

УДК 621.039

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.14>

Оригинальная статья / Original paper

## Двухкомпонентная атомная энергетика как инструмент решения современных проблем в условиях неполноты знаний об энергетике будущего

В.П. Кучинов<sup>1</sup>, Н.В. Горин<sup>2</sup>, Е.В. Кузнецов<sup>2</sup>, В.В. Коробейников<sup>3</sup>, В.М. Декусар<sup>3</sup>, С.Е. Щеклеин<sup>4</sup><sup>1</sup> НИЯУ МИФИ,

115409 Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

<sup>2</sup> ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,

456770 Россия, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а/я 245

<sup>3</sup> АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

<sup>4</sup> Уральский федеральный университет,

620002 Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

**Реферат.** Обсуждается двухкомпонентная атомная энергетика, состоящая из существующих реакторов на тепловых нейтронах и реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом, как инструмент решения основных проблем современности – загрязнения окружающей среды и глобального потепления при неполноте знаний об энергетике будущего. Утверждается, что этот инструмент заработает в полную силу лишь при его применении в странах «Группы двадцати» – Китае, США, Индии, России, странах Евросоюза и остальных. Обоснование его применения для широкого использования затруднено недостаточными знаниями (или их отсутствием) о будущем развитии как мирового сообщества, так и самой энергетике. Связанные с этим неопределенности названы и отмечено, что многие из них находятся в стадии разрешения. По мере отдаления горизонта прогнозирования объем неопределенностей увеличивается, однако ряд ключевых положений уже известен и это позволяет принимать обоснованные решения. Это позволило Госкорпорации «Росатом» принять стратегию перехода в среднесрочной перспективе в России к двухкомпонентной атомной энергетике. Что касается других стран, то во многих из них общественное мнение консервативно и пока не поддерживает широкое распространение атомной энергетике в связи с опасениями ядерных аварий и возможностями распространения ядерного оружия. К широкомасштабному использованию атомной энергетике пока не подключился и крупный бизнес, не усматривая в ней серьезных экономических стимулов. Сделан вывод, что в России принято своевременное решение об ориентации энергетике на двухкомпонентную атомную энергетическую систему, что может служить примером и для других стран.

**Ключевые слова:** энергопереход, загрязнение окружающей среды, глобальное потепление, неполнота знаний о будущем энергетики, двухкомпонентная атомная энергетика, замкнутый ядерный топливный цикл.

**Для цитирования:** Кучинов В.П., Горин Н.В., Кузнецов Е.В., Коробейников В.В., Декусар В.М., Щеклеин С.Е. Двухкомпонентная атомная энергетика как инструмент решения современных проблем в условиях неполноты знаний об энергетике будущего. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;1:169–186. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.14>

## Введение

Президент РАН академик В.Е. Фортов в 2015 г. в предисловии к [1] писал «...Трудно понять почему, но Советский Союз и затем Россия, будучи крупнейшим в мире экспортером энергоресурсов, не разрабатывали собственные прогнозы развития мировых энергетических рынков, а опирались на регулярно выпускаемые материалы министерства энергетики США и Международного энергетического агентства. Отдавая должное этим очень квалифицированным и масштабным исследованиям, нельзя вместе с тем недооценивать роль многочисленных факторов неопределенности и большое влияние политических и экономических интересов на формирование видения будущего».

Все современные подходы к решению глобальных проблем взаимодействия человека и биосферы имеют общую методологическую ограниченность, так как являются экстраполяцией текущих знаний и тенденций на будущее. Реальное развитие событий будет определяться сложным взаимодействием технологических, социальных и природных факторов, включая возможность непредвиденных природных и социальных (международных) глобальных изменений. Это делает задачу взаимодействия человечества и биосферы, включая энергетику, одной из наиболее сложных в истории цивилизации. Несмотря на то, что цикличность развития общества и смены его технологических укладов рассмотрены во многих трудах, неполнота знаний об энергетике будущего сохраняется [2 – 4].

Энергообеспечение определяет уровень жизни населения каждой страны, ее технологический уклад, циклы и тенденции экономического развития, формирует политические и экономические факторы. В настоящее время мир вступает в этап четвертого энергетического перехода с вытеснением ископаемых видов углеводородного топлива, доля которого в мировом энергобалансе составляет ~80%, энерготехнологий с наименьшим влиянием на окружающую среду. Это связано с наметившейся тенденцией исчерпания их ресурсов, требованиями к минимизации отходов и защите окружающей среды, борьбой с изменением климата и сокращением выбросов парниковых газов. Энергопереход определяется как 10%-ное сокращение доли рынка определенного энергоресурса за 10 лет [1]. Однако темпы изменений и скорость перехода связаны с неопределенностями, из-за чего появляются «консервативные», «инновационные» и прочие сценарии развития в многочисленных прогнозах, результаты которых различаются от десятков процентов до нескольких раз.

Атомная энергетика, свободная от загрязняющих выбросов углеводородной энергетике и обеспечивающая производство предсказуемого объема энергии, не зависящего от метеоусловий, пока не стала, да и не могла стать по ряду причин

основой для нового перехода к экологически чистой энергетике. Сегодня такой переход большинство населения связывает с массовым использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в основном, на базе использования энергии солнца и ветра [5, 6]. ВИЭ относятся к стохастическим (вероятностным) источникам, требуют отчуждение значительных земельных площадей, зависят от метеоусловий и не способны обеспечить цивилизацию энергией в размере десятка млрд т.н.э., соизмеримой с современным потреблением энергии ~ 15 млрд т.н.э. в год [7].

Атомная энергетика развивается разнонаправленно: Китай, Индия, Иран, Египет, Ю. Корея, Турция демонстрируют значительный интерес к АЭС и активно строят энергоблоки [8, 9]. Однако в некоторых странах ее развитие даже остановилось, хотя существует очень большой задел. Германия на законодательном уровне отказалась от АЭС (в пользу ветроэнергетики) и после аварии на Фукусиме поэтапно закрыла все 19 атомных станций. США, занимающие первое место по числу АЭС в мире (108 реакторов действует, 31 остановлен ввиду истощения ресурса), не построили за последние 35 лет ни одной АЭС на своей территории [10]. Освоение и внедрение технологий реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом сможет решить накопленные проблемы современной атомной энергетике, расширить существующие рынки и создать новые [11]. Однако следует отметить отсутствие у части населения заинтересованности в ее развитии и значимых стимулов для крупного бизнеса вкладываться в нее [12, 13].

В этих условиях важно показать эффективность этой энерготехнологии как инструмента решения современных проблем и реагирования на вызовы. Способность современной атомной энергетике решать экологические проблемы продемонстрирована на примерах структуры энергетике ряда стран с высоким уровнем жизни населения. Разработаны программы, сценарии и алгоритмы прогнозирования особенностей развития ядерных энерготехнологий, опубликованы результаты исследований, но надежность прогнозов в решении назревших проблем сталкивается с существенным недостатком знаний о будущем энергетике, из-за чего возникает значительный разброс в получаемых результатах [14 – 16].

В России принято решение о переходе к двухкомпонентной атомной энергетике, состоящей из существующих реакторов на тепловых нейтронах и новых реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым циклом. Она производит на единицу массы сырья на несколько порядков больше энергии и меньше отходов, чем углеводородная. В планах Госкорпорации «Росатом» предполагается увеличение доли атомной генерации в России до 25% к 2045 г., переход на конвейерное производство АЭС, в том числе серийное производство ВВЭР-1200, реакторов малой мощности и плавучих энергоблоков<sup>1</sup>.

Исходя из этого становится актуальным рассмотрение трансформации структуры мировой энергетике, в том числе атомной, как инструмента реагирования на основные проблемы современности – загрязнение окружающей среды и глобальное потепление, в условиях неполноты знаний о будущем энергетике. В рамках настоящей работы недостаточность знаний является одной из основных неопределенностей, но даже с учетом этого неизбежно придется развивать атомную энергетике, так

<sup>1</sup> Годовой отчет АО «Атомэнергопром», 2024.

как без ее крупномасштабного использования человечеству не выжить, а никакой другой энергетической системы концентрированной энергии с меньшим влиянием на окружающую среду пока нет.

## Особенности предстоящего энергоперехода

Наиболее известно уже ставшее классическим разделение энергетических переходов, предложенное В. Смилом. Первый в истории энергопереход с экологически чистой древесины на экологически опасный уголь массово начался в период промышленной революции, происшедшей в ведущих государствах мира в XVIII–XIX вв. Именно тогда появились первые паровые машины и индустриальные технологии массового производства товаров, что потребовало резкого увеличения производства энергии, которое мог обеспечить только уголь, и его доля выросла с ~5% в мировом энергетическом балансе в 1840 г. до ~50% в 1900 г. (~45% за ~60 лет). Дальнейшая индустриализация и развитие транспорта привели ко второму энергопереходу, основой которого стала нефть, и ее вклад в энергобаланс возрос с ~3% в 1915 г. до ~45% в 1975 г. (~42% за ~60 лет). Затем наступила очередь природного газа, доля которого возросла с ~3% в 1930 г. до ~23% в 2017 г. (~20% за ~90 лет), что фактически стало третьим энергопереходом.

Главной движущей силой первых трех переходов были экономические стимулы массового производства и потребления, что побудило крупный бизнес относительно быстро, за два поколения людей, перевести общество на более энергоемкое топливо, пренебрегая при этом охраной окружающей среды. Это породило к середине прошлого века массу экологических проблем, усиливающихся в настоящее время – прежде всего загрязнение окружающей среды и, возможно, глобальное потепление. Если во время первого энергетического перехода при численности населения ~1 млрд. и небольших энергозапросах, а следовательно, и небольших производимых загрязнениях с этим можно было мириться, то начиная со второй половины прошлого века с кратным увеличением численности населения и соответствующим ростом загрязнения пришло осознание проблемы, а с ним и поиски энерготехнологий с наименьшим влиянием на окружающую среду.

Любое используемое математическое моделирование для прогнозирования четвертого энергоперехода экстраполирует текущие тенденции без учета их возможных изменений из-за принятия важных политических решений, результатов целенаправленной пропаганды для переоценки национальных и общечеловеческих ценностей, катастрофических событий или войн, предвидеть которые за ~10–20 лет до их начала, учитывая разногласия мнений многочисленных политологов, практически невозможно. История иллюстрирует многочисленные подобные события. Моделирование дает точные результаты только в периоды устойчивого развития и в течение не очень продолжительных интервалов времени. Геополитические условия в будущем будут отличаться от настоящего, однако ряд существующих требований к энергетическим системам и тенденций их развития сохранится. Среди них – безопасность, надежность, устойчивость и гибкость, а тенденция – уменьшение экологического следа, т.е. снижение негативного воздействия производства энергии на окружающую среду.

Ввиду большого количества фактов как объективных, так и субъективных, а также неполноты знаний о будущем, невозможно сколько-нибудь уверенно предсказать направление будущего развития ядерной энергетики России на длительный период времени, но можно рассмотреть вероятные тенденции развития. Для расчетных исследований рассматривались упрощенные модели развития атомной энергетики России для сравнительного системного анализа. В исследованиях использовался программный код CYCLE [14 – 16]. Понятно, что эти модели не отражают реальные структуры будущего развития ЯЭ России, как и любые другие. Но в качестве моделей (без деталей) они позволяют сравнить три важных тенденции: рост, выход на стационар и тенденцию на снижение развития.

Первая группа – это растущие сценарии. На сегодняшний день не существует возможности предсказать, с каким темпом будет происходить рост мощностей и будет ли производная изменения мощности по времени весь рассматриваемый период положительной. Вторая группа сценариев предполагает, что после некоторого периода роста мощностей произойдет выход на стационарный уровень, в котором не будет изменения суммарной установленной мощности системы во времени. Третья группа сценариев моделирует снижение установленных мощностей ядерной энергетики внутри страны.

На рисунке 1 приведены изменения установленных мощностей для модельных сценариев.

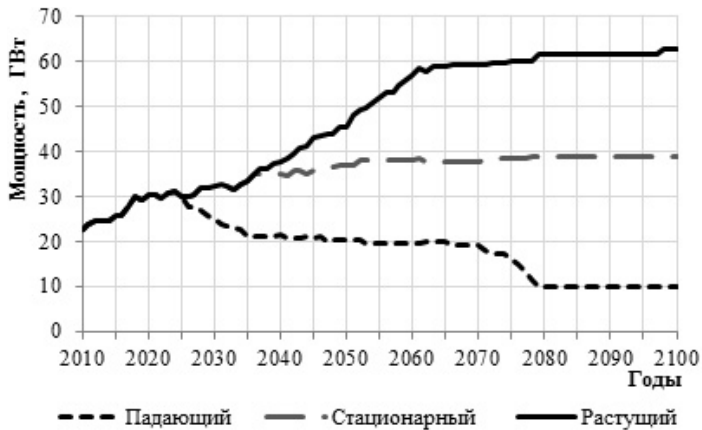


Рис. 1. Изменения установленных мощностей для модельных сценариев

Каждая из линий на рис. 1 показывает установленные мощности, достигаемые в отдельной группе сценариев с использованием набора соответствующих реакторных технологий, предприятий производства, переработки и хранения топлива. Принципиально такой подход можно экстраполировать на мировую ядерную энергетику. МАГАТЭ, например, увеличило показатели своего оптимистического прогноза до 950 ГВт(э) к 2050 г., что в 2,5 раза превышает текущую установленную мощность.

Результаты многокритериального анализа для вариантов групп сценариев показали наибольший потенциал для двухкомпонентной системы. Вариант с медленным вводом быстрых реакторов имеет более низкий рейтинг среди двухкомпонентных ЯЭС, но более высокий по сравнению с однокомпонентной системой. Включение в систему ядерной энергетики быстрых реакторов для всех рассмотренных вариантов

развития позволит решить ее системные проблемы, в том числе наиболее важные – это снижение количества отходов традиционной АЭ, экономия природных ресурсов и др. Исследования показали устойчивость рейтингов двухкомпонентных систем для разных групп сценариев для достаточно существенных изменений (ухудшений) значений экономического критерия и его веса.

Исходя из этого трансформация структуры мировой энергетики, включая атомную энергетику как инструмент реагирования на основные проблемы современности – загрязнение окружающей среды и глобальное потепление – становится актуальным. Однако темп трансформации – это одна из основных неопределенностей, рассматриваемых в рамках настоящей работы.

## Основные неопределенности знаний о будущем энергетики

Уверенному принятию долгосрочных решений по трансформации структуры энергетики препятствует не только неполнота знаний о ее будущем, но и наличие сложных связей в многокомпонентных системах социума, политики, экономики и экологии с вероятностным характером многих событий. Но они одновременно являются движущей силой уточнения представлений о мире.

Наиболее серьезная современная неопределенность знаний о будущем энергетики связана с последствиями загрязнения окружающей среды и, по-видимому, с климатическими изменениями. Как писал В.И. Вернадский еще в начале прошлого века, масштабы человеческой деятельности стали соизмеримыми с масштабами общепланетарных процессов, а деятельность человека выступает в качестве мощной геологической силы, воздействие которой приводит к нарушению гомеостаза планеты [17]. С утверждением В.И. Вернадского коррелирует современный вывод международной группы экспертов по контролю за изменениями климата (МГЭИК), признающей «... взаимозависимость климата, экосистем и биоразнообразия, а также человеческого общества...» [18], хотя эта точка зрения оспаривается [19].

Рассматривая задачу об уменьшении современных антропогенных выбросов в атмосферу, нельзя забывать о том, что придется также решать не менее сложную задачу по очистке окружающей среды от загрязнений, выброшенных в окружающую среду за прошедшие ~170 лет после промышленной революции, также связанную со многими неопределенностями. Например, перед промышленной революцией концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере составляла ~300 ppm, а в настоящее время ~400 ppm. Можно надеяться, что человеческая цивилизация, в конечном счете, справится с извлечением и локализацией углекислого газа из атмосферы, а также других основных загрязнений из окружающей среды, но это, несомненно, потребует больших затрат энергии и времени. Обосновать масштаб энергозатрат сегодня не представляется возможным – промышленные технологии «очистки» атмосферы отсутствуют, но интуитивная и грубая оценка подводит к мысли, что требуемая энергия должна быть соизмерима с энергией, полученной человеком от сжигания органического топлива, начиная с середины XIX в. до настоящих дней, а возможно и больше. Исходя из этого предположения, можно также ожидать аналогичный масштаб требуемого на очистку окружающей среды времени. Вместе с тем очистка окружающей среды от загрязнения

с энергетической и временной точек зрения в научной среде широко не обсуждается, и эту проблему следует также отнести к «неопределенным» знаниям о будущем.

К неопределенным знаниям можно отнести и оценки по обеспечению человечества углеводородным топливом, исчерпание которого прогнозируется в пределах сотни лет, хотя эти оценки также оспариваются.

К неопределенным знаниям о будущем следует отнести и потенциальные риски распространения ядерного оружия, связанные прежде всего с социальными (международными) глобальными противоречиями, а не с распространением технологий атомной энергетике. Весь оружейный плутоний в мире произведен в специальных реакторах на тепловых нейтронах в рамках программ создания ядерного оружия, и нет достоверной информации, что сколько-нибудь значительное его количество было произведено для оружейных целей легководными реакторами, составляющими основной парк гражданской атомной энергетике. Риски появления ядерного оружия в странах, им не обладающих, больше связаны с ростом международной напряженности, распространением знаний о ядерном оружии, чем с развитием гражданской ядерной энергетике.

По мере отдаления горизонта прогнозирования объем неопределенностей, связанных с развитием как технологий, так и человеческого сообщества, увеличивается.

Существующие неопределенности можно представить в виде тематических направлений, которые препятствуют обоснованному прогнозу развития.

- Возможность промышленного получения термоядерной энергии.
- Появление прорывных энергосберегающих технологий.
- Сценарии и масштабы развития энергетике.
- Рост численности населения Земли, уровень и сроки его стабилизации [20].
- Возможности общества влиять на гомеостаз планеты. Последствия загрязнения окружающей среды и, в том числе его влияние на климатические проблемы, условия жизни, миграцию и численность населения.
  - Прогноз прогрева вечной мерзлоты и выход метана в атмосферу с лавинообразным нарастанием парникового эффекта. Если эффект от  $\text{CO}_2$  в парниковом эффекте принять за единицу, то эффект от метана равен 21, от  $\text{NO}_2$  – 310, от водяных паров – 5.
  - Необходимость очистки природы от загрязнения в результате человеческой деятельности за последние ~150–200 лет.
  - Оценка достоверности (надежности) современных климатических моделей и соответствующих климатических угроз.
  - Отношение общества к развитию ядерных технологий, а в более общем случае повышение радиационной грамотности населения, отношение к проблемам ядерного нераспространения, РАО и ОЯТ.

Некоторые из перечисленных направлений находятся в стадии исследований, например, особенности ядерного нераспространения [21–24]. Однако к поиску решений по ряду направлений пока не приступали.

## **Влияние энерготехнологий на загрязнение окружающей среды**

Используемые энерготехнологии в разных странах существенно различаются и, как следствие, различаются величины выбросов  $\text{CO}_2$  (рис. 2) в них [25].

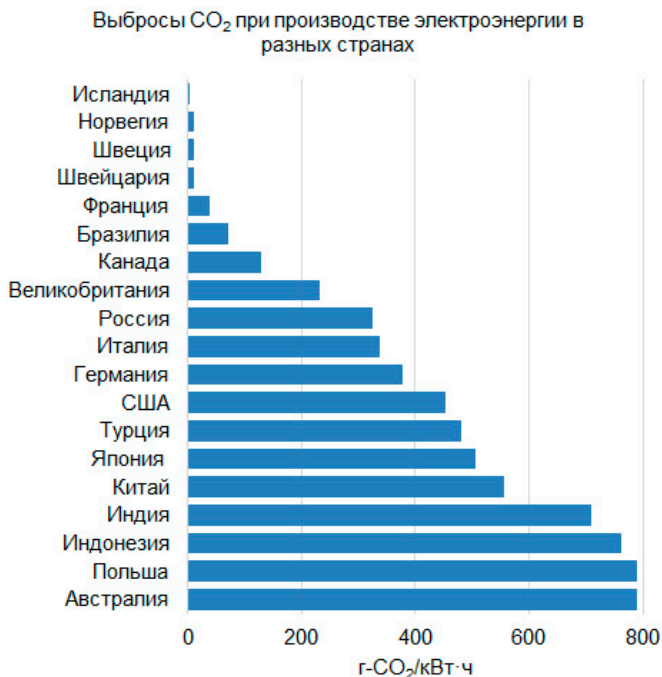


Рис. 2. Выбросы CO<sub>2</sub> при производстве электроэнергии разными технологиями в разных странах

Наименьшие выбросы у Исландии, которая удовлетворяет около 85% своих потребностей в первичной энергии за счет гидроэнергетики и геотермальной энергии. Более того, почти 100% электроэнергии в этой стране производится за счет этих двух источников, которых достаточно для небольшого населения ~0,35 млн., а выбросы в выбранном масштабе на рис. 2 не видны.

В полной мере используют благоприятные природные условия Норвегия (население ~5,3 млн.) и Швеция (10,3 млн.), производя электроэнергию ветровыми генераторами и гидростанциями, расположенными на горных реках. Франция (~70 млн.), Бразилия (~210 млн.) и Швейцария (~8,5 млн.) производят электроэнергию за счет атомной и гидроэнергетики с выбросами, на порядок меньшими по сравнению с основным загрязнителями.

Китай и Индия – две крупнейшие страны мира с общим населением ~3 млрд. вырабатывают электроэнергию за счет другой технологии – сжигания угля с соответствующими большими выбросами.

Рисунок 2 демонстрирует выбросы CO<sub>2</sub> при производстве электроэнергии разными технологиями в разных странах. Пример Исландии можно не принимать во внимание, так как численность ее населения незначительна, а доступ к подземным горячим водам в мире ограничен. Относительно невелики Норвегия и Швеция, однако Франция (~70% электроэнергии за счет АЭС) и Бразилия (~83% электроэнергии за счет ВИЭ, в том числе ~65% от гидроэнергетики) – это крупные страны, и малые уровни загрязнения из-за развития АЭС и гидроэнергетики достаточно убедительны.

В настоящее время во многих странах развиваются и эксплуатируются энерготехнологии на основе солнца и ветра, но их доля в энергобалансе находится на уровне единиц процентов. Ставка на солнечную энергетику некоторыми европейскими стра-

нами оказалась ошибочной из-за уязвимости энергосистем от природных катаклизмов и роста цен на электроэнергию. Как сообщалось, на Пиренейском полуострове в апреле 2025 г. произошел один из самых масштабных блэкаутов в истории современной Европы, причиной которого, как полагают, явилось влияние аномальных погодных условий<sup>2</sup>. Этот опыт следует учитывать при выборе энергетической политики на будущее.

Солнечная энергетика в небольших масштабах развивается в России. Современная структура производства и потребления электроэнергии в России представлена в табл. 1 и 2<sup>3</sup>.

Таблица 1

### Годовое (2023 г.) производство электроэнергии в России и доля в энергобалансе по типам электростанций

Произведено электроэнергии разными типами электростанций (млрд.КВт·ч), в том числе:	1181
Тепловые	753 / 63,8%
Гидро	202 / 17,1%
Атомные	218 / 18,5%
Ветровые и солнечные	7,9 / 0,7%

Таблица 2

### Годовое (2023 г.) потребление электроэнергии в России, млрд.КВт·ч

Произведено электроэнергии	1181
Потреблено электроэнергии всего, в том числе:	1172
Промышленные организации	610
Сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	23,9
Строительство	13,2
Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов	32,9
Транспортировка и хранение	95,3
Деятельность в области информации и связи	8,3
Прочие виды экономической деятельности	107
Бытовое потребление населением (146,1 млн. чел, ~1,26 МВт/чел)	184
Потери в электросетях	97,5
Отпущено за пределы РФ	0

Суммарная мощность солнечного излучения, проходящего через единицу площади, ориентированной перпендикулярно потоку солнечных лучей, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы («солнечная постоянная») составляет 1367 Вт/м<sup>2</sup>. В среднем атмосфера поглощает 17 – 25% солнечной радиации<sup>4</sup>. По оценкам максимальный поток солнечного излучения на уровне моря

<sup>2</sup> Европе не светит. Пиренейский полуостров временно остался без электроэнергии. <https://www.kommersant.ru/doc/7692828> (дата обращения 09.12.2025).

<sup>3</sup> Российский статистический ежегодник. 2024: Стат.сб. Росстат. М.: 2024, 630 с.

<sup>4</sup> Таблицы физических величин. Справочник. Под редакцией акад. И.Е. Кикоина. М.: Атом-издат, 1976, 1008 с.

~ 1000 – 1100 Вт/м<sup>2</sup>. В средних широтах в дневное время значение потока солнечного излучения достигает ~ 800 Вт/м<sup>2</sup> летом, снижаясь до ~ 250 – 300 Вт/м<sup>2</sup> зимой. Ночью это значение снижается практически до 0.

С учетом эффективности преобразования падающего солнечного излучения в электроэнергию (самая высокая на сегодняшний день ~ 15 – 20%) можно надеяться на получение от 1 м<sup>2</sup> площади солнечной панели не более ~ 50 – 100 Вт электрической мощности. Это соответствует годовой энергии ~ 400 – 800 кВт·ч. Поэтому чтобы полностью перевести годовые бытовые энергопотребности населения России (184 млрд. кВт·ч для 146,1 млн. чел.) на солнечную энергетику, потребуются сотни миллионов солнечных панелей с соответствующим обеспечением сырьем для их производства, а также затраты на их монтаж, обслуживание, утилизацию и изготовление новых. Даже частичная реализация таких планов пока представляется сомнительной.

Из рисунка 3 видно, что за основное загрязнение ответственны Китай (30%), США (11%), Евросоюз (7%), Индия (7%) и Россия (5%) [26]. Таким образом, атомная энергетика как инструмент решения основных проблем современности – загрязнение окружающей среды и глобальное потепление – заработает в полную силу лишь при ее применении именно в этих странах, но лучше во всех странах «Группы двадцати». Однако для ее развития требуется политическое решение руководства стран, основанное на поддержке населения, и заинтересованность крупного бизнеса. Примером в этом отношении является Китай, который демонстрирует за последние годы существенный рост атомной энергетики. По данным МАГАТЭ на начало 2026 г. в стране сооружалось 28 ядерных энергоблоков установленной мощностью около 30 ГВт(э), что составляет половину от строящихся энергоблоков в мире.

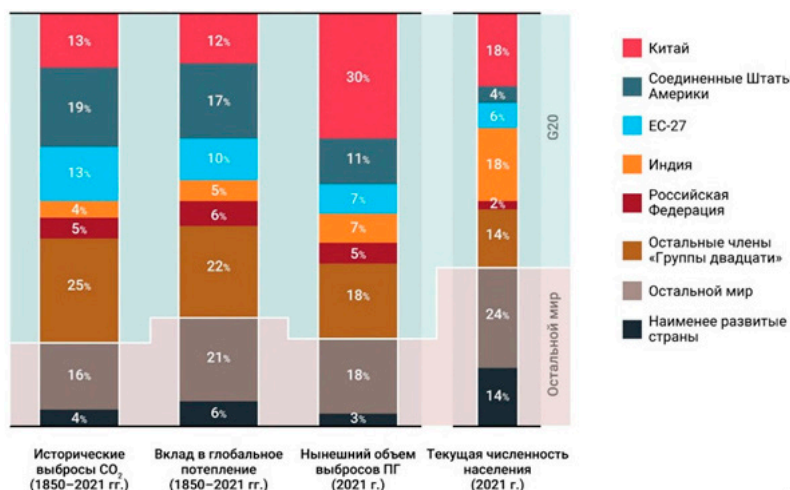


Рис. 3. Влияние стран на глобальное изменение климата

## Предпосылки диверсификации энерготехнологий

Одна из движущих сил трансформации современной энергетики вызвана необходимостью производства требуемого количества энергии с наименьшим влиянием на окружающую среду. В какой-то степени эта трансформация связана также

с неопределенностью знаний о будущем, поскольку не следует исключать появление какой-либо новой чистой энерготехнологии, аналогично тому, как полтора столетия назад в жизнь человечества вошла электроэнергетика, хотя серьезных предпосылок к этому пока нет. Поэтому всерьез следует рассчитывать только на существующие технологии, среди которых атомная энергетика способна обеспечить человечество достаточной энергией с наименьшим влиянием на окружающую среду.

В развитии мировой энергетики существенна роль Госкорпорации «Росатом», которая сегодня безусловный лидер мирового атомного рынка. Действительно, в портфеле ее зарубежных заказов 33 энергоблока в 10-ти странах мира, из них 22 блока в семи странах находятся в стадии сооружения. Госкорпорация «Росатом» контролирует 39% рынка обогащения урана. На ее долю приходится около половины всех международных соглашений в области атомной энергетики. Совокупно на США, Францию, Японию и Южную Корею приходится ~40% рынка.

В России имеется технологический задел для перехода к двухкомпонентной ядерной энергетике: эксплуатируются два энергетических реактора на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800, причем БН-800 – с активной зоной, полностью загруженной МОКС-топливом для отработки технологии замыкания ЯТЦ. Начата подготовка к сооружению коммерческого реактора большой мощности БН-1200М, строится реактор БРЕСТ-ОД-300.

Активные работы по развитию этой технологии в настоящее время проводятся в КНР и Индии. Франция, хотя и имеет большой опыт в разработке, сооружении и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах, но после остановки реактора Супер-Феникс-1200 практически заморозила это направление атомной энергетики, а если быть объективными, оказалась не в состоянии обеспечить эффективное и надежное сопровождение «быстрой» технологии, имея КИУМ на Супер-Фениксе 10 – 12%.

Опыт эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах в России дает возможность говорить о том, что диверсификация существующей в мире атомной энергетики обещает увеличение эффективности использования урановых ресурсов с последующим переходом на практическое самообеспечение ядерным топливом за счет воспроизводства плутония, который будет использоваться в МОКС-топливе с окончанием запасов  $^{235}\text{U}$ . В двухкомпонентной системе долгоживущие трансурановые элементы (например, плутоний и америций) «перерабатываются» в быстрых реакторах, уменьшая период потенциальной опасности отходов с 300 000 до 300 – 500 лет. Замкнутый ЯТЦ сможет снизить зависимость от цен на уран и геополитических рисков, а в целом при сочетании с ВИЭ обеспечить решение климатической проблемы с устойчивым энергообеспечением.

В получении «чистой» энергии заинтересованы все страны мира, тем более, если в ближайшем будущем появятся или будут приняты ограничения на использование углеводородного топлива. В этом случае они вынуждены будут обратиться к атомной энергетике. Скорее всего, на первых этапах они будут импортировать только реакторную установку на тепловых нейтронах, а ОЯТ отправлять на переработку в государство-экспортер этой технологии и получать от него свежее топливо. В перспективе возможно создание двухкомпонентной атомной энергетики в кооперации с зарубежными государствами и международными центрами по обеспечению ядерным топливом и переработкой ОЯТ. В этом случае в наибольшей степени выполняются условия нераспространения.

В таком режиме можно надеяться на сотрудничество как со странами, уже имеющими АЭС и опыт их создании и эксплуатации, так и со странами-новичками. Опыт создания имеют многие страны, например, в Южной Америке можно назвать Бразилию и Аргентину, в Африке – ЮАР, на Ближнем Востоке – ОАЭ.

Однако основное развитие ЯЭ следует ожидать в Юго-Восточной Азии, регионе, численность населения которого ~630 млн. превосходит Европейский Союз или Северную Америку. Десять государств региона – Мьянма, Индонезия, Малайзия, Таиланд, Камбоджа, Бруней, Вьетнам, Филиппины, Лаос и Сингапур – входят в объединение АСЕАН, которое характеризуется следующим:

- совокупно это объединение занимает седьмое место в перечне крупнейших экономик мира, а по прогнозам в течение ближайших ~20-ти лет должно переместиться на четвертое;

- по темпам развития АСЕАН – один из мировых лидеров;

- по количеству работоспособного населения АСЕАН на третьем месте после Китая и Индии;

- начиная с 2000 г. реальные доходы его населения ежегодно росли в среднем на ~5% и количество бедных стремительно сокращается;

- в этом регионе ожидается основной прирост производства и потребления электроэнергии; проблема усложняется традиционной энергетической бедностью Азии, в результате чего около миллиарда человек ее населения до сих пор не имеют доступа к электроэнергии;

- вполне возможно, что некоторые страны могут обратиться к атомной энергетике для решения своих проблем. Действительно, к 2030 г. первую АЭС может запустить Индонезия, примерно к 2035 г. – Малайзия и Таиланд, в перспективе – Филиппины и Вьетнам.

Одной из проблем создания новой энерготехнологии в мире и связанных с ней неопределенностей является наличие большого разнообразия групп сторонников и противников развития атомной энергетики, их информированности, профессиональной подготовки, мотивации, активности и пр., поэтому представляется целесообразной для достижения наибольшего эффекта информационно-разъяснительная работа с разной аргументацией в разных группах.

При рассмотрении вопроса о сторонниках и противниках развития атомной энергетики существенное значение имеет позиция крупных электрогенерирующих компаний и их интересов в ближне-, средне- и долгосрочной перспективах. В целом эта категория мотивируется, главным образом, соображениями экономической целесообразности и способна принимать решения, рассчитанные на долгосрочную перспективу, а при появлении заинтересованности способна сформировать в обществе атмосферу позитивных ожиданий в отношении развития атомной энергетики. Это может быть серьезной движущей силой реализации в промышленном масштабе новой технологической платформы.

На уровне населения негативное отношение к ядерной энергетике проистекает из страха возникновения ядерных аварий и ожиданий решения энергоэкологических проблем с помощью солнечной и ветровой энергетик.

На уровне обладателей альтернативных энергетических технологий оппозиция мотивируется стремлением к комфортным условиям развития своих направлений бизнеса.

Мотивация политиков в отношении атомной энергетике связана, с одной стороны, с желанием избежать тем, способных осложнить борьбу за поддержку избирателей и дать политическим противникам повод для критики в их адрес, а с другой, с пониманием энергетических проблем, стоящих перед государством. Для государственного руководителя принятие решения о сооружении новых АЭС может быть связано с риском потери поддержки избирателей в случае распространенности в стране антиядерных настроений.

В ряде случаев оппозиционные настроения в отношении атомной энергетике проистекают из элементарного недостатка истинной информации и при восполнении этого пробела могут измениться. Для уменьшения неопределенностей необходима упреждающая разъяснительная работа, к которой должны быть готовы специалисты-ядерщики, педагоги, медики, специалисты органов местного самоуправления, экологи, а также политики и журналисты. Цель – создать в общественном мнении устойчивое представление о том, что мир движется к эпохе новой ядерной энергетической системы IV поколения, в которой Россия имеет существенные технологические наработки.

## Заключение

Трансформация структуры мировой энергетике с переходом на двухкомпонентную атомную энергетике как инструмента реагирования на основные проблемы современности – загрязнение окружающей среды и глобальное потепление – является объективным процессом. Прогнозирование структурных изменений мировой энергетике и их темпов затруднено неполнотой знаний о ее будущем и по мере отдаления горизонта прогнозирования объем неполноты увеличивается. Тем не менее, несмотря на недостаток знаний о будущем, в Россия принято правильное решение об ориентации своей энергетике на атомную.

Вместе с тем устойчивость работы энергосистемы может быть обеспечена как диверсификацией энерготехнологий, так и использованием более энергоемкого топлива, что позволит существенно уменьшить загрязнение окружающей среды. В целях обеспечения условий для продвижения новой технологической платформы необходимо проводить линию на привлечение в число ее сторонников представителей крупного бизнеса путем демонстрации экономической выгоды решений, реализуемых в случае применения российских технологий быстрых реакторов и замкнутого топливного цикла.

Для поддержки населением развития атомной энергетике необходимо преодолеть фобии и стереотипы, сложившиеся у населения России и мира, о возможных авариях с радиоактивным загрязнением местности и надеждах на решение экологических и энергетических проблем за счет солнечной и ветровой энергетик. Наиболее эффективно это может быть достигнуто в результате работы с молодежной аудиторией и внедрения соответствующего учебного курса в школьные и вузовские программы.

## Литература

1. Прогноз развития энергетике мира и России 2019 (под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина). ИНЭИ РАН – Московская школа управления СКОЛКОВО. М.: 2019, 210 с. ISBN 978-5-91438-028-8.

2. Шумпетер И. Теория экономического развития (Исследование предпринимательской прибыли, капитала, кредита, процента и цикла конъюнктуры). М.: Прогресс, 1982, 455 с.
3. Кондратьев Н.Д. Проблемы экономической динамики. М.: Экономика, 1989, 526 с. ISBN 5-282-00700-2.
4. Глазьев С.Ю., Безруков Л.Б., Долголаптев А.В., Ларин Н.В., Сывороткин В.Л., Федоров В.М. Климатические изменения и энергопереход. *Экономические стратегии*. 2023;25(6(192)):16–29.
5. Велькин В.И., Щелоков Я.М., Щеклеин С.Е. Возобновляемая энергетика и энергосбережение: учебник. Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020, 312 с. ISBN 978-5-7996-3122-2.
6. Щеклеин С.Е., Дубинин А.М. Физико-химические основы новых способов использования водорода, углеводородных и металлических топлив для производства и аккумулирования энергии. Мин-во науки и высшего образования РФ, Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024, 340 с. ISBN 978-5-7996-3901-3.
7. Капица П.Л. Энергия и физика: Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР, Москва, 8 октября 1975 г. *Вестник АН СССР*. 1976;1:34–43. URL: [http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP\\_10.HTM](http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM) (дата обращения 24.11.2025).
8. Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле (под редакцией академика РАН Пономарева-Степного Н.Н.). М.: Техносфера, 2016.
9. Белая книга ядерной энергетике. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами (под общей редакцией проф. Е.О. Адамова). М.: Издательство АО «НИКИЭТ», 2020.
10. Велькин В.И. Атомная энергетика мира. Состояние и перспективы. Екатеринбург: УрФУ, 2021, 442 с. ISBN 978-5-907297-94-4.
11. Adamov E., Gabaraev B., Gorin N., Kapliencko A., Kuchinov V. Nuclear power engineering with fast neutron reactors and closed nuclear fuel cycle – Solution of climate problems and more. *Nuclear Engineering and Design*. 2025;433:113803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113803>
12. Харви Ш. Стимулирование интереса молодежи к ядерной энергетике. Бюллетень МАГАТЭ. Март 2021, с. 20–21.
13. Бильбао-и-Леон С. Как заставить мир посмотреть на ядерную отрасль под другим углом. Бюллетень МАГАТЭ. Март 2021, с. 28–29.
14. Калашников А.Г., Мосеев А.Л., Декусар В.М., Коробейников В.В., Мосеев П.А. Развитие программного комплекса CYCLE для системного анализа ядерного топливного цикла. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2016;1:91–99. DOI: <https://doi.org/10.26583/nre.2016.1.10>
15. Зродников А.В., Коробейников В.В., Мосеев А.Л., Егоров А.Ф., Декусар В.М., Гурская О.С., Пупко Л.П. Анализ сценариев масштабного развития двухкомпонентных ЯЭС с оптимальным учетом экспортного потенциала российских ядерных технологий. Препринт ФЭИ – 3291. Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2021, 59 с.
16. Коробейников В.В., Мосеев А.Л., Егоров А.Ф., Декусар В.М., Гурская О.С. Оценка эффективности сценариев развития ядерной энергетике России в условиях неопределенности знаний о будущем. Препринт ФЭИ – 3289. Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».
17. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2004, 575 с.
18. МГЭИК, 2023 г. Резюме для политиков. В сб. Изменение климата 2023: Обобщающий отчет. Доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Вклад рабочих групп I, II и III в шестой оценочный отчет Межправительственной группы экспертов

по изменению климата. МГЭИК, Женева, Швейцария, 36 с. URL: <http://unepcom.ru/news/news2023/5436-230320climate.html> (дата обращения 24.11.2025).

19. Шполянская Н.А. Геокриология. Эволюция криолитозоны и глобальные изменения климата: Учебное пособие. М.: «КДУ» (Книжный Дом Университета), «Добросвет», 2018.

20. Капица С.П. Модель роста населения земли и предвидимое будущее цивилизации. URL: [http://ecsocman.hse.ru/data/291/971/1219/2002\\_n3\\_p22-43.pdf](http://ecsocman.hse.ru/data/291/971/1219/2002_n3_p22-43.pdf) (дата обращения 24.11.2025).

21. Горин Н.В., Кучинов В.П., Екидин А.А., Декусар В.М., Моисеев А.В., Шидловский В.В. Аргументы для формирования поддержки атомной энергетике в обществе. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2023;4:119–133. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.10>

22. Горин Н.В., Волошин Н.П., Чуриков Ю.И., Чебесков А.Н., Кучинов В.П., Васильев А.П., Моисеев А.В., Шепелев С.Ф., Скворцов Д.А., Журин С.И., Шидловский В.В., Кривцов А.В. Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом. *Атомная энергия*. 2021;130(1):48–51. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4264> (дата обращения 24.11.2025).

23. Горин Н.В., Карманов А.Л., Первиненко В.Н., Власов В.В., Теплых Н.А., Кучинов В.П., Чебесков А.Н., Шидловский В.В. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортером быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ. *Атомная энергия*. 2021;131(4):227–232. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4681> (дата обращения 24.11.2025).

24. Горин Н.В., Кузнецов Е.В., Кучинов В.П., Чебесков А.Н., Моисеев А.В., Шидловский В.В., Кривцов А.В. Барьеры на путях ядерного распространения при экспорте российских быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (на примере БРЕСТ ОД-300). *Вестник НЯЦ*. 2021;4(88):16–21. DOI: <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21>

25. Country Specific Electricity Grid Greenhouse Gas Emission Factors 2020. URL: [https://www.carbonfootprint.com/docs/2020\\_07\\_emissions\\_factors\\_sources\\_for\\_2020\\_electricity\\_v1\\_3.pdf](https://www.carbonfootprint.com/docs/2020_07_emissions_factors_sources_for_2020_electricity_v1_3.pdf) (дата обращения 24.11.2025).

26. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (2023 г.). Краткий обзор. Доклад о разрыве в уровне выбросов за 2023 год: Заезженная пластинка – температура установила новые рекорды, однако миру не удастся сократить объемы выбросов (снова). Найроби. DOI: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>

Поступила в редакцию 13.02.2026

После доработки 10.03.2026

Принята к опубликованию 20.03.2026

## Авторы

Кучинов Владимир Петрович, доцент,

E-mail: [vkuchinov@bk.ru](mailto:vkuchinov@bk.ru)

Горин Николай Владимирович, к.ф.м.н,

e-mail: [nvgorin@mail.ru](mailto:nvgorin@mail.ru)

Кузнецов Евгений Валерьевич, начальник отделения,

e-mail: [nio230@vniitf.ru](mailto:nio230@vniitf.ru)

Коробейников Валерий Васильевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.,

E-mail: [korob@ipre.ru](mailto:korob@ipre.ru)

Декусар Виктор Михайлович, ведущий научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: [decouss@ipre.ru](mailto:decouss@ipre.ru)

Щеклеин Сергей Евгеньевич, зав. кафедрой «Атомные станции и ВИЭ», д.т.н.,

E-mail: [s.e.shcheklein@urfu.ru](mailto:s.e.shcheklein@urfu.ru)

UDC 621.039

## Two-Component Nuclear Power as a Tool for Solving Modern Problems in Conditions of Incomplete Knowledge about the Future Power Industry

Kuchinov V.P.<sup>1</sup>, Gorin N.V.<sup>2</sup>, Kuznetsov E.V.<sup>2</sup>, Korobeynikov V.V.<sup>3</sup>, Dekusar V.M.<sup>3</sup>, Shcheklein S.E.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> MEPhI,

31 Kashirskoye Sh., 115409 Moscow, Russia

<sup>2</sup> FSUE "RFNC – VNIITF named after Acad. E.I. Zababakhin",

PO box 245, 13 Vasilieva st., 456770 Snezhinsk, Chelyabinsk reg., Russia

<sup>3</sup> IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

<sup>4</sup> Ural Federal University,

19 Mira St., 620062 Yekaterinburg, Russia

### Abstract

A two-component nuclear power consisting of existing thermal neutron reactors and fast neutron reactors with a closed fuel cycle is discussed as a tool for solving the main modern time problems – environmental pollution and global warming with insufficient knowledge about the future of power industry. It is argued that this tool will work in full force only when it is used in the G20 countries – China, the USA, India, Russia, the European Union and others. The justification of its application for widespread use is hampered by insufficient knowledge (or lack thereof) about the future development of both the global community and the power industry itself. The associated uncertainties are mentioned and it is noted that many of them are under resolution. As the forecasting horizon gets further away, the volume of such uncertainties increases, but a number of key provisions are already known and this allows us to make informed decisions. This allowed the Rosatom State Corporation to adopt a strategy for the transition to a two-component nuclear power in Russia in the medium term. As for other countries, public opinion is conservative in many of them and does not yet support the widespread use of nuclear energy due to fears of nuclear accidents and the possibility of nuclear proliferation. Large business has not yet joined the large-scale use of nuclear energy, not seeing serious economic incentives in it. It is concluded that Russia has made a timely decision to focus energy on a two-component nuclear power system, which can serve as an example for other countries.

**Keywords:** energy transition, environmental pollution, global warming, incomplete knowledge about the future power industry, two-component nuclear power, closed fuel cycle.

**For citation:** Kuchinov V.P., Gorin N.V., Kuznetsov E.V., Korobeynikov V.V., Dekusar V.M., Shcheklein S.E. Two-Component Nuclear Power as a Tool for Solving Modern Problems in Conditions of Incomplete Knowledge about the Future Power Industry. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;1:169–186. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.14> (in Russian).

### References

1. Forecast of the development of energy in the world and Russia 2019. Edited by A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagina. Moscow, INEI RAN – SKOLKOVO, 2019, 210 p. ISBN 978-5-91438-028-8 (in Russian).

2. Schumpeter I. The Theory of Economic Development (Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung, 1912) (Study of Entrepreneurial Profit, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle). Moscow, Progress Publ., 1982, 455 p. (in Russian).
3. Kondratiev N.D. Problems of Economic Dynamics. Moscow: Economica Publ., 1989, 526 p. ISBN 5-282-00700-2 (in Russian).
4. Glazyev S.Yu., Bezrukov L.B., Dolgolaptev A.V., Larin N.V., Syvorotkin V.L., Fedorov V.M. Climate change and energy transition. *Economic strategies*. 2023;25(6(192)):16–29 (in Russian).
5. Velkin V.I., Shchelokov Ya.M., Shcheklein S.E. Renewable Energy and Energy Saving: textbook Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Yekaterinburg: Ural. University Publ., 2020, 312 p. ISBN 978-5-7996-3122-2 (in Russian).
6. Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Physicochemical Foundations of New Methods of Using Hydrogen, Hydrocarbon, and Metal Fuels for Energy Production and Storage. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2024, 340 p. ISBN 978-5-7996-3901-3 (in Russian).
7. Kapica P.L. Energy and Physics. Report to the scientific session on the 250-th Anniversary of the USSR Academy of Sciences. Moscow. 08.10.75. URL: [http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP\\_10.HTM](http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM) (accessed Nov. 24, 2025) (in Russian).
8. Alekseev P.N., Alekseev S.V., Andrianova E.A. et al. Two-component nuclear energy system with thermal and fast reactors in a closed nuclear fuel cycle (ed. by Academician of the Russian Academy of Sciences N.N.Ponomarev-Stepnoy N.N.). Moscow, Tekhnosfera, 2016 (in Russian).
9. White Book of Nuclear Energy. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. (ed. E.O. Adamov). Moscow, JSC "NIKIET" Publ., 2020 (in Russian).
10. Velkin V.I. Nuclear Energy of the World. Status and Prospects. Yekaterinburg, UrFU, 2021, 442 c. ISBN 978-5-907297-94-4 (in Russian).
11. Adamov E., Gabaraev B., Gorin N., Kapliencko A., Kuchinov V. Nuclear power engineering with fast neutron reactors and closed nuclear fuel cycle – Solution of climate problems and more. *Nuclear Engineering and Design*. 2025;433:113803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113803>
12. Harvey S. Spurring youth interest in nuclear. IAEA Bulletin, Mar, 2021, p. 20–21.
13. Bilbao y León S. Finding a new voice for nuclear. IAEA Bulletin, Mar, 2021, p. 28–29.
14. Kalashnikov A.G., Moseev A.L., Dekusar V.M., Korobeynikov V.V., Moseev P.A. Development of the Code CYCLE for Nuclear Fuel Cycle Analysis. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016;1:91–99. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.1.10> (in Russian).
15. Zrodnikov A.V., Korobeynikov V.V., Moseev A.L., Egorov A.F., Dekusar V.M., Gurskaya O.S., Pupko L.P. Analysis of scenarios for the large-scale development of two-component nuclear power plants with optimal consideration of the export potential of Russian nuclear technologies. Preprint IPPE – 3291. Obninsk, IPPE JSC, 2021, 59 p. (in Russian).
16. Korobeynikov V.V., Moseev A.L., Egorov A.F., Dekusar V.M., Gurskaya O.S. Evaluation of the effectiveness of scenarios for the development of nuclear energy in Russia in the context of uncertainty about the future. Preprint IPPE – 3289. Obninsk, JSC IPPE (in Russian).
17. Vernadsky V.I. Biosphere and noosphere. Moscow, Iris-press, 2004, 575 p. (in Russian).
18. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 p. URL: <http://unepcom.ru/news/news2023/5436-230320climate.html> (accessed Nov. 24, 2025).

19. Shypolyanskaya N.A. Geocryology. Permafrost zone evolution and Global climate change. Study guide. Moscow, "KDU Publ.", "Dobrosvet Publ.", 2018 (in Russian).
20. Kapitsa S.P. The model of the growth of the earth's population and the foreseeable future of civilization. URL: [http://ecsocman.hse.ru/data/291/971/1219/2002\\_n3\\_p22-43.pdf](http://ecsocman.hse.ru/data/291/971/1219/2002_n3_p22-43.pdf) (accessed Nov. 24, 2025) (in Russian).
21. Gorin N.V., Kuchinov V.P., Ekidin A.A., Dekusar V.M., Moiseev A.V., Shidlovsky V.V. Arguments for Creation of Support for Nuclear Power in Society. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023;4:119–133. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.10> (in Russian).
22. Gorin N.V., Voloshin N.P., Churikov Yu.I., Chebeskov A.N., Kuchinov V.P., Vasilyev A.P., Moiseev A.V., Shepelev S.F., Skvortsov D.A., Zhurin S.I., Shidlovskiy V.V., Krivtsov A.V. Nuclear Non-Proliferation Security on Exportation of fast Reactors with a Closed Fuel Cycle. *Atomic energy*. 2021;130(1):53–56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00773-0>
23. Gorin N.V., Karmanov A.L., Pervinenko V.N., Vlasov V.V., Teplykh N.A., Kuchinov V.P., Chebeskov A.N., Shidlovsky V.V. Detection of Indications of Nuclear Non-Proliferation Breaches by States Importing Fast Reactors with Closed NFC Installations. *Atomic Energy*. 2022;131(4):229–233. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00864-6>
24. Gorin N.V., Kuznetsov E.V., Kuchinov V.P., Chebeskov A.N., Moiseev A.V., Shidlovskiy V.V., Krivtsov A.V. Barriers on Ways of Nuclear Distribution at Export of the Russian Fast Reactors with Closed Nuclear Fuel Cycle (on an example Brest ОД-300). *Vestnik NYAC*. 2021;4(88):16–21. DOI: <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21> (in Russian).
25. Country Specific Electricity Grid Greenhouse Gas Emission Factors 2020. URL: [https://www.carbonfootprint.com/docs/2020\\_07\\_emissions\\_factors\\_sources\\_for\\_2020\\_electricity\\_v1\\_3.pdf](https://www.carbonfootprint.com/docs/2020_07_emissions_factors_sources_for_2020_electricity_v1_3.pdf) (accessed Nov. 24, 2025).
26. United Nations Environment Programme (2023). Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). Nairobi. DOI: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>

#### Authors

Vladimir P. Kuchinov, Associate Professor,

E-mail: [vkuchinov@bk.ru](mailto:vkuchinov@bk.ru)

Nikolay V. Gorin, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: [nvgorin@mail.ru](mailto:nvgorin@mail.ru)

Evgeniy V. Kuznetsov, Head of Department,

E-mail: [nio230@vniitf.ru](mailto:nio230@vniitf.ru)

Valerij V. Korobeynikov, Principal Scientist, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: [korob@ippe.ru](mailto:korob@ippe.ru)

Victor M. Dekusar, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [decouss@ippe.ru](mailto:decouss@ippe.ru)

Sergey E. Shcheklein, Head of the Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [s.e.shcheklein@urfu.ru](mailto:s.e.shcheklein@urfu.ru)