стремились для сокращения всех — практически без исключений — издержек в течение десятилетий во всех производственных секторах. Это находит своё убедительное подтверждение в законах Райта и Мура. Однако что определяет оптимальный или предпочтительный масштаб структурной единицы?

Если в электроэнергетике рассматривать электроны как единицы производства электроэнергии, то представляется логичным и рациональным строить электростанции как можно большего размера. Такое заключение имеет смысл, когда остальные факторы, как, например, имеющиеся возможности, мощности, ресурсы и инфраструктура для производства, доставки, транспортировки, сборки и строительства; распределения спроса и потери при передаче; допуски на риски, связанные с институтами и обществом, и их приемлемость; политическая воля и требования справедливости и др., столь незначительны, что не влияют на расширение объекта. Существуют внутренние ограничения на то, насколько далеко может простираться увеличение производства энергии, связанное с масштабом, перед тем как оно начнёт уменьшаться. В случае энергетических систем ограничения на размеры и мощность системы определяются приемлемым уровнем безопасности.

В рамках таких ограничений базовый экономический масштаб проистекает из масштаба потребностей в материалах. В случае тепловых электростанций выделение тепловой энергии и реакции преобразования являются волнометрическими: они происходят по всему объёму, в котором они имеют место. Таким образом, отношение поверхности к объёму масштабируется с показателем степени $2/3$ для сферических структур

(резервуаров) и $1/2$ для цилиндрических структур (цилиндры, трубы). Масштабирование такого рода позволяет получить общую формулу для полной стоимости оборудования:

$$c_1 = c_0 V^s, \quad (2)$$

где c_0 — коэффициент, зависящий от конструкции, V — эффективный объём оборудования или системы, $s \approx 0,6$ — показатель степени. Это известное "правило 0,6", применяющееся для инженерных оценок стоимости [94]. В случае энергетических систем оно может быть представлено в виде $c_1 = c_0 (P_{\text{unit}}/P_{\text{density}})^s$, где P_{unit} — расчётная мощность каждого блока, P_{density} — эффективная плотность мощности (усреднённая по всему объёму блока, а не только по объёму выделения энергии).

Более детальный анализ промышленных данных показывает, что показатель степени масштабирования варьируется от 0,21 до 1,26. В случае $s < 1$ размеры оборудования и систем следует увеличивать. Величина $s = 1$ соответствует отсутствию выгоды от масштаба. Показатель степени $s > 1$ означает дисэкономии от масштаба, что побуждает уменьшать размеры систем и оборудования. Как уже отмечалось, у ранних паровых турбин показатель степени был значительно меньше единицы (был близок к $1/4$), создавая сильные стимулы для постройки как можно более крупных турбин, что, возможно, оказало сильное влияние на проекты электростанций, работающих на угле, и АЭС.

Исторические данные по капитальным затратам на АЭС, в особенности в США и других развитых странах, показывают, что показатель степени превосходит единицу [4]. Этот эмпирический факт свидетельствует о том, что рост проектной мощности коммерческих энергетических реакторов давно вышел на режим дисэкономии от масштаба в дополнение к увеличению размеров источников радиоактивности и усилению эффектов аварий и их последствий. Ранние исследования экономии масштаба, проведённые среди американских компаний, генерирующих электроэнергию, показали, что в 1955 г. наблюдалась существенная экономия за счёт масштаба, а к 1970 г. значительная часть электроэнергии в США производилась компаниями, которые работали на фактически плоском участке кривой средних расходов [95]. Стремление к экономии за счёт масштаба уже давно достигло своих пределов как для технологических систем, так и для экономических организаций.

При этом следует отметить некоторые тонкие моменты. В отличие от волнометрических реакций и соответствующих технологий и систем, существуют реакции, происходящие исключительно или в основном на границах раздела фаз. К типичным межфазным технологиям и системам относятся фильтрация, испарение, конденсация, проводимость, излучение, парогенерация, фотоэлектрические процессы, электрохимические или каталитические реакции, на которых основана работа фотоэлектрических ячеек, аккумуляторов, топливных элементов, каталитических конвертеров, сверхпроводников, 2D дисплеев и др.

Скорость реакции или пропускная способность таких систем пропорциональна площади их сечения или границы между фазами, так что максимальный показатель степени масштабирования равен единице. На практике он даже слегка меньше единицы из-за краевых эффектов и необходимости в поддержке и опоре для структуры,

что благоприятствует созданию более крупноразмерных блоков. Инженерные разработки и проектирование фокусируются для таких технологий и систем на том, чтобы сделать все нефункциональные структуры максимально тонкими с практической точки зрения, а объёмные элементы (подложки) — самыми малыми, приближая тем самым показатель степени к единице. Здесь также имеется важное ограничение, в особенности в аккумуляторах и иных системах для хранения и генерации энергии, связанное с плотностью мощности и её влиянием на безопасность.

Следует также отметить, что, поскольку экономия от масштаба структурной единицы мала, многие такие технологии и продукты для повышения экономичности основываются на масштабе производства и непротиворечивым, а иногда и предсказуемым образом (закон Мура) добиваются одновременно и снижения затрат, и повышения производительности. Неспособность или отсутствие необходимости в производстве больших блоков на раннем этапе, или внутренние потребности рынка в производстве большого количества блоков малого или требуемого размера помогли подобным технологиям расширяться и очень быстро развиваться в соответствии с законом Райта путём воспроизводства продукции в массовом масштабе.

Ситуация становится сложной и запутанной в случае экономии за счёт масштаба структурной единицы. В этом случае требуются компромиссы. Погоня исключительно за таким способом экономии может оказаться разрушительной для лежащих в её основе технологий и систем [4]. Было установлено, что соответствующий максимальный размер блока может дать предсказание для рыночных жизненных циклов практически всех преимущественно волюметрических технологий и систем генерации мощности в соответствии с логистическими кривыми роста. Этот универсальный закон предоставляет количественные инструменты для выявления тенденций и прогнозирования будущего развития [84].

В теплоэнергетических системах наряду с химическими и ядерными реакциями, происходящими в объёме вещества, имеются теплообменники и парогенераторы, в которых процессы идут в основном на границе раздела фаз. Если объёмы (и соответствующие значения плотности мощности и полной мощности) слишком велики для имеющихся поверхностей, то система будет перегреваться и выйдет из строя. Волюметрические энергетические системы также имеют внутренние ограничения на масштаб структурной единицы, и в них не всегда "большее" является синонимом "лучшего".

В пределах, устанавливаемых требованиями безопасности, технологичности, транспортируемости или осуществимости строительства, эмпирические данные демонстрируют различные значения показателя степени, которые зачастую возрастают при увеличении масштаба структурной единицы. Это наблюдение является указанием на уменьшение отдачи при увеличении масштаба и возможное существование некоторого масштаба структурной единицы, требуемого для повышения экономичности и усиления защиты. Такой подход отличается от выбора "правильного" размера, при котором масштаб структурной единицы выбирается на основе требований конечного использования.

Таким образом, показатель степени масштаба структурной единицы может варьироваться в определённом

диапазоне и не всегда оказывается меньше единицы, что может благоприятствовать увеличению масштаба.

Теперь мы можем рассмотреть комбинацию масштаба структурной единицы и объёма производства для оценки и прогнозирования оптимальной стратегии.

Полная стоимость производства конструкции для достижения целевого значения полной мощности P_{total} составляет $c_{\text{total}} = cN_{\text{total}}$, где $c = c_1 N_{\text{total}}^{-w}$ является кумулятивной средней стоимостью на единицу продукции, $c_1 = c_0 V^s$ — стоимость первой единицы продукции на основании экономии за счёт масштаба, $N_{\text{total}} = P_{\text{total}}/P_{\text{unit}}$, $V = P_{\text{unit}}/P_{\text{density}}$, где P_{density} — эффективная плотность мощности всего блока (а не только объёма реакции, см. ниже).

Производя подстановки в выражение для закона Райта и в формулу экономии за счёт масштаба, можно вывести следующий закон масштабирования для полной стоимости:

$$c_{\text{total}} = c_0 V^s N_{\text{total}}^{-w} N_{\text{total}} = c_0 \left(\frac{P_{\text{unit}}}{P_{\text{density}}} \right)^s \left(\frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{unit}}} \right)^{1-w} = c_0 P_{\text{density}}^{-s} P_{\text{total}}^{1-w} P_{\text{unit}}^{-1+w+s}, \quad (3)$$

и кумулятивной средней стоимости:

$$c_{\text{avg}} = \frac{c_{\text{total}}}{N_{\text{total}}} = c_0 P_{\text{density}}^{-s} P_{\text{total}}^{-w} P_{\text{unit}}^{-1+w+s}. \quad (4)$$

При решении задач с ограничением по времени, таких как достижение определённых климатических целей к середине столетия, полезно преобразовать закон Райта для временной развёртки.

Для того чтобы высветить ключевую динамику в простейшем виде, мы предполагаем постоянную скорость роста g для объёма производства и установленной мощности при фиксированной величине P_{unit} , так что $N(t) = N_0 \exp(gt)$, где N_0 — начальное число блоков. Если предположить, что в специально разработанной производственной парадигме закон Райта действует с первого блока, то $N_0 = 1$. Кумулятивная средняя стоимость тогда равна

$$c(t) = c_1 N^{-w}(t) = c_0 V^s (N_0 \exp(gt))^{-w} = c_0 \left(\frac{P_{\text{unit}}}{P_{\text{density}}} \right)^s \exp(-wgt) = c_0 P_{\text{density}}^{-s} P_{\text{units}}^s \exp(-wgt), \quad (5)$$

$$c_{\text{total}}(t) = N(t)c(t) = c_1 N^{1-w}(t) = c_0 P_{\text{density}}^{-s} P_{\text{unit}}^s \exp[(1-w)gt], \quad (6)$$

$$P_{\text{total}}(t) = N(t)P_{\text{unit}} = N_0 \exp(gt)P_{\text{unit}}. \quad (7)$$

Для достижения целевого значения полной установленной мощности P_{total} за фиксированный период времени t_p имеем $N_{\text{total}} = P_{\text{total}}/P_{\text{unit}} = N_0 \exp(gt_p)$. Отсюда следует, что скорость роста выражается как

$$g = \frac{1}{t_p} \ln \left(\frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{unit}}} \right), \quad (8)$$

$$c_{\text{total}}(t_p) = N(t_p)c(t_p) = c_0 \left(\frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{unit}}} \right) \left(\frac{P_{\text{unit}}}{P_{\text{density}}} \right)^s \times \exp(-wgt_p) = c_0 P_{\text{density}}^{-s} P_{\text{total}}^{1-w} P_{\text{unit}}^{-1+w+s}. \quad (9)$$

Последнее выражение для полных затрат совпадает с выведенным ранее выражением (4).

6.4. Сила и эффективность новой парадигмы

Если теперь вспомнить, что в большинстве случаев для снижения затрат при увеличении объёма производства $s > 0$ и $w > 0$ ($w < 0$ для исторических капитальных инвестиций в АЭС), то становится ясно, что:

1) повышение эффективной плотности мощности в пересчёте на блок (а не только на реактивный объём) при наложении условий, связанных с безопасностью, снижает полные системные издержки и средние кумулятивные издержки в пересчёте на блок — экономия за счёт плотности мощности;

2) повышение целевой полной мощности при учёте баланса потребностей снижает средние кумулятивные системные издержки (за исключением прошлых и нынешних коммерческих АЭС, которые были построены на месте, а не произведены в промышленных условиях) — экономия за счёт объёма производства или целевого масштаба;

3) в случае неограниченного роста фиксированного размера блока с постоянной скоростью g кумулятивные средние издержки снижаются со скоростью wg , а скорость роста полных производственных издержек составляет $(1 - w)g < g$ при $w > 0$, что меньше скорости роста производства (за исключением прошлых и нынешних коммерческих АЭС, для которых $w < 0$) — экономия за счёт обучения и накопления опыта;

4) влияние масштаба структурной единицы на полные и кумулятивные издержки в пересчёте на блок зависят от показателя степени, равного $-1 + w + s$:

а) при $-1 + w + s > 0$ более мелкий блок стоит меньше — дисэкономия за счёт масштаба структурной единицы;

б) при $-1 + w + s = 0$ блоки всех размеров стоят одинаково — экономия инвариантная относительно масштабов (масштаб структурной единицы и объём производства);

в) при $-1 + w + s < 0$ более крупные блоки стоят меньше — экономия за счёт масштаба структурной единицы.

Общая связь между масштабом структурной единицы (Unit Scale — US) и объёмом производства (Production Volume — PV) и относящимися к ним показателями степени масштабирования показана на рис. 5. Важно отметить, что эти количественные соотношения выполняются для большинства промышленно выпускаемых изделий и производственных систем, а не только для ядерной энергетики. Наиболее быстро растущие технологии и отрасли относятся к области, где доминирует экономия за счёт объёма производства. Другие успешные технологии и отрасли относятся к областям, где преобладает экономия за счёт масштаба структурной единицы, но которые также получают выгоды от экономии за счёт объёма производства. К сожалению, обычные АЭС находятся вне этих областей с $w < 0$ (рост затрат при увеличении объёма производства или строительства) и $s > 1$ (повышение удельных затрат для блоков большего размера). Эта необычная особенность может быть устранена в описываемой здесь новой парадигме.

Для полноты картины в неё следует включить прочие расходы энергетических систем, включая затраты на

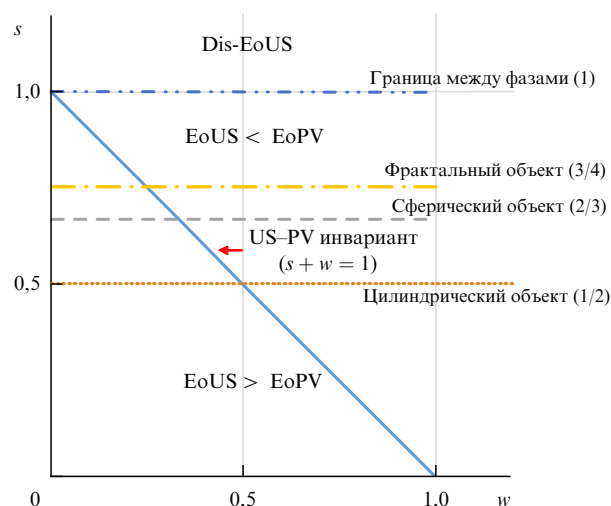


Рис. 5. Фазовое пространство показателя степени для масштаба структурной единицы s и объёма производства w . Область выше прямой $s = 1$ отвечает дисэкономии от масштаба структурной единицы (dis-EoUS); линия $w + s = 1$ соответствует инвариантности относительно изменения масштабов (масштаб структурной единицы и объёма производства). В области выше линии инвариантности относительно изменения масштабов и ниже прямой $s = 1$ экономия за счёт объёма производства доминирует над экономией за счёт масштаба структурной единицы ($EoUS < EoPV$); в области ниже линии инвариантности относительно изменения масштабов и $s = 1$ экономия за счёт масштаба структурной единицы доминирует над экономией за счёт объёма производства ($EoUS > EoPV$). Показатель степени для геометрического масштабирования равен 1/2 для цилиндрических объектов, 2/3 для сферических; 3/4 для фрактальных (заполняющих объём и масштабно-инвариантных) и 1 для границ между фазами.

топливо, фиксированные и переменные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание и потенциальные выбросы углерода. Однако приведённые аргументы по масштабированию помогают перевести ключевые вопросы в область научных исследований, основанных на применении первых принципов и универсальных законов в искусственных системах. Это относится в наибольшей степени к ядерным энергетическим системам, поскольку доля стоимости топлива в них очень низка. Только при одном определённом условии (4в) экономия за счёт масштаба структурной единицы может быть со временем реализована на уровне экономии за счёт объёма производства.

Для энергетической системы общего характера, для которой выполняется правило 0,6 или $s = 0,6$, имеем $-1 + w + s = -0,4 + w$. Если $w = 0,4$, то затраты снижаются на 24,2 % при каждом удвоении объёма производства, что является очень высоким и труднодостижимым на практике в больших системах; стоимость блоков любого размера будет одинаковой. Более вероятно, что $w < 0,4$ и $-1 + w + s < 0$, тогда более крупные блоки будут стоить меньше и будут более экономически эффективными за счёт капитальных затрат.

Однако, поскольку полученные значения показателя степени w систематически попадают в диапазон от 0,15 до 0,23 или выше, что соответствует снижению затрат от 10 % до 15 % или более при каждом удвоении объёма производства, получаем $-1 + w + s = (-0,85 \div -0,77) + s$. При $s > (0,77 - 0,85)$, что наблюдается в исторических данных по АЭС, имеет место неравенство $-1 + w + s > 0$, тогда блоки меньшего раз-

мера становятся более экономичными (а также более безопасными). Фактически в теплоэнергетических системах общего назначения, где выделение энергии и её перенос имеют волнометрический характер, а теплообмен, парогенерация и конденсация происходят на границе между фазами, комбинированный показатель степени ближе к 1, чем к 0,6, так что системы меньшего размера в общем случае являются более экономичными.

Если $s = 1$, что означает отсутствие экономии от масштаба структурной единицы, то $-1 + w + s = w > 0$, и более мелкие блоки в целом стоят меньше. Выигрыш получается только за счёт обучения и накопления опыта при воспроизведении операций в процессе производства.

Для энергетических систем с показателем степени s в интервале от 0,6 до 0,77–0,85, снижение затрат за счёт роста производства становится решающим фактором: большее снижение затрат благоприятствует системам меньшего размера, а меньшее снижение затрат — более крупным системам. В любом случае они основываются на компромиссе и балансе, а не на движении только в одном направлении.

В охватывающих всю систему оптимизированных естественных и искусственных сетях, в которых энергия преобразуется и передаётся, показатель степени масштабирования равен $3/4$, что соответствует фракталоподобным сетевым структурам, заполняющим пространство, как это объясняется теориями Уэста и Беджана [28, 29]. В этом случае $-1 + w + s = -0,25 + w$, и линией раздела является значение $w = 0,25$, или снижение затрат на 15,9 % при каждом удвоении объёма производства. С точки зрения экономики, если производство может быть усовершенствовано так, чтобы обеспечивать снижение затрат при каждом удвоении более чем на 15,9 %, то блоки самого малого размера, лимитируемого лежащими в основе технологиями, становятся в целом более экономически эффективными.

При распространении такой оптимизации на всю производственную экосистему и рассмотрении издержек производства как отражения стоимости энергии, ресурсов и информации, вложенных в изделия в процессе трансформирования и транспортировки, выигрыш в эффективности на основе масштаба естественным образом приведёт к соответствующему снижению затрат. Такие системы являются автомодельными на всех масштабах, что даёт $-1 + w + s = 0$. Поскольку $s = 3/4$, то $w = 1/4$, т.е. то же значение, что и во всех аллометрических свойствах масштабирования, которые наблюдаются и могут быть выведены из сетевых и конструктивных теорий. Они отличаются постоянной отдачей, которая обеспечивает и поддерживает экспоненциальный рост без каких-либо сингулярностей при конечных значениях времени и являются бесконечно устойчивыми, если пространство и энергия для роста неограниченны. В этом и состоит оптимальное выделение и распределение ресурсов, функций, эффективностей и несовершенств. В реальности все системы, способные к эволюции, являются динамическими с пространственными или временными сдвигами или искажениями, которые служат источником постоянного усовершенствования и перераспределения среди всех возможных конфигураций на всех масштабах в конкуренции с другими системами.

Данное наблюдение иллюстрирует тот факт, что в условиях ограничений, налагаемых законом сохранения энергии, все аспекты материи (ресурсы) и информации

(экономика) должны быть включены в полное описание системы и глобальную оптимизацию. Когда некоторые аспекты лимитируются фактором, ограничивающим систему в целом, оптимизация приводит к иерархическим структурам и процессам, которые являются топологически статическими и ограниченными по диапазону возможных масштабов, превращаясь в эволюционный тупик. В таких замкнутых системах оптимизация сводится к более равномерному распределению несовершенств по уровням масштаба, а возможности для усовершенствований, охватывающих всю систему, являются скудными. Вместо этого возникает тенденция к локальным оптимизациям, которые зачастую приводят к неэффективности системы, когда некоторые компоненты или подсистемы чрезмерно оптимизируются за счёт других, что приводит к перекосу в выделении ресурсов. Существуют возможности и пространство для продвижения вниз к всё более мелким масштабам, однако способность таких систем функционировать на более крупных масштабах может быть подорвана, поскольку большее количество внутренних структур и процессов на более мелких масштабах может использовать для обеспечения своей стабильности большее количество энергии и ресурсов. В конечном счёте масштабирование вниз является ограниченным, поскольку оно становится таким далёким от масштаба человека, что начинает быть бесполезным или бессмысленным. Возникновение нарушения симметрии в долгосрочной перспективе будет масштабироваться вверх и наружу, в частности, для обеспечения интересов и ценностей человека.

В открытых системах, где ограничения отсутствуют или находятся очень далеко, эффективные системы по-прежнему являются иерархическими и в то же время динамическими, так что усовершенствование и эволюция на всех масштабах могут происходить одновременно. Локальная недостаточная или избыточная оптимизация может быть скомпенсирована общей оптимизацией и усовершенствованием системы вместо перераспределения несовершенств по масштабам.

Таким образом, на ранних стадиях (почти) неограниченного роста, в силу того что малые единицы могут обычно отличаться более высокими скоростями роста за счёт более быстрого обучения и расширения массового производства, они со временем могут превосходить более крупные единицы по производительности — и чем больше различие в скоростях роста, тем меньше времени для этого понадобится. Указанный феномен демонстрируется в реальном времени взрывообразным ростом солнечной и ветровой энергетики (ветровые турбины отличаются большой экономией за счёт масштаба структурной единицы, так что их росту способствовали экономия как за счёт масштаба структурной единицы, так и за счёт объёма производства).

Существует ещё одно потенциально важное масштабирование, требующее оценки, — потребность в ресурсах. Предположим для простоты, что материалы используются пропорционально полному структурам, и, следовательно, масштабирование происходит аналогично масштабированию затрат. Тогда получается, что

$$M_{\text{total}} = M_{\text{unit}} N_{\text{total}} = m_0 \left(\frac{P_{\text{unit}}}{P_{\text{density}}} \right)^s \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{unit}}} = m_0 P_{\text{total}} P_{\text{density}}^{-s} P_{\text{unit}}^{s-1}. \quad (10)$$

Преимущество в использовании высоких плотностей мощности для сокращения потребностей в ресурсах и, следовательно, влияния на окружающую среду становится очевидным и допускающим численное описание. Однако плотность мощности является показателем эффективной плотности, усреднённой по всему пространству или площади, на которых происходит генерация энергии, а не плотностью топлива, активной зоны или бойлера. Величину M имеет смысл интерпретировать или как используемые материалы, или как занятую территорию, или как некоторую комбинацию обоих факторов.

