

---

---

## ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ КАК СРЕДСТВО БОРЬБЫ С ПОТЕПЛЕНИЕМ КЛИМАТА И ПРОБЛЕМЫ “ЗЕЛЕННОЙ” ЭНЕРГЕТИКИ

© 2021 г. В. И. Берёзкин\*

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН –  
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,  
Санкт-Петербург, Россия*

*\*E-mail: v.berezkin@inbox.ru*

Поступила в редакцию 01.07.2021 г.

После доработки 03.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Анализируются современные усилия по борьбе с потеплением климата путем продвижения к конечной цели, объявленной многими странами как полная декарбонизация их экономик к 2050 г. Рассмотрены основные тенденции в минимизации вредных воздействий на природную среду посредством замены ископаемого топлива на возобновляемые и экологически чистые (“зеленые”) источники – водород, энергию ветра, Солнца, воды. Описаны также перспективные в данном контексте разработки атомной энергетики. Рассмотрены проблемы создания термоядерных электростанций. Показано, что “зеленых” источников энергии, в строгом смысле, сегодня не существует, а обозначенные пути достижения нулевого выброса вредных веществ довольно противоречивы и поэтому выглядят пока трудно реализуемыми. Вместе с этим отмечено, что развивать “зеленую” энергетику жизненно необходимо не только с точки зрения охраны природы, но и в связи с тем, что традиционные ископаемые источники энергии рано или поздно будут исчерпаны. Обозначено, какие проблемы необходимо будет решить. Показано, что их очень много и они очень сложные. Сделан вывод, что уровень современных технологий и существующие здесь идеи позволяют предположить, что углеродное топливо как первичный источник энергии к 2050 г. останется востребованным. И поскольку достижение декарбонизации сопряжено также с проблемами, решения которых пока не найдены или не проверены практикой, постольку путь в данном направлении будет, скорее всего, более длительным.

*Ключевые слова:* потепление климата, декарбонизация мировой экономики, “зеленые” источники энергии

**DOI:** 10.31857/S0869607121060021

### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающееся потепление климата обычно связывают с усилением антропогенной нагрузки на окружающую среду в виде увеличения выбросов парниковых газов:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и др. Данный тезис не считается однозначным, однако то, что в настоящее время деятельность человека характеризуется постоянным ростом вредных выбросов – бесспорный факт. Эти выбросы в основном обусловлены использованием невозобновляемых источников энергии на основе углерода. Поэтому сегодня во всех развитых странах прилагаются усилия по разработке эффективных природоохранных мер. Особенно заметная деятельность наблюдается в энергетике. Здесь

главной целью объявлено постепенное замещение угля, нефти, природного газа “зелеными” возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). В этой связи уже более 65 стран поставили задачу полной декарбонизации своих экономик к 2050 г. или за период 2045–2060 гг. [9].

Наиболее значимыми на сегодня “зелеными” ВИЭ считаются гидроресурсы, ветер, солнечное излучение. Поэтому интенсивно разрабатываются и строятся соответствующие объекты, изучаются особенности их функционирования и возможности увеличения эффективности их работы. К таким объектам относятся гидро-, ветряные и солнечные электростанции (соответственно ГЭС, ВЭС и СЭС).

Отметим также автономный “зеленый” транспорт на электротяге, поскольку он также характеризуется нулевым углеродным выбросом. Здесь вместо двигателей внутреннего сгорания (ДВС) используются электродвигатели (ЭД), питающиеся от аккумуляторных батарей (АКБ) или батарей водородных топливных элементов (ВТЭ).

Достоинства “зеленой” энергетики очевидны. Главное из них состоит в отсутствии сжигания топлива и соответствующего прямого загрязнения окружающей среды. Однако и здесь существуют серьезные экологические проблемы, которые не всегда упоминают и анализируют. Кроме того, есть другие проблемы, имеющие принципиальный характер. Среди них одна из самых важных – это энергетическая рентабельность.

В настоящей работе дан анализ основных тенденций в деле снижения вредных воздействий на природную среду мировой энергетикой. Рассмотрены недостатки “зеленых” ВИЭ. Показано, что экологически чистых источников энергии в строгом смысле не существует, но развивать “зеленую” энергетику действительно необходимо также и в связи с тем, что традиционные ископаемые источники энергии, являющиеся сегодня основой мировой экономики, рано или поздно будут исчерпаны.

Делается вывод, что в ближайшем будущем трудно рассчитывать на полноценную замену традиционных экологически проблемных источников энергии чем-либо другим. Тенденции в энергетике, включая темпы роста доли “зеленых” ВИЭ в производстве энергии, уровень современных технологий и существующие здесь идеи позволяют предполагать, что углеродное топливо как первичный источник энергии и к 2050 г. останется востребованным, не говоря уже о нуждах нефтехимии, металлургии и других отраслей. Так что достичь глобальной декарбонизации к намеченному сроку будет трудно.

## ОСНОВНЫЕ ДОСТИГНУТЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Согласно [20], в 2020 г., как и во все предыдущие годы, в мировом производстве энергии (тепловой и электрической) основным ее источником оставалось традиционное углеродное топливо. При этом доли нефти, газа и угля составили величины, соответственно, равные 31.21, 24.72 и 27.20%. Доля атомных электростанций (АЭС) – 4.31%, ГЭС – 6.86%. Суммарная доля других возобновляемых источников энергии – биотоплива (твердого, жидкого и газообразного), ветра, Солнца, приливов и т.д. равна 5.70%. Так что на теплоэлектростанциях (ТЭС), использующих углеродные ископаемые виды топлива, выработано 83.13% энергии.

Спрос на энергию постоянно растет. Ее выработка в мире за период 2010–2020 гг. увеличилась на 10.14% (в аналогичный, но допандемийный период с 2009 по 2019 г. – на 21% [21]). Первая пятерка ее производителей в 2020 г. выглядела так ( $10^{18}$  Дж): Китай – 145.46; США – 87.79; Индия – 31.98; Россия – 28.31; Япония – 17.03. Увеличивается также и производство вредных веществ (парниковых газов, пыли, сажи, оксидов серы, азота и т.д.), зольных материалов. Так, выбросы только  $\text{CO}_2$  за период 2010–2020 гг. выросли с 31291.4 до 32284.1 млн т/год. При этом страны, вырабатывающие наибольшие количества энергии, больше всех выбрасывают в атмосферу и  $\text{CO}_2$  (млн т в

2020 г.): Китай – 9899.3; США – 4457.2; Индия – 2302.3; Россия – 1482.2; Япония – 1027.0.

Для оценки эффективности того или иного источника широко используется показатель энергетической рентабельности EROI (“energy return on investment”). Это отношение полученной энергии к энергии, затраченной на это получение. Параметр впервые ввел биолог Ч. Холл в 1970-х гг., исследуя миграцию рыб [22]. Идея проста: на поиск и добычу пропитания нельзя тратить энергии больше, чем ее содержится в трофее, т.е. при  $EROI \leq 1$  энергозатраты на производство энергии не компенсируются получаемой энергией, что делает бессмысленной такой процесс, а чем EROI больше единицы, тем добыча энергии выгодней. Идея параметра EROI оказалась продуктивной, и в дальнейшем она была распространена на нефть и другие источники [23]. Подчеркнем, что речь идет именно о затраченной энергии, а не о стоимости материалов, оборудования, работ [15].

В настоящее время EROI для производства энергии из угля у разных авторов обычно находится в пределах 30–80, из нефти и газа – от 11 до 35 (чаще всего ~30, как и у АЭС), для сланцевой нефти EROI ~ 5. Для биогаза, биоэтанола, биодизеля разного происхождения (из травы, кукурузы, сахарного тростника, рапсового масла и т.д.) EROI ~ 2–3 и даже EROI < 1 [24].

#### ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЭС, СЭС И ВЭС И ПЕРЕРАБОТКИ НЕКОТОРЫХ ОТСЛУЖИВШИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для ГЭС в литературе чаще всего встречаются величины EROI ~ 50. Строительство крупных ГЭС выступает серьезной нагрузкой на окружающую среду. Так, крупные равнинные ГЭС, построенные на всех континентах, кроме Австралии и Антарктиды, приводят к масштабным затоплениям. Появляются большие поверхности испарения, увеличивается влажность, не в лучшую сторону изменяется климат. Теряются значительные территории, включающие сельскохозяйственные и лесные угодья. Изменение устоявшихся экосистем в руслах и поймах рек делает природную среду невозможной для обитания некоторых видов флоры и фауны. Плотины препятствуют нересту проходных рыб и т. п. Могут быть и другие проблемы, причем не только в случае равнинных ГЭС. Например, в Китае р. Янцзы протекает в основном по горным районам. На ней в 1992–2012 гг. построена самая мощная в мире ГЭС (22500 МВт) “Три ущелья” [38]. При этом было затоплено 13 городов, 140 поселков, 1350 деревень, потеряно около 28 тыс. га обрабатываемых земель. Считается, что в случае прорыва дамбы в районе ГЭС в зоне затопления могут оказаться около 360 млн человек. Большую потенциальную угрозу несут в себе ГЭС, сооруженные в районах с повышенной сейсмической активностью. Отметим также, что строительство ГЭС не везде возможно и не всегда оправдано по многим причинам. Так, многие страны близки к исчерпанию возможностей постройки новых станций. Например, Европа в целом использует свой гидропотенциал уже более чем на 70%, Япония – на 90%. Большими ресурсами гидроэнергии обладает Россия, но она использует их только на 20%. Во многих других странах с высоким гидропотенциалом (Китай, страны Южной Америки) ситуация аналогичная. Проблема в том, что наиболее богатые гидроресурсами регионы удалены от основных потребителей энергии [3].

