

Содержание

Введение	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
Глава 1	
АКТУАЛЬНАЯ РОЛЬ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	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
Глава 2	
АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГОПЕРЕХОДА	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	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	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	
БЕЗОПАСНОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ ОТХОДАМИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	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	
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	113
1. Экономика атомной энергетике: стоимость строительства и эксплуатации АЭС	116
2. Как атомная энергетика влияет на экономику страны и способствует созданию рабочих мест	120
3. Социальное восприятие атомной энергетике: 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 энергетике	142
4. Технологии России в атомной энергетике	145
Современные водо-водяные энергетические реакторы	145
Плавающие 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

	167
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
Глава 8	
БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	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
Заключение	227
Литература и источники	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 теплоэлектростанции (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

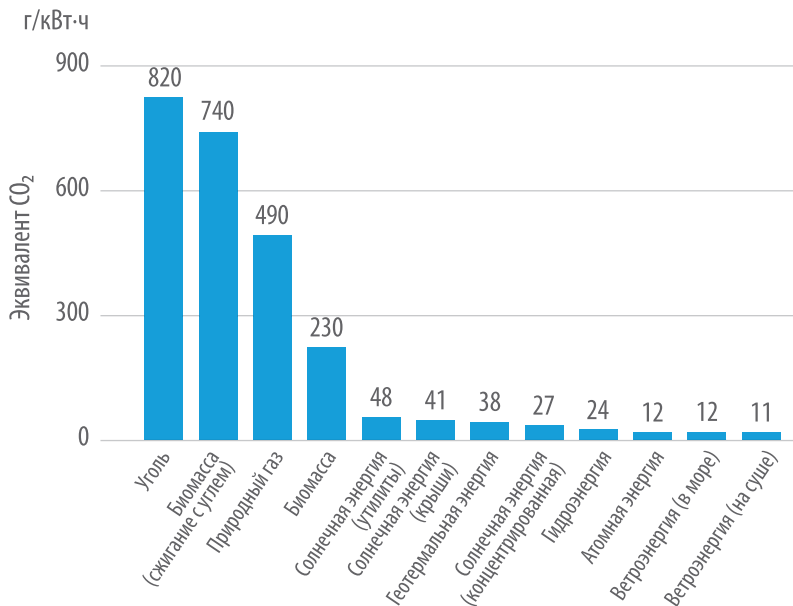
Место расположения глубинного геологического хранилища «Онкало» близ Эурайоки, Финляндия, на фоне атомной электростанции «Олкилуото»

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 CO₂-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 CO₂ для АЭС не превышают 12 г/кВт·ч¹.

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.

¹ 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.

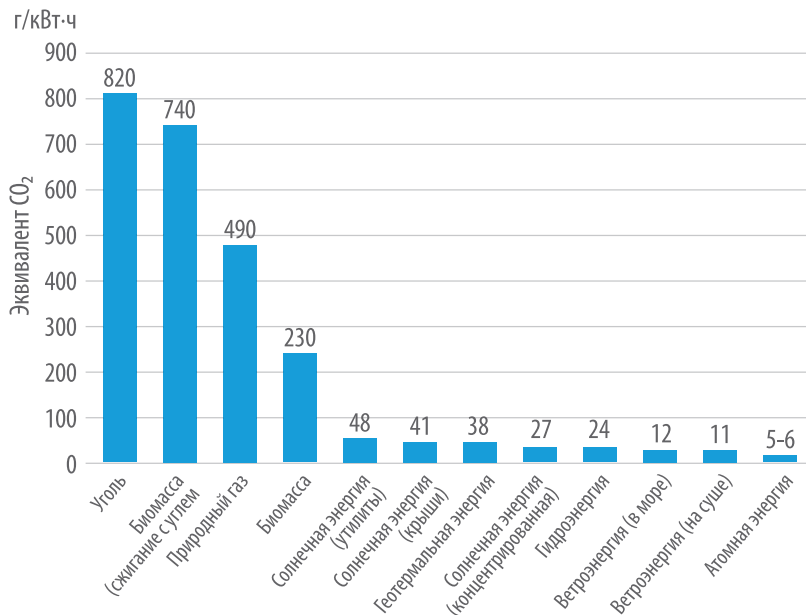


Рис. 3

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 криптовалют¹. 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,

¹ 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 конкуренции¹.

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%². 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.

¹ 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>.

² 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>.

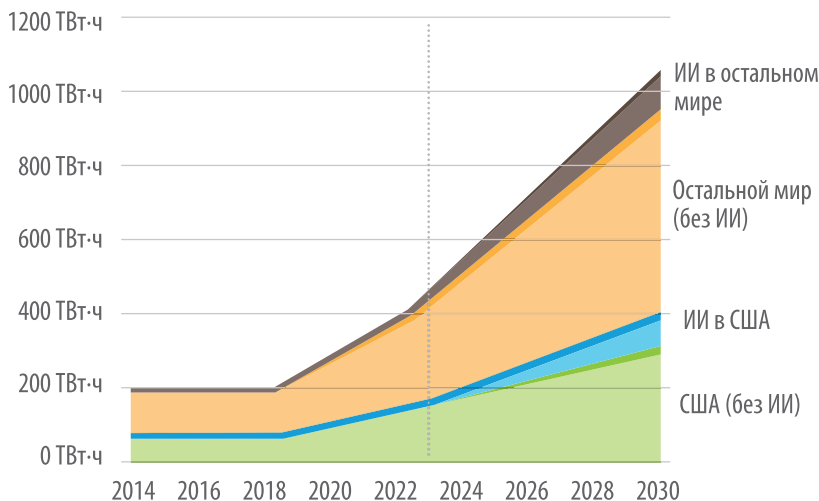


Рис. 4

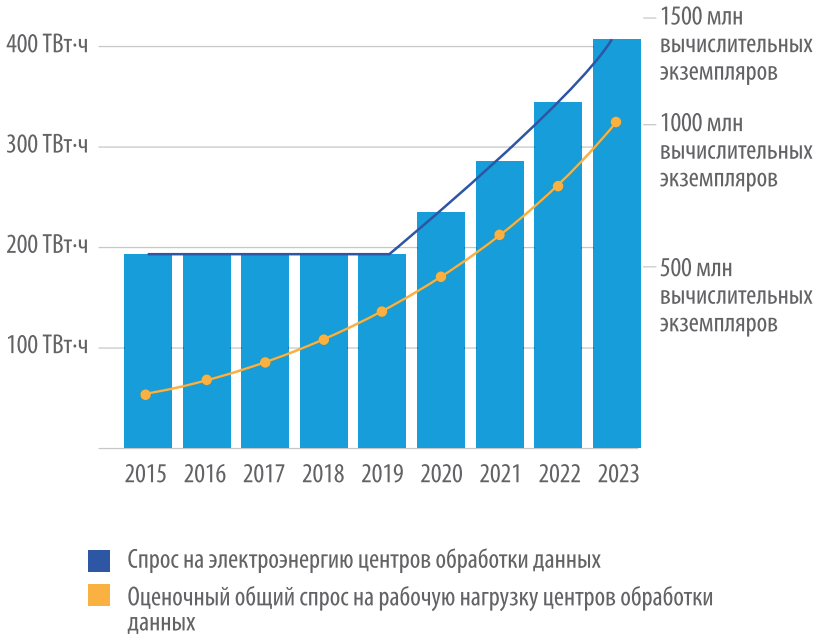
Увеличение энергопотребления центров обработки данных за счет искусственного интеллекта к 2030 г.

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»¹.

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.

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

**Рис. 5**

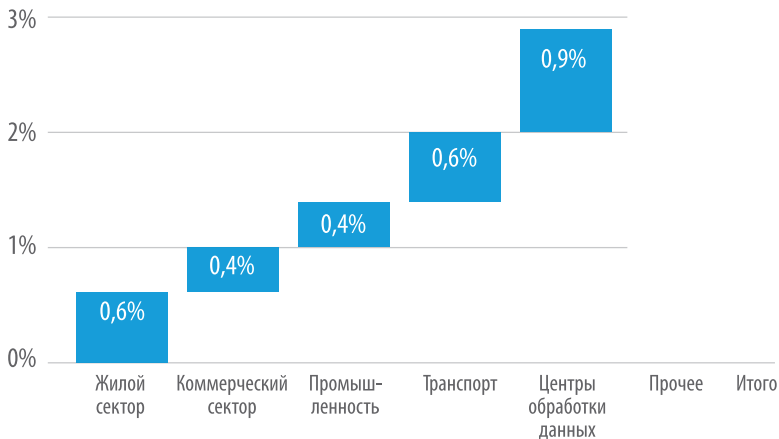
Требования к рабочей нагрузке для центров обработки данных и потребляемая ими мощность

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.

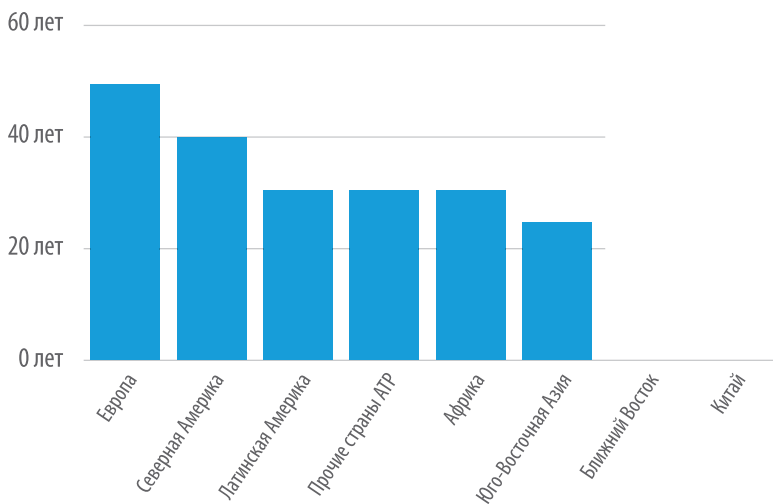
При всей важности цифрового лидерства в современном мире представленный пример — далеко не единственный, показывающий, как много актуальных и острых глобальных проблем может быть решено с помощью мирного атома. Далее мы подробнее рассмотрим

**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

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru