

# Содержание

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Введение</b>                                                                | 7  |
| 1. Современное состояние и значение атомной энергетики в мировой энергосистеме | 7  |
| 2. Основные проблемы и перспективы развития атомной отрасли                    | 10 |
| 3. Обоснование актуальности исследования: цели и задачи работы                 | 14 |
| 4. Анализ существующих исследований в области атомной энергетики               | 19 |
| 5. Новизна исследования                                                        | 21 |
| <br><b>Глава 1</b>                                                             |    |
| <b>АКТУАЛЬНАЯ РОЛЬ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>                                      | 25 |
| 1. Мировая энергетика: основные источники энергии и их доли                    | 27 |
| 2. Атомная энергетика как фактор стабильности и энергетической безопасности    | 32 |
| 3. Атомная энергетика: недооцененные плюсы и переоцененные минусы              | 36 |
| 4. Статистика: атомные реакторы и их распределение по странам                  | 44 |
| 5. Компании — лидеры мирового атомного рынка                                   | 46 |
| <br><b>Глава 2</b>                                                             |    |
| <b>АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГОПЕРЕХОДА</b>               | 51 |
| 1. Глобальный энергопереход: причины и цели                                    | 53 |
| 2. Роль атомной энергетики в снижении выбросов углерода                        | 57 |
| 3. Декарбонизация: атомная энергия как зеленый источник                        | 59 |
| 4. Сравнение атомной энергетики с возобновляемыми источниками                  | 61 |
| Капвложения                                                                    | 61 |
| Стоимость эксплуатации                                                         | 61 |
| Утилизация отходов и компонентов                                               | 62 |
| Срок эксплуатации и эффективность                                              | 62 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. Атомная энергетика как стабильный элемент энергоперехода                        | 63 |
| 6. Атомная энергетика и возобновляемые источники энергии: конкуренция или синергия | 65 |

### **Глава 3**

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| <b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>     | 69 |
| 1. Принципы работы атомных реакторов                  | 71 |
| 2. Типы реакторов и их особенности                    | 73 |
| 3. Технологии замкнутого топливного цикла             | 77 |
| 4. Малые модульные реакторы и их возможное применение | 81 |
| 5. Термоядерный синтез: потенциал и вызовы            | 86 |

### **Глава 4**

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>БЕЗОПАСНОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ ОТХОДАМИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ</b>                  | 91  |
| 1. Проблемы безопасности атомных станций и уроки техногенных катастроф          | 93  |
| 2. Современные стандарты и технологии безопасности                              | 96  |
| 3. Управление ядерными отходами: современные методы и перспективы               | 100 |
| Типы ядерных отходов                                                            | 101 |
| Процесс управления отходами                                                     | 102 |
| Переработка                                                                     | 105 |
| Замкнутый цикл                                                                  | 105 |
| Перспективные направления                                                       | 106 |
| 4. Международное сотрудничество и обеспечение безопасности в атомной энергетике | 108 |

### **Глава 5**

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>                              | 113 |
| 1. Экономика атомной энергетики: стоимость строительства и эксплуатации АЭС               | 116 |
| 2. Как атомная энергетика влияет на экономику страны и способствует созданию рабочих мест | 120 |
| 3. Социальное восприятие атомной энергетики: ожидания и опасения общества                 | 121 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. Роль атомной энергетики в национальной энергетической безопасности      | 126 |
| 5. Экономика атомного экспорта: партнерства и конкуренция на мировом рынке | 127 |

## **Глава 6**

### **АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА РОССИИ И ЕЕ РОЛЬ НА МИРОВОМ РЫНКЕ**

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
|                                                            | 133 |
| 1. Структура атомной энергетики России                     | 136 |
| 2. «Росатом» в мировой атомной энергетике                  | 139 |
| 3. Стратегические цели России в области атомной энергетики | 142 |
| 4. Технологии России в атомной энергетике                  | 145 |
| Современные водо-водяные энергетические реакторы           | 145 |
| Плавучие энергоблоки                                       | 145 |
| Реакторы на быстрых нейтронах                              | 147 |
| Замкнутый цикл                                             | 148 |
| Малые модульные реакторы                                   | 149 |
| Новые виды топлива                                         | 149 |
| Технологии обращения с радиоактивными отходами             | 150 |
| 5. Атомная энергетика и развитие экономики России          | 151 |
| 6. Конкурентные преимущества российских атомных технологий | 155 |
| 7. Экспорт атомных технологий                              | 157 |
| 8. Проекты «Росатома» за рубежом                           | 159 |
| Иран: Бушерская АЭС                                        | 159 |
| Турция: АЭС «Аккую»                                        | 160 |
| Бангладеш: АЭС «Руппур»                                    | 161 |
| Египет: АЭС «Эль-Дабаа»                                    | 161 |
| Венгрия: АЭС «Пакш-2»                                      | 162 |
| Индия: АЭС «Куданкулам»                                    | 163 |
| Китай: Тяньваньская АЭС                                    | 163 |
| Китай: АЭС «Сюйдапу»                                       | 164 |
| Другие проекты                                             | 164 |

## **Глава 7**

### **АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И МЕЖДУНАРОДНАЯ ПОЛИТИКА**

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 1. Конкуренция за влияние                                | 171 |
| 2. Международные отношения и энергетическая безопасность | 174 |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. Роль МАГАТЭ и ядерные программы двойного назначения                        | 178 |
| 4. Перспективы России                                                         | 181 |
| 5. Перспективы Китая                                                          | 185 |
| 6. Санкции как препятствие для атомной экспансии России и Китая               | 187 |
| <b>Глава 8</b>                                                                |     |
| <b>БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>                                             | 193 |
| 1. Сценарии будущего: перспективы атомной энергетики на ближайшие десятилетия | 195 |
| Роль ММР                                                                      | 200 |
| 2. Технологии будущего                                                        | 203 |
| Основные стартапы в сфере термоядерного синтеза                               | 208 |
| Основные проекты в области подкритических реакторов с ускорителями            | 210 |
| 3. Перспективы международного сотрудничества                                  | 211 |
| Обмен технологиями и опытом                                                   | 212 |
| Гармонизация стандартов безопасности                                          | 215 |
| Финансирование проектов                                                       | 216 |
| Вызовы и перспективы                                                          | 218 |
| 4. Экология, устойчивое развитие и борьба с климатическими изменениями        | 219 |
| <b>Заключение</b>                                                             | 227 |
| <b>Литература и источники</b>                                                 | 233 |

# Введение

1. Современное состояние и значение атомной энергетики в мировой энергосистеме
2. Основные проблемы и перспективы развития атомной отрасли
3. Обоснование актуальности исследования: цели и задачи работы
4. Анализ существующих исследований в области атомной энергетики
5. Новизна исследования

## 1. Современное состояние и значение атомной энергетики в мировой энергосистеме

В числе вызовов, стоящих перед человечеством, обеспечение энергетической безопасности, удовлетворение растущего спроса на энергоносители и энергогенерации и, наконец, предотвращение глобальной климатической катастрофы занимают далеко не последнее место. При этом от решения указанных задач в немалой степени зависит судьба атомной энергетики, едва ли не самой сложной системы, когда-либо созданной людьми. Либо она станет важнейшим элементом мировой энергетической инфраструктуры, либо ее доля в энергетическом балансе, пусть не в ближайшие годы, но в обозримой перспективе, снизится почти до нуля.

Между тем последствия реализации каждого из этих сценариев крайне сложно переоценить. Поскольку атомная отрасль, будучи важной частью нашей цивилизации, влияет на экономику, геополитику, экологию.

В середине прошлого столетия люди научились использовать атомную энергию не только в военных целях, но и для производства электричества. В 1954 г. в Обнинске была запущена первая атомная электростанция (АЭС).

С тех пор атом стал не только военным, но и мирным. Хотя аварии на АЭС в Чернобыле и Фукусиме показали, что использование ядерных технологий для решения энергетических проблем может иметь весьма серьезные издержки.

А вопрос надежности и безопасности АЭС стал едва ли не приоритетным при реализации соответствующих проектов.

В то же время при неукоснительном соблюдении всех правил эксплуатации АЭС оказывают минимальное воздействие на окружающую среду. И уж точно по этому показателю оставляют далеко позади углеводородные генерации. В этом плане, пожалуй, единственный минус безаварийных атомных станций — проблема хранения и утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Но эти издержки несопоставимы с тем ежедневным экологическим уроном, который приносят тепловыделяющие станции (ТЭС), использующие уголь или мазут.

С другой стороны, необходимость решения задач, касающихся ОЯТ, стимулирует инновации, способствует открытию новых профильных производств и бизнесов. И это лишь малая часть всего комплекса экономических преимуществ атомной энергетики. Непременным следствием появления АЭС в той или иной стране становится резкое увеличение рабочих мест, главным образом высококвалифицированных, что повышает запрос местного населения на получение высшего образования.

При этом высокая энергоемкость делает атомные генерации крайне востребованными для таких энергоинтенсивных отраслей, как металлургия и химическая промышленность.

Еще одно немаловажное конкурентное преимущество, особенно по сравнению с гидро-, ветровой или солнечной энергетикой, — работа АЭС не зависит от погодных условий или иных особенностей местности, где они расположены. Это позволяет использовать их в регионах, где есть проблемы с доступом к другим энергоносителям.

Упомянутые аспекты превращают атомную энергетику в важный фактор международных отношений и геополитики. Спрос на энергию растет практически по всему миру. А страны, которые обзавелись собственными АЭС, гарантированно избавляются от энергозависимости и энергодефицита, что приобретает критически важное значение в условиях обострения борьбы за доступ к нефтегазовым месторождениям и/или контроль над трубопроводами или водными магистралями, используемыми при транспортировке углеводородов. Наличие атомных генераций позволяет обеспечивать бесперебойное функционирование национальных энергосистем вне зависимости от остроты и исхода соответствующих конфликтов и динамики мировых цен на топливо.

А это, в свою очередь, становится не просто прочной основой социально-экономического развития, но и базисом для укрепления суверенитета.

Тем более логично возрастание роли на мировой арене государств, способных экспортировать атомно-энергетические компетенции и технологии, прежде всего России, США, Китая, Франции.

Возможно, отчасти поэтому атомная энергетика порой оказывается в эпицентре геополитических столкновений, главным образом из-за подозрения в использовании для разработки или распространения ядерного оружия.

Не будем сейчас подробно рассматривать вопрос, насколько оправданны (или, наоборот, спекулятивны и ситуативны) подобные обвинения.

Заметим лишь: объединение усилий разных стран по предотвращению попыток милитаризации атомно-энергетических технологий не вызывает сомнений.

Тем более что открытость и широкое международное сотрудничество в данной сфере будут способствовать повышению уровня доверия между различными и даже конкурирующими (если не враждующими) геополитическими акторами и, следовательно, предотвращению угрозы большой войны, с высокой вероятностью последней для человечества.

Максимально широкое международное сотрудничество по развитию мирного атома позволит реализовать и масштабировать проекты в области термоядерного синтеза, наладить выпуск ядерных двигателей для космических кораблей и компактных реакторов для энергообеспечения колоний на Марсе и других планетах.

При несомненной важности таких вопросов, как ядерная безопасность, энергообеспеченность, геополитические интересы, атомная энергетика — это еще и результат способности человека преодолевать преграды. В середине прошлого века ученые-атомщики доказали, что наши самые смелые фантазии могут стать реальностью. Но и сейчас атомная энергетика остается генератором научного поиска, продолжает дарить человечеству мечту. А ведь именно мечта двигает человечество вперед.

## 2. Основные проблемы и перспективы развития атомной отрасли

Аварии на Чернобыльской АЭС (1986) и АЭС «Фукусима-1» (2011) наглядно показали, к чему могут привести даже кажущиеся незначительными недочеты в управлении станциями или стихийные бедствия. Несмотря на проведенную «работу над ошибками», ни политики, ни лидеры общественного мнения, ни даже профильные эксперты не спешат соглашаться с тем, что текущий уровень риска приемлем для широкого внедрения атомной энергетики.

Смежная проблема — хранение и утилизация ОЯТ. Период распада некоторых радиоактивных элементов измеряется сотнями, а то и тысячами лет. Поэтому обеспечение безопасности в данном вопросе требует не только значительных капиталовложений и наличия передовых технологий. Едва ли не важнее для страны, столкнувшейся с необходимостью разместить ОЯТ на своей территории, — готовность общества согласиться с издержками использования атомной энергетики.

Яркое тому доказательство — перипетии вокруг финского комплекса «Онкало» (рис. 1) — уникального геологического хранилища с использованием стальных канистр, запечатанных в медные капсулы, помещенных в гранитные тоннели на глубину почти 1 км, залитых



**Рис. 1**

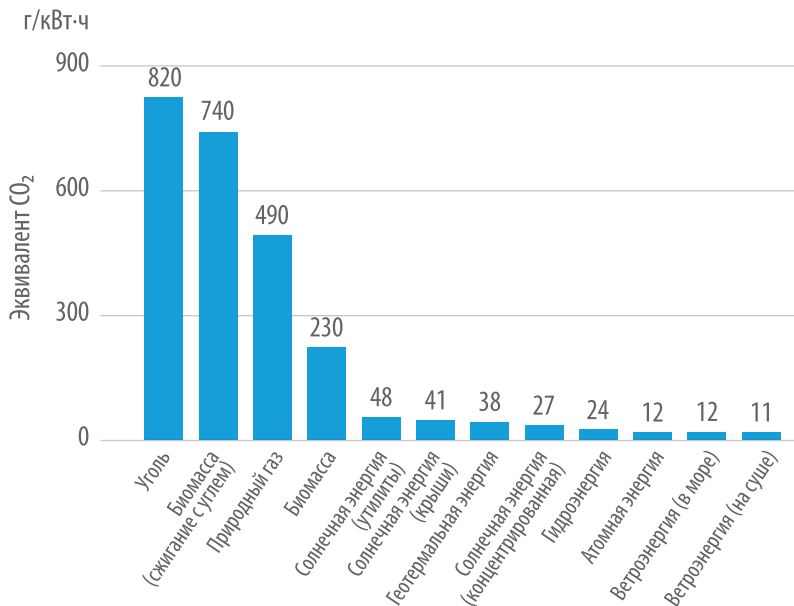
Место расположения глубинного геологического хранилища «Онкало» близ Эурайоки, Финляндия, на фоне атомной электростанции «Олкилуото»

**Фото:** © M. Pakats / Shutterstock

бетонитом и засыпанных грунтом. Предполагаемый срок работы — 100 000 лет, притом что отходы будут приниматься с 2026 до 2120 г. Стоимость проекта — около €1 млрд.

Подобные единичные проекты пока не вызывают широкого публичного одобрения из-за дороговизны, а также сомнений в безопасности хранилища, ведь используемые металлы обладают коррозионностью.

В целом финансирование — едва ли не главный после безопасности камень преткновения в реализации атомно-энергетических программ. АЭС требуют значительных стартовых капвложений, причем с длительными сроками окупаемости. Таким образом с чисто экономической (или, скорее, бухгалтерской) точки зрения — а именно по стоимости единицы произведенной мощности — атомные генерации проигрывают, например, солнечным или ветровым.

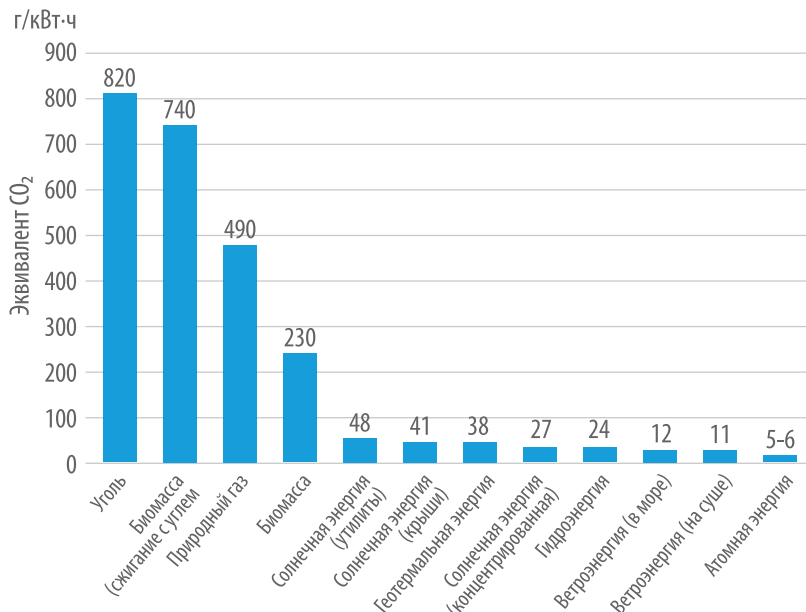
**Рис. 2**Выбросы CO<sub>2</sub>-эквивалента

Источник: World Nuclear Association

Впрочем, в отличие от других видов низкоуглеродной энергетики, атомные генерации практически не зависят от погодных и географических условий, ландшафта и т.п. При этом, согласно последним данным World Nuclear Association (рис. 2), выбросы CO<sub>2</sub> для АЭС не превышают 12 г/кВт·ч<sup>1</sup>.

В марте 2022 г. Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН) приводила еще более низкие показатели по выбросам АЭС — диапазон 5,1–6,4 г на кВт·ч для атомной энергетики (рис. 3). А это абсолютный рекорд для всех генераций, включая самые зеленые.

<sup>1</sup> World Nuclear Association. Information Library / Energy and the Environment / Carbon Dioxide Emissions From Electricity. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity>. — Здесь и далее примечания автора, если не указано иное.

**Рис. 3**

Средние объемы выбросов углекислого газа при выработке электроэнергии. В разрезе источников электроэнергии, в эквиваленте за весь жизненный цикл

Иными словами, по сочетанию таких факторов, как стабильность работы и влияние на окружающую среду, атомную энергетику можно назвать безальтернативной.

В свою очередь, проблему дороговизны атомных станций позволяет решить применение так называемых технологий четвертого поколения. Прежде всего для производства малых модульных реакторов (ММР) — на быстрых нейтронах и расплавленных солях. Более дешевые и компактные, они могут быть использованы в тех случаях, когда финансовый вопрос и вопрос энергообеспеченности по важности примерно сопоставимы для потенциального потребителя.

Немаловажный аргумент в пользу развития атомно-энергетических технологий — возможности, которые открывает ядерная

медицина, в том числе для лечения онкологических заболеваний. В промышленности также весьма востребована радиационная обработка материалов.

Наконец, проект ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) по созданию международного экспериментального термоядерного реактора объединяет усилия ученых множества стран, порой находящихся в режиме острого противостояния друг с другом. Таким образом, атом становится «мирным» не только благодаря целям применения, но и способности соответствующих исследований примирить нынешних геополитических антагонистов.

### 3. Обоснование актуальности исследования: цели и задачи работы

Президент США Дональд Трамп пообещал «предоставить американцам самую дешевую энергию и электричество на Земле», а также активизировать работы, связанные с искусственным интеллектом (ИИ), и поощрять майнинг криптовалют<sup>1</sup>. Эти цели сколь амбициозны, столь и противоречивы — деятельность и разработчиков ИИ, и майнеров требует слишком значительных энергоресурсов, чтобы это не повлияло на их стоимость для остальных потребителей. Единственный проверенный способ снизить расходы на электроэнергию при одновременном увеличении спроса — резко увеличить выработку атомных генераций. Отсюда — намерение Трампа одобрить строительство атомных электростанций, работающих на малых реакторах.

Этот шаг вполне отвечает потребностям и настроениям американского высокотехнологичного бизнеса.

*«Мы... должны по-новому взглянуть на атомную энергетику, либо перезапустив существующие станции, уже подключенные к сети, либо построив следующее поколение меньших, более безопасных и эффективных реакторов. И здесь реформирование нормативных актов,*

---

<sup>1</sup> Washington Post. Does Trump want Putin to get Ukraine's \$26 trillion in gas and minerals? <https://www.washingtonpost.com/opinions/2024/12/18/trump-ukraine-gas-mineral-russia-peace-deal>.

которые были написаны для технологий 1970-х годов, жизненно важно для ускорения инноваций и внедрения», — отмечает Эрик Шмидт, бывший глава Google/Alphabet, а ныне председатель Специального проекта по изучению конкуренции<sup>1</sup>.

При этом Шмидт подчеркивает: *«Хотя преимущества ядерной энергетики хорошо известны, инновации в энергетике США также должны быть направлены на термоядерную энергию — процесс, который питает Солнце. Термоядерные генераторы используют огромную энергию, выделяющуюся при соединении легких атомных ядер в более тяжелые, что делает их потенциально богатым, надежным и чистым источником энергии...»*

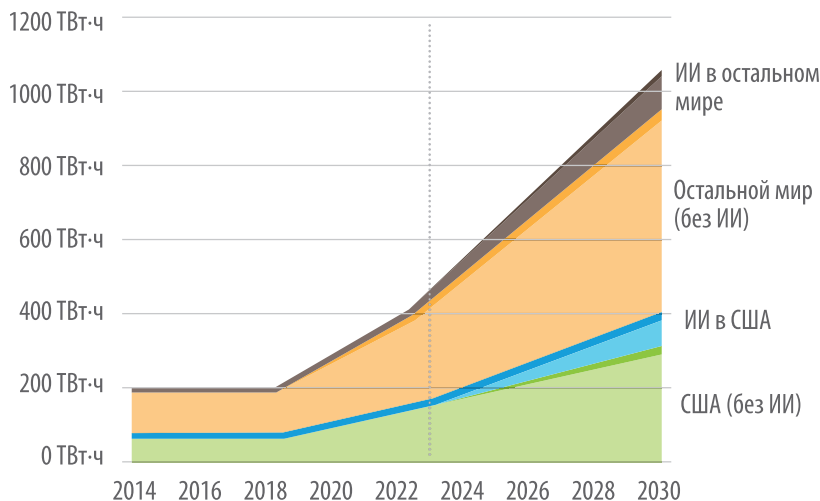
*Если США смогут развивать термоядерную энергетику в масштабах страны, то потребности ИИ в электроэнергии можно будет легко удовлетворить. Для этого потребуются значительные инвестиции и новые партнерства между стартапами и национальными лабораториями, чтобы продвинуть концептуальные разработки и спланировать путь к коммерциализации».*

По оценкам Goldman Sachs Research, спрос на электроэнергию для центров обработки данных к 2030 г. вырастет на 160%<sup>2</sup>. При этом только работы в области ИИ потребуют ежегодно не менее 200 тераватт-часов (ТВт·ч) до конца десятилетия. Это почти пятая часть всего энергопотребления дата-центров (рис. 4 и 5).

Только для поддержания их работы энергокомпаниям США потребуется вложить \$50 млрд в новые генерирующие мощности. Европе, с ее самой старой энергосистемой в мире, на аналогичные цели потребуется в разы больше — до €800 млрд. При этом Старый Свет, в отличие от США после возвращения Трампа в Белый дом, еще не отказался от зеленой повестки. И развитие солнечной и ветровой видов энергетики для европейцев по-прежнему «на столе». Тогда как по перспективам атомных генераций у стран ЕС нет единого мнения.

<sup>1</sup> Project Syndicate. Eric Schmidt. We Need Energy for AI, and AI for Energy. <https://www.project-syndicate.org/magazine/massive-ai-energy-requirements-achievable-with-government-strategic-role-by-eric-schmidt-2024-12>.

<sup>2</sup> Goldman Sachs Research. AI is poised to drive 160% increase in data center power demand. <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/AI-poised-to-drive-160-increase-in-power-demand>.

**Рис. 4**

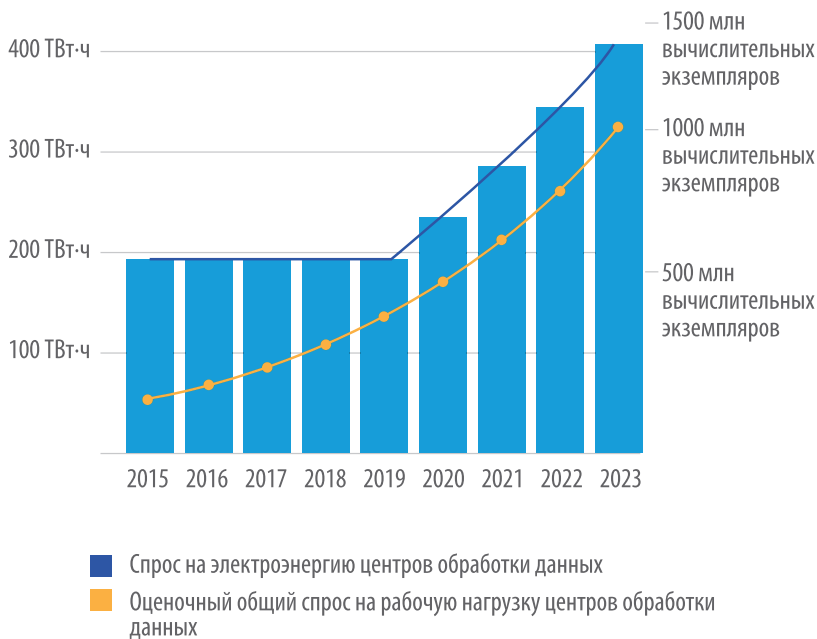
Увеличение энергопотребления центров обработки данных за счет искусственного интеллекта к 2030 г.

**Источник:** Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Research

В этом смысле для европейцев больше, чем для американцев, сегодня актуально предупреждение американского политического и экономического обозревателя Ноа Смита: «Если мы не перестанем вписывать электротехнику в климатический дискурс, она и дальше будет страдать от партийной поляризации и неверно расставленных приоритетов»<sup>1</sup>.

Как бы там ни было, от успехов в разработке и применении цифровых технологий (прежде всего ИИ) сегодня зависят уже не только позиции той или иной страны в глобальных экономических рейтингах. Дееспособность и «суверенность» используемых нейросетей теперь определяет и военно-технический потенциал, а следовательно, и возможность защищать национальные интересы на мировой арене.

<sup>1</sup> Noah Smith. America is losing the physical technologies of the future. <https://www.noahpinion.blog/p/america-is-losing-the-physical-technologies>.

**Рис. 5**

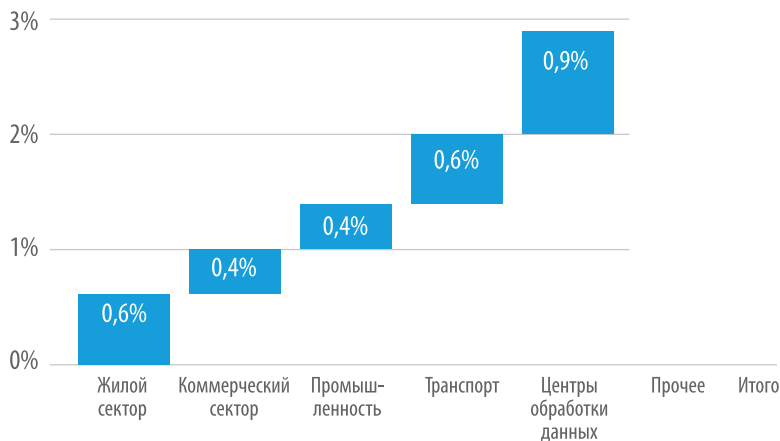
Требования к рабочей нагрузке для центров обработки данных и потребляемая ими мощность

**Источник:** Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Research

Спрос на электроэнергию центров обработки данных на 2023 г. является оценочным.

С учетом критически высокого уровня энергопотребления соответствующих цифровых систем возникает очевидный конфликт между решением задач технологического развития и тем, что Ноа Смит называет «климатическим дискурсом». И опять же, разрешение коллизии — в более широком использовании атомной энергетики, с ее низким углеродным следом и гарантированно стабильной выработкой.

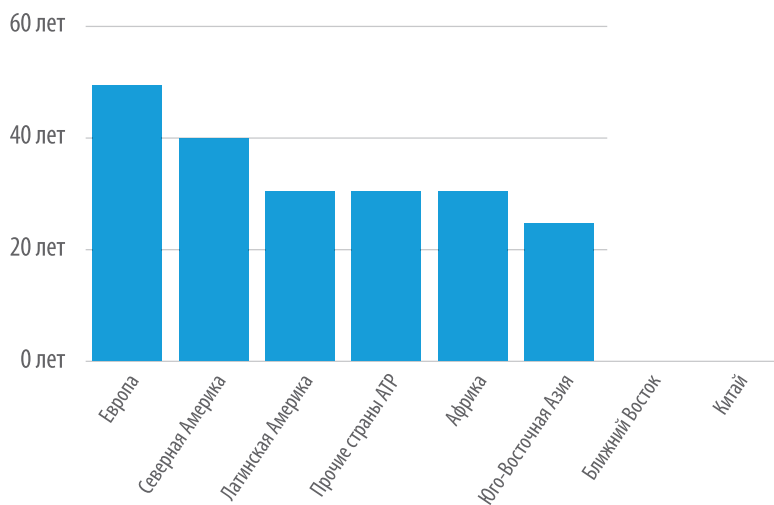
При всей важности цифрового лидерства в современном мире представленный пример — далеко не единственный, показывающий, как много актуальных и острых глобальных проблем может быть решено с помощью мирного атома. Далее мы подробнее рассмотрим

**Рис. 6**

Рост спроса на электроэнергию в США по секторам.

Прогнозируется, что спрос на электроэнергию будет расти со среднегодовым темпом 2,4% в период с 2022 по 2030 г.

Источник: Goldman Sachs Research, EIA

**Рис. 7**

Средний возраст региональных электросетей

Источник: Nexans Presentation

взаимосвязь таких аспектов, как технические особенности атомных станций, их воздействие на окружающую среду, стоимость производства энергии, влияние атомной энергетики на международные отношения, и то, как отдельные страны используют ее в качестве геополитического инструмента.

Ответы на все эти вопросы позволят нам предположить, какое будущее ждет атомную энергетику.

#### 4. Анализ существующих исследований в области атомной энергетики

Классической работой по рассматриваемой нами теме считается «Атомное пробуждение: Новый взгляд на историю и будущее ядерной энергетики» Джеймса Махаффи. Также нельзя не отметить вклад, внесенный в изучение данной проблемы Дэниелом Ергиным<sup>1</sup>, Мередит Энгвин («Скрытая хрупкость наших энергосетей»), Ричардом Вольфсоном («Атомный выбор в XXI веке»), Скоттом Монтгомери («Видеть свет: Доводы в пользу ядерной энергетики в XXI веке»), Раули Партаненом и Янне Корхоненом («Темная лошадка: Ядерная энергетика и изменение климата»), Фрэнсисом Дж. Гэвином («Ядерное оружие и американская большая стратегия»), Джейн Накано («Меняющаяся геополитика ядерной энергии. Взгляд на Соединенные Штаты, Россию и Китай»), Николой де Блазио («Ядерная геополитика и технологии»).

В то же время основные источники актуальной информации и аналитики — профильные организации:

- **Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) (International Atomic Energy Agency, IAEA)**, которое публикует ежегодный аналитический отчет «Перспективы развития мировой энергетики»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Ергин Д. В поисках энергии: Ресурсные войны, новые технологии и будущее энергетики. М.: Альпина Паблишер, 2017.

<sup>2</sup> International Energy Agency. World Energy Outlook 2024. <https://eepir.ru/wp-content/uploads/2024/10/WorldEnergyOutlook2024.pdf>.

- **Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ — IAEA)** регулярно публикует исследования, посвященные вопросам ядерной безопасности, а также использованию атомной энергетики для достижения целей устойчивого развития<sup>1</sup>. Кроме того, в базе данных PRIS собрана ключевая информация обо всех АЭС, действующих в мире<sup>2</sup>.
- **Международный институт стратегических исследований (The International Institute for Strategic Studies, IISS)** анализирует динамику спроса и предложения в атомной энергетике, а также роль России, Китая и стран Ближнего Востока в формировании этого рынка. Рассматриваются политические и экономические аспекты ядерных программ таких стран, как Саудовская Аравия, ОАЭ и Египет<sup>3</sup>.
- Ежегодные отчеты **Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA)** и **Energy Institute**, а также **World Nuclear Industry Status Report** активиста Майкла Шнайдера содержат данные о текущем состоянии атомной энергетики в мире<sup>4,5,6</sup>.
- **Аналитический центр Ember** как специализирующийся на возобновляемой энергетике дает возможность по различным количественным показателям сопоставить АЭС с зелеными генерациями<sup>7</sup>.

---

<sup>1</sup> IAEA. Nuclear Power and Sustainable Development. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1754web-26894285.pdf>.

<sup>2</sup> The Power Reactor Information System (PRIS). <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>.

<sup>3</sup> IISS. The geopolitics of nuclear energy: new dynamics of supply and demand. <https://www.iiss.org/online-analysis/online-analysis/2018/12/geopolitics-nuclear-energy>.

<sup>4</sup> World Nuclear Association. World Nuclear Performance Report 2024. <https://world-nuclear.org/images/articles/World-Nuclear-Performance-Report-2024.pdf>.

<sup>5</sup> Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2024. [https://www.energyinst.org/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0006/1542714/684\\_EI\\_Stat\\_Review\\_V16\\_DIGITAL.pdf](https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGITAL.pdf).

<sup>6</sup> World Nuclear Industry Status Report. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnistr2024-v2.pdf>.

<sup>7</sup> Ember Think Tank. Insights. <https://ember-energy.org/insights>.

- **Российское энергетическое агентство** представляет сценарии развития мировой энергетики до 2050 г.<sup>1</sup>
- **Агентство по ядерной энергии при Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) (Nuclear Energy Agency, NEA)** регулярно публикует исследования, посвященные различным аспектам сотрудничества между странами — лидерами по развитию ядерных технологий<sup>2</sup>.
- Журнал ***Bulletin of the Atomic Scientists*** освещает вопросы международной безопасности в контексте использования и развития ядерных технологий<sup>3</sup>.

## 5. Новизна исследования

В нашем исследовании мы предлагаем отказаться от шаблонного восприятия атомной и так называемой чистой энергетики, использующей возобновляемые источники энергии (ВИЭ), как конкурирующих технологий. Логичнее их рассматривать как взаимодополняющие элементы, которые помогают добиться сразу двух важных целей: устранить энергодефицит и минимизировать негативное влияние на окружающую среду.

Содействуя снижению энергозависимости различных стран, экспорт мирных атомных технологий и компетенций способствует формированию долгосрочных межгосударственных партнерств. Это, в свою очередь, укрепляет на мировой арене роль государств, обладающих передовыми разработками в области ядерной энергетики. А сама она — о чем мы тоже подробно поговорим — становится важным элементом мягкой силы.

Впрочем, наряду с оптимистичным сценарием, предполагающим широкую и повсеместную реализацию атомно-энергетических

---

<sup>1</sup> Российское энергетическое агентство. Сценарии развития мировой энергетики до 2050 года. <https://www.imemo.ru/files/File/ru/seminars/EnergyDialogue/2024/Drebentsov-26012024.pdf>.

<sup>2</sup> Nuclear Energy Agency. <https://www.oecd-neo.org>.

<sup>3</sup> Bulletin of the Atomic Scientists. <https://thebulletin.org>.

программ, мы рассмотрим и последствия (тоже весьма вероятного) сворачивания соответствующих проектов по политическим и экологическим мотивам.

Большая часть профильной литературы на русском языке посвящена техническим аспектам атомной энергетики. Учет и анализ мнений авторитетных зарубежных специалистов, исследователей и экологов позволяют дать читателю более полное представление о дискуссиях по вопросам атомной энергетики, ее геополитической роли и возможных вариантах ее будущего развития.

Раздел с практическими рекомендациями, касающимися и таких аспектов, как хранение ОЯТ, обеспечение безопасности АЭС и работа с общественным мнением, повышает ценность исследования для тех руководителей разных рангов, чья деятельность в той или иной степени связана с атомной энергетикой.



1

АКТУАЛЬНАЯ  
РОЛЬ  
АТОМНОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ



1. Мировая энергетика: основные источники и их доли
2. Атомная энергетика как фактор стабильности и энергетической безопасности
3. Атомная энергетика: недооцененные плюсы и переоцененные минусы
4. Статистика: атомные реакторы и их распределение по странам
5. Компании — лидеры мирового атомного рынка

## **1. Мировая энергетика: основные источники энергии и их доли**

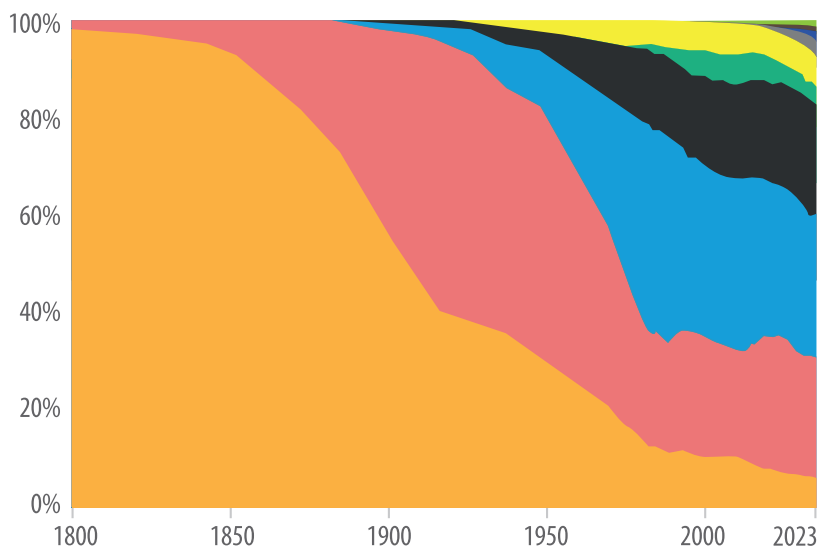
Основными энергоносителями в мире по-прежнему остаются нефть, уголь и природный газ, обеспечивающие около 80% мирового энергопотребления. При этом нефть покрывает около 30% глобальных энергетических потребностей, в основном в транспортном секторе и в нефтехимической промышленности<sup>1</sup>. Природный газ, считающийся более экологичным топливом, — около 22%. Уголь — 25%, несмотря на лидерство соответствующих генераций по выбросам углекислого газа. Доля атомной энергии — менее 4% (рис. 8).

Если говорить об энергоносителях, используемых для выработки непосредственно электричества, расклад будет несколько иной. Согласно данным проекта Our World in Data, в 2023 г. на уголь по данному показателю приходилось 36%, на газ — 22%, на гидроэнергетику — 14%, а на атомную энергетику — уже почти 9% (рис. 9).

Правда, за последние 40 лет доля генераций, использующих углеводороды, практически не изменилась. В 1985 г. — 64%, в 2023-м — 61%. Зато растет вклад ВИЭ (рис. 10). Солнечная, ветровая и прочие виды зеленой энергетики увеличивают свою рыночную нишу главным образом за счет АЭС (рис. 11).

---

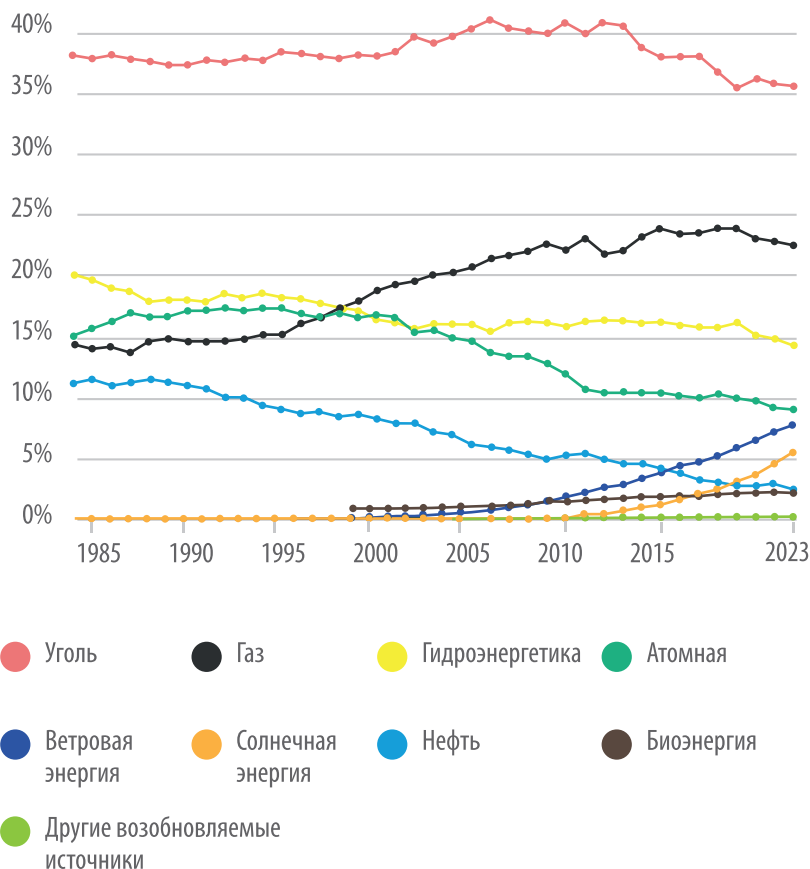
<sup>1</sup> Our World in Data. Energy Mix. Explore global data on where our energy comes from, and how this is changing. <https://ourworldindata.org/energy-mix>.



**Рис. 8**

Потребление энергии с разбивкой по источникам энергии

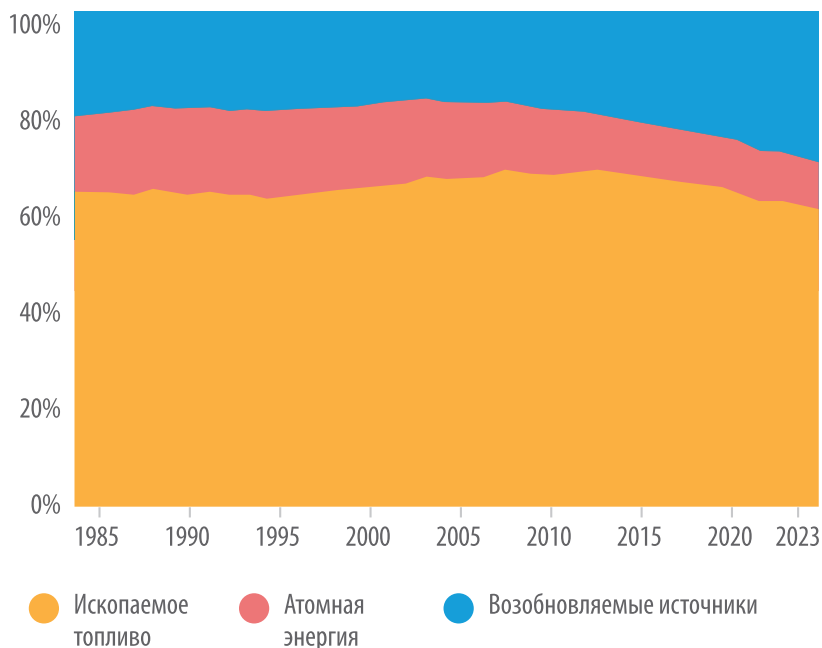
**Источник:** Energy Institute — Statistical Review of World Energy (2024); Smil (2017)  
 OurWorldinData.org/energy/CC BY



**Рис. 9**

Выработка электроэнергии с разбивкой по источникам энергии

**Источник:** Ember (2024); Energy Institute — Statistical Review Of World Energy (2024)  
OurWorldinData.org/energy/CC BY



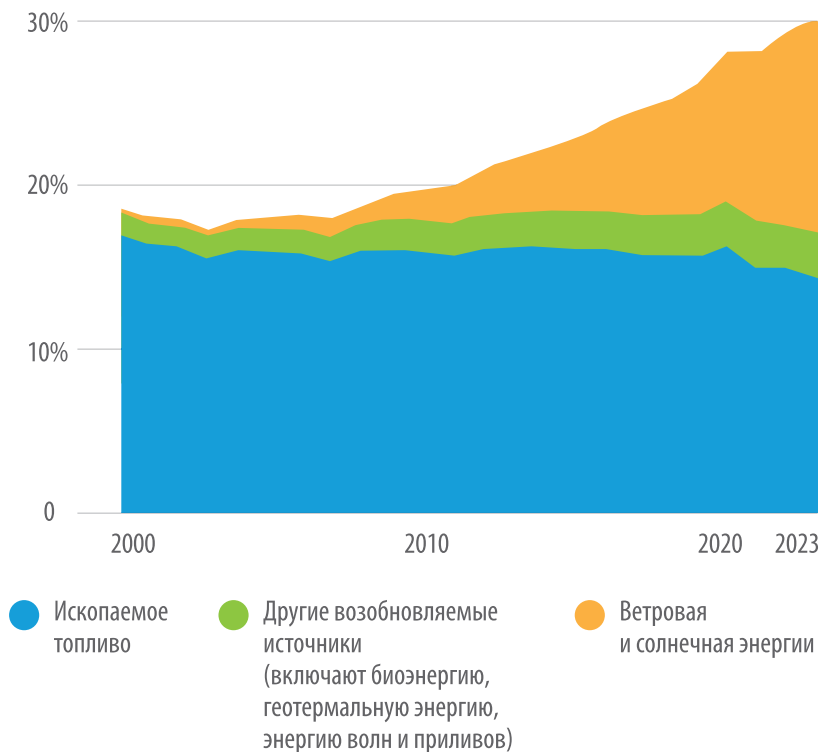
Ватт-час — энергия, производимая одним ваттом мощности в течение одного часа. Поскольку один ватт эквивалентен одному джоулю в секунду, один ватт-час эквивалентен 3600 джоулям энергии. Для кратных единиц используются метрические приставки, обычно:

- киловатт-часы (кВтч), или тысяча ватт-часов;
- мегаватт-часы (МВтч), или миллион ватт-часов;
- гигаватт-часы (ГВтч), или миллиард ватт-часов;
- тераватт-часы (ТВтч), или триллион ватт-часов.

### Рис. 10

Доля углеводородов, ВИЭ и атомной энергетики  
в выработке электричества

**Источник:** Ember (2024); Energy Institute — Statistical Review Of World Energy (2024)  
OurWorldinData.org/energy/CC BY

**Рис. 11**

Рост доли ветровой и солнечной видов энергетики  
в выработке электричества

**Источник:** Annual electricity data, Ember

В 2023 г. доля ВИЭ в мировом энергобалансе впервые превысила 30%. А в 69 странах она больше 50%. В то же время доля атомно-энергетической выработки за два десятилетия снизилась почти вдвое — с 16,6% в 2000 г. до 9,1% в 2023-м<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ember Think Tank. Global Electricity Review. <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/05/Report-Global-Electricity-Review-2024.pdf>.

Тем не менее возможно изменение тренда. Согласно отчету WNA, выработка электроэнергии на АЭС в 2023 г. выросла на 2%, достигнув 2602 млрд кВт·ч.

При этом, несмотря на то что страны Ближнего Востока и Персидского залива полагаются главным образом на нефть и природный газ, Саудовская Аравия собирается строить и АЭС. Европа, при всей приверженности зеленой повестке, также не отказывается полностью от атомной энергетики, наглядное подтверждение чему — Венгрия и Финляндия. Китай, будучи мировым лидером в области ветровой и солнечной видов энергетики и продолжая активно использовать угольные генерации, в то же время рекордными темпами строит АЭС. На развитие атомной энергетики в США делает ставку и администрация Трампа.

## 2. Атомная энергетика как фактор стабильности и энергетической безопасности

*«Вводятся в эксплуатацию новые реакторы и планируется новое строительство в самых разных странах. Сотрудничество и конкуренция в отрасли позволят реализовать множество новых проектов в ближайшие годы»,* — заявила генеральный директор WNA Сама Бильбао-и-Леон, выступая в 2023 г. на 28-й Конференции сторон рамочной конвенции ООН по изменению климата (COP28)<sup>1</sup>. В рамках подписанных тогда соглашений предполагается утроить имеющиеся в мире ядерные мощности к 2050 г.

Указанные параметры и дедлайн вполне объяснимы. Как раз к середине нынешнего столетия мировой спрос на электроэнергию вырастет на 75–100%<sup>2</sup>. При этом только в Индии рост этого показателя составит 250–280%.

<sup>1</sup> «Ведомости». Производство электроэнергии на АЭС в мире растет. (27 ноября 2024 г.) <https://www.vedomosti.ru/analytics/world/articles/2024/11/26/1077505-proizvodstvo-elektroenergii-na-aes-v-mire-rastet>.

<sup>2</sup> IEA. World Energy Outlook. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/outlook-for-electricity>.

Солнечная и ветровая виды энергетики критически зависят от погодных условий. ТЭС, использующие уголь или мазут, характеризует высокий объем выбросов углекислого газа. Кроме того, цена углеводородов подвержена резким колебаниям под влиянием не только экономических, но и геополитических факторов.

В этом смысле атомная энергетика оказывается едва ли не оптимальным выбором. При этом значительные капитальные затраты на стадии строительства АЭС компенсируются сравнительно низкими эксплуатационными расходами на протяжении всего срока службы, который уже может достигать 60 лет.

Так, например, выработка 1 кВт·ч на новых американских атомных генерациях потребует от \$6500 до \$8100 стартовых инвестиций<sup>1</sup>. В Южной Корее с этой же целью придется потратить \$2157, в Словакии — \$6920.

Зато после выхода станции на проектную мощность 1000 кВт·ч будет обходиться в среднем в \$30,92<sup>2</sup>. Топливо — полцента за 1 кВт·ч, что составляет 15–20% эксплуатационных расходов<sup>3</sup>.

Многоблочные станции и энергооператоры, в распоряжении которых находятся несколько АЭС, тоже выигрывают от эффекта масштаба<sup>4</sup>. В 2022 г. средняя стоимость 1 МВт на АЭС с несколькими энергоблоками составляла \$28,64, тогда как на станциях с одним энергоблоком — \$41,08.

Неудивительно, что многие европейские страны развивают атомную энергетику:

- Швеция планирует построить как минимум два крупных реактора к 2035 г. и десять новых реакторов к 2045 г.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Our World of Energy. What does it cost to build a nuclear power plant? <https://www.ourworldofenergy.com/vignettes.php?type=nuclear-power&id=6>.

<sup>2</sup> NEI. Nuclear Costs in Context. [https://nei.org/CorporateSite/media/filefolder/resources/reports-and-briefs/2024-Costs-in-Context\\_final.pdf](https://nei.org/CorporateSite/media/filefolder/resources/reports-and-briefs/2024-Costs-in-Context_final.pdf).

<sup>3</sup> World Nuclear Association. Economics of Nuclear Power. <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power>.

<sup>4</sup> NEI. Nuclear Costs in Context. [https://nei.org/CorporateSite/media/filefolder/resources/reports-and-briefs/2024-Costs-in-Context\\_final.pdf](https://nei.org/CorporateSite/media/filefolder/resources/reports-and-briefs/2024-Costs-in-Context_final.pdf).

<sup>5</sup> Energy Brain Pool. Will 2024 mark the beginning of a new nuclear era? <https://blog.energybrainpool.com/en/will-2024-mark-the-beginning-of-a-new-nuclear-era>.