При получении материалов (цемент, сталь и т.д.), а также оборудования для средних и крупных ГЭС сжигается очень много углеродного топлива. Поэтому можно констатировать, что утверждение, согласно которому все ГЭС производят экологически чистую энергию, не полностью соответствует действительности.

СЭС строятся из батарей солнечных панелей, в свою очередь состоящих из отдельных фотоэлементов. У разных панелей коэффициент фотоэлектрического преобразова-

ния, иными словами, коэффициент полезного действия (КПД) обычно равен 5–25%. Производительность панелей максимальна, когда Солнце в зените. При сплошной облачности она падает более чем на порядок, в темное время суток она равна нулю. С другой стороны, при работе в ясный солнечный день фотоэлементы нагреваются, что отрицательно сказывается на эффективности их работы: со временем существенно падает КПД, уменьшается срок службы. Срок службы панелей (это обычно 7–25 лет) определяется временем деградации фотоэлементов и зависит от многих факторов – конструкции, материалов, температурного режима, влагостойкости и т.д.

Основа солнечных панелей – это высокочистый кремний, в них присутствует также немало ценных и редких элементов, в том числе токсичных (свинец, кадмий, галлий, мышьяк, теллур, селен, индий, ртуть и т.д.). Сам кремний получают из силанов – ядовитых и взрывоопасных жидкостей.

Большой проблемой является переработка отслуживших солнечных батарей. Панели измельчают. Вытравливающими растворами от кремния отделяют просветляющие, активные полупроводниковые, промежуточные и другие слои, обрабатывают сам кремний, который затем переплавляют в слитки для дальнейшего использования. Полученные растворы очищают, концентрируют, осаждают в несколько циклов, извлекают металлы и другие вещества. Так что технология затратна и финансово, и энергетически, при этом она достаточно грязная. Поэтому панели вместо цеха переработки нередко оказываются на свалке. У СЭС EROI для всего жизненного цикла станций низкий. В различных источниках наиболее часто встречаются величины ~4–7 (см., например, [15]).

Самые крупные СЭС построены в основном в пустынях [29, 35]. Например, китайская СЭС Лунъянся [35] находится в провинции Цинхай, на северо-востоке Тибета (рис. 1). Она состоит из 4 млн панелей общей максимальной мощностью 850 МВт и занимает площадь 30 км<sup>2</sup>. Сравнимые по мощности СЭС построены также в Мексике, ОАЭ, США и других странах; все они хорошо видны из космоса. Когда панели только таких СЭС начнут вырабатывать ресурс, то ежегодный масштаб их переработки будет огромен. В то же время переработка необходима, поскольку иначе будут безвозвратно теряться большие количества ценных и редких элементов.

**ВЭС.** В устройство ветряков входят: лопасти (обычно три, причем это самая сложная и дорогая часть ветроэлектростанции); ротор, к которому они крепятся, и который насажен на главную ось (первичный вал); редуктор; вторичный вал (ось генератора); поворотная система; тормозной механизм и т.д. Все это устанавливают на несущей стальной мачте или башне из железобетона. Материал лопастей – композит на основе стеклянных, стальных, углеродных волокон в полимерной матрице. Диапазон рабочих скоростей ветра промышленных ветряков находится в пределах от 3–4 до 20 м/с. Ниже этого предела турбина останавливается сама (ее эффективность становится нулевой), при максимально возможном ветре мощность турбины максимальна. При слишком сильном ветре автоматика разворачивает плоскость вращения лопастей параллельно направлению ветра и останавливает лопасти во избежание разрушения всей установки.

Развиваемая мощность турбины зависит от ее конструкции (в том числе от величины потерь в механической и электрической части) и силы ветра. Средний фактор (коэффициент) ветряной загрузки в мире равен 24–27% [3]. Он зависит от ветровой специфики конкретной местности, погодных условий, времени суток, времени года. В частности, в приморской ветроэнергетике данный параметр может превышать 40%, в материковых областях он обычно не более 20%. Так что эффективность ветрогенераторов в среднем примерно такая же, как и у СЭС, или несколько выше.

Отметим, что более общий параметр в энергетике – это коэффициент использования установленной мощности, КИУМ (отношение произведенной за конкретный период электроэнергии к максимально возможной выработке за тот же период). Он применим не только к любым ЭС, но и к любым энергосистемам (от районных до гло-



**Рис. 1.** Китайская СЭС Луньянся на северо-востоке Тибета; сверху – вид с уровня земли, внизу – из космоса (справа – водохранилище на р. Хуанхэ) [35].

**Fig. 1.** The Chinese Longyanxia solar power plant in the north-east of Tibet; above – a view from ground level, below – from space (on the right – a water reservoir on the Yellow River) [35].

бальных). КИУМ, в отличие от коэффициента ветряной загрузки, можно повышать и понижать в зависимости от уровня текущего потребления энергии. Выработка электроэнергии ветряной турбиной не регулируется. Ее можно лишь остановить.

Для ВЭС наиболее востребованы сегодня турбины с максимальной мощностью 2–3 МВт. У них высота башни ~100 м, а размах лопастей может быть еще больше, вес каждой – порядка 100 т. Уровень шума таких установок достигает 110 дБ и более, что эквивалентно уровню шума вертолета. Генерируется также инфразвук – низкочастотные колебания, передающиеся в почву и грунт. У многих жителей ближайших населенных пунктов пейзаж с промышленными ветряными установками вызывает раздражение, дискомфорт. В сочетании с другими воздействиями это может привести к “синдрому ветрогенератора” (нарушению сна, головной боли, тошноте, тахикардии, проблемам с памятью, с концентрацией внимания и т.д.). Только в США ВЭС ежегодно убивают более полумиллиона птиц [28].

Для достаточно населенных регионов выделение территорий для строительства крупных ВЭС (как и СЭС или равнинных ГЭС) – вопрос сложный. Такие ВЭС построены в малонаселенных или безлюдных местностях. Например, в Китае в провинции Ганьсу действует гигантский ветропарк общей мощностью около 8 ГВт (на 2020 г.) [30] (рис. 2). В дальнейшем ее планируется довести до 20 ГВт. Комплекс расположен в пустыне Гоби. Его минус – это отсутствие в регионе крупных потребителей электроэнергии. Считается, что он ориентирован на будущее.

Большой проблемой любых ВЭС выступает переработка отслуживших свой срок (20–25 лет) промышленных ветроустановок. В настоящее время рассматриваются различные ее направления, но их суть практически одинакова (см., например, [39]). Ло-

пасти измельчаются в гранулы. Затем прессованием, склеиванием, сплавлением предполагается производство различных изделий — полимерных досок, поддонов для складских помещений, наружных отделочных материалов, ограждений и даже железнодорожных шпал. В связи с этим необходимо отметить два момента. Во-первых, подобные изделия не пользуются пока достаточным спросом, поскольку к их качеству имеется много претензий. Во-вторых, когда и эти изделия отслужат свой срок, то непонятно, куда потом их девать и что делать с миллионами тонн полимерных досок, поддонов и т.п. Отметим также, что в настоящее время в лабораториях прорабатывается также пиролиз в инертной атмосфере при температурах 450–700°C. Предполагается, что таким образом можно получать синтез-газ ( $\text{CO} + \text{H}_2$ , используется как промышленное химическое сырье или топливо при производстве тепловой и электрической энергии), уголь для различных целей (например, для приготовления красок, клеев и даже удобрений), восстанавливать армирующие волокна для повторного их использования. Понятно, что пиролиз лопастей требует огромных затрат энергии, а качество получаемых продуктов будет заметно уступать аналогам, получаемым по другим уже давно отработанным технологиям.

В связи с указанными обстоятельствами, лопасти и другие части конструкции в настоящее время, как правило, отправляют на свалку и/или засыпают землей (рис. 3). Всего в 2019–2020 гг. подлежали утилизации турбины общей мощностью 2 ГВт [39]. Считается, что к 2050 г. можно ожидать накопления десятков млн т композитов, подлежащих утилизации. Наши оценки показывают, что после 2050 г. необходимо будет перерабатывать только лопастей около 2 млн т в год.

Для ВЭС оценки EROI обычно дают величины 16–18 (см., например, [15]). Поскольку эффективные технологии переработки деталей ветротурбин сегодня практически отсутствуют, то в EROI, скорее всего, не учтены энергозатраты на нее, т.к. они фактически не известны. Отсюда следует, что необходимо разрабатывать эффективные со всех точек зрения методы переработки рабочих деталей ВЭС (как и СЭС).

Серьезной проблемой функционирования ВЭС и СЭС является неравномерность работы (пики и провалы в производстве электроэнергии), требующая их подключения к крупным энергосистемам со стабильными источниками (например, ГЭС, АЭС). При этом общий вклад СЭС и ВЭС не должен превышать 25% во избежание дестабилизации работы всей энергосистемы и ее отключения [3]. Это вынуждает использовать мощные аккумуляторные батареи (АКБ) или иметь запасы топлива для дизель-генераторов, используемых в локальных сетях.

Так, в Южной Австралии на территории ВЭС мощностью 100 МВт построена и подключена к общей энергосети крупнейшая в мире Li-AKB емкостью 129 МВт час [37] (рис. 4). При слабом ветре или штиле она способна выдавать в сеть порядка 100 МВт электрической мощности, но только в течение примерно 1 часа.

Более удачный, на наш взгляд, вариант буферизации организован при вводе в эксплуатацию упоминавшейся выше китайской СЭС Луньянся. Этот солнечный парк объединен с местной ГЭС с таким же названием.

Отметим также, что строительство ГЭС, СЭС и ВЭС сопряжено с использованием значительных количеств природных ресурсов, а на предприятиях, связанных с производством и утилизацией элементов данных ЭС, происходят выбросы  $\text{CO}_2$  и других вредных веществ. К сожалению, соответствующие количественные оценки в литературе найти трудно.

Несмотря на все сказанное отметим, что “зеленые” ВИЭ уже начали исполнять важную экологическую функцию экономии углеродных ресурсов.



Рис. 2. Ветропарк в Китае в провинции Ганьсу на территории пустыни Гоби [30].

Fig. 2. A wind farm in China in Gansu province on the territory of the Gobi Desert [30].

### АВТОНОМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

Оксиды углерода и другие вредные вещества являются продуктами не только электростанций на углеродном топливе, но и автономных транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Согласно разным оценкам, сегодня только выхлопы таких автомобилей дают до 70–90% загрязнений воздушной среды в мегаполисах. Поэтому большое внимание уделяется автономному транспорту на электротяге, эксплуатация которого характеризуется нулевым углеродным выбросом.

В современном электромобилестроении доминирует транспорт на литий-ионных АКБ, поскольку по совокупности параметров (емкости, плотности запасаемой энергии и т.п.) они пока превосходят все остальные типы. Li-АКБ состоят из множества элементов (ячеек), разных у разных производителей [25, 26, 35]. Например, компания Tesla использует цилиндрические элементы Panasonic, напоминающие хорошо известные батарейки типа AA. АКБ легкового автомобиля емкостью, например, 85 кВт ч состоит из 7104 ячеек. Вес АКБ в сборе – 540 кг, габариты: длина/толщина/ширина – 2100/150/1500 мм. Напряжение на АКБ – 400 В. Отметим, что для АКБ легкового автомобиля Tesla Model S требуется 52.5 кг лития, для электрогрузовика Tesla Semi Truck – порядка 100 кг.

Li-АКБ выдерживают от 500 до 1 тыс. перезарядок, после чего они перестают воспринимать заряд. Так что при ежедневной интенсивной эксплуатации батарею придется менять на новую уже через 2–3 г. У Li-АКБ недостаточно широкий температурный диапазон. Уже при легком морозе емкость резко падает (т. е. падает пробег между зарядками), при жаре работа Li-АКБ нестабильна, поэтому приходится применять принудительное охлаждение, обычно жидкостное. Существует опасность пожара и взрыва при авариях, разгерметизации ячеек. У разных производителей цена Li-АКБ примерно одинакова (в среднем \$1 тыс. за 1 кВт ч), так что для массового потребителя электромобиль не очень доступен. Поэтому во всем мире ведется поиск дешевого, безопасного, долговечного аккумулятора с быстрой зарядкой и высокой плотностью энергии.

Что касается других применений Li, то это важнейший материал для атомной энергетики, металлургии, производства керамики, стекла, полимеров и т.д. [33]. Отметим, также, что облучением лития получают тритий – второй наряду с дейтерием компонент топлива для возможных в будущем термоядерных электростанций (см., например, [3]).

Хотя литий довольно широко распространен в природе, он относится к редким металлам, поскольку находится в рассеянном виде. Более 70% месторождений Li нахо-





**Рис. 3.** Кладбище примерно 1000 стекловолоконных лопастей с трех ВЭС, построенных на северо-западе США в 1990-х гг. в первую волну ветроэнергетики и отработавших 25 лет. Каждую лопасть разрежут на три части и затем все захоронят [39].

**Fig. 3.** A cemetery of about 1000 fiberglass blades from three wind farms built in the northwest of the United States in the 1990s in the first wave of wind power and worked for 25 years. Each blade will be cut into three parts and then all will be buried [39].

дится в Чили, Боливии и Аргентине. Основные его источники – это минерализованные воды, соли высохших соляных озер, солончаковые отложения пустынь с содержанием Li 0.01–1% [10, 16]. Растворы перекачивают в искусственные водоемы, выпаривают на солнце до полутора лет. Смесь растворов перерабатывают с помощью целого ряда химических реакций и электролиза расплавов солей с последующей очисткой от примесей вакуумной дистилляцией, ректификацией, зонной плавкой. Затем литий рафинируют, последовательно выпаривая разные металлы из расплава. Так что добыча и производство Li – сложный и долгий процесс, очень вредный, грязный, а также энергозатратный. Поэтому остро стоит вопрос о переработке АКБ для повторного использования Li, а также иных редких и ценных используемых в Li-АКБ металлов, в том числе, опасных и ядовитых, попадание на свалку которых крайне нежелательно. В частности, растворимые соединения кадмия поражают центральную нервную систему, печень, почки, способствуют разрушению костей; кобальт и его соединения токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным действием.

Считается [31], что в настоящее время перерабатывается только 3% из всего объема мирового производства батареек и аккумуляторов. Это очень энергоемкий процесс, в котором для извлечения металлов тратится в 6–10 раз больше энергии, чем требуется для их добычи. Что касается Li-АКБ, то к настоящему времени разработано не так уж много технологий их переработки [7]. Различные металлы вытравливаются химически и разделяются с помощью довольно дорогого оборудования (магнитных сепараторов, электролизаторов и т. д.). Так что переработка литиевых аккумуляторов – это не только энергоемкий процесс, но также довольно сложный, грязный и дорогой, с большим количеством отходов.

По расчетам International Energy Agency (IEA), если сегодняшние темпы роста производства электротранспорта сохранятся, то уже к 2030 г. будет произведено 11 млн т отработавших Li-АКБ [40].

К настоящему времени практически все основные автопроизводители (Audi, BMW, Ford, Honda, Hyundai, Mercedes, Toyota, Volvo и т.д.) объявили о прекращении в ближайшем будущем производства автомобилей с ДВС. С 2030–2040-х гг. в Великобритании, США, Франции, Японии и других странах начнет действовать запрет на их





Рис. 4. Литий-ионная супербатарея мощностью 100 МВт, Южная Австралия, г. Джеймстаун [37].

Fig. 4. Lithium-ion super battery with a capacity of 100 MW, South Australia, Jamestown [37].

производство. Пользоваться старыми машинами с ДВС и перепродавать их запрещено не будет [27].

В 2020 г. указанные компании произвели около 60 млн автомобилей [34]. Если теперь представить, что в 2040 г. они выпустили столько же автомобилей (автобусов, грузовиков, легковых автомобилей) со средней мощностью, скажем, 100 кВт (или 136 л. с.), но не с ДВС, а с АКБ, то только для их подзарядки потребуется  $60 \text{ млн} \times 100 \text{ кВт} = 6 \text{ ТВт}$  электрической мощности. И это без учета возможного увеличения выпуска электроавтомобильной техники с сегодняшнего дня по 2040 г. и работающих электроавтомобилей, произведенных до 2040 г., а также всех других потребителей электроэнергии.

В 2020 г. всего в мире произведено 26823.2 ТВт ч электроэнергии [20]. Поэтому совокупная мощность всех электростанций планеты в 2020 г. была равна  $26823.2 \text{ ТВт ч} / (365 \text{ сут} \times 24 \text{ ч}) = 3.06 \text{ ТВт}$ . В различных других источниках представлены величины примерно от 2 до 5 ТВт.

Лития для производства 60 млн единиц только электротранспорта потребуется более 3 млн т, если исходить из расчета 50 кг на машину, или свыше 6 млн т, если брать 100 кг и не учитывать других потребностей в данном металле. Мировые запасы пригодного для промышленной добычи лития на конец 2020 г. оценивались в 18.955 млн т, а используемого в Li-АКБ кобальта – в 6.902 млн т [20]. Так что полный перевод автотехники на АКБ, как запланировано во многих странах, выглядит пока не слишком реально. Альтернативу или дополнение к транспорту на АКБ может составить транспорт на водородных топливных элементах (ВТЭ).

Топливные элементы вырабатывают электроэнергию во многом подобно тому, как это происходит в других химических источниках тока, например, тех же Li-АКБ. Только если в последних Li находится в замкнутом объеме, то в первых источник энергии (бензин, этанол, метанол, метан, водород) поступает извне, а наружу выходят продукты химических реакций (оксиды углерода и др.). В качестве топлива наиболее предпочтителен водород, поскольку продуктом его преобразования является просто водяной пар. В качестве катализатора, как правило, используется платина. Можно предположить, что часть выхлопного газа ВТЭ, т.е. водяного пара, включится в природный круговорот воды, а часть поступит в атмосферу, усугубляя парниковый эффект. В итоге сколько молекул водорода будет использовано во всех ВТЭ, столько молекул воды будет возвращено в окружающую среду. Кроме того, при отрицательных температурах возникает проблема обледенения объектов, работающих на ВТЭ. К сожалению, обсуждение данных обстоятельств в литературе найти трудно.

В энергоустановках элементарные ВТЭ объединяют в модули, как и единичные элементы в Li-АКБ; из модулей собирают батареи нужной мощности, вплоть до величин, характерных для небольших электростанций.

Основная проблема водородных энергоустановок – это сам водород. Он химически чрезвычайно активен и при этом легко проникает в объем металлов (явление окклюзии, растворения газов в металлах с образованием твердых растворов [1]). В результате многие металлы, включая высокопрочные стали, сплавы титана и никеля, становятся хрупкими вследствие образования металлгидридов. Более того, некоторые металлы просто рассыпаются в порошки металлгидридов. Водород способен проникать также в резину, пластики и даже стекло. Если он находится под высоким давлением (например, в топливном баке транспортного средства), то проблема усугубляется. Жидкое состояние водорода между его плавлением и кипением характеризуется очень низкими температурами:  $t_{\text{пл}} = -252.6^\circ\text{C}$  и  $t_{\text{кип}} = -259.1^\circ\text{C}$  (или  $T_{\text{пл}} \approx 14\text{ K}$ ,  $T_{\text{кип}} \approx 20\text{ K}$ ) [17]. Более низкие температуры плавления и кипения только у гелия. Так что для хранения водорода в жидком виде, в том числе на борту транспортного средства, требуется тяжелое криогенное оборудование. В этой связи рассматривают разные варианты его транспортировки и хранения при температурах окружающей среды. Например, хранение в обратимо гидрирующихся металлах и сплавах, в эффективных адсорбентах водорода, для чего можно использовать капиллярные матрицы, составленные, в частности, углеродными нанотрубками и т.д. [2]. Несмотря на все трудности, уже сегодня мелкими сериями выпускаются транспортные средства различного назначения, от легковых автомобилей (например, Toyota Mirai, Япония) до поездов (например, Coradia iLint, Франция). Однако ВТЭ пока дороги, объемы их выпуска остаются небольшими, поэтому и водородная инфраструктура находится в зачаточном состоянии. Например, в Германии водородных заправок сегодня около ста на всю страну.

### ВОДОРОД КАК АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО В ДЕКАРБОНИЗАЦИИ МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Водород – это очень важное промышленное сырье. Его производят примерно 75 млн т в год. Еще около 42 млн т вырабатывают в смеси с другими газами (обычно в виде синтез-газа) [5, 8]. В энергетике и на транспорте его потребляется пока менее 0.01 млн т в год. Вырабатывается он в основном тремя способами [13]. Более  $\frac{3}{4}$  водорода производится конверсией метана (самый дешевый пока метод), для чего расходуются более 205 млрд м<sup>3</sup> природного газа. Почти весь остальной водород получают из кокса (на это уходит 107 млн т каменного угля). В итоге в атмосферу наряду с другими вредными веществами поступает 830 млн т CO<sub>2</sub>. Это больше, чем в 2020 г. выбросила, например, Германия (604.9 млн т) [20]. Небольшая часть (около 0.1%) вырабатывается электролизом воды, точнее водных растворов солей или гидроксидов металлов, а также кислот или щелочей (чистая вода плохо проводит электрический ток). Поэтому и здесь выделяются вредные и ядовитые вещества. Например, нередко используют процесс  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl} = 2\text{NaOH} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2$ .

Из разных источников следует, что цена электролизного водорода в 3–9 раз выше, чем произведенного первыми двумя способами. Причем до 85% его цены – это стоимость электроэнергии [12]. Цена водорода, получаемого из воды с помощью ВИЭ, почти на порядок выше стоимости природного газа [5]. Поэтому возникает вопрос: какова энергетическая рентабельность водорода?

В [11] предложена модель расчета коэффициента EROI при различных вариантах производства, хранения, транспортировки водорода. Для электролиза воды рассмотрены ВИЭ, ТЭС и АЭС. Учтены направления энергосбережения при использовании выбрасываемого вторичного тепла в металлургии, нефтепереработке. Показано, что затраты энергии на получение водорода составляют 154–614% от его химической

энергии, что отвечает  $EROI = 0.650-0.163$  и характеризует водород как энергетически нерентабельный энергоноситель.

Несмотря на то, что многие проблемы, связанные с водородом, остаются пока еще без эффективного решения, мировое сообщество сегодня возлагает на него надежды как на основной альтернативный источник энергии, способный обеспечить значительное снижение выбросов  $CO_2$  в атмосферу. Многие страны, особенно из числа ратифицировавших Парижское соглашение по климату, разработали национальные водородные стратегии.

Так, Австралия, используя солнечную и ветряную энергию, планирует производство аммиака как способ хранения и транспортировки водорода. Франция планирует развивать водородную энергетику на базе АЭС. Германия предполагает к 2050 г. осуществить полный отказ от использования нефти, газа и угля. Для этого она будет искать поставщиков водорода в лице сегодняшних экспортеров энергоресурсов. В частности, рассматривается вариант конверсии метана на соответствующих предприятиях, которые можно построить неподалеку от выхода на территорию страны трубопроводов природного газа из России. Ранее Германия объявила, как известно, об отказе от АЭС.

Россия не будет форсировать расставание с углеводородами. Одна из первостепенных задач, на которых она планирует сосредоточиться, – разработка конкурентоспособных технологий производства водорода из природного газа (с улавливанием  $CO_2$ ) и электролизом воды на базе АЭС и ВИЭ [8, 19].

Согласно [20], в 2020 г. в мире использовано 10.6 млрд т углеродного топлива. Водород примерно в 2.5 раза более эффективен, поэтому его потребовалось бы 4.25 млрд т. Если учесть рост спроса на энергию за последние десятилетия, то для 2050 г. эту цифру следует удвоить. С другой стороны, по данным, например, [18], в 2050 г. потребуется 1.37 млрд т водорода для получения половины мировой энергии. Такой прогноз соответствует ситуации, что потребности в энергии к 2050 г. не увеличатся примерно вдвое, а примерно в три раза упадут, что маловероятно. В любом случае встает вопрос, где взять энергию для получения таких количеств водорода (и одновременно, например, для подзарядки АКБ всех типов и назначений)? Ответа пока нет. Поэтому необходимо продолжить поиск эффективных источников энергии, особенно возобновляемых.

Новый импульс в развитии технологий производства водорода могут придать успехи атомной энергетики, которая является углеродно-нейтральной. Реакторы характеризуются сегодня огромным разнообразием по мощности, назначению, типу [6]. Так, атомные энерготехнологические станции (АЭТС) на базе высокотемпературных газохлаждаемых реакторов (ВТГР), основой которым послужили разработки атомных ракетных двигателей на водороде [4], могут быть использованы для производства последнего, для опреснения воды, обеспечения технологических процессов металлургии, нефтепереработки и т.д. Причем в производстве водорода может использоваться как паровая конверсия метана, так и высокотемпературный электролиз, где большая часть электрической энергии для разложения воды замещается тепловой энергией.

Как новые источники энергии, особого внимания заслуживают реакторы на быстрых нейтронах (РБН). В них возможна организация замкнутых циклов, когда отработанное топливо превращается в новое топливо и возвращается обратно в реактор. Полагают, что такая технология позволит получать энергию в течение столетий или даже тысячелетий. Россия такой технологией не просто обладает, а считается лидером в данной области. РБН вполне можно рассматривать как перспективные в ближайшем будущем дополнительные источники энергии для эффективного производства водорода.

В начале июня 2021 г. госкорпорация “Росатом” приступила к строительству в Томской области опытно-демонстрационного энергетического комплекса нового типа, в состав которого войдет РБН нового поколения “БРЕСТ-ОД-300” (быстрый реактор естественной безопасности) с электрической мощностью 300 МВт. Комплекс будет

включать также завод по сборке топливных элементов и завод по их переработке после использования (облучения в реакторе). Комплекс будет вырабатывать тепло, электричество, а также топливо для самого себя [14].

Генеральный директор МАГАТЭ М. Гросси положительно оценил начало строительства комплекса, особо отметив полную автономность и закрытость топливного цикла, что уменьшит количество ядерных отходов, требующих долгосрочного хранения. Генеральный директор госкорпорации “Росатом” А. Лихачев на церемонии закладки реактора 08.05.2021 заявил, что благодаря переработке ядерного топлива бесконечное количество раз, ресурсная база атомной энергетики становится практически неисчерпаемой, поэтому при успешной реализации проекта такие комплексы будут внедряться по всей стране, а в 2030–2040-х гг. можно будет начать их экспорт. Правда, необходимо отметить, что опыта эксплуатации подобных циклических комплексов пока еще нет. Поэтому их достоинства требуют практической проверки. Время покажет, насколько потенциальные возможности комплексов соответствуют действительности. На это уйдут 2030–2040-е гг., и если все подтвердится, то понадобится еще немало лет, чтобы построить достаточное количество таких объектов.

Отметим также термоядерные электростанции (ТЯЭС), которые считаются потенциальным источником энергии в будущем. В 2007 г., как хорошо известно (см., например, [3]), на юге Франции силами международного консорциума, в который входит и Россия, началось строительство ИТЭР (интернационального термоядерного экспериментального реактора). За основу взят импульсный реактор тороидального типа (токамак), который впервые разработан и построен еще в СССР. На сегодняшний день из всех возможных вариантов реакций термоядерного синтеза легких ядер можно использовать только слияние дейтерия и трития. Реакция происходит при температуре ~150 млн °С, что на порядок выше температуры в центре Солнца. Остальные реакции с участием, например, дейтерия и протия требуют гораздо более высоких температур при этом характеризуются низким энергетическим выходом.

Считается, что термоядерное топливо будет добываться из морской воды, в которой примерно 0.015% дейтерия, если остальное – протий. Дейтерий получают в процессах изотопного обмена, многоступенчатого электролиза воды, ее ректификации и т.д., на что требуется достаточно много энергии и материальