УДК 621.039.51

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК ИНСТРУМЕНТ ДОСТИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ ТЕХНОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Н. В. Горин [1], Б. К. Водолага [1], В. П. Кучинов [2], Б. А. Габараев [3], В. В. Шидловский [4]

[1] ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия
[2] НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия
[3] АО «НИКИЭТ им. Н. А. Доллежаля», НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия
[4] АО «Прорыв», г. Москва, Россия

Показано, что климат и развитие общества оказались под угрозой из-за загрязнения окружающей среды, в частности, за счет сжигания углеводородных энергоносителей. Один из способов обеспечения сохранения климата заключается в переходе на энерготехнологии, снижающие, а по возможности прекращающие загрязнение окружающей среды отходами сжигания углеводородов. Отмечается, что среди таких технологий атомная энергетика – наиболее эффективный инструмент. Подчеркивается, что она совместно с возобновляемыми источниками энергии оказывает минимальное влияние на окружающую среду и может стать энерготехнологией будущего на базе новой технологической платформы, обеспечивающей сочетание реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом. Только такая энерготехнология способна при сохранении климата обеспечить цивилизацию энергией в масштабах десятков миллиардов тонн нефтяного эквивалента. Наиболее результативные действия по развитию атомной энергетики на новой технологической платформе могут предпринять страны «Группы двадцати». Сделан вывод, что для адекватного реагирования на климатические вызовы современности в запасе у современной цивилизации не более одного столетия. Отмечено, что в первую очередь необходимо замещать угольную энергетику более чистыми энергетическими технологиями.

Ключевые слова: углеродная нейтральность; климатические явления; глобальное потепление; загрязнение окружающей среды; реакторы на быстрых нейтронах; замкнутый ядерный топливный цикл.

1. Введение

Проблема изменения климата не нова и о возможных путях ее решения уже немало опубликовано. В течение последних десятилетий изменения климата постоянно рассматривают межгосударственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) и эксперты ООН, на основании их публикаций за последние несколько лет [1–7] выполнена настоящая работа. МГЭИК анализирует опубликованные результаты исследований в рецензируемых изданиях и определяет области, в которых в научном сообществе присутствует единство или различия во мнениях и результат анализа является обобщенным мнением научной общественности.

По мере деятельности МГЭИК совершенствуется методология, углубляется понимание проблем климата и уточняются численные величины. Основные выводы сформулированы как факты или положения с указанием уровня достоверности: очень низкий, низкий, средний, высокий и очень высокий. В настоящей работе использованы выводы с высоким и очень высоким уровнем достоверности.

В большинстве научных публикаций, как правило, обсуждение вопросов изменения климата начинается с рассмотрения корреляций между глобальными выбросами парниковых газов и ростом глобальной средней температуры над сушей и

океаном, хотя, строго говоря, нет единого научно обоснованного мнения о причинах изменения климата и роста этой температуры [8]. Тем не менее подавляющее большинство экспертов считает эту корреляцию установленным фактом. Более того, такая точка зрения стала согласованной на государственном уровне политической позицией, сформулированной в Статье 4 Парижского соглашения 2015 г., призывающей к сокращению выбросов парниковых газов. Исходя из того, что двуокись углерода – основной компонент парниковых газов, то речь, по сути, идет о достижении углеродной нейтральности техногенной деятельности человеческого сообщества. В большинстве публикаций обсуждение выбросов парниковых газов и мер по их сокращению проводится преимущественно для энергетического сектора с упором на возобновляемые источники энергии и энергоэффективность, опять же на глобальном уровне. К основным антропогенным источникам выбросов парниковых газов также относят транспорт, землепользование и лесное хозяйство.

В 2022 г. были установлены новые рекорды не только температурного режима Земли, но и побиты рекорды глобальных выбросов парниковых газов, которые достигнули 57,4 Гт $CO_{2экв}$ [7]. Напрашивается вывод, что предлагаемые на глобальном уровне меры не работают, а обсуждения только это констатируют, что ведет к опасности потери устойчивости развития мирового сообщества. Опасность становится все реальнее, уже произошли широкомасштабные и быстрые изменения в атмосфере, океане, криосфере и биосфере. Глобальное потепление – не единственная угроза. Не следует забывать о сокращении площади лесных массивов примерно на треть за последние тысячелетия, о складывающемся дефиците чистой питьевой воды, о загрязнении пластиком, о деградации земель и потере плодородия почвы и пр.

Возможно, это объясняется тем, что современное общество не является единым организмом, управляемым из общего центра, а представляет собой 197 стран, отличающихся друг от друга уровнем развития, размером территории, политическим строем, проводимой политикой и многими другими факторами. Его развитие можно сравнить с движением повозки, запряженной упрямой и капризной лошадью, не всегда выполняющей команды кучера. Пассажиры повозки препираются между собой, отдают противоречивые команды, а некоторые даже пытаются выхватить вожжи и выбрать другую дорогу. Тем не менее повозка куда-то едет, а общество развивается. Каждая страна преследует свои цели, во главу угла ставит собственные выгоды как для управленческой элиты, так и населения, но учитывает и возможные меры международного воздействия. Все остальные аргументы для нее менее значимы.

В этих условиях возможность решения общечеловеческой проблемы климата, которое не гарантирует немедленной выгоды, а требует немалых затрат и усилий, представляется трудной. Однако на начальном этапе не требуется участия всех стран в ее решении. Вполне достаточно стран с крупнейшими экономиками, которые в наибольшей степени загрязняют окружающую среду, а это страны из «Группы двадцати»: Китай, США, ЕС и остальные[1]. Отметим, что уже появились тревожные формулировки: «жесткие сокращения» и «жесткие меры», по контексту адресованные к этим странам, на которые в настоящее время приходится 76 % мировых выбросов [7]. Одновременно появились сомнения в возможности ограничить рост температуры величиной 2 °C.

Учитывая это, достижение углеродной нейтральности техногенной деятельности человечества для предотвращения изменений климата целесообразно рассматривать не только глобально или на уровне нескольких стран («Группа

[1] «Группа двадцати» – Аргентина, Австралия, Бразилия, Великобритания, Германия, Индия, Индонезия, Италия, Канада, Китай, Мексика, Турция, Россия, Саудовская Аравия, США, Франция, ЮАР, Республика Корея, Япония и Европейский союз.

«двадцати» или страны БРИКС), но и на уровне возможностей отдельных стран (Китай, США, Россия).

В этой связи авторы предлагают ответы на три вопроса: Что можно сделать для прекращения загрязнения окружающей среды? Какие страны могут это сделать наиболее эффективно? Какой резерв времени остался в запасе хотя бы для стабилизации современного климата, не говоря уже о его возвращении к состоянию вековой давности?

Возможности солнечной и ветровой технологий недостаточны для удовлетворения глобальных потребностей в ежегодном современном потреблении ~14,3 млрд т н. э. → ~$6 \cdot 10^{20}$ Дж ~19 000 ГВт·год. Увеличение их доли в энергетическом балансе до нескольких десятков процентов пока сомнительно. Даже чисто виртуальное увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) до 100 % (при всех нерешаемых ресурсных ограничениях по металлам, стройматериалам, площадкам и т. п.) не снимает с повестки дня «родовой» порок ВИЭ – зависимость их функционирования от внешних факторов: предсказуемых суточных и сезонных колебаний и непредсказуемых погодных, сейсмических, вулканических и иных экстремальных природных явлений.

Поэтому особое внимание в работе уделено атомной энергетике, как одному из реальных инструментов достижения углеродной нейтральности и смягчения последствий изменений климата.

2. Современные изменения климата

Климат на Земле определяется сложной взаимосвязью энергии, получаемой от Солнца, процессов, происходящих в глубинах Земли, и излучаемого в космическое пространство тепла, количество которого определяется составом атмосферы. Нарушение теплового баланса, связанное с уменьшением излучаемого в космос тепла, приводит к росту глобальной средней температуры над сушей и океаном, т. е. к парниковому эффекту. На Земле и ранее отмечались как периоды потепления, так и похолодания (например, ледниковые периоды), причем их продолжительность изменялась в диапазонах от миллионов до десятков лет, что дает основание ряду специалистов говорить об естественных причинах современных климатических явлений, которые не связаны с техногенной деятельностью современной цивилизации [8].

Однако тогда на Земле не было человеческой цивилизации с численностью населения в несколько миллиардов человек и техногенной деятельности в современном масштабе, загрязняющей окружающую среду. Радикальные изменения произошли за исторически короткий период – всего за два века, влияние антропогенной деятельности на климат уже невозможно отрицать. Причем основной загрязняющий компонент, влияющий на масштаб парникового эффекта, – углекислый газ, который генерируется в результате техногенной деятельности и выбрасывается в атмосферу.

Рост выбросов парниковых газов в атмосферу за последние три десятилетия показан на рис. 1 [7]. Можно видеть их монотонный рост до объема в 57,4 ГтCO_2, достигнутый в 2022 г. за счет сжигания ископаемого углеводородного топлива. Это еще раз подчеркивает срочность внедрения энерготехнологии с минимальным углеродным следом.

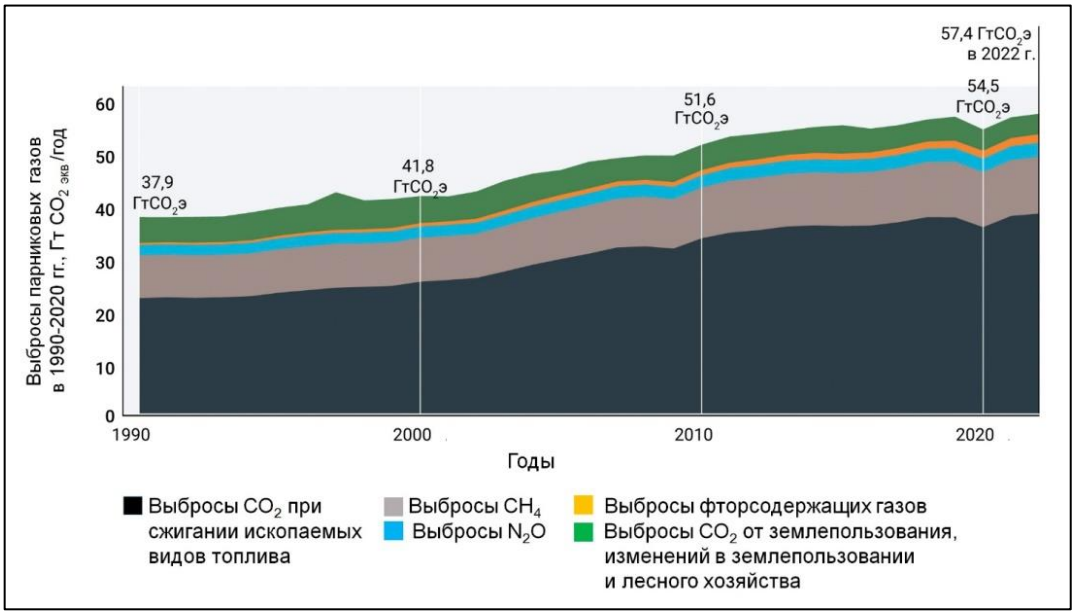

Рис. 1. Выбросы парниковых газов в 1990–2020 гг.

В этой связи в научной печати широко обсуждают вопросы снижения выбросов парниковых газов и прежде всего CO_2 как основного продукта сгорания углеводородов. При этом только электроэнергетика в 2022 г. ответственна за выброс 12,43 млн т CO_2 эквивалента, что составляет около 22 % общего объема выбросов.

Вместе с тем скорости климатических процессов и их отклики на масштабы загрязнения обсуждают редко. Это, как правило, происходит в специализированной научной литературе, в частности, в периодических публикациях МГЭИК. В них отмечается, что после прекращения загрязнения на естественное восстановление окружающей среды могут потребоваться значительные сроки, от десятилетий и вплоть до тысячелетий, а некоторые показатели могут и не восстановиться. При этом следует учитывать, что допустимый уровень воздействия на биосферу человек существенно превысил уже к началу XXI в. Оценки варьируются, но специалисты по глобальной экологии не оспаривают кратное превышение допустимых пределов [9]. Широкие круги населения с этими публикациями не знакомятся, а специалисты в области гуманитарных дисциплин (экологи, журналисты, педагоги и пр.), к мнению которых население прислушивается, эти аспекты, как правило, не акцентируют. Частичное оздоровление экологической обстановки, если это окажется возможным, потребует среди прочего больших затрат энергии, при выработке которой следует минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Основные выводы МГЭИК

– МГЭИК признает взаимозависимость климата, экосистем, биоразнообразия и человеческого общества. Деятельность человека вызвала глобальное потепление главным образом за счет выбросов парниковых газов. При этом глобальная приземная температура увеличилась на 1,1 °C за период с 1850–1900 гг. по 2011–2020 гг. Произошли широкомасштабные и быстрые изменения в атмосфере, океане, криосфере и биосфере.

– Рост глобальной приземной температуры прогнозируется по меньшей мере до середины текущего столетия. Глобальное потепление на 1,5 и 2 °C будет достигнуто в течение XXI в., если в предстоящие десятилетия не произойдет резкого сокращения выбросов CO_2 и других парниковых газов.

– За период 1850–2019 гг. было выброшено в общей сложности 2400 ± 240 Гт антропогенного CO_2, а его поглощение сушей и океаном составило 1430 Гт CO_2.

– Начиная с 1970-х гг. произошло потепление верхнего слоя мирового океана (0–700 м), и основной фактор – влияние человека.

– Многие изменения, вызванные прошлыми и будущими выбросами парниковых газов, необратимы в течение столетий и даже тысячелетий, особенно изменения в океане, ледяных щитах и глобальном уровне океана.

– Каждая 1 000 Гт CO_2 кумулятивных выбросов вызывает повышение глобальной приземной температуры на 0,27–0,63 °C, при этом наилучшая оценка 0,45 °C.

– Глобальные антропогенные выбросы парниковых газов оцениваются в 59 ± 6,6 Гт CO_2-экв (2019 г.) Суммарные выбросы парниковых газов от сельского хозяйства, лесного хозяйства и других видов землепользования представляют ~12 Гт CO_2-экв/год в течение 2007–2016 гг.

– В 2019 г. ~35 % населения мира проживало в странах с выбросами более 9 т CO_2экв на душу населения, в то время как ~41 % – в странах с выбросами менее 3 т.

– Средний глобальный уровень моря повысился на 0,20 м в период с 1901 по 2018 г.

– В настоящее время ~3,3–3,6 млрд чел. (около половины населения Земли!) живут в условиях, крайне уязвимых к изменению климата, при этом самые серьезные неблагоприятные последствия наблюдаются в Африке, Азии, Центральной и Южной Америке, в наименее развитых странах, на малых островах и в Арктике. В период с 2010 по 2020 г. человеческая смертность от наводнений, засух и штормов была в 15 раз выше в крайне уязвимых регионах по сравнению с регионами с очень низкой уязвимостью.

– Концентрация парниковых газов в атмосфере продолжала увеличиваться, начав примерно с 280 частей на миллион (ppm) в 1850 г. для двуокиси углерода (CO_2) и достигнув среднегодовых значений 410 ppm, 1866 частей на миллиард (ppb) для метана (CH_4) и 332 ppb для закиси азота (N_2O) в 2019 г.

– Необходимое условие для стабилизации глобальной приземной температуры – уравновешивание двух противоположных процессов – антропогенных выбросов CO_2 и их антропогенного удаления, но технических и экономических проработок такого предложения не проводилось. Если бы такое равновесие было достигнуто, то глобальное повышение приземной температуры постепенно бы прекратилось, хотя продолжались бы другие изменения. Так, потребовалось бы от нескольких столетий до тысячелетий для прекращения подъема глобального среднего уровня океана. Заметные изменения глобальной приземной температуры начнут проявляться примерно в течение 20 лет, а для многих других климатических факторов воздействия проявятся намного позже.

– По оценкам ученых, в этом столетии и в последующие годы ожидается оттаивание многолетней мерзлоты. К 2100 г. приповерхностная (в пределах 3–4 м) площадь многолетней мерзлоты уменьшится на 24–69 %. Это приведет к кумулятивному выбросу в атмосферу десятков, сотен гигатонн углерода из многолетней мерзлоты в виде CO_2 и метана к 2100 г. с потенциальной возможностью усугубления изменения климата. Многолетняя мерзлота арктических и умеренно холодных регионов содержит 1460–1600 Гт органического углерода, что почти в два раза больше концентрации углерода в атмосфере.

3. Обсуждение выводов МГЭИК

МГЭИК с высокой вероятностью считает техногенную деятельность и связанные с ней загрязнения окружающей среды ответственными за глобальное потепление и климатические эффекты. При этом речь идет не о каком-либо конкретном государстве, а обо всей цивилизации в целом. С этим можно согласиться, так как состав атмосферы, уровень моря и климат не могут быть индивидуальны для отдельной страны или небольшой группы стран. При этом техногенная деятельность оказывает непрерывное влияние на климатические явления.

Выбросы CO_2 в атмосферу происходили на протяжении последних 170 лет. Это незначительный срок в масштабах глобальных процессов, поэтому выброс можно

считать залповым, причем основная масса парниковых газов выброшена за последние ~60–70 лет и распределилась между океаном, сушей (в растениях и почве) и атмосферой. Выбросы монотонно нарастают, на их стабилизацию в ближайшие годы, тем более на их снижение, надеяться не следует, так как энергетика – инерционная отрасль промышленности и быстро, по крайней мере в лучшую сторону, ничто не изменяется, поэтому климатические проблемы будут только нарастать.

Из этого следует, что:

– Первоочередной мерой защиты от изменений климата должно быть снижение, а по возможности прекращение загрязнения окружающей среды, но быстрого эффекта от очищения среды ожидать не следует.

– Глобальное потепление на ~2 °С в XXI в., несомненно, произойдет.

– Каждая 1 000 Гт CO_2 кумулятивных выбросов вызывает повышение глобальной приземной температуры на ~0,45 °С. При ежегодных выбросах ~60 Гт за сотню лет температура возрастет на ~3 °С и с учетом уже достигнутых 1,5 °С рост составит ~4,5 °С. В ряде научных публикаций при упоминаниях таких температур звучало словосочетание «катастрофический рост». Поэтому климатические проблемы должны быть решены за срок не более столетия.

– Большую опасность представляет повышение уровня моря и, как следствие, затопление территорий и миграция очень больших масс населения со всеми вытекающими последствиями – социальными, экономическими, военными и пр. Масштабы миграции и связанных с ними проблем, скорее всего, будут на порядки превышать недавний кризис в Европе из-за наплыва мигрантов.

– Не меньшую опасность представляет оттаивание вечной мерзлоты. Причем угрозы связаны не столько с потерей устойчивости строительных конструкций на мерзлых грунтах, сколько с выходом в атмосферу метана и углерода и соответствующим резким усилением парникового эффекта.

– Можно прогнозировать, что одному-двум следующим поколениям придется приступить к решению двух жизненно важных проблем, имеющих общечеловеческое значение – переводить производство на энергоносители с минимальным воздействием на окружающую среду и очищать загрязненную атмосферу от парниковых газов. Опыта решения таких задач нет, а возможности их решения пока не очевидны.

4. Подходы стран к достижению углеродной нейтральности

Перечень энерготехнологий, способных ежегодно производить не менее десятка миллиардов тонн нефтяного эквивалента энергии (в настоящее время цивилизация потребляет 14,3 млрд т н. э.), ограничен. В настоящее время ~80 % потребляемой в мире энергии производится за счет сжигания угля, нефти и газа, предприятия углеводородной энергетики – основные загрязнители окружающей среды. Однако если убрать из списка энерготехнологий три углеводородных (угольную, нефтяную и газовую), то останется единственная – атомная, не имеющая ограничений по масштабам производства энергии. У солнечной и ветровой технологий мала плотность потока энергии, и они могут пока вносить лишь небольшие добавки на уровне процентов в мировой энергетический баланс, практически исчерпаны природные ресурсы рек для развития гидроэнергетики, низка теплопроводность горных пород для развития геотермальной энергетики и пр.

В последнее время вновь стали обращать внимание на атомную энергетику, примером чего служит прошедший саммит по ядерной энергии (21.03.24, Брюссель). В заявлении участников саммита выражена готовность «работать над полным раскрытием потенциала ядерной энергетики путем принятия таких мер, как создание благоприятных условий для поддержки и конкурентного финансирования продления срока службы существующих ядерных реакторов, строительства новых атомных электростанций и скорейшего развертывания современных реакторов».

Для достижения углеродной нейтральности понадобится существенно изменить структуру существующего мирового энергетического баланса и кратно увеличить мощности по производству электроэнергии низкоуглеродными и безуглеродными технологиями. В результате можно прогнозировать снижение, а затем и прекращение загрязнения атмосферы углекислым газом. Это возможно лишь совместными усилиями крупнейших стран мира с наибольшим производством энергии, т. е. с крупнейшими экономиками в мировой структуре – со странами «Группы двадцати». Усилия одной страны или группы стран, но с небольшим общим производством энергии, будут и недостаточны и, возможно, даже бесполезны.

Можно достичь целей декарбонизации, незамедлительно приступив к практическим действиям с использованием разных путей. Однако каждый путь имеет кроме достоинств ряд недостатков, например, отчуждаются значительные территории, потребляются дефицитные материалы, пресная вода и пр.

Мировое человеческое сообщество не является единым организмом и не управляется из одного центра. В этой связи обсуждение мер по снижению объемов выбросов и достижению углеродной нейтральности на глобальном уровне имеет смысл лишь как обозначение ориентиров движения в желаемом направлении. Реальная же картина оказывается много сложнее, поскольку территориальные выбросы парниковых газов и выбросы отдельных стран существенно отличаются друг от друга. Это различие представлено на рис.2 [7].

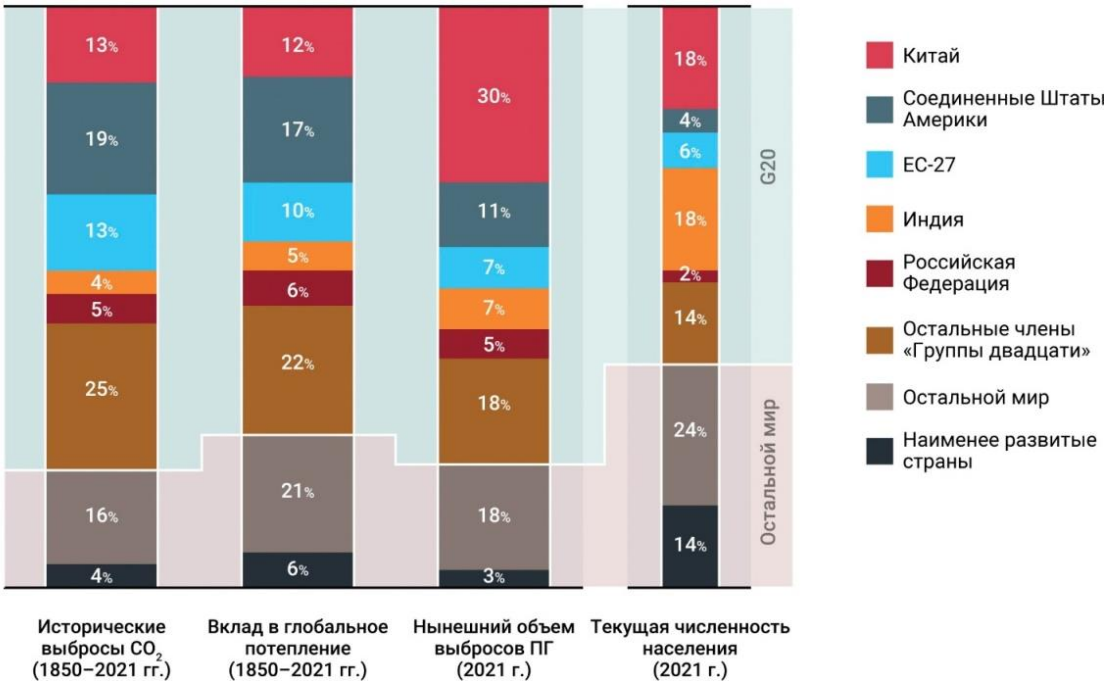

Рис. 2. Влияние стран на глобальное изменение климата

Рис. 2 демонстрирует, что основное загрязнение вызвано деятельностью стран «Группы двадцати». В текущем загрязнении, нормированном на 1 % населения, лидируют США, Китай, ЕС, Индия и Россия. За исключением Индии, это страны с развитыми экономиками, имеющими опыт создания энерготехнологий с минимальным воздействием на окружающую среду, квалифицированные кадры и инфраструктуру. Так, Китай активно развивает атомную энергетику и ВИЭ, и если они заменят угольную генерацию, то это будет заметным вкладом в решение общемировой проблемы. Наибольший парк АЭС эксплуатируется в США, широко представлена атомная энергетика в Евросоюзе. Однако для развития атомной энергетики, требуемой для действительного решения климатических проблем, необходимы политические решения, возможно, усиленные экономическими стимулами для начала работ. Известно, например, что в годы первого мирового

нефтяного кризиса Франция приняла политическое решение и смогла за относительно короткий срок существенно увеличить долю атомной энергетики до ~76 % в энергетическом балансе страны. Принимая ограничения по времени, связанные с принятием действенных мер по стабилизации климата, представляется целесообразным, чтобы прежде всего развитые экономики группы G-20 повторили этот пример.

Известно также, что каждое государство-участник Парижского соглашения должно разработать на национальном уровне план действий по сокращению выбросов и адаптации к изменению климата и обновлять его каждые пять лет (ОНУВ[2]). Эти планы определяют порядок достижения целевых показателей и содержат детально проработанные механизмы мониторинга и проверки хода их достижения, чтобы этот процесс не отклонялся от графика. Все государства-участники Парижского соглашения выпустили по меньшей мере первый ОНУВ, а 151 из них сообщило о новом или обновленном ОНУВ по состоянию на 02.11.21. Оценка этих планов и их реального воплощения показывает, что разрыв в уровне выбросов, определяемый как разница между предполагаемыми глобальными выбросами парниковых газов, достигнутыми в результате полного осуществления последних версий ОНУВ, и выбросами при применении мер с наименьшими издержками, согласованных с долгосрочной температурной целью в соответствии с Парижским соглашением, остается значительным. Это означает, что все государства-участники Парижского соглашения должны срочно ускорить низкоуглеродную трансформацию всех секторов экономики для достижения долгосрочной температурной цели, содержащейся в Парижском соглашении.

Что касается энергетики, то, как отмечалось выше, в настоящее время уже имеются апробированные технологии генерации электроэнергии с использованием энергии солнца, энергии ветра, биотоплива и атомной энергии. В каждой стране свои приоритеты и возможности, но представляется, что оптимальное сочетание всех этих источников энергии станет тем инструментом, который позволит достичь углеродной нейтральности. Однако если к первым трем технологиям отношение населения положительное, то к атомной энергетике, мягко говоря, не очень доброжелательное.

5. Климатическая обстановка в Российской Федерации

Российская Федерация – крупнейшее государство в мире по занимаемой территории.

Ниже приведены результаты Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [10].

В 2023 г. в России среднегодовая аномалия (отклонение от среднего за 1991–2020 гг.) температуры воздуха составила +0,99 °С, весной +1,06 °С, летом +0,87 °С, осенью +1,96 °С, зимой +0,42 °С. Скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры за период 1976–2023 гг. составила 0,50 °С за 10 лет. Средние годовые аномалии температуры приземного воздуха, осредненные по территории России за 1936–2023 гг., представлены на рис. 3, на котором виден устойчивый рост за последние полвека.

[2] Определяемые на национальном уровне вклады (ОНУВ) стран-участниц Парижского соглашения – это стратегические планы, направленные на сокращение выбросов парниковых газов и адаптацию к изменению климата.

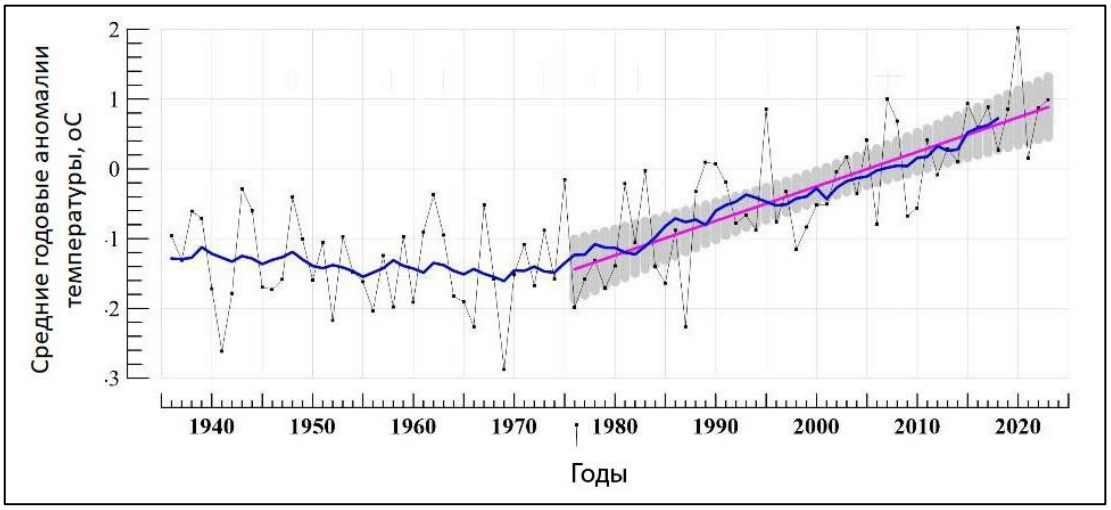

Рис. 3. Средние годовые аномалии температуры приземного воздуха (°С), осредненные по территории России за 1936–2023 гг. Показаны 11-летнее скользящее среднее и линейный тренд за 1976–2023 гг. с 95 %-й доверительной полосой. 1976 г. выбран условно в качестве начала современного потепления в соответствии с ходом глобальной температуры

В области морской Арктики температура с 1990-х гг. к 2018–2020 гг. повысилась зимой более чем на 4 °С, а летом – на 2 °С, а к 2023 г. понизилась зимой на 2 °С, а летом – на 0,5 °С. В Северном Ледовитом океане площадь, занятая льдом (ледовитость) на сезонном минимуме в сентябре, сократилась с 1980 до 2012 г. в 2,2 раза. На акватории арктических морей, по которым пролегает Северный морской путь, ледовитость в сентябре сокращалась с 1996 г. вместе с ростом летней температуры воздуха и за десять лет уменьшилась в восемь раз, с 1892 до 234 тыс. км^2.

Продолжительность залегания снежного покрова в среднем по России зимой 2022/23 гг. оказалась значительно меньше климатической нормы, аномалия вошла в десятку наименьших значений.

Продолжается рост концентрации CO_2, максимальные среднемесячные значения, наблюдаемые в зимние месяцы, превысили 430 ppm.

6. Современные низкоуглеродные и безуглеродные энерготехнологии

В настоящее время доступны следующие энерготехнологии с наименьшим влиянием на окружающую среду:

– возобновляемые источники энергии (гидроэнергетика, солнечная, ветровая, приливная, геотермальная);

– ядерные технологии (современные ядерные реакторы на тепловых нейтронах с открытым топливным циклом и будущие реакторы на быстрых нейтронах с замкнутым циклом);

– водородная энергетика.

Возобновляемые источники энергии. Источник большей части выбросов парниковых газов от энерготехнологий с возобновляемыми источниками энергии ─ не процесс производства энергии, а сопутствующая инфраструктура. Эти выбросы связаны с технологиями добычи, переработки, транспортировки и утилизации, причем они на порядок меньше, чем в случае ископаемых энергоносителей. В энерготехнологиях с углем, нефтью и газом основной выброс парниковых газов происходит в процессе производства энергии, в химической реакции окисления и образования углекислого газа.

В последние годы активно развиваются солнечная и ветровая энергетики, и вполне возможно, что их доля в мировом энергетическом балансе будет

увеличиваться. В настоящее время она находится на уровне процентов (по первичной энергии), за ближайшие два-три десятилетия может увеличиться в два-три раза, но для заметного изменения баланса и стабилизации выбросов парниковых газов необходима доля не менее десятков процентов. Эксперты надеются на увеличение доли солнечной энергетики, возможности других возобновляемых источников, в том числе и атомную, которую пока не упоминают.

Ядерные технологии. Сырьевое топливо для атомной энергетики по своей природе хотя и относится к ископаемым источникам энергии, но реакторы на быстрых нейтронах способны воспроизводить для себя топливо, что делает их похожими в какой-то мере на возобновляемые источники энергии. В ядерной реакции деления из 1 кг урана возможно получать ~$5{,}7 \cdot 10^5$ и ~$8 \cdot 10^7$ МДж для тепловых и быстрых реакторов соответственно, тогда как от 1 кг органического топлива получается 10–50 МДж. За счет высокой плотности энергии в ядерном топливе реализуются минимальные выбросы в окружающую среду.

Для атомной энергетики с быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом решаются проблемы безопасности, благодаря чему последствия любой аварийной ситуации на реакторе не выходят за границы станции и не оказывают влияния на условия жизни населения. Обеспечиваются также режим ядерного нераспространения, минимизация объема образующихся отходов, безопасность перевозок отработавшего топлива [11–14].

Сегодня существуют достаточно развитые методологии сравнения различных энергетических технологий как с точки зрения экономических, так и экологических показателей. Прежде всего, это методология оценки с использованием приведенной стоимости производимой электроэнергии (Levelized Cost of Energy Analysis – LCEA), а также методология с использованием критериев «не причинять существенного вреда». В соответствии с приведенными оценками атомная энергетика даже в современном ее виде вполне конкурентоспособна с ВИЭ.

Вместе с тем перспективы развития атомной энергетики в XXI в. не однозначны. Например, отказ от нее некоторых стран в связи с ее потенциальной опасностью и надеждами, что потребности человечества удовлетворят возобновляемые источники энергии [15]. Эту точку зрения критикуют и указывают на уязвимость возобновляемых источников из-за пылевых бурь, штилей, длительной засухи, вулканических извержений, экстремально низких температур (например, массовый отказ ветровых электростанций в штате Техас в 2021 г.) [17]. Энергосистему, состоящую из возобновляемых источников энергии, необходимо дополнить независимыми источниками другого типа, чтобы обеспечить надежность энергообеспечения хотя бы самих важных потребностей. В таких комбинированных энергосистемах вместо конкуренции имеет место синергетический эффект. Атомные реакторы сглаживают выработку электрической энергии в энергосистеме, компенсируя суточные, сезонные либо метеорологические колебания мощности возобновляемых источников энергии.

Неоднозначность взглядов на перспективы атомной энергетики проявляется и на уровне государственных решений. Например, Германия недавно поразила многих, завершив под давлением Зеленых вывод из эксплуатации последних атомных энергоблоков, Австрия не стала загружать ядерное топливо в активную зону своего первого современного атомного энергоблока, Бельгия планирует в 2025 г. завершить вывод атомных энергоблоков из эксплуатации. В то же время Россия, Китай и Индия вводят в эксплуатацию новые энергоблоки, Великобритания ведет переговоры с зарубежными компаниями о строительстве своих новых энергоблоков, США произвели первые десятки килограммов обогащенного урана и в перспективе смогут отказаться от его импорта. В рамках ЕС с переменным успехом полемизируют две группы стран, одна из которых (Франция, Венгрия, Великобритания и еще 13 из 27 членов ЕС) активно выступает за развитие атомной

энергетики, а вторая (Австрия, Германия и Люксембург) столь же активно выступает против.

Тем не менее атомная энергетика развивается, Европа признала АЭ зеленой и, скорее всего, вернется к ней.

В этих неоднозначных условиях ряд стран и международных объединений проводят работы по всем направлениям в рамках международного проекта Generation IV, разрабатывая как реакторы на тепловых нейтронах – высокотемпературные газоохлаждаемые (VHTR), жидкосолевые (MSR) и на сверхкритической воде (SCWR), так и на быстрых – газоохлаждаемые (GFR), с натриевым (SFR) и свинцовым (LFR) теплоносителем.

Наиболее активные работы осуществляются в России и Китае. Создаются энергоблоки с реакторами большой мощности (российский ВВЭР-ТОИ, китайские HPR-1000 и CAP-1400), средней (российские ВВЭР-600 и ВБЭР-600) и малой (начата эксплуатация российского ПЭБ «Академик Ломоносов» с двумя водоохлаждаемыми реакторами КЛТ-40С, китайская АЭС с двумя газоохлаждаемыми высокотемпературными реакторами HTR-PM). На площадке Северского химического комбината строится опытно-демонстрационный энергокомплекс в составе реакторной установки «БРЕСТ-ОД-300» с пристанционным ядерным топливным циклом и комплексом по производству плотного нитридного топлива для реакторов на быстрых нейтронах.

Водородная энергетика. В последнее время активно обсуждается водородная энергетика, поскольку в единичном акте производства энергии при окислении (сжигании) 1 кг водорода выделяется ~140 МДж энергии, что кратно превышает энерговыделение для привычных углеводородов. При этом образуется экологически чистая вода, а не углекислый газ. Строго говоря, водород в данном случае рассматривается не как первичный (сырьевой) источник энергии, а как энергоноситель.

Производство и использование водорода с помощью, например, атомной энергии, не сопровождается выбросами в атмосферу вредных веществ. К достоинствам водородной энергетики следует отнести:

- неограниченные запасы экологически чистого сырья (воды);
- удобный энергоноситель для транспортировки, накопления и хранения энергии;
- технология производства энергии и ее отходы (та же самая вода) не загрязняют окружающую среду.

Концепция атомно-водородной энергетики представляется следующей [16]: вода на входе + чистая ядерная энергия → водород → водород + кислород = чистая энергия + вода на выходе.

Отметим, что рост атомной энергетики не решает проблемы обеспечения моторным топливом транспорта и отопления производственных и бытовых объектов, поэтому неминуем перевод транспорта и систем отопления на электричество либо на водород, в том числе с использованием топливных элементов.

7. Угроза углеводородных технологий здоровью населения

Загрязнение атмосферы углеводородной энергетикой приводит не только к росту парникового эффекта и глобальному потеплению, но и влияет на здоровье населения.

На рис. 4 представлены коллективные дозы облучения на единицу выработанной электроэнергии для разных электротехнологий, видно, что облучение радионуклидами происходит не только в атомной отрасли [6].

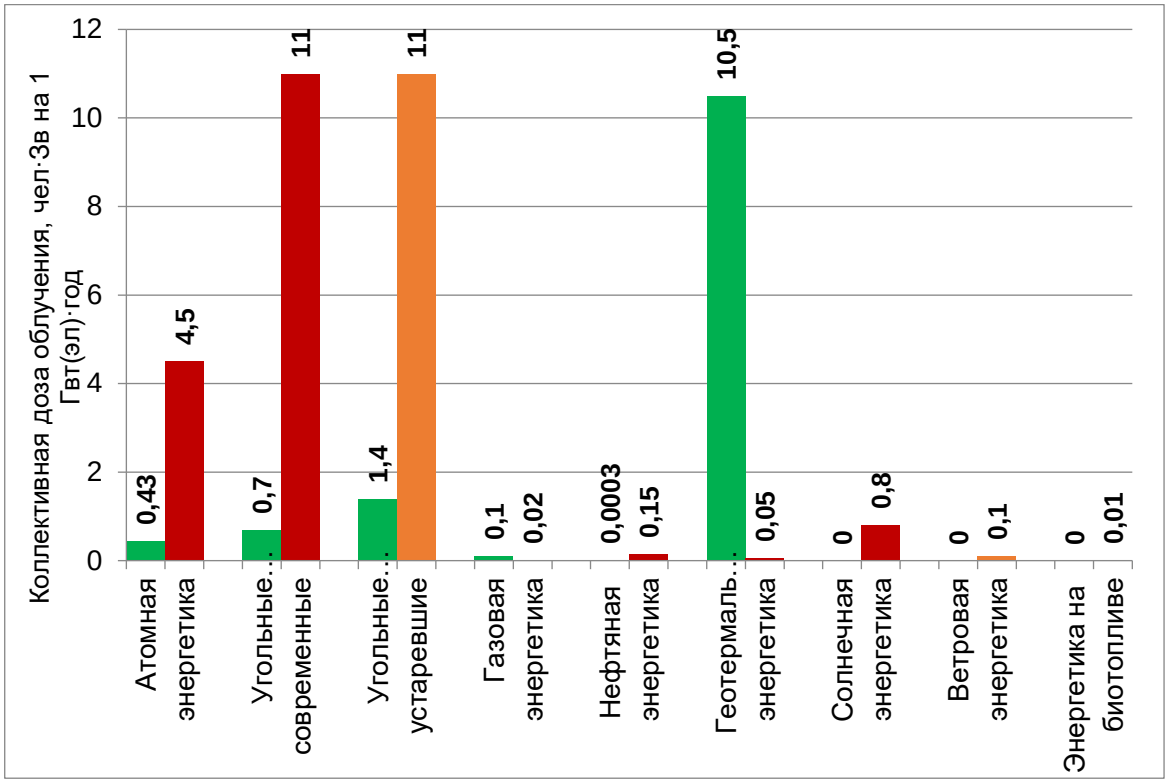

Рис. 4. Коллективные дозы облучения на единицу выработанной электроэнергии для разных энерготехнологий. Зеленым цветом – для населения, коричневым – для персонала

В целом добыча ресурсов представляет собой источник облучения персонала и населения из-за присутствия естественных радионуклидов в рудах. Так, угольные электростанции вносят существенный вклад в общую коллективную дозу из-за прямого сжигания угля и отложения угольной золы.

В РФ поставлена задача замены угольных ТЭЦ, а также решения проблем золоотвалов – источника экологического воздействия. Ситуация осложняется еще и тем, что угольные станции считают безопасными и размещают их вблизи крупных населенных пунктов. Основное влияние на здоровье человека (на органы дыхания) оказывает пыль. Заболеваемость по основным классам болезней (зарегистрировано пациентов с диагнозом, установленным впервые в жизни) в течение 1992–2018 гг. представлена в табл. 1 [18].

Таблица 1. Заболеваемость населения в течение 1992–2018 гг.

Годы	1992	2010	2018
Всего	91 296	111 428	114 841
Болезни органов дыхания	42 966	46 281	52 833

Видно, что с 1992 по 2018 г., а это соизмеримо со временем жизни одного поколения людей, на ~25 % возросла общая заболеваемость населения, причем половина болезней связана с органами дыхания.

Для атомной энергетики выбросы составляют 5,1–6,4 г CO_2 г экв/кВт·ч, причем наибольший вклад вносит топливная цепочка «от начальной до конечной стадии». Основу современной атомной энергетики составляют тепловые реакторы, использующие только ~0,7 % добытого урана в топливной цепочке. При переходе на быстрые реакторы с замкнутым топливным циклом эффективность использования урана в топливной цепочке с ~0,7 % будет возрастать и приближаться к 100 % и, как

следствие, уменьшится добыча урана и пропорционально снизятся выбросы углекислого газа от атомной энергетики.

Основные аргументы в пользу развития атомной энергетики представлены в [19].

Геотермальная энергетика также становится источником облучения во время эксплуатации, демонстрируя самую высокую коллективную дозу для населения. Она находятся в диапазоне (1–20) чел·Зв, на рис. 4 показана средняя величина 10,5 чел·Зв. Однако доля геотермальной энергии в энергетическом балансе мала, и этой особенностью можно пренебречь. Уровни облучения персонала и населения для газовой, нефтяной, солнечной, ветровой и энергетики на биотопливе на графике в выбранном масштабе не видны, но величины облучений проставлены.

8. Выводы

1. Рассмотрены важнейшие выводы МГЭИК и оценены их последствия, предложено решение, которое можно осуществить в течение ближайших десятилетий и которое, несомненно, скажется на климатических явлениях, и названы страны, которые могли бы это сделать.
2. Климатические изменения угрожают не только устойчивому развитию, но и существованию самой цивилизации.
3. Для достижения углеродной нейтральности понадобится существенно изменить структуру существующего энергетического баланса и кратно увеличить мощности по производству электроэнергии низкоуглеродными и безуглеродными технологиями. Это возможно лишь совместными усилиями крупнейших стран мира с наибольшим производством энергии, т. е. с крупнейшими экономиками в мировой структуре (странами «Группы двадцати»). Усилия единственной страны или даже небольшой группы стран будут и недостаточны и, возможно, даже бесполезны.
4. Угольная энерготехнология оказывает наибольшее негативное влияние на экологическую обстановку и здоровье населения. Поэтому ее следует в первую очередь заменять на более безопасные технологии.
5. Возобновляемые источники энергии и водородную энергетику следует развивать совместно с атомной энергетикой.
6. Атомная энергетика способна самостоятельно обеспечить углеродную нейтральность и ежегодно производить десятки миллиардов тонн нефтяного эквивалента энергии с минимальным воздействием на окружающую среду и наименьшими выбросами парниковых газов. Для нее практически решаются проблемы безопасности, благодаря чему последствия любой аварийной ситуации не выходят за границы станции и не оказывают влияния на условия жизни населения, обеспечен режим ядерного нераспространения, минимизирован объем образующихся отходов и отработавшего топлива.

9. Список литературы

1. МГЭИК, 2023 г.: Резюме для политиков // 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 [Основная группа авторов, Х. Ли и Дж. Ромеро (ред.)]. МГЭИК. – Женева, Швейцария. – 36 с.
2. Изменение климата, 2021 г. Физическая научная основа. Вклад рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Резюме для политиков // МГЭИК. 2021. Швейцария.
3. МГЭИК, 2019 г.: Резюме для политиков // Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата [Х.-О. Пёртнер, Д.К. Робертс, В. Массон-Дельмотт, П. Чжай, М. Тигнор, Э. Положанска, К. Минтенбек, М. Николаи, Э. Окем, Я. Петцольд, Б. Рама, Н.М. Вейер (ред.)].

4. МГЭИК, 2019 г.: Резюме для политиков // Изменение климата и земля: Специальный доклад МГЭИК об изменении климата, опустынивании, деградации земель, устойчивом управлении земельными ресурсами, продовольственной безопасности и потоках парниковых газов в наземных экосистемах [П. Р. Шукла, Д. Ски, Э. Кальво Буэндия, В. Массон-Дельмотт, Х.- О. Пёртнер, Д. С. Робертс, П. Чжай, Р. Слейд, С. Коннорс, Р. ван Диемен, М. Ферра, И. Хоги, С. Луз, С. Неоги, М. Патхак, Я. Петцхольд, Дж. Португал Перейра, П. Вьяс, Э. Хантли, К. Киссик, М. Белкасеми, Дж. Мэйли, (ред.)].
5. МГЭИК, 2018 г.: Резюме для политиков // Глобальное потепление на 1,5 °С. Специальный доклад МГЭИК о последствиях глобального потепления на 1,5 °С выше доиндустриальных уровней и о соответствующих траекториях глобальных выбросов парниковых газов в контексте укрепления глобального реагирования на угрозу изменения климата, а также устойчивого развития и усилий по искоренению бедности [В. Массон-Дельмотт, П. Чжай, Г. О. Пёртнер, Д. Робертс, Д. Ски, П. Р. Шукла, А. Пирани, В. Муфума-Окия, К. Пеан, Р. Пидкок, С. Коннорс, Д. Б. Р. Мэтьюз, Я. Чжень, С. Чжоу, М. И. Гомис, Е. Лонной, Т. Мейкок, М. Тигнор, Т. Уотерфилд (ред.)]. Всемирная метеорологическая организация. – Женева, Швейцария. – 35 с.
6. Достижение углеродной нейтральности в регионе ЕЭК ООН : Комплексная оценка жизненного цикла источников электроэнергии. 2022. Европейская экономическая комиссия ООН, Женева.
7. Программа ООН 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 удается сократить объемы выбросов (снова)». Найроби. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922 (Дата обращения: 31.03.25).
8. *Шполянская, Н. А.* Геокриология. Эволюция криолитозоны и глобальные изменения климата: Учеб. пособие / Н. А. Шполянская. – М. : «КДУ» (Книжный Дом Университета); «Добросвет», 2018.
9. *Данилов-Данильян, В. И.* Устойчивое развитие и нескончаемые дискуссии о нем / В. И. Данилов-Данильян // Экологический ежегодник. – 2008. – № 2. – С. 6–13.
10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. – М. : Росгидромет, 2024. – 104 с.
11. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортером быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ / Н. В. Горин, А. Л. Карманов, В. Н. Первиненко и [др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т.131, вып. 4. – С. 227–232.
12. *Горин, Н. В.* Обоснование ядерной и радиационной безопасности контейнера для отработавших ТВС реакторов АМБ Белоярской АЭС / Н. В. Горин, Я. З. Кандиев, Ю. И. Чернухин // Атомная энергия. – 2006. – Т.100, вып. 6.– С. 423–428.
13. *Анфалова, О. В.* Вывоз ОЯТ реакторов АМБ-100 и АМБ-200 Белоярской АЭС на ПО Маяк / О. В. Анфалова, Н. В. Горин, В. С. Краев // Вопросы радиационной безопасности. – 2019. – № 2. – С. 47–52.
14. Атомная энергетика как основа устойчивого развития / Н. В. Горин, Б. К. Водолага, В. П. Кучинов, В. В. Шидловский // Государственное управление. Электронный вестник. – 2022. – № 95. – С. 7–19. – DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-7-19.
15. Nuclear energy – The solution to climate change? / N. Muellner, N. Arnold, K. Gufler [et al.] // Energy Policy 155 (2021), 1–10. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421521002330 (дата обращения:31.03.25.
16. *Каплиенко, А. В.* Возможная роль ядерной энергетики в безуглеродном мире / А. В. Каплиенко, Б. А. Габараев, Ю. С. Черепнин // Труды VI Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2023), П-15, 14–17 ноября 2023 г., Москва. https://istc-2023.nikiet.ru/theses.php (дата обращения: 31.03.25).
17. *Пономарев-Степной, Н. Н.* Атомно-водородная энергетика: системные аспекты и ключевые проблемы / Н. Н. Пономарев-Степной, А. Я. Столяревский, В. П. Пахомов. – М. : Энергоатомиздат, 2008. – 108 с.
18. Россия в цифрах: Крат. стат. сб. – М. : Росстат, 2020.
19. Аргументы для формирования поддержки атомной энергетики в обществе / Н. В. Горин, В. П. Кучинов, А. А. Екидин [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 119–133. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.10. (дата обращения 31.03.25).

Сведения об авторах:

Горин Николай Владимирович, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», к. ф.-м. н., в. н. с.; г. Снежинск, Россия. Эл. почта: nvgorin@mail.ru

Водолага Борис Константинович, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», д. ф.-м. н., г. н. с.; г. Снежинск, Россия. Эл. почта: b.k.vodolaga@vniitf.ru

Кучинов Владимир Петрович, НИЯУ МИФИ, доцент; г. Москва, Россия.

Габараев Борис Арсентьевич, НИКИЭТ, НИУ МЭИ, д. т. н., г. н. с.; г. Москва, Россия

Шидловский Владимир Владиславович, АО «Прорыв», к. т. н., нач. управления, г. Москва, Россия.

NUCLEAR ENERGY AS A TOOL TO ACHIEVE CARBON NEUTRALITY IN HUMAN ACTIVITIES TO MITIGATE CLIMATE CHANGE

N.V. Gorin [1], B.K. Vodolaga [1], V.P. Kuchinov [2], B.A. Gabaraev [3], V.V. Shidlovskiy [4]

[1] FSUE "RFNC – VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Russia
[2] National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
[3] "N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering" (JSC "NIKIET"),
[4] JSC "Proryv", Moscow, Russia

It is shown that sustainability of climate and social development has been under threat due to environmental pollution caused by burning of hydrocarbon energy carriers. One of the ways to ensure climate sustainability is the switch to energy technologies that reduce or, if possible, stop contamination of environment with hydrocarbon burning wastes. It is noted that among these technologies nuclear energy is the most effective tool. It is emphasized that nuclear energy together with renewables produces the least environmental impact and can become a future energy technology based on a new technological platform which provides a combination of fast neutron reactors and a closed fuel cycle. This is the only one energy technology that (if the current climate is conserved) is capable of providing the civilization with energy of about dozens of billion toe. The Group of Twenty (G-20) countries are able to take the most effective actions for the development of nuclear power industry. It is concluded that modern civilization has no more than one century left to adequately respond to modern climate challenges. It is noted that first of all a coal-fired power industry should be substituted by a cleaner technology.

Key words: carbon neutrality, climatic phenomena, global warming, environmental pollution, fast neutron reactors, closed fuel cycle.

References

1. IPCC, 2023: Summary for Policymakers // 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC. – Geneva, Switzerland. – 36 p.
2. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfeld, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].
3. IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. https://doi.org/10.1017/9781009157988.00
4. IPCC, 2019: Summary for Policymakers // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–35. https://doi.org/10.1017/9781009157964.001.
5. IPCC, 2018: Summary for Policymakers // Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E.

Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–24. https://doi.org/10.1017/9781009157940.001
6. Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment Electricity Sources (2022) United Nations Economic Commission for Europe. United Nations. Geneva, http://www.unece.org.
7. Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). (2023) United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report. Nairobi. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922.
8. *Shypolyanskaya, N. A.* Geocryology. Permafrost zone evolution and Global climate change: Study guide // M. – "KDU Publishing", "Dobrosvet Publishing", 2018. [in Russian].
9. *Danilov-Daniljan, V. I.* Sustainable development and never-ending discussions about it / V. I. Danilov-Danilijan // Ecological year-book. – №2. – P.6-13. [in Russian].
10. A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2023. – M. : Rosghydromet, 2024. – 104 p. [in Russian].
11. Detection of Indications of Nuclear Non-Proliferation Breaches by States Importing Fast Reactors with Closed NFC Installations / N. V. Gorin, A. L. Karmanov, V. N. Pervinenko [et al.] // Atomic Energy – 2021. – Vol. 131, N 4. – P. 229–233.
12. *Gorin, N. V.* Substantiation of Nuclear and Radiation Safety of Cask for Spent Fuel Assemblies of Beloyarskaya NPP's AMB Reactors / N. V. Gorin, Y. Z. Kandiev, Y. I. Chernukhin // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 100, N. 6. – P. 423-428.
13. *Anfalova, O. V.* Transport of the AMB-100 and AMB-200 reactors SNF from Beloyarsk NPP to PA «Mayak» / O. V. Anfalove, N. V. Gorin, V. S. Kraev // Radiation Safety Problems. – 2019. – N 2. – P.47–52. [in Russian].
14. Nuclear Energy as a Basis for Sustainable Development / N. V. Gorin, B. K. Vodolaga, V. P. Kuchinov, V. V. Shidlovskiy // Public Administration E-journal. – 2022. – N 95. P. 7–19.
15. Nuclear energy – The solution to climate change? / N. Muellner, N. Arnold, K. Gufler [et al.] // Energy Policy 155 (2021), 1–10. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421521002330 (accessed: 31.03.2025).
16. *Kaplienko, A. V.* Possible role of nuclear energy in carbon-free world / A. V. Kaplienko, B. A. Gavaraev, Yu. S. Cherepnin // Proceedings of the 6th International Scientific Conference "Innovation Projects and Nuclear Energy Technologies" (ISC NIKIET-2023), P-15, November 14–17, Moscow. https://istc-2023.nikiet.ru/theses.php [in Russian].
17. *Ponomarev-Stepnoi, N. N.* Nuclear-hydrogen energy industry: systemic aspects and key problems / N. N. Ponomarev-Stepnoi, A. Ya. Stolyarovskiy, V. P. Pakhomov – M. : Energoatomizdat. – 108 pp. [in Russian].
18. Russia in Figures (Rossiya v tsifrakh in Russian): Brief statistical compendium / M. : Rosstat, 2020. [in Russian].
19. Arguments for Creation of Support for Nuclear Power in Society / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, A. A. Ekidin [et al.] // Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika. – 2023. – N. 4. – P. 119–133. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.10 [in Russian].