Именно по этой причине в системах ядерной энергетики должны быть сокращены или упразднены зоны отчуждения. На крупнейшей в мире АЭС Кашивадзаки-Карива (Kashiwazaki-Kariwa) в Японии эффективная плотность мощности на поверхности земли, которая получается при генерации полной мощности 8 ГВт электрической энергии в пределах зоны отчуждения радиусом 1,5 км, составляет 1130 Вт м^{-2} . Этот показатель близок к плотности солнечного излучения в верхних слоях земной атмосферы, равной 1361 Вт м^{-2} . При включении в расчёт зоны проектных аварий радиусом 10 миль (16,1 км) плотность уменьшается ещё в 116 раз до величины всего лишь $9,8 \text{ Вт м}^{-2}$. Данный показатель сравним с показателем для большой ГЭС, но гораздо ниже показателя для коммерческих солнечных PV-панелей, который уже достиг пикового значения 175 Вт м^{-2} электрической мощности и продолжает возрастать. Такое сравнение значительно улучшается в пользу ядерной энергии при учёте коэффициента использования, стабильности сетей, надёжности поставок и хранения энергии, но до превосходства в показателе всё ещё далеко.

Представленный краткий экскурс иллюстрирует эффект с помощью исторических прецедентов. Максимальная эффективность фотосинтеза составляет по оценкам 26 %, что является показателем для получения, использования и хранения солнечной энергии в природе. Однако фактическая доля энергии, сохраняемая в сухой биомассе, гораздо меньше, и показатель 1–3,5 % можно считать для неё исключительно высоким. Таким образом задаётся — в качестве показателя в верхней части шкалы — поверхностная плотность мощности, полученной биомассой и сохраняющейся в ней на уровне 11 Вт м^{-2} . В действительности ежегодный выход от биомассы составляет примерно 60 МДж м^{-2} , или $1,9 \text{ Вт м}^{-2}$ тепловой энергии при выделении за тот же интервал времени (при том же уровне текущего глобального радиационного воздействия). Большая часть захваченной солнечной энергии используется для роста и поддержания биологических систем.

Для сравнения, в угольном пласте со средней толщиной 15 м при полноте извлечения 95 % запасено 400 ГДж м^{-2} энергии. В случае извлечения и использования для генерации мощности в течение одних суток пласт оказывается в 2,4 млн раз более энергетически интенсивным, чем биомасса. Такое возрастание на порядки доступных источников энергии, а также соответствующие сокращения используемых площадей и увеличенная энергоинтенсивность стали теми ключевыми факторами, которые вызвали и обеспечили первую и вторую промышленные революции. Они сместили подтверждённые границы энергетических ресурсов на несколько порядков величины (согласно консервативным оценкам, на два

порядка на основании подтверждённых запасов на нынешнем уровне потребления, на три и более порядка выше, чем на доиндустриальном уровне), увеличили интенсивность обогрева в несколько раз (по сравнению с биомассой) и интенсивность энергии для перемещения от нескольких сотен тысяч до миллиона раз (по сравнению с био-, гидро- и ветровой энергией), позволили электрифицировать всё большее количество сторон экономики и жизни общества и сократить непосредственное воздействие на окружающую среду в сотни раз в современной энергетически интенсивной экономике, которая глобально потребляет в сумме более чем в 30 раз больше энергии, чем в начале XIX в.

Для использования таких обширных запасов высококонцентрированной энергии в ископаемых видах топлива потребовались и были осуществлены широкомасштабные изыскания, извлечение, транспортировка, переработка и распределение топлива. Конечное его использование должно поддерживаться обширной сетью магистралей, железных дорог, электрических цепей, газопроводов, флотом нефтяных танкеров и сетью заправочных станций. Экономия за счёт масштаба и сетевые эффекты в такой архитектуре полной системы велики и очевидны. Отрасли и экосистемы, работающие на ископаемых видах топлива, весьма продуктивны и эффективны до тех пор, пока отходы и выбросы не начинают искажать системы и циклы Земли и наносить им ущерб. Поскольку использование ископаемого топлива превратило энергетическую систему человечества в замкнутую систему, привязанную к земле, преимущества и экономические достоинства раннего этапа быстро превратились в серьёзные недостатки и "пассивы" с экзистенциальными последствиями, включая климатический кризис. В любой замкнутой системе порядок постепенно разрушается, и в конечном счёте начинает доминировать беспорядок. Замкнутые системы не могут быть устойчивыми.

Возврат к использованию возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая, гидроэнергия и биомасса, разрешает проблему замкнутой системы. Современные виды возобновляемых источников энергии гораздо более эффективны, чем природные возобновляемые источники прошлого. В частности, солнечные фотоэлектрические системы имеют наиболее высокие показатели эффективности захвата и превращения солнечной энергии в электричество и предоставляют самые эффективные и чистые формы энергии для различных нужд. Это возможно благодаря тому, что преобразование и транспортировка энергии происходят на поверхности функциональных материалов на микроскопическом уровне посредством фундаментальных электромагнитных взаимодействий без участия мириадов сопутствующих явлений и систем. По-видимому, солнечные PV-панели являются наиболее устойчивым источником энергии, поскольку они в наименьшей степени пересекаются с системами и циклами Земли, имеющими важность для биологии, в особенности если использованные участки земли уменьшаются за счёт комбинации с другими способами получения энергии. По существу, происходит непосредственный захват и преобразование энергии синтеза ядер на Солнце без необходимости создания и обслуживания реакторов для слияния ядер на Земле.

Ветровая энергия, гидроэнергия и биомасса представляют собой вторичный и третичный уровень преобразования и транспортировки солнечной энергии, по-

этому они гораздо сильнее привязаны к системам и циклам Земли. Следовательно, их влияние может оказаться существенным на больших масштабах, что может снизить их потенциальную стабильность. Этот вывод подтверждается не только результатами крупномасштабного использования гидроэнергии с негативными локальными последствиями для экосистемы и погоды в долгосрочной перспективе, вырубкой лесов для добычи топлива и пищи (биоэнергия) в доиндустриальном обществе, но и тем, что солнечные PV-панели были впервые применены в космосе. Возможность использования определённого типа энергии в космосе является окончательной проверкой и подлинным индикатором того, что она не связана тесным образом с системами и циклами Земли и, таким образом, является более устойчивой. Однако одной устойчивости такого рода недостаточно для развития экономики и общества. Имеет значение интенсивность энергии: при более высокой интенсивности становятся возможными структуры и процессы, которые не реализуются при более низкой интенсивности, что открывает путь для выхода за пределы существующих ограничений.

В системах с экономией за счёт масштаба, $s < 1$, более крупные единицы действительно дают более значительную экономию ресурсов. Как уже отмечалось, в масштабах системы такое решение не всегда более эффективно с экономической точки зрения. В краткосрочной перспективе при определённых ограничениях на доступность системы и степень воздействия на окружающую среду существует необходимость в балансе, в особенности в замкнутых системах, где энергетические ресурсы и материалы являются в основном внутренними для систем и циклов Земли, представляющих важность для жизни. Подобные ограничения могут быть смягчены или устранены, если источники энергии и материалов в основном являются внешними, а достаточная отдача на инвестиции может быть использована для того, чтобы замкнуть существенные циклы производства и потребления энергии и поддерживать их отделёнными от жизненно важных систем и циклов. В этом случае энергетические системы меньшего размера, для которых лежащие в их основе технологии устанавливают более низкие ограничения, могут быть экономически более эффективными с точки зрения системы, что может иногда отличаться от экономичности с точки зрения отдельной структурной единицы.

Теплоэнергетические системы могут обеспечить более высокую эффективность и меньшие потери в крупных системах, поскольку тепло порождается, а генерация мощности включает выделение энергии в реакциях, её передачу и преобразование. Этот фактор действует в сторону более крупных систем, в особенности тех, где топливо составляет большую часть затрат и отходов (включая выбросы). Эти соображения, однако, не относятся к коммерческой ядерной энергетике и не могут применяться к ней по изложенным здесь соображениям безопасности и экономичности.

В любом случае в системах теплоэнергетики принцип "чем больше, тем лучше" не всегда действует для генерирующих блоков. В силу неизбежных потерь при передаче и преобразовании энергии для её распределения и использования существуют системные ограничения, требующие оптимизации для равномерного распределения использования, потерь и неэффективности по

всем масштабам, что и определяет должный масштаб структурной единицы.

При сравнении различных энергетических систем, в особенности тех, в которых требуются большие авансовые инвестиции, включение коэффициентов загруженности или использования в приведённые выше соотношения, открывает ещё один аспект, влияющий на экономическую и сырьевую эффективность. Поскольку экономическая ценность прямо пропорциональна этим факторам, они в обратной пропорции сказываются на затратах. Можно включить их в формулы для получения эффективных затрат в виде $c_{\text{eff}} = c/DF$, где DF — коэффициент загруженности, или использования. Более высокая степень загруженности приводит к понижению эффективных затрат.

Для точного сравнения требуется учесть ещё один важный фактор эффективности системного уровня. Если в модельной системе с N независимыми функциональными модулями (не связанными друг с другом модулями с различными функциями, которые в совокупности формируют общий функционал системы, как это имеет место в монолитной системе) коэффициент загруженности одного модуля равен DF_{unit} , то коэффициент загруженности системы может быть выше, если плановые отключения можно скоординировать таким образом, чтобы в любой момент времени лишь малое количество структурных единиц $n < N$ находилось в режиме оффлайн. Тогда эффективный коэффициент загруженности системы равен

$$DF_{\text{eff}} = \frac{NP_{\text{unit}} - n(1 - DF_{\text{unit}})P_{\text{unit}}}{NP_{\text{unit}}} = 1 - \frac{n}{N}(1 - DF_{\text{unit}}). \quad (11)$$

При $N = n = 1$ (единственный или монолитный модуль) $DF_{\text{eff}} = DF_{\text{unit}}$, при $N \gg n$ (большие кластеры надёжных модулей) $DF_{\text{eff}} = 1$.

Таким образом, малые надёжные модули более эффективны и доступны, чем большие монолитные структурные единицы. Это заключение справедливо только для генерирующих модулей, которыми можно управлять. Оно в общем случае не относится к системам солнечной или ветровой энергетики, где коэффициент загруженности в основном определяется природными условиями через наличие соответствующих движущих сил, а не конструкцией установок. В таких случаях коэффициент загруженности может быть разбит на два компонента — коэффициент, связанный с наличием внешней движущей силы, и ещё один, связанный с наличием отдельной структурной единицы, — которые соответствующим образом должны использоваться для сравнения.

Здесь требуется разъяснение, позволяющее развеять возможные опасения относительно применимости такой методики масштабирования для разработки и построения новой парадигмы энергетических систем. Всесторонняя научная революция проявляется во множестве аспектов. Некоторые взгляды и представления ведущих физиков, интересные для читателей, помогут разъяснить вопрос о применимости методики.

Роберт Б. Лафлин (Robert B. Laughlin), лауреат Нобелевской премии по физике, и Дэвид Пайнс (David Pines), который в ходе своей блистательной карьеры был приглашённым учёным в Лос-Аламосской нацио-

нальной лаборатории и в Институте Санта-Фе, опубликовали нашедшую широкий отклик статью [96] с критикой "Теории всего" (The Theory of Everything): "Открываемые физические явления, которые управляются принципами высшего порядка, обладают некоторым свойством, а именно нечувствительностью к микроскопике, имеющим отношение к более широкому вопросу о том, что является познаваемым в широчайшем смысле этого слова".

В цепных реакциях деления ядер типичное время жизни мгновенного нейтрона составляет порядка 10^{-4} с в реакторах на тепловых (медленных) нейтронах и 10^{-7} с в реакторах на быстрых нейтронах, что соответствует среднему пробегу от 0,02 до 2 см. В терминах временных и пространственных масштабов мегаэлектронвольты и большие энергии ядер преобразуются в электронвольты и тепловую энергию более низкого уровня. Происходящие при этом явления и характеристики реакторов деления в большом масштабе не зависят заметным образом от микроскопике реакторов деления и их характеристик, различающихся по величине на много порядков. Описание специфики физики ядерных реакторов и реакторной техники и связанных с ними вопросов термодинамики можно найти в содержательных монографиях ведущих учёных [97–99].

