

ВОЗМОЖНАЯ РОЛЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В БЕЗУГЛЕРОДНОМ МИРЕ

Каплиенко А.В. (АО «НИКИЭТ»), Габараев Б.А., Черепнин Ю.С.
(АО «НИКИЭТ», НИУ МЭИ)

Сокращения: АСММ (атомная станция малой мощности), ВИЭ (возобновляемые источники энергии), ВЭС (ветровая электростанция), ГВт (гигаватт = 10^9 Вт), ГЭС (гидравлическая электростанция), ЕС (Европейский союз), ИНПРО (международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (INPRO)), КВ (коэффициент воспроизводства); КИУМ (коэффициент использования установленной мощности), МЭА (Международное энергетическое агентство), ОДЭК (опытно-демонстрационный энергетический комплекс), ОЯТ (отработавшее ядерное топливо), ПВт (петаватт = 10^{15} Вт), ПЭБ (плавающий энергоблок), РАО (радиоактивные отходы), РБН (реактор на быстрых нейтронах), РММ (реактор малой мощности), РУ (реакторная установка), СЭС (солнечная электростанция), ТВт (тераватт = 10^{12} Вт), ТЭС (тепловая электростанция), ЯМ (ядерные материалы), ЯТЦ (ядерный топливный цикл), ЯЭ (ядерная энергетика).

Введение

Энергетика является основой экономики любого современного государства, да и экономики мира в целом. Как известно, самым «удобным» для практического использования видом энергии является электроэнергия. В настоящее время более половины электроэнергии вырабатывают электростанции, работающие на органическом топливе (уголь, природный газ, нефть). Однако эта раскладка может кардинально измениться уже в первой половине текущего столетия, благодаря активности защитников климата нашей планеты.

Действительно, по метеорологическим наблюдениям последних десятилетий прослеживается достаточно четко выраженная тенденция к росту средней температуры нижних слоев земной атмосферы. Оценки многих встревоженных ученых свидетельствуют о том, что перегрев земной атмосферы более, чем на 2°C может вызвать необратимые катастрофические изменения климата, угрожающие самому существованию человеческой цивилизации.

Эту потенциально опасную динамику средней температуры нижних слоев земной атмосферы ряд ученых считает следствием парникового эффекта, который, по их мнению, связан с техногенными выбросами диоксида углерода (CO_2), являющегося основным продуктом горения органического топлива в кислородсодержащей среде. Главными источниками таких выбросов признаны тепловые электростанции и транспорт (наземный, морской и воздушный).

У сторонников парникового эффекта, как и в случае любой научной теории или гипотезы, нашлись оппоненты, по мнению которых масштабы современных техногенных факторов не могут привести к глобальному перегреву нижних слоев атмосферы. Как полагают оппоненты, это явление скорее вызвано каким-то циклическим нетехногенным природным процессом с настолько длительным периодом по сравнению с историей систематического мониторинга динамики температуры атмосферы, что наука пока не выявила эту цикличность.

Будучи профессионалами в несколько иной сфере, авторы не считают себя вправе вмешиваться между безусловно компетентными уважаемыми сторонниками парникового эффекта и их не менее компетентными оппонентами. Однако случилось так, что активность защитников земного климата привела к обсуждению угрозы катастрофических изменений климата и путей ее предотвращения на различных

климатических форумах, в том числе самого высокого политического уровня. Были подписаны Киотский протокол об изменении климата (1997 г.), Парижское соглашение по климату (2015 г.) и Климатический пакт Глазго (2021 г.), утвержденные подписями правительств почти 200 государств. Эти документы предусматривают сокращение глобальных выбросов парниковых газов с тем, чтобы не допустить к концу XXI века повышение температуры земной атмосферы более, чем на полтора градуса по Цельсию.

Первоочередным шагом реализации планов по сокращению глобальных выбросов парниковых газов предусмотрен постепенный отказ от ТЭС, так как именно эти электростанции используют органическое топливо в виде угля, природного газа или нефти. Правительства почти 200 государств добровольно обязались достичь к 2050 году состояния нулевого выброса углерода, а точнее CO_2 в атмосферу. Так, например, председатель КНР Си Цзиньпин в своем видеовыступлении на Генеральной Ассамблее ООН в феврале 2020 года объявил целью Китая «прохождение в 2030 году пика выбросов CO_2 и достижение угольной нейтральности к 2060 году». При этом стоит отметить, что на долю Китая приходится почти 30 % мирового выброса CO_2 .

Однако отказ от ТЭС, ежегодно генерирующих более половины мирового количества электроэнергии, реально возможен только при наличии замещающих электрогенерирующих мощностей. На эту роль были выбраны так называемые ВИЭ, а именно ГЭС, ВЭС и СЭС. Судьба АЭС как-то оказалась в «серой» зоне. Так, например, в ЕС часть государств, в частности Франция, Венгрия, Великобритания и еще 13 из 27 членов ЕС выступают в поддержку ядерной энергетики, тогда как Германия, Австрия и Люксембург решительно выступают против. Россия, Китай, Индия, Турция, Египет и ряд других стран реализуют далеко идущие программы развития своей ядерной энергетики.

Упоная на то, что ВИЭ с избытком заместят все прочие виды электрогенерации, сторонники декарбонизации предполагают радикально изменить весь уклад современной экономики, переведя транспорт, металлургию и другие энергоемкие отрасли мировой экономики на использование электроэнергии. По их мнению, часть электроэнергии, которую будут генерировать ВИЭ, возможно использовать для электролиза воды с целью получения «зеленого» водорода. Этот водород можно использовать как путем сжигания, так и более рационально, например, в топливных элементах, обеспечивающих электроэнергией транспорт и прочие энергоемкие отрасли экономики. Как полагают защитники климата, безуглеродная электрогенерация послужит в сочетании с широким производством и применением зеленого водорода основой для создания новой мировой экономики, которую нередко называют водородной.

1. Проблемные вопросы безуглеродной электрогенерации, основанной исключительно на ВИЭ

Некоторые аспекты перехода к безуглеродной электрогенерации и сопряженной с ней водородной экономике ранее рассматривались авторами в работе [1], в частности обсуждались вопросы реализации ВИЭ в необходимых масштабах и энергетической безопасности энергосистемы, основанной исключительно на ВИЭ. Главное преимущество ВИЭ состоит в том, что они представляют собой энергоресурс, постоянно возобновляемый природой независимо от человека, не сопровождают выработку электроэнергии выбросами CO_2 и не требуют затрат на приобретение, доставку и хранение топлива, утилизацию его отходов. Именно поэтому защитники климата обратились к ВИЭ, решая вопросы ресурсных ограничений и экологической безопасности.

Вместе с тем, ВИЭ не лишены недостатков, из которых одни вполне очевидны, а другие могут проявиться при тех или иных обстоятельствах. Так, например, применительно к ГЭС можно отметить следующие очевидные недостатки:

- ограниченность гидроэнергетических ресурсов, особенно в государствах с небольшой территорией (например, многие страны КС);
- отчуждение значительных территорий, иногда даже с затоплением населенных пунктов;
- затруднение продвижению проходной рыбы, стремящейся к местам нереста.

Из разряда не совсем очевидных недостатков ГЭС можно отметить:

- возможность катастрофического разрушения плотин на водохранилищах в случае ненадлежащего мониторинга и поддержания их целостности;
- чрезвычайные затраты на утилизацию или реновацию плотины, на рекультивацию обнажившегося дна водохранилища во избежание экологического или инфекционного бедствия.

О масштабах потерь при разрушении плотины ГЭС можно судить по аварии, случившейся в Китае в 1975 году при разрушении сравнительно небольшой (высота 25 м и длина 120 м) грунтовой плотины ГЭС Байнцяо на реке Жухэ, когда в результате наводнения погибло 26 тысяч человек, а из-за последующего голода и эпидемии умерло еще 145 тысяч человек.

С учетом подобных обстоятельств многие страны воздерживаются от строительства ГЭС большой мощности. Исключение составляют страны с большой территорией и полноводными реками, такие как Китай, Россия, Бразилия, Индия и т.п.

Поэтому из различных видов ВИЭ основное внимание уделяется развитию ВЭС и СЭС. К разряду их очевидных недостатков относятся:

- отчуждение больших территорий под строительство ВЭС и СЭС;
- низкие значения КИУМ из-за сильной зависимости от суточных, сезонных и погодных факторов;
- необходимость применения систем хранения энергии;
- материалоемкость ВИЭ и систем хранения энергии.

Первый недостаток наиболее актуален для небольших густонаселенных стран без выхода к морю, лишенных возможности строить ВЭС или СЭС морского базирования.

Второй недостаток можно компенсировать резервированием по генерирующей мощности. В работе [1] приведен наглядный пример: *в 2021 году суммарные мощности всех ВЭС и фотоэлектрических СЭС мира составили, соответственно, 825 и 849 ГВт, а их совместный вклад в мировую выработку электрической энергии оказался равным 10,3 %, из которых на ветровую энергетику пришлось 6,6 %, а на солнечную энергетику остальные 3,7 %. Почти такой же 9,9%-ный вклад совместно внесли все АЭС мира в копилку мировой выработки электрической энергии в том же 2021 году при суммарной мощности 400 ГВт, которая, как минимум, в четыре раза меньше суммарной мощности ВЭС и фотоэлектрических СЭС ($825 + 849$) = 1674 ГВт. Иными словами, КИУМ мирового парка АЭС оказался в четыре раза больше, чем КИУМ мирового парка ВЭС и фотоэлектрических СЭС. Отсюда вывод о необходимости, как минимум, четырехкратного резервирования генерирующей мощности ВИЭ для надежного замещения ТЭС и АЭС.*

Реализация такого масштабного резервирования генерирующей мощности ВИЭ и систем хранения энергии может оказаться под вопросом, так как переход от топливоемкой энергетики современной мировой экономики к материалоемкой безуглеродной энергетике грядущего мира водородной экономики потребуются колоссальные материальные ресурсы, причем не только сталь и бетон, но и куда более

дефицитные материалы, например, медь, алюминий, полимеры и такие редкие металлы, как литий, никель, платина, кобальт, кадмий и др. Интересная информация о данном переходе приведена в 3-й части «Генерального плана Тесла по устойчивой глобальной энергетической экономике» [2]. Для достижения устойчивой энергетической экономики к 2050 году потребуется ~30,3 ТВт мощности СЭС и ВЭС и ~240 ТВт·ч энергоемкости аккумуляторов, что означает 15-кратное увеличение современного уровня этих параметров.

С учетом материалоемкости самой электрогенерации, аккумуляторов и электропередачи это означает суммарную потребность (млн. т): никель – 40, алюминий – 412, литий ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) – 118, цинк – 66, кремний – 39, серебро – 0,07, магний – 18. Что касается меди, объявленной «главным металлом зеленой энергетики»: добыча (2019 г.) – 24 млн. т, потребление в СЭС – 5,5 т/МВт, в ВЭС – (4–10) т/МВт.

Из числа неочевидных недостатков мировой электрогенерации, основанной исключительно на ВИЭ, следует отметить:

- нарушение принципов безуглеродности и экологичности на начальном и конечном этапах жизненного цикла ВИЭ (добыча и производство материалов для создания ВИЭ, утилизация ВИЭ по завершении срока службы);
- нарушение требования о бесперебойности энергоснабжения, иными словами, несоблюдение энергетической безопасности.

Касательно первого из этих недостатков можно отметить, что современное производство материалов для создания ВИЭ осуществляется с большими выбросами CO_2 . На этапе утилизации элементов ВИЭ, например, полимерных лопастей ветротурбин или солнечных панелей неизбежно будут выделяться токсичные вещества, куда более вредные, чем CO_2 .

Второй недостаток из вышеприведенных представляется авторам наиболее серьезным. Обычно для обеспечения бесперебойности той или иной функции рассматриваемой энергетической системы прибегают к таким мерам, как резервирование (по генерирующей мощности) или диверсификация (например, по принципу действия). Казалось бы, электрогенерация, основанная исключительно на ВИЭ, вполне удовлетворяет этим требованиям. Однако резервирование и диверсификация элементов энергетической системы достигают своей цели только при условии, что последние не подвержены отказу по общей причине.

Между тем, помимо неблагоприятных суточных, сезонных и погодных факторов, сказывающихся на работоспособности или эффективности ВИЭ, возможны экстремальные ситуации. В качестве примера случившегося экстремального события можно привести февральские морозы (до -20°C) в штате Техас, которые привели к потере ~75 % генерирующей мощности ВЭС из-за обледенения лопастей ветротурбин. Из числа крайне маловероятных, но не совсем исключенных, экстремальных ситуаций можно было бы назвать гипотетическое извержение вулканическое извержение глобального масштаба (например, Йеллоустоунского вулкана в США).

Таким образом, для обеспечения энергетической безопасности (удовлетворения хотя бы самых жизненно важных потребностей) необходимо, чтобы любая энергосистема будущего содержала помимо ВИЭ другой источник электроэнергии, устойчивый против фактора, вызвавшего у ВИЭ отказ по общей причине. В настоящее время на роль такого устойчивого источника электроэнергии могли бы претендовать ТЭС или АЭС. Первые автоматически отвергаются сторонниками безуглеродной водородной экономики, остаются только АЭС.

В дорожной карте [3] такой авторитетной организации, как МЭА, приведены результаты исследований, согласно которым нулевая углеродность мировой электрогенерации будет достигнута к 2050 году при выработке 88 % электроэнергии на

ВИЭ, а оставшихся 12 % в основном на АЭС. Авторы затрудняются ответить на вопрос, хватит ли этих 12 % для удовлетворения жизненно необходимых потребностей, но полагают, что возможность оперативной «переброски» избыточной электроэнергии АЭС на электролизеры для производства водорода позволит постоянно держать мощность реактора на уровне, близком к номинальному. В результате, можно ожидать, что со временем допустимый вклад АЭС превысит упомянутые 12 % без ущерба для энергосистемы в целом. Отсюда следует вывод о сохранении некоего «окна возможностей» для ядерной энергетики в грядущем мире водородной экономики.

2. Перспективы освоения «окна возможностей» для ядерной энергетики

Наиболее радикальные защитники климата решительно настроены ликвидировать это окно, либо оставить его слегка приоткрытым только на некоторый переходный этап. В рамках ЕС происходит, как уже упомянуто во «Введении», почти бескомпромиссное противостояние между сторонниками ядерной энергетики и их оппонентами.

В мировом научном сообществе тоже нет однозначного отношения к перспективам ядерной энергетики. В 2021 году международный журнал «Energy Police» опубликовал статью группы австрийских ученых [4]. Они сравнили разработанные в МАГАТЭ и других международных организациях прогнозы развития ядерной энергетики на различные периоды времени с реальной динамикой параметров этой отрасли энергетики за эти же периоды времени и обнаружили реальная динамика всегда проходила вблизи нижних границ коридора прогнозов. Также отметили ограниченность ресурсов ^{235}U и преобладание вклада реакторов, спроектированных в 1960–1980 гг. и построенных в 1970–1990 гг., напомнили об остаточном риске тяжелых аварий, больших выбросах радиоактивных материалов при таких авариях и рисках распространения ядерных материалов. Правда, авторы работы [4] мимоходом упомянули о разработчиках инновационных энерготехнологий, обещающих десятикратное снижение риска тяжелых аварий, но тут же посетовали на длительные сроки разработки, планирования и строительства инновационных реакторов, которые могут не успеть к 2050 году.

Они пришли к выводу о том, что **вклад ядерной энергетики в смягчение изменений климата не превышает 2–3 % от суммарного выброса CO_2 и лучше от нее отказаться, заменив ее другими источниками электроэнергии.** Остается только догадываться, что под другими источниками подразумеваются все те же ВИЭ. Обсуждавшийся выше вопрос об энергетической безопасности системы, основанной исключительно на ВИЭ, остался за пределами внимания авторов работы [4].

Недостатки современной ядерной энергетики стали предметом рассмотрения не только в работе [4]. Уже к началу 2000-х годов сформировалось понимание того, что для широкого развития ядерной энергетики необходимо комплексно решать четыре основные проблемы: снижение стоимости произведенной энергии, повышение безопасности, обращение с РАО и ОЯТ, нераспространение ядерных материалов. Если продолжать строить новые атомные электростанции и предприятия ядерного топливного цикла по существующим проектам, даже самым совершенным из «поколения III+», перечисленные выше проблемы будут только нарастать. Только ядерная энергетика, базирующаяся на новых принципах, будет способна решить перечисленные проблемы и стать устойчивым источником энергообеспечения на долгие годы.

Соответственно, для интенсификации работ по созданию реакторов нового типа, свободных от перечисленных недостатков в начале 2000-х годов было организовано два крупнейших международных проекта «Международный форум «Поколение IV» (или GIF — Generation IV International Forum) [5] и проект ИНПРО [6]. Задачами первого

проекта стали поиски и реализация новых конструкций ядерных энергетических систем. Проект ИНПРО направлен на формулирование требований потребителей к конструкциям ядерных систем и технологий и разработке методологии оценки качества новых проектов применительно к требованиям потребителей.

В рамках проекта Gen IV были проанализированы различные реакторные технологии (концепции), которые могли бы удовлетворять разработанным требованиям. В результате исследований были отобраны и рекомендованы для дальнейшей научно-исследовательской и конструкторской проработки шесть перспективных реакторных концепций:

- БН (быстрый натриевый реактор);
- СВТГР (сверхвысокотемпературный газовый реактор);
- СКВР (сверхкритический водяной реактор);
- БГР (быстрый газовый реактор);
- СБР (свинцовый быстрый реактор);
- ЖСР (жидкосолевой реактор).

Работы по тем или иным направлениям из этих шести реакторных концепций ведутся в нескольких странах (Россия, Китай, Индия, США, ЕС), но следует отметить, что в форсированном режиме они осуществляются в России и Китае.

Наиболее ярким и продвинутым примером разработки инновационной ядерной энерготехнологии в рамках Gen IV является российский атомный проект «Прорыв», нацеленный на разработку, создание и промышленную реализацию замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) на базе реакторов на быстрых нейтронах с целью развития крупномасштабной ядерной энергетики, отвечающей следующим требованиям [7, 8]:

- исключение тяжелых аварий, требующих эвакуации населения;
- обеспечение конкурентоспособности на рынке электрогенерации;
- использование полного потенциала природного уранового сырья;
- радиационно-эквивалентное захоронение радиоактивных отходов;
- укрепление режима нераспространения ядерных и материалов.

В рамках проекта «Прорыв» на площадке Сибирского химического комбината уже развернуто сооружение опытно-демонстрационного энергетического комплекса в составе энергоблока с инновационным реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и замыкающего ядерный топливный цикл пристанционного завода.

Энерготехнология с РБН в замкнутом ЯТЦ удовлетворяет перечисленным требованиям к крупномасштабной ядерной энергетике, так как:

- исключает тяжелые аварии, требующие эвакуации населения. Это достигается, благодаря реализации принципа «естественной безопасности», без наращивания дорогостоящих инженерных барьеров и систем безопасности только за счет особенностей баланса нейтронов цепной реакции деления в БР, природных закономерностей, свойств и качеств его основных компонентов – свинцового теплоносителя и топлива, а также технических решений, способствующих их реализации. Естественным образом может быть кардинально снижен или даже исключен риск наиболее тяжелых аварий
- решает проблему ресурсного ограничения по топливу, благодаря использованию ^{238}U (и возможно ^{232}Th);
- предлагает малоотходную переработку ОЯТ с радиационно-эквивалентным захоронением РАО;

- обеспечивает технологическую поддержку режима нераспространения (отказ от обогащения урана, отсутствие blankets, пристанционный топливный цикл, КВ~1, технологии переработки ОЯТ без разделения урана и плутония).

Запуск ядерного энергоблока БРЕСТ-ОД-300 предполагается в 2026–2027 гг. При этом уже в 2030-х гг. может начаться тиражирование данной технологии.

Другим направлением развития ядерной энергетики следует считать интенсивную разработку проектов АСММ, которая осуществляется в настоящее время во многих странах [9–12]. К преимуществам АСММ относятся:

- возможность применения в относительно малых электрических сетях (небольшие страны, удаленные районы больших стран или островные территории);
- возможность применения в гибридных энергосистемах с преобладанием ВИЭ;
- снижение рисков и повышение экономической конкурентоспособности вследствие почти полного производства модулей в заводских условиях с минимальным объемом строительно-монтажных работ непосредственно на площадке;
- эффект серийности как компенсация эффекта масштаба мощности;
- короткие сроки сооружения, возможность поэтапного наращивания мощности АЭС путем ввода последующих энергоблоков;
- модульность и компактность, небольшой радиус зоны планирования защитных мероприятий вокруг АСММ (как правило, до 300 метров);
- более высокий уровень безопасности, обеспечиваемый меньшей напряженностью энерговыделения, естественной циркуляцией теплоносителя и широким применением пассивных средств безопасности;
- возможность подземного и подводного размещения, что также дает больше защиты от стихийных бедствий и представляется более безопасным решением;
- более дешевый и облегченный вывод из эксплуатации, в том числе посредством вывоза с площадки модуля и централизованной утилизации;
- повышенная мотивация инвесторов к проектному кредитованию сооружения АСММ вследствие меньшей стоимости модуля, сокращенных сроков сооружения, результирующего снижения рисков и меньшего периода окупаемости по отношению к АЭС большой мощности;
- замена паропроизводящих систем неядерных (углеводородных) станций с целью отказа от сжигания органического топлива;
- неэлектрические применения: опреснение, теплофикация, производство водорода, конверсия органического топлива и т.п.;
- повышенная длительность топливных кампаний (10 лет и более без перегрузок топлива);
- сокращение затрат на лицензирование, так как всестороннюю проверку регулирующих органов проходит только первый блок. Кроме того, в этом случае вступает в действие «кривая обучения», благодаря которой строительство и эксплуатация каждого последующего блока будет обходиться дешевле, чем предыдущего;
- упрощение систем и конструкций в РММ позволяет исключить аварии с потерей теплоносителя через разрывы трубопровода большого диаметра в связи с отсутствием таких трубопроводов в первом контуре РММ.

По состоянию на текущий 2023 год в мире насчитывается несколько десятков проектов АСММ различной мощности. Подавляющее большинство разработок находится на разных стадиях проектирования или лицензирования [9–11]. Однако в ряде случаев АСММ уже строятся или даже введены в эксплуатацию.

Так, например, в Китае строится АСММ с интегральным PWR АСР-100 мощностью 125 МВт-эл, ввод которой в эксплуатацию запланирован на конец 2026 г. Аргентина продолжает сооружение АСММ с интегральным PWR CAREM-25 мощностью 30 МВт-эл, физический пуск которого ожидается в 2026 г. Этот реактор является прототипом следующего реактора, мощность которого будет выбрана в диапазоне 150–300 МВт-эл. В 2023 году регулирующий орган США лицензировал проект многомодульной АЭС с энергетическими модулями NuScale мощностью по 77 МВт-эл. Предполагается, что первые АЭС такого типа будут введены в эксплуатацию в Польше (2029 г.) и США (2030 г.).

В России реализуются планы создания нескольких пилотных АСММ на различных реакторных технологиях [11]. Первая российская наземная АСММ будет построена в Якутии на базе РУ РИТМ-200Н мощностью по 55 МВт-эл. Проект получил в 2022 году положительное заключение государственной экологической экспертизы, а в 2023 году лицензию на размещение станции. Ее ввод в эксплуатацию запланирован на 2028 год.

В рамках федерального проекта «Новая атомная энергетика, в том числе малые реакторы для удаленных территорий» в составе Комплексной программы «Развитие техники, технологии и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» предусмотрено сооружение головной АСММ на базе РУ «Шельф-М» мощностью 10 МВт-эл. По плану она должна быть введена в промышленную эксплуатацию в 2030 году.

Наряду со строящимися АСММ уже имеются примеры действующих АСММ. В мае 2019 года подключен к электрической сети первый в мире ПЭБ «Академик Ломоносов» суммарной мощностью 70 МВт-эл с двумя водоохлаждаемыми реакторами КЛТ-40С. На стадии реализации находится российский проект по энергоснабжению Баимского золотомедного месторождения на Чукотке – четыре ПЭБ. В декабре 2021 года подключена к энергосистеме первая китайская АСММ суммарной мощностью 210 МВт-эл с двумя высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами НТР-РМ.

Заключение

Наблюдаемое в последние десятилетия повышение средней температуры нижних слоев земной атмосферы ряд ученых объясняет следствием парникового эффекта, который, по их мнению, связан с техногенными выбросами CO₂ и угрожает существованию человечества. Почти 200 государств добровольно обязались достичь к 2050 году состояния нулевого выброса углерода, а точнее CO₂ в атмосферу. Основными источниками техногенных выбросов CO₂ признаны тепловые электростанции и транспорт (наземный, морской и воздушный).

Для замещения ТЭС (тепловых электрических станций) защитники климата предлагают ВИЭ (возобновляемые источники энергии), ускоренному развитию которых уделяется внимание в большинстве стран мира. По расчетам МЭА (Международное атомное агентство) достижение нулевого выброса CO₂ к 2050 году возможно при условии, что 88 % электроэнергии будут вырабатывать ВИЭ, а оставшиеся 12 % будет, в основном, генерировать ЯЭ (ядерная энергетика).

Наиболее радикально настроенные сторонники «зеленой» энергетики настаивают на постепенном отказе от ЯЭ, ссылаясь на потенциальную нехватку ²³⁵U, опыт случившихся аварий ЯЭ, проблемы обращения с ОЯТ (отработавшее ядерное топливо) и РАО (радиоактивные отходы), нераспространения ЯМ (ядерных материалов). Они игнорируют тот факт, что энергетическая система, базирующаяся исключительно на ВИЭ, потребует многократного резервирования по установленной мощности. Даже при условии удовлетворении этого требования остается открытым вопрос обеспечения

энергетической безопасности при отказе ВИЭ по общей причине, например, в случае гипотетического глобального вулканического извержения. Для устойчивости энергетической системы помимо ВИЭ необходим другой источник электроэнергии, который бы не зависел от события, вызвавшего массовый отказ ВИЭ.

Из реально освоенных на сегодня источников электроэнергии на эту роль может претендовать с учетом требования о безуглеродности только ЯЭ. Таким образом, для ЯЭ сохраняется некое «окно возможностей», а вопрос о том, хватит ли для обеспечения энергетической безопасности тех 12 % выработки электроэнергии за счет ЯЭ, которые предусмотрены в отчете МЭА, пока остается открытым для дальнейших исследований. Вместе с тем, следует признать и устранить многие аспекты объективной критики в адрес ЯЭ, чтобы она стала приемлемой для общества.

Именно на устранении реальных недостатков ЯЭ сосредоточены усилия по разработке энерготехнологии с РБН (реакторы на быстрых нейтронах) в замкнутом ЯТЦ (ядерном топливном цикле). Работы в этом направлении уже проводятся в России, Китае, США и странах Европейского союза. Дальше всех продвинулась Россия, где в рамках проекта «Прорыв» на площадке Сибирского химического комбината уже развернуто сооружение ОДЭК (опытно-демонстрационного энергетического комплекса). Запуск ядерного энергоблока БРЕСТ-ОД-300 предполагается в 2026–2027 гг., а тиражирование технологии может начаться уже в 2030-х гг.

Еще одним перспективным развитием ЯЭ является интенсивная разработка проектов атомных станций малой мощности (АСММ), осуществляемая в России, Китае, США, Аргентине, Южной Корее и ряде других стран. Наибольшего продвижения достигли Россия и Китай, построившие свои первые АСММ и активно реализующие планы дальнейшего освоения АСММ. Так, например, в России реализуется проект сооружения 4 ПЭБ (плавучих энергоблоков) для энергоснабжения Баимского золотомедного месторождения на Чукотке, запланирован к 2028 году ввод в эксплуатацию первой наземной АСММ на базе РУ (реакторных установок) РИТМ-200Н мощностью по 55 МВт-эл, а в 2030 году будет введена в эксплуатацию АСММ на базе РУ Шельф-М мощностью 10 МВт-эл.

На фоне пессимистических прогнозов оппонентов ЯЭ о неминуемом «опоздании» новых ядерных энерготехнологий к заветному 2050 году очень важно отметить, что практически все наиболее важные перспективные разработки уже успешно прошли точку невозврата и их практическая реализация ожидается в обозримом будущем. Разумеется, существенную роль также могут сыграть политическая воля правительств ведущих стран и поддержка инвесторов.

Список литературы

1. Каплиенко А.В., Габараев Б.А., 2023 «Возобновляемые источники энергии: панацея для глобальной электроэнергетики или нет?», российский журнал «Обозреватель/Observer», 3(2023), с.131–144.
2. «Master Plan Part 3 Sustainable Energy for All of Earth» [Tesla-Master-Plan-Part-3.pdf](#) Ежемесячный дайджест отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (ЦАИР), май 2023, с. 2–7;
3. Net Zero by 2050. A Road for the Global Energy Sector. IEA October 2021. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
4. Nikolaus Mueller *, Nikolaus Arnold, Klaus Gufler, Wolfgang Kromp, Wolfgang Renneberg, Wolfgang Liebert, 2021. Nuclear energy - The solution to climate change? Energy Policy 155 (2021), 1-10.

5. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. www.gen-4.org. 2014.
6. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems: INPRO Manual - Overview of the Methodology. IAEA-TECDOC-1575. 2008.
7. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с. // https://www.nikiet.ru/file/Belaya_kniga.pdf.
8. О реализуемом Госкорпорцией «Росатом» проекте «Прорыв» // <https://proryv.2020.ru/>.
9. ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS. 2022 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) <http://aris.iaea.org>.
10. Технологические и экономические аспекты проектов атомных станций малой мощности (АСММ). Аналитический отчет [Текст] / И.Б. Журавлёв, А.П. Крупнова, П.Б. Птицын; М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2020. – 124 с. – Рус. – Деп. 18.05.20.
11. Экологические преимущества и перспективные проекты АСММ. Дайджест СМИ НИКИЭТ №22/30 мая-6 июня 2023 г. (Пресс-служба АО «Русатом Оверсиз». 31.05.2023).
12. Систематизация и характерные особенности потенциальных сценариев работы проектов АС малой и средней мощности в региональных энергетических системах и в комплексных производственных системах с акцентами на вопросы экономического анализа сценариев работы энергоустановок. Смирнова Л.С. Королев С.А. НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия. 2021 г., 77 с. <https://preprints.ru/files/761> (обращение 26.06.2023).