Эти результаты, сконцентрированные в форме масштабирования, объединяющей экономии за счёт структурной единицы и за счёт объёма производства с учётом в явном виде коэффициента загруженности, содержат общие предсказания новой парадигмы. Они уже могут подвергаться проверке по некоторым аспектам в других технологиях и отраслях и могут пройти конкретную проверку после коммерческого запуска и развёртывания в ближайшем будущем некоторых SMR и MR. Здесь следует отметить, что подобные законы и предсказания основываются на науке искусственного, используются для неё и могут быть реализованы, только если усилия людей будут направлены на реализацию и нахождение решений в таком подходе, оптимизированном в масштабе всей системы. Они не появятся сами собой. Результаты в случае неадекватной реализации могут оказаться хуже оптимальных. Хотя застой в нынешней ядерной энергетике гражданского назначения не сформировал позитивных тестов для предсказаний новой парадигмы, в течение десятилетий появились обширные свидетельства того, что значительные отклонения от таких законов и принципов со временем могут привести к провалам на рынке.

6.5. Ограничение масштаба генерирующей единицы естественной безопасностью

Мы используем далее тот же подход на основе масштабирования для установления взаимосвязей в энергетической системе и ограничений на её безопасность.

Для простоты с целью иллюстрации выбраны сферические системы. Цилиндрические системы подчиняются такому же закону масштабирования. Следует помнить, что проводимый ниже анализ может применяться на любом уровне в иерархических энергетических системах. Если подобное масштабирование не срабатывает на определённых уровнях в некоторых системах, то обычно это является указанием на недоработки или искажения, которые могут быть устранены или скорректированы.

В предположении равномерности плотности мощности $P_{\text{core density}}$ (отличной от эффективной мощности P_{density} , используемой ниже) в сфере реактора (химического или ядерного) для преобразования энергии, запасённой в топливе, в тепло и изотропности отвода тепла наружу распределение температуры внутри сферы описывается простой формулой $T(r) - T(0) = -(P_{\text{core density}}/6k)r^2$, где r — радиальная координата, $r \leq R$; R — радиус сферы, k — эффективный коэффициент теплопроводности. Тепло может отводиться за счёт теплопроводности, конвекции, излучения или любой комбинации этих механизмов.

В действующих системах тепловая энергия активно отводится, и температура на границе раздела фаз поддерживается на фиксированном уровне. При этом в центре сферы, где температура максимальна, имеет место соотношение $T(0) = T(R) + (P_{\text{core density}}/6k)R^2$, $T(R) = T_{\text{coolant}}$ (все допущения делаются для простоты), и эта величина обычно доводится до максимума для повышения термодинамической эффективности цикла конверсии.

Для поддержания $T(0)$ ниже предела отказа топлива или структурных материалов с некоторым запасом, или T_{max} , выполняется условие

$$P_{\text{core density}} R^2 < 6k(T_{\text{max}} - T_{\text{coolant}})$$

или

$$P_{\text{unit}} = P_{\text{core density}} \frac{4}{3} \pi R^3 < 8k\pi R(T_{\text{max}} - T_{\text{coolant}}) = p_0 V^{1/3} \Delta T_{\text{max}}. \quad (12)$$

Это означает, что при увеличении полной мощности системы радиус сферы необходимо пропорционально увеличивать для обеспечения того же запаса до отказа. Напротив, если физический размер не изменяется при изменении полной мощности, то запас безопасности уменьшается. Поскольку более высокое значение T_{coolant} может обеспечить более высокое качество тепла или более высокий коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую, увеличение T_{max} или повышение стабильности топлива (включая его локализацию, будь то в форме капсулирования или помещения в оболочку) может поднять пределы безопасности для плотности мощности и мощности структурной единицы.

Более тонкий анализ с включением зависимости k от мощности в случае сильно турбулентной принудительной циркуляции приводит, по-видимому, к тем же заключениям. Разумно считать, что если такое масштабирование работает при самом маленьком масштабе, при котором теплопроводность является единственным механизмом теплопередачи, то у оптимизированных иерархических сетей должно осуществляться такое же или аналогичное масштабирование для системы в целом, для того чтобы она была масштабна инвариантной или в целом наиболее эффективной [28, 29].

У этого масштабирования есть критически важные последствия. На уровне структурной единицы, $c_1 = c_0 V^s$, $s = 0,6-1$ для хорошо сконструированных систем имеем $P_{\text{unit, max}} = p_0 \Delta T_{\text{max}} V^{1/3}$, тогда удельные капитальные затраты $c_p = c_1/P_{\text{unit, max}} = (c_0/p_0 \Delta T_{\text{max}}) V^{s-1/3}$. Поскольку $s - 1/3 > 0$, для этого требуется минимизация объёма или мощности структурной единицы для минимизации удельных затрат по каждому их типу в случае сохранения

неизменными всех остальных факторов. Такая ситуация даёт пример случая, когда безопасность и экономичность могут быть оптимизированы или реализованы одновременно. Существуют определённые пределы уменьшения систем, проистекающие из технических возможностей и необходимых базовых потребностей, которые здесь не рассматриваются.

Удельные капитальные затраты обратно пропорциональны $\Delta T_{\max}$; это означает, что виды топлива с более высокой температурой разрушения могут обеспечить более низкие затраты и улучшенную экономичность.

Если при любых реалистичных условиях, будь то нормальная работа, переходный процесс, внештатная ситуация или авария, условие $P_{\text{unit}} > P_{\text{unit, max}}$ может выполняться достаточно долго до наступления повреждения или уничтожения топлива, активной зоны реактора или его корпуса, то требуется использование дополнительных систем защиты, аварийного реагирования и локализации (Safety and Emergency Response Systems and Containment — SERSC). Они, по существу, представляют собой дополнительное оборудование и системы, в лучшем случае с очень низким коэффициентом загрузки, что является экономически неэффективным или — в некоторых сценариях аварий — они могут мешать доступу и препятствовать применению более адекватных и эффективных методов для смягчения негативных последствий. Таковы конструкция и условия работы существовавших ранее и действующих коммерческих энергетических реакторов. Гораздо лучше с самого начала избегать таких условий при проектировании.

В случае ядерной энергетики один конкретный момент требует дополнительного анализа. В отличие от других энергетических систем, при остановке цепных реакций деления в ядерном реакторе выделение энергии ядра снижается незамедлительно, однако существенное тепло распада может генерироваться и выделяться в течение продолжительного времени. Поскольку плотность энергии в ядерном топливе более чем в 100000 раз выше, чем в химическом или ископаемом топливе, даже при незначительности доли этой энергии, выделяющейся в течение продолжительного времени, она может накапливаться до необычайно больших количеств.

Для того чтобы придать этим утверждениям более количественную форму, мы воспользуемся формулой Вигнера – Вэя (Wigner – Way) для мощности остаточного тепловыделения и интегрированной тепловой энергии. Следует отметить, что она основывается на статистическом подходе и применима только для периодов полураспада продолжительностью несколько суток или менее. Для больших периодов полураспада она даёт очень консервативную оценку и существенно занижает полное остаточное тепло распада:

$$P_d(t) = 0,0622 P_0 [t^{-0,2} - (t_0 + t)^{-0,2}], \quad (13)$$

где $P_d(t)$ — генерация тепловой мощности, вызванная бета- и гамма-излучением, P_0 — тепловая мощность перед остановкой реактора, t_0 — время (в секундах), соответствующее тепловой мощности перед остановкой реактора, t — время (в секундах), прошедшее после остановки реактора.

Остаточное тепло распада немедленно уменьшается до 6,22 % через 1 с после остановки реактора и продолжает снижаться до величины менее 1% в течение

1 ч. Хотя эта величина может показаться малой по сравнению с полной мощностью, для больших энергетических реакторов она не является незначительной. Например, современный реактор с 1000 МВт электрической энергии или 3000 МВт тепловой энергии будет генерировать более 180 МВт тепловой энергии через 1 с после остановки реактора и свыше 30 МВт спустя 1 ч. Приведённые показатели гораздо больше, чем у большинства дизельных электрогенераторов, и именно по данной причине требуется большое количество таких генераторов на месте в случае нештатной ситуации или аварии.

Ещё более необычным является тот факт, что в течение дней или месяцев остаточное тепло может накапливаться до величины, эквивалентной тепловой энергии, генерируемой реактором, работающим на полной мощности в течение нескольких секунд или десятков тысяч секунд. При отсутствии достаточного теплоотвода или утечки это вызовет расплавление не только металла, но и керамики. В Фукусиме большинство аварийных дизель-генераторов было смыто цунами, что привело к расплавлению трёх реакторов в течение нескольких дней, несмотря на то что при землетрясении произошла их автоматическая остановка.

Такие катастрофические аварии могут быть устранены детерминистическим образом за счёт конструкции, ограничивающей плотность мощности и полную мощность. Данные конструкции не требуют использования множества последовательно установленных резервных SERSC или слоёв SERSC и способны улучшать одновременно и безопасность ядерной энергетики, и её экономичность.

Для того чтобы сконструировать реактор с неограниченной защитой, которая не повреждается при аварии, наряду с ограничением плотности мощности и полной мощности существует несколько принципиально различных подходов и стратегий. В некоторых из них используется гарантированное удержание теплоносителя, как, например, в реакторах бассейнового типа, или удаление остаточного тепла распада в окружающее пространство, осуществляемое за счёт структурно усиленной природной конвекции, или использование очень больших термических масс или объёмов воды для охлаждения и испарения при снижении тепловыделения. Иногда используются теплоносители с низкой запасённой физической или химической энергией для предотвращения разрастания аварии. Иногда используются теплоносители с относительно низкой охлаждающей способностью, благодаря чему потеря мощности при циркуляции теплоносителя или даже самого теплоносителя после отключения реактора не может привести к избыточному перегреву и расплавлению. Существуют также конструкции, работающие на жидком топливе, которое должно быть предварительно расплавлено. Относительные преимущества и недостатки каждого решения зависят от конкретной конструкции, назначения и эффективности в практических реализациях.

Реакторы с неограниченной защитой, которая не повреждается при аварии, должны разрабатываться с оборудованием и системами пассивного управления остаточным теплом распада для работы в период времени после остановки реактора, как если бы они были активными системами с низким выходом по мощности. К счастью, эти дополнительные сложности и затраты

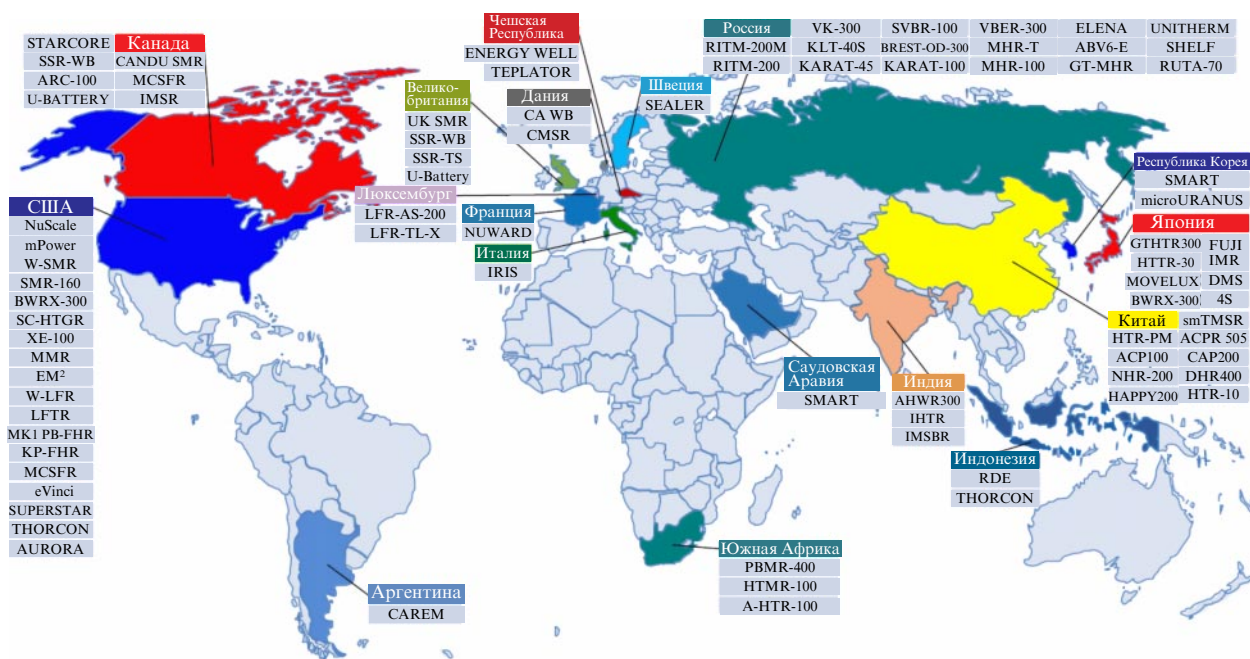


Рис. 6. Малые модульные реакторы и микрореакторы, находящиеся в стадии разработки или демонстрации в различных странах.

могут быть сбалансированы другими усовершенствованиями и источниками экономии. Такое решение не является оптимальным исходным пунктом для проектирования, если только применение дополнительных SERSC не вызвано регуляторными нормами, несмотря на то что ни одна из них в любом случае не требуется в фундаментально безопасных системах. Этот путь может оказаться весьма ненадёжным.

Если существующие и появляющиеся конструкции могут оцениваться и реализовываться с точки зрения новой парадигмы, то становятся возможными исследования и тестирование более действенных и эффективных комбинаций с меньшими квантами инвестиций, более короткими периодами разработки и существенно большей отдачей, когда успешные конструкции выбираются на основе конкуренции и оптимизации, которые направляются и поддерживаются универсальными законами, управляющими природой и рукотворным миром. В начале первой ядерной эры наблюдался "взрыв" идей и подходов, обусловивших самое быстрое внедрение и освоение совершенно нового в истории человечества источника первичной энергии. Вторая ядерная эра с детерминистической фундаментальной безопасностью и конкурентной рыночной экономикой станет грандиозным скачком вперёд.

6.6. Дополнительные тесты и реализации на основе строящихся малых модульных реакторов и микрореакторов

В 2010 г. в мире имелось более 12 основных конструкций SMR, включая 6 PWR, 3 HTR и 4 LMR [6]. Среди этих SMR раннего этапа разработок реактор KLT-40С был построен, HTR-PM и CAREM близки к завершению, а компания NuScale получила сертификат NRC на конструкцию SMR и через несколько лет начнёт строительство этого реактора. Некоторые более крупные проекты, как, например, mPower и PBMR, были закрыты или приостановлены.

Закрытие проектов и медленный прогресс в проектах крупных SMR дали частичные подтверждения предсказаний новой парадигмы. Эти конструкции с расчётной мощностью энергоблока в диапазоне 300–450 МВт электрической энергии или более по-прежнему находятся в парадигме строительства и вряд ли получают значительный выигрыш от гораздо более эффективной парадигмы производства. В них отсутствует фундаментальная безопасность уровня I, так что регуляторные требования к ним качественно не отличаются от требований к большому АЭС с монолитной конструкцией. Начальные инвестиции в них огромны, продолжительность разработки велика, рыночный потенциал ограничен, а экономическая конкурентоспособность отсутствует, так что они являют собой примеры того, чего следует избегать в новой парадигме.

К 2020 г. в мире существовало свыше 69 SMR и MR, включая 25 PWR наземного базирования и 6 PWR морского базирования, 11 HTGR, 11 FR, 10 MSR и 6 MR [5]. Они разрабатывались и демонстрировались повсеместно (рис. 6) с богатым разнообразием вариантов, сигнализирующим о потенциальном прорывном росте и экспансии в ближайшем будущем.

Несколько компаний публично объявили о своих планах по разработке и проектах микрореакторов с мощностью менее 10 МВт электрической энергии по классификации МАГАТЭ. Американский стартап Oklo в 2020 г. подал в NRC США заявку на особую комбинированную лицензию на компактный реактор на быстрых нейтронах Augora, рассчитанный на 4 МВт тепловой энергии и 1,5 МВт электрической энергии [100], который будет построен и будет эксплуатироваться Национальной лабораторией в Айдахо. Канадская компания Global First Power, являющаяся совместным предприятием Ontario Power Generation и Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC), предложила свой проект микромодульного реактора (MMR), рассчитанного на 15–30 МВт тепловой энергии и 5–10 МВт электрической энергии, для экологически

гической оценки и заключения соглашения о размещении в Чок Ривер (Chalk River), на площадке, которая принадлежит Atomic Energy of Canada Limited и управляется Канадскими ядерными лабораториями (Canadian Nuclear Laboratories) [101].

Министерство энергетики только что обнародовало свой проект MARVEL по постройке одного MR в Национальной лаборатории в Айдахо в качестве тестовой площадки для предоставления отсутствующих в настоящее время экспериментальных возможностей и оказания содействия исследователям и конечным пользователям в понимании путей интеграции MR с другими технологиями и в ускорении разработок [102].

Многие массово развивающиеся энергетические технологии являются микросистемами. Их примерами служат дизель-генераторные установки мощностью от нескольких единиц до тысяч кВт с глобальной ежегодной установкой нескольких сотен ГВт и двигатели внутреннего сгорания (Internal Combustion Engines — ICE), предназначенные главным образом для автомобилей или передвижных энергетических установок, обычно мощностью 50–100 кВт каждая, с ежегодным производством и продаж в мире суммарной мощности в несколько ТВт (для сравнения, полная глобальная установленная электрическая мощность генерации превысила в 2019 г. 7 ТВт электрической энергии с ежегодным приростом в диапазоне 200–300 ГВт электрической энергии). Общая экономичность системы и эффективность ресурсов, по-видимому, являются решающими факторами для массового производства и развёртывания модулей ядерных реакторов.

Эти новые SMR и MR предоставят более полные тесты и доказательства и позволят широко реализовать новую парадигму ядерной энергетики гражданского назначения.

6.7. Суррогатные тесты и переносимые способы и возможности

Для достижения самой амбициозной цели, поставленной в докладе IPPC, опубликованном в 2018 г. [49], ядерная энергетика должна вырасти на 501 % к 2050 г. по сравнению с уровнем 2010 г. с 375 ГВт электрической энергии до 2250 ГВт, что эквивалентно ежегодному добавлению с настоящего времени в течение 30 лет 75 ГВт электрической энергии (все установленные в настоящее время мощности к тому времени уже будут выведены из эксплуатации). В большинстве прочих сценариев прогнозируется гораздо более низкий рост добавления мощностей — в два раза или более. Выше уже было дано краткое описание стратегии достижения уровня в 1148 ГВт электрической энергии для иллюстрации закона Райта отдельно при использовании малых модульных реакторов, крупных и микрореакторов. Если начать эту работу сейчас, то постоянная ежегодная скорость прироста для модулей, рассчитанных на 10 МВт электрической энергии, которая требуется для достижения к 2050 г. уровня в 2258 ГВт электрической энергии, должна составлять 41,4 %, и 33,4 % в случае модулей, рассчитанных на 100 МВт электрической энергии. Обращаясь к показателям роста, приведённым в табл. 2 для всех технологий генерации энергии, можно заключить, что такие показатели прироста хотя и велики сами по себе, но являются вполне обычными по сравнению с другими технологиями и должны быть легкодо-

стижимыми. Если мощность модуля увеличивается, оставаясь при этом в рамках фундаментальной безопасности, то это позволяет уменьшить требуемую скорость прироста.

Если новая парадигма ядерной энергетики гражданского назначения, способная обеспечить производство и установку блоков ядерных реакторов в количестве, исчисляемом несколькими тысячами или даже многими десятками или сотнями тысяч в последующие три десятилетия, представляется неправдоподобной, то следует проанализировать возможности других, более успешных, технологий и отраслей.

Мы начнём с рассмотрения необычайно успешной технологии с "продуктом-убийцей" — промышленной газотурбинной установки для генерации электричества. До наступления значительного прогресса в материалах, конструкции и производстве, имевшего место с середины 1980-х гг. до середины 1990-х гг., газовые турбины на базе существующих авиационных газотурбинных установок иногда применялись в качестве вспомогательных устройств для генерации электроэнергии в период пиковых нагрузок. Начиная с середины 1990-х гг. сверхмощные промышленные газотурбинные установки, в которых используются кристаллические лопатки турбин и прочие усовершенствованные материалы, позволили поднять температуру сжигания топлива и коэффициенты преобразования далеко за пределы возможных ранее значений (см., например, [103]). Генерация мощности за счёт использования газа превратилась в наиболее быстро растущий источник тепловой мощности во многих частях мира. Даже в последнее время при замедлении роста в результате насыщения рынка газотурбинные установки добавляют каждый год 36–60 ГВт электрической энергии при числе блоков 360–500, что даёт средний показатель в 110 МВт электрической энергии на каждую установку. Затраты с учётом монтажа составляли в 2018 г. 4,2 долл. за Вт электрической энергии [104]. Большая часть промышленных газотурбинных установок выпускается тремя ведущими производителями — GE, Siemens и MHPs. Мировое производство электроэнергии за счёт газа возрастало в диапазоне 30–60 % каждое десятилетие начиная с 1990 г. (см. табл. 2). За десятилетие около 2000 г. только в США прирост мощностей генерации на базе газа намного превысил 200 ГВт электрической энергии, что увеличило полную установленную мощность генерации электроэнергии почти на треть. Стремительный рост технологии гидравлического разрыва пласта для добычи сланцевой нефти и газа по существу превратил добычу с низкими коэффициентами загрузки при бурении в фактически подземную химическую переработку (производство) с высокими коэффициентами загрузки, изменил ландшафт мировой энергетики и ускорил отказ от использования угля.

С учётом ограничений на углеродный след потенциал газотурбинных установок в мире снижается. Хотя размер выбросов парниковых газов при генерации электричества за счёт газа существенно ниже, чем при использовании угля, он, тем не менее, слишком высок для борьбы с климатическими изменениями. Природный газ предлагается как компромиссное топливо, дополнительное к возобновляемым источникам энергии.

Газотурбинные установки, по-видимому, представляют собой класс энергетических систем с самой сильной экономией от масштаба структурной единицы, ко-

торая также получает преимущества от экономии масштаба. Сжигание газа, превращение энергии в многоступенчатых турбинах, генерация электроэнергии с использованием соосных генераторов являются в основном волнометрическими процессами без участия внутренних реакций на границе раздела фаз. Газотурбинные установки серийно производятся на заводах и перевозятся на места для монтажа на станциях с минимальным объёмом строительных работ. Им, однако, требуются газопроводы для бесперебойной подачи топлива. Ресурсы природного газа распределены по миру неравномерно, так что газопроводы и танкеры со сжиженным газом, а также терминалы являются необходимой структурой для транспортировки и распределения топлива. Как показал анализ и прогнозы, сделанные более десятилетия назад, рыночный жизненный цикл газотурбинных установок, основанный на максимальном размере устанавливаемой структурной единицы, приближается к концу для этого поколения технологии [84].

В исследовании [84] делалось предсказание о том, что имеется потребность и существует окно для возникновения новой технологии и системы генерации энергии с крупномасштабным развёртыванием в районе следующего десятилетия. Оказалось, что солнечная фотоэлектрическая энергетика примерно в это же время начала свой взрывообразный рост с увеличением установленной мощности более чем в 20 раз в каждое из первых двух десятилетий XXI в., который продолжается и сейчас. Фотоэлектрические панели отличаются очень низкой экономией за счёт структурной единицы, в основном за счёт краевых эффектов, так что на их разработке и установке экономия за счёт масштаба структурной единицы не сказывается. Вместо этого в них целенаправленно и эффективно реализовывалась экономия за счёт объёма производства, что обеспечило самый экстраординарный рост в истории энергетических технологий и систем. В долгосрочной перспективе их потенциал лимитирован присущими им ограничениями, связанными с низкой плотностью мощности и низким коэффициентом загрузки, типичным для переменных и перемежающихся природных источников.

Коммерческие авиалайнеры по существу представляют собой летающие силовые установки с мощностью тяги в диапазоне 20–100 МВт. Они являются сложными и критичными с точки зрения безопасности конструкциями, на которые распространяются жёсткие ограничения; при этом некоторые ключевые характеристики и риски аналогичны ядерным реакторам с дополнительными и предъявляющими крайне высокие требования функциями мобильности и связанными с ними рисками. В 2020 г., который из-за глобальной пандемии был одним из худших за десятилетия для авиоперевозок и производителей самолётов, четыре крупнейших производителя — Airbus, Boeing, Bombardier и Embraer — всё же поставили в сумме 972 единицы воздушных судов. Предполагается, что консолидированный спрос на глобальном рынке воздушных судов в последующие два десятилетия составит около 40 тыс. единиц [105, 106]. При средней мощности 50 МВт суммарная новая мощность составит в течение двух десятилетий 2000 ГВт, тем самым демонстрируя, что в случае скорого принятия новой парадигмы промышленное производство систем ядерной энергетике для борьбы с климатическими изменениями является осуществимой задачей.

Суда — это по существу плавучие энергетические установки. Судостроение — одна из отраслей промышленности, а верфи являются производственными платформами, которые систематически исследуются в анализе снижения затрат в усовершенствованных ядерных реакторах. Плавучая АЭС КЛТ-40С представляет собой продукт для тестирования этих переносимых конструкций с дедевром 33980 т. Во всём мире зарегистрировано около 98140 коммерческих судов со средним брутто-тоннажем 21010 т. Строительство новых судов в 2019 г. добавит в сумме 65911 кт или примерно 3000 единиц. Мировая судостроительная промышленность является высококонкурентной, за последние годы она резко нарастила производительность, которая составляет 1500–3500 единиц в год; в настоящее время мощности в ней задействованы на 50 % [13, 107]. Если часть из них будет мобилизована и переведена на производство SMR и MR, то добавление десятков или сотен гигаватт электрической энергии, вырабатываемых ежегодно АЭС, станет осуществимой задачей, по крайней мере, с точки зрения возможностей для производства модулей.

Эти отрасли не только дают позитивные суррогатные тесты для новой парадигмы, но и предлагают переносимые способы и возможности изготовления фундаментально безопасных SMR и MR, предназначенных для массового производства и широкого развёртывания.

Проблемы, связанные с ядерным топливом и отходами, могут решаться аналогичным образом. Добыча и переработка урана являются типичными горнодобывающими технологиями, развитие которых очень хорошо описывается законом Райта, так что расширение производства в то время, пока блоки реактора находятся на этапе проверки, может быть синхронизировано с тщательным планированием и соответствующими инвестициями. Поскольку применение сухих контейнеров оказалось эффективным и экономичным временным решением для хранения отходов, а в технологиях и системах бурения в целом наблюдается значительный прогресс, со временем также могут быть разработаны подходящие средства для работы с отходами. Следует помнить, что поскольку топливо и продукты ядерных реакций деления не входят в основные биогеохимические жизненные циклы и могут использоваться легче всего для производства энергии и тепла, производственные меры, связанные с топливным циклом, не могут быть должным образом разработаны и применены до тех пор, пока звено выработки энергии в цепочке добавления стоимости не станет хорошо обоснованным. Это заключение устанавливает приоритеты для разработок.

7. Заключение

В борьбе с рукотворными климатическими изменениями и в процессе адаптации к ним мы сталкиваемся с чрезвычайными глобальными вызовами. В первой половине настоящего форума внимание было привлечено к нескольким надвигающимся проблемам, которые являются гораздо более пугающими и близкими, чем это единодушно считается обществом. Климат и экосистемы — это взаимосвязанные сложные нелинейные динамические системы, и изменения, происходящие в них в течение длительных периодов времени, могут казаться постепенными и несущественными. Однако сложные динамические системы могут внезапно испытывать радикальные

изменения, когда внешние или внутренние движущие силы или разбалансировки достигают точки опрокидывания или состояния бифуркации, о чём свидетельствуют пять эпизодов массового вымирания и множество более мелких случаев в истории Земли. Будучи разумными существами, мы не можем и не станем ждать, когда это произойдёт, без прогнозирования и подготовки для предупреждения изменений, ограничения их последствий и адаптации к ним.

Сейчас стало ясно, что задача декарбонизации глобальной энергетики имеет высочайший приоритет, является осуществимой и может в кратко- и среднесрочной перспективе дать наиболее значительный вклад. Хотя возобновляемые источники энергии с возможностями для хранения энергии быстро развиваются и демонстрируют большой потенциал, становится всё более очевидным, что опора исключительно на них для своевременной реализации декарбонизации является нереалистичной [108]. В области исследований и разработок управляемого синтеза в недавнее время наблюдался огромный скачок интереса, инвестиций и попыток поиска инновационных подходов и решений в дополнение к обычному токамаку, примерами чего являются международный проект ITER и национальные проекты, осуществляемые по всему миру. Несмотря на блестящее будущее, перспективы своевременного осуществления этих проектов к середине столетия, с тем чтобы они могли стать существенным подспорьем в решении проблемы, в настоящее время остаются весьма неопределёнными.

После того как настоящая статья была в основном закончена и разослана для получения комментариев и отзывов, IEA опубликовало доклад относительно достижения нулевого уровня выбросов к 2050 г. и ограничения подъёма глобальной температуры до $1,5^{\circ}\text{C}$ [109]. Этот документ, представляющий собой наиболее исчерпывающую и амбициозную дорожную карту из всех разработанных к настоящему времени в мире, призывает к полной трансформации энергетических систем, на которых базируются экономики. Несмотря на существующий зазор между риторикой и реальностью в вопросах выбросов, дорожная карта показывает, что всё ещё существуют пути к достижению нулевого уровня выбросов к 2050 г. Стратегия, на которой фокусируется IEA, связана исключительно с возобновляемыми источниками энергии, в особенности солнечной и ветровой, с дополнительным вкладом от гидроэнергетики и ядерной энергетики в качестве существенной базы для перехода. Дорожная карта призывает к тому, чтобы к 2050 г. две трети всех поставок энергии обеспечивались ветровой и солнечной энергией, биоэнергией, геотермальной и гидроэнергией. За период от настоящего времени до 2050 г. мощность солнечных PV-систем возрастёт в 20 раз, а мощность ветровой энергетики — в 11 раз. Увеличение вклада солнечной и ветровой энергетики в этом десятилетии обеспечит к 2030 г. ежегодный прирост в размере 630 ГВт в максимуме от солнечных фотоэлектрических установок и 390 ГВт в максимуме от ветровых установок. Доля продаж электромобилей (Electric Vehicle — EV) в мире возрастёт с примерно 5 % до более чем 60 %, количество пунктов зарядки EV увеличится с нынешних примерно 1 млн до 40 млн при скачке в годовом объёме производства аккумуляторов EV с сегодняшних 160 ГВт тепловой энергии до 6600 ГВт тепловой энергии в 2030 г., что эквивалентно ежегодному добавлению почти 20 ги-

гафабрик в течение последующих 10 лет. Хотя этот план выглядит осуществимым, IEA признаёт, что путь к его реализации остаётся очень тернистым. В докладе имеются содержательные ссылки для оценки эффективности представленного здесь решения по вопросам ядерной энергетики.

Хотя энергия деления ядер уже является вторым по величине источником низкоуглеродной электроэнергии в мире, её позиции более противоречивы, а будущее представляется весьма туманным. В большинстве сценариев по борьбе с изменениями климата признаётся, что ядерная энергия должна быть частью решения, и чем более амбициозные цели при этом ставятся, тем большей должна быть доля ядерной энергетики. Отношение к ядерной энергетике сообществ, которые ранее были антиядерными, претерпело значительные изменения. Многие правительства планируют развивать и расширять ядерную энергетику. В последнее время отмечался значительный рост частных и государственных инвестиций, программ и попыток исследования, разработок и демонстраций усовершенствованных систем и технологий ядерной энергетики. Однако эти усилия сводятся на нет общими неправильно понимаемыми допущениями, восприятием и позиционированием. Ядерная энергетика в течение десятилетий находилась в состоянии застоя и падения, и она сама, и отрасль в целом представлялись неспособными набрать и поддерживать импульс, необходимый для повторного разгона разработок и внедрений. Долгожданный ядерный ренессанс, или наступление второй ядерной эры, ещё не произошёл.

Именно в контексте этого фона и проблем здесь предлагается новая парадигма ядерной энергетики гражданского назначения для анализа и оценки её истории, статуса и перспектив, и кратко описывается глобально масштабируемое и своевременное системное решение. Такой подход, проистекающий из гарантии фундаментальной ядерной безопасности за счёт конструкции и обеспечения экономичности за счёт промышленного производства энергетических блоков, обладает потенциалом для преодоления стагнации и достижения самых амбициозных целей в борьбе с климатическими изменениями. Новая парадигма строится на основе существующей ядерной науки и проверенных технологий и направляется универсальными законами, которые открыты, теоретически описаны и подтверждены в наиболее успешно развивающихся технологиях и отраслях. Она может заимствовать существующие возможности и способы производства из смежных отраслей и увеличить срок службы или уменьшить количество "блокированных активов" во многих энергетических системах и инфраструктуре с интенсивными выбросами углерода.

Глобальное производство и потребление энергии отвечают за выбросы примерно 73 % парниковых газов за счёт электричества, тепла и двигательных установок. Доли различных секторов экономики при этом составляют: промышленность — 24,2 %, транспорт — 16,2 %, эксплуатация зданий — 17,5 %. Хотя некоторые сегменты в сфере транспорта и обслуживания зданий уже электрифицированы, для многих сегментов промышленности и транспорта ещё нет альтернатив с низкими выбросами углерода. В качестве решения для транспортировки энергии был предложен "зелёный" водород, для которого требуется подача большого количества недорогой первичной энергии с низкими выбросами

углерода. В случае технологического промышленного тепла и непосредственного промышленного использования тепловой энергии электрификация не очень подходит из-за неэффективности и образования отходов при внешнем преобразовании и передаче тепла. Существуют области, где ядерная энергия может "блеснуть" при условии, что существующее длительное время разногласие между безопасностью и экономичностью ядерной энергетики будет разрешено, отработанное топливо и отходы будут подлежать мониторингу и удаляться, а вопросы безопасности и риски распространения радиоактивных материалов будут находиться под контролем и сведены к минимуму. Новая парадигма пока только в теории смогла продемонстрировать свою силу и эффективность в решении таких вопросов. Мы увидим, что большее количество предсказаний будет проверено в новых реализациях, а технологии и системы, которые станут образцом для подражания, появятся в течение десятилетия.

В своей последней книге, посвящённой климатическим изменениям, Билл Гейтс анализирует выбросы углерода с разбивкой по источникам и предлагает комплексный план действий для достижения нулевого уровня выбросов к 2050 г. [110]. Гейтс систематически рассматривает то, как мы получаем энергию, производим вещи, выращиваем растения, передвигаемся, создаём прохладу и обогреваемся, и даёт краткое описание имеющихся технологий и необходимых инноваций. Настоящее исследование представляет собой дополнение, основывающееся на фундаментальных силах и взаимодействиях, служащих источником первичных видов энергии, и описание того, как их производство и использование связаны с основными системами и циклами материалов на Земле и могут влиять на них. Если мы в основном пользуемся формами энергии в рамках биогеохимической системы, представляющей важность для жизни, мы неизбежно сталкиваемся с проблемами устойчивости, в частности с климатическими изменениями, диктуемыми законами термодинамики. Если вместо этого мы в большей степени пользуемся видами энергии, внешними для подобных систем и циклов, такими как прямая солнечная и ядерная энергия, то существует потенциал для достижения долгосрочной устойчивости и движения вперёд. Новая парадигма представляет собой проект того, как можно быстро и предсказуемым образом масштабировать вверх ядерную энергетику, а также предлагает и другие сценарии реализации, не сводящиеся к электричеству (см., например, [111]).

Приведённые здесь парадигматические предсказания являются нейтральными в отношении типов реакторов и топлива. Более конкретный анализ и предсказания выходят за рамки настоящего обзора. Мы можем, однако, попытаться рассмотреть, какой уровень запроектированной безопасности будет скорее всего выбран в результате рыночной конкуренции при понимании того, что возникающие явления и появляющиеся системы по своей природе являются вероятностными. Уровень III, вероятностная безопасность, становится всё более неприемлемым. Уровень I, фундаментальная безопасность, по-видимому, устранил большинство опасений, связанных с безопасностью, и скорее всего будет среди первых ласточек второй ядерной эпохи. Уровень II, радиационная безопасность, обеспечивается за счёт компромисса между эффективностью и безопасностью с потенциаль-

ной возможностью повышения эффективности системы при условии, что восприятие рисков и допуски будут улучшены, а последствия аварий — как в реальности, так и на уровне демонстраций — станут менее разрушительными и обширными. Таким образом, конструкции уровня I и II являются дополнительными; конструкции уровня I, скорее всего, появятся на первых этапах, способствуя расширению производства, внедрения и приёмки ядерных объектов. Конструкции уровня II станут более распространёнными в долгосрочной перспективе, когда промышленность и рынки будут более устоявшимися и зрелыми, а восприятие рисков и допуски — более благоприятными. Конструкции уровня III будут необходимо развивать, а нынешние АЭС и новые проекты могут улучшить свои перспективы и характеристики путём модификации некоторых аспектов для достижения безопасности уровня II.

Следует ещё раз подчеркнуть, что чем выше в новой парадигме будет полная целевая установленная мощность, тем ниже будет средняя кумулятивная стоимость структурной единицы. Декарбонизация всё более широких секторов экономики с использованием ядерной энергии от энергетических модулей с гарантированной ядерной безопасностью поможет миру достичь более амбициозных целей в ослаблении климатических изменений при одновременном улучшении экономической ситуации. Было бы очень важно сравнить эту стратегию с другими, в особенности с той, что предлагается в докладе IEA, и улучшить их для расширения круга возможностей и повышения вероятности успеха. Это можно также рассматривать как масштабированное решение в комплексных планах действия типа того, что был предложен Гейтсом.

После того как новая парадигма устоит и просуществует в течение времени, достаточного для оказания содействия в борьбе с климатическими изменениями, на передний план выйдут другие важные цели, связанные с ресурсами и эффективностью конверсии, а также с замыканием топливных циклов для повышения устойчивости, и найдутся спрос и ресурсы, требуемые для масштабного экономического развития и реализации.

Для этого многообещающего решения требуется глобальное сотрудничество, охватывающее несколько отраслей. Дух и усилия этого форума и специального выпуска журнала *УФН* вдохновляют на следующую встречу Востока и Запада исторического значения [112], они будут распространяться с Севера на Юг по всему миру, по мере того как человечество будет сталкиваться с климатическими изменениями и совместно использовать решения в области энергетики. Перефразируя Эйзенхауэра, можно сказать, что если кошмарная тенденция застоя и падения ядерной энергетики гражданского назначения может быть обращена вспять, то этот величайший источник энергии может превратиться в большое благо для всего человечества.

Благодарности

Автор благодарит Зигфрида Хеккера из Стэнфордского университета за его экспертные замечания, основанные на богатом многолетнем опыте, и за приглашение на этот форум; Тошики Таджиму (Toshiki Tajima) из Университета штата Калифорния в Ирвайне за его любезное предложение представить и опубликовать настоящий обзор, а также остальных докладчиков и

авторов этого форума за разъяснения вопросов, связанных с изменением климата, и побуждение разрабатывать глобальные решения в области энергетики.

При подготовке и рассмотрении рукописи обзора многие ведущие эксперты и специалисты сделали ценные замечания, направленные на его улучшение и корректировку. Среди них следует отметить Виктора Рейса (Victor Reis), Джона Брауна (John Browne), Вацлава Смилы (Vaclav Smil), Тодда Аллена (Todd Allen) и Тома Уорда (Tom Ward).

Многие ведущие эксперты и специалисты по энергетике поделились со мной ценными советами, мыслями, возможностями и поддержкой с того времени, как я начал исследовать вопросы трансмутации ядерных отходов с использованием ускорителей, после чего переключился на вопросы усовершенствования топливных циклов, поколения IV ядерно-энергетических систем, партнёрства в мировой ядерной энергетике и проблематики малых модульных реакторов и микрореакторов в контексте новой парадигмы ядерной энергетики гражданского назначения. Их значительный вклад в соответствующих областях отражён в ссылках к настоящему обзору.

Некоторые из моих основных результатов и размышлений относительно SMR и новой парадигмы представлялись и обсуждались ранее и получили позитивную и конструктивную оценку. Среди мероприятий, где это происходило, следует отметить коллоквиумы и семинары в Университете штата Калифорния в Беркли, Массачусетском технологическом институте, Университете штата Мичиган, Питтсбургском университете, Центре исследования нелинейных явлений при Лос-Аламосской национальной лаборатории и совместном мероприятии по представлению доклада Массачусетского технологического института "Будущее ядерной энергии в мире с ограничениями на углерод" в Китае, организованном вместе с Сямыньским университетом (Xiamen University), а также на Российско-американском форуме молодых специалистов по ядерной энергетике в CISAC при Стэнфордском университете.

Перевод с английского: М.Ж. Шматиков

Список литературы

- Kuhn T S *The Structure of Scientific Revolutions* (Chicago, IL: Univ. of Chicago Press, 1962); Пер. на русск. яз.: Кун Т *Структура научных революций* (М.: АСТ, 2020)
- "The Future of the Nuclear Fuel Cycle". MIT Energy Initiative. An Interdisciplinary MIT Study. MIT, 2011, <http://energy.mit.edu/research/future-nuclear-fuel-cycle/>
- Murogov V M *Nucl. Energy Technol.* **5** (3) 241 (2019)
- Li N "A paradigm shift needed for nuclear reactors: from economies of unit scale to economies of production scale", in *Proc. of Intern. Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP'09, Tokyo, Japan, May 10–14, 2009*
- Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)* 2020 ed. (Vienna: IAEA, 2020) and SMR publications in 2011, 2012, 2014, 2016, and 2018; https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
- Ux Consulting, Small Modular Reactor Assessments (2010)
- Ux Consulting, Small Modular Reactor Market Outlook (2013)
- Ingersoll D T, Carelli M D (Eds) *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors* 1st ed. (Oxford: Woodhead Publ., 2014); Ingersoll D T, Carelli M D (Eds) *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors* 2nd ed. (Oxford: Woodhead Publ., 2020)
- "Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment". Nuclear Energy Agency. OECD. NEA, 2016, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14924/small-modular-reactors-nuclear-energy-market-potential-for-near-term-deployment?details=true
- Stokes G M et al. "American Nuclear Energy at the Crossroads", Novim Group (Santa Barbara, CA: Univ. of California, 2017)
- "Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity". Report. McKinsey Global Institute. Reinventing construction through a productivity revolution. 2017, <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>
- "Solving the Productivity Puzzle". The Role of Demand and the Promise of Digitization. Report. McKinsey and Company, 2018, <https://www.mckinsey.com/featured-insights/regions-in-focus/solving-the-productivity-puzzle>
- Ingersoll E, Gogan K "Missing Link to a Livable Climate: How Hydrogen-Enabled Synthetic Fuels Can Help Deliver the Paris Goals". Lucid Catalyst, Terra Praxis, 2020, <https://www.lucidcatalyst.com/hydrogen-report>
- Weinberg A M et al. *The Second Nuclear Era: A New Start for Nuclear Power* (Ed. R Manning) (New York: Praeger, 1985)
- Spiewak I, Weinberg A M *Annu. Rev. Energy* **10** 431 (1985)
- Weinberg A M *The First Nuclear Era: The Life and Times of a Technological Fixer* (New York: AIP Press, 1997)
- Weinberg A M *Science* **186** 205 (1974)
- Weinberg A M *Minerva* **10** 209 (1972)
- Weinberg A M *Science* **177** 211 (1972)
- Simon H A *The Sciences of the Artificial* 1st ed. (Cambridge, MA: MIT Press, 1969); Simon H A *The Sciences of the Artificial* 2nd ed. (Cambridge, MA: MIT Press, 1981); Simon H A *The Sciences of the Artificial* 3rd ed. (Cambridge, MA: MIT Press, 1996)
- Newell A, Simon H A *Human Problem Solving* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1972)
- Simon H A "The Science of Design: Creating the Artificial", *Design Issues*, Vol. 4, No. 1/2, Designing the Immaterial Society (Cambridge, MA: MIT Press, 1988) pp. 67–82
- Anderson P W *Science* **177** 393 (1972)
- Anderson P W *More and Different: Notes from a Thoughtful Curmudgeon* (Singapore: World Scientific, 2011)
- Wilczek F *A Beautiful Question: Finding Nature's Deep Design* (New York: Penguin Books, 2016)
- Wilczek F "Physical foundations of future technology", in *Mega-tech: Technology in 2050* (New York: The Economist Books, PublicAffairs, 2017)
- Waldrop M M *Complexity: the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos* (New York: Simon and Schuster, 1992)
- West G *Scale: The Universal Laws of Growth, Innovation, Sustainability, and the Pace of Life in Organisms, Cities, Economics, and Companies* (New York: Penguin Press, 2017)
- Bejan A *Shape and Structure, from Engineering to Nature* (New York: Cambridge Univ. Press, 2000)
- Romer P M *J. Political Economy* **98** (5, Pt. 2) S71 (1990)
- Romer P M *J. Economic Perspectives* **8** (1) 3 (1994)
- Greenspan E (Ed.-in-Chief) *Encyclopedia of Nuclear Energy* (Amsterdam: Elsevier, 2021)
- International Atomic Energy Agency, PRIS Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/pris>
- Nuclear Power Reactors in the World* (Reference Data Series, No. 2) 2020 ed. (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020); <https://www.iaea.org/publications/14756/nuclear-power-reactors-in-the-world>
- International Atomic Energy Agency, ARIS Advanced Reactors Information System, <https://aris.iaea.org>
- "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV Intern. Forum, GIF-002-00 (2002), https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9352/technology-roadmap
- Generation IV International Forum, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. OECD Nuclear Energy Agency, 2014, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9352/technology-roadmap

38. International Atomic Energy Agency, International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) (по состоянию на март 2021 г.), <https://www.iaea.org/services/key-programmes/international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro>
39. International Atomic Energy Agency, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Safety of Nuclear Reactors. IAEA-TECDOC-1902, 2020, <https://www.iaea.org/publications/12298/inpro-methodology-for-sustainability-assessment-of-nuclear-energy-systems-safety-of-nuclear-reactors>
40. Atlantic Council Task Force on US Nuclear Energy Leadership, US Nuclear Energy Leadership: Innovation and the Strategic Global Challenge. Atlantic Council Global Energy Center, 2019, <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/us-nuclear-energy-leadership-innovation-and-the-strategic-global-challenge-2/>
41. U.S. DOE, Advanced Reactor Demonstration Program, 2021, <https://www.energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/advanced-reactor-demonstration-program>
42. Idaho National Laboratory (INL), Versatile Test Reactor – Solving Energy Challenges through Science, 2021, <https://inl.gov/vtr/>
43. U.S. DOE, Accident Tolerant Fuels. 2021, <https://www.energy.gov/ne/articles/5-things-you-should-know-about-accident-tolerant-fuels>. High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU). 2021, <https://www.energy.gov/ne/articles/what-high-assay-low-enriched-uranium-haleu>
44. Kempfer J, Allen T "2020 Advanced Nuclear Map: Progress Amidst a Tumultuous Year", <https://www.thirdway.org/graphic/2020-advanced-nuclear-map-progress-amidst-a-tumultuous-year>
45. World Nuclear Performance Report, 2020 ed., No. 2020/008 (London: World Nuclear Association, 2020), <https://www.world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/world-nuclear-performance-report.aspx>
46. ElBaradei M "The Enduring Lessons of Chernobyl" (Vienna: IAEA, 2005), <https://www.iaea.org/newscenter/statements/enduring-lessons-chernobyl>
47. Taleb N N *The Black Swan: the Impact of the Highly Improbable* (New York: Random House, 2007)
48. Ritchie H, Roser M "Energy", Our World in Data, 2020, accessed in March, 2021, <https://ourworldindata.org/energy>, and data sources referenced therein
49. "Global Warming of 1.5°C", Special Report (International Panel on Climate Change, 2018), <https://www.ipcc.ch/sr15/>
50. International Energy Agency, World Energy Outlook 2020. IEA, (Paris, 2020), <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
51. International Energy Agency, Nuclear Power in a Clean Energy System. IEA (Paris, 2019), <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>
52. OECD — Nuclear Energy Agency, Nuclear Energy: Combating Climate Change. NEA (Paris, 2015), https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14914/nuclear-energy-combating-climate-change
53. International Atomic Energy Agency, Climate Change and Nuclear Power 2020. IAEA (Vienna, 2020), <https://www.iaea.org/publications/14725/climate-change-and-nuclear-power-2020>
54. MIT Energy Initiative (MITEI), The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World — An Interdisciplinary MIT Study. (MIT, 2018), <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>
55. Climate Interactive, En-ROADS. Online, 2021, <https://www.climateinteractive.org/tools/en-roads/>
56. Hecker S S (Ed.) *Doomed to Cooperate: How American and Russian Scientists Joined Forces to Avert Some of the Greatest Post-Cold War Nuclear Dangers* (Los Alamos, NM: Bathtub Row Press, 2016)
57. Hecker S S, Kassianova A A "The future of global nuclear power through the eyes of young Russian and American professionals", Bull. Atomic Scientists (June 20, 2019), <https://thebulletin.org/2019/06/the-future-of-global-nuclear-power-through-the-eyes-of-young-russian-and-american-professionals/>, and the featured articles
58. "Nuclear technology's role in the world's energy supply is shrinking. Anniversaries of the Fukushima and Chernobyl disasters highlight the challenges of relying on nuclear power to cut net carbon emissions to zero" *Nature* (09 March 2021) Editorial, <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00615-w>
59. Eisenhower D D "Atoms for Peace Speech", in *The 470th Plenary Meeting of the United Nations General Assembly, 8 December 1953*, <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>
60. Hirschberg S et al. *Comparison of Severe Accident Risks in Fossil, Nuclear and Hydro Electricity Generation* (Villigen: Paul Scherrer Institute, 2001)
61. Ritchie H "What are the safest and cleanest sources of energy?", Our World in Data, 2020, <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>
62. Slovic P *Science* **236** 280 (1987)
63. Gregory R, Mendelsohn R *Risk Analysis* **13** (3) 259 (1993)
64. Gregory R, Flynn J, Slovic P *Am. Scientist* **83** (3) 220 (1995)
65. Slovic P "Trust, emotion, sex, politics, and science: Surveying the risk-assessment battlefield", in *Environment, Ethics, and Behavior: The Psychology of Environmental Valuation and Degradation* (Eds M H Bazerman et al.) (San Francisco: New Lexington Press, 1997) pp. 277–313
66. IAEA, Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, IAEA Nuclear Energy Series NBG-G-3.1, Rev.1 (2015)
67. Atlantic Council Task Force on US Nuclear Energy Leadership: Innovation and the Strategic Global Challenge. Global Energy Center, 2019, <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/us-nuclear-energy-leadership-innovation-and-the-strategic-global-challenge-2/>
68. Nagy B et al. *PLoS One* **8** (2) e52669 (2013)
69. Farmer J D, Lafond F *Res. Policy* **45** (3) 647 (2016)
70. Smil V "Germany's Energiewende, 20 Years Later", IEEE Spectrum (2020), <https://spectrum.ieee.org/energy/renewables/germanys-energiewende-20-years-later>
71. Way R, Mealy P, Farmer J D "Estimating the costs of energy transition scenarios using probabilistic forecasting methods", INET Oxford Working Paper No. 2021-01 (Oxford: Institute for New Economic Thinking at the Oxford Martin School, 2020); <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/no-2021-01-estimating-the-costs-of-energy-transition-scenarios-using-probabilistic-forecasting-methods/>
72. McNeerney J et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **108** 9008 (2011)
73. Nuclear Threat Initiative (NTI), Proliferation Risks of Nuclear Power Programs. NTI, 2007, <https://www.nti.org/analysis/articles/risks-nuclear-power-programs/>
74. Davies R V et al. *Nature* **203** 1110 (1964)
75. Liu C et al. *Nat. Energy* **2** 17007 (2017)
76. Dungan K et al. *Prog. Nucl. Energy* **99** 81 (2017)
77. Yuan Y et al. *Nat. Sustain.* **4** 708 (2021)
78. Le Quéré C et al. *Earth Syst. Sci. Data* **6** (1) 235 (2014) <https://doi.org/10.5194/essd-6-235-2014>
79. World Nuclear Association, Radioactive Waste – Myths and Realities. Updated 2021, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-wastes-myths-and-realities.aspx>
80. Office of Nuclear Energy, 5 Fast Facts about Spent Nuclear Fuel. U.S. DOE, 2021, <https://www.energy.gov/ne/articles/5-fast-facts-about-spent-nuclear-fuel>
81. Curtis T L et al. "A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials: Drivers, Barriers, Enablers, and U.S. Policy Considerations", Technical Report NREL/TP-6A20-74550 (Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2021); <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74550>
82. Xu Y et al. *Waste Management* **75** 450 (2018)
83. Moran E F et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115** 11891 (2018)
84. Li N *Energy Policy* **36** (6) 2212 (2008)
85. Rasmussen N C *Annu. Rev. Energy* **6** 123 (1981)
86. U.S. NRC, Probabilistic Risk Assessment (PRA), <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/pr.html>
87. Pedersen T *IAEA Bull.* **31** (3) 25 (1989)

88. Taleb N N *Antifragile: Things That Gain From Disorder* (New York: Random House, 2012)
89. IAEA ARIS. KLT-40S, JSC Afrikantov OKB Mechanical Engineering (OKBM), Last update 23-04-2013, <https://aris.iaea.org/PDF/KLT-40S.pdf>
90. Beliaev V, Polunichev V "Basic safety principles of KLT-40C reactor plants", IAEA INIS, 1998, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/058/31058468.pdf
91. NuScale Power, One Plant Does it All – Simultaneously, 2021, <https://www.nuscalepower.com/>
92. Ed Cummins, Westinghouse – AP1000 Plant Overview. IAEA INIS, 2014, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/123/46123064.pdf
93. Wright T P J. *Aeronaut. Sci.* **3** 122 (1936)
94. Tribe M, Alpine R L W *Eng. Costs Production Economics* **10** 271 (1986)
95. Christensen L R, Greene W H J. *Political Economy* **84** (4, Pt. 1) 655 (1976)
96. Laughlin R B, Pines D *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **97** (1) 28 (2000)
97. Lee J C *Nuclear Reactor Physics and Engineering* (New York: John Wiley and Sons, 2020)
98. Todreas N E, Kazimi M S *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals* (Boca Raton, FL: CRC Press, 1989)
99. Todreas N E, Kazimi M S *Nuclear Systems II: Elements of Thermal Hydraulic Design* (New York: Taylor and Francis, 1990)
100. Oklo, What would you do with a MW-decade of clean energy? Accessed in May 2021, <https://oklo.com/>
101. Ultra Safe Nuclear, Reliable Energy Anywhere. 2021, Accessed in May 2021, <https://usnc.com/>
102. U.S. DOE, New MARVEL Project Aims to Supercharge Micro-reactor Deployment. Accessed in May 2021, <https://www.energy.gov/ne/articles/new-marvel-project-aims-supercharge-microreactor-deployment>
103. Brandt D E, Wesorick R R "GE Gas Turbine Design Philosophy", GE Power Generation GER-3434D (Schenectady, NY: GE Industrial and Power Systems, 1994)
104. Turbomachinery International (TMI), Worldwide Gas Turbine Forecast. Turbomachinery Magazine Handbook (2019)
105. Airbus, Global Market Forecast 2019-2038 (2018), <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.htm>
106. Boeing, Commercial Market Outlook 2020-2039 (2019), <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/index.page>
107. UNCTAD, Review of Maritime Transport (2020), <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2020>
108. Дробински Ф, Тантет А *УФН* **192** (11) 1191 (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039080>; Drobinski P, Tantet A *Phys. Usp.* **65** (11) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039080>
109. IEA. "Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector" (2021), <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
110. Gates B How to Avoid a Climate Disaster: The Solutions We Have and the Breakthroughs We Need (New York: Alfred A. Knopf, 2021)
111. "Rethinking Deployment Scenarios to Enable Large-Scale, Demand-Driven Non-Electricity Markets for Advanced Reactors", Report ID 3002018348 (Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2021)
112. Таджима Т, Некас А, Массард Т, Гейлс С *УФН* **192** (11) 1280 (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039052>; Tajima T, Necas A, Massard T, Gales S *Phys. Usp.* **65** (11) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039052>

New paradigm for civil nuclear energy. Perspectives from the hierarchy of energy sources and fundamental safety

N. Li

Transform Insight Partners, USA

E-mail: powertocw@gmail.com

This paper is a review extended in scope and based on a presentation made at the Uspekhi Forum on Climate Change and Global Energy. Following a brief overview of the history, status, and outlook of civil nuclear energy to present the key problems and challenges, this energy source is placed in a primary energy hierarchy on Earth with all classes of energy systems based on fundamental forces to reveal its unique characteristics that set civil nuclear energy qualitatively apart. A new paradigm is outlined with a distinct set of safety categories, design principles, and production methods that differ from conventional nuclear power, which leads to a global energy system solution for much broader development and deployment at scale in time to help mitigate climate change. Based on concepts and methods from studies of emergent properties in complex adaptive systems, we use a scaling method to analyze nuclear reactor safety and economics, and explicitly relate reactor unit scale, safety limits, and production volume to cumulative cost and capacity. Simultaneous improvement in and optimization of nuclear safety and economics are leading to small modular reactors (SMRs) and micro reactors (MRs) as exemplar technologies of the new paradigm. We show that select SMR and MR designs with deterministic fundamental safety should be manufactured, which can achieve substantial cost reductions as production volumes increase, following Wright's law observed in the majority of proven technologies. The new paradigm offers distinct and testable predictions, some of which have been partially tested, and some of which have surrogate tests from successful technologies and industries, which are also endowed with substantial transferrable capabilities and capacities for implementation. The scaling principles and results should be generally applicable to other energy systems and the majority of manufactured goods.

Keywords: nuclear energy, paradigm, primary energy hierarchy, fundamental safety, manufactured systems, economies of production volume, unit scale, small modular reactors, micro reactors, global energy solution

PACS numbers: **28.41.-i**, **28.50.-k**, **89.30.Gg**

Bibliography — 112 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (11) 1231–1274 (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039082>

Received 24 July 2021

Physics – Uspekhi **65** (11) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.08.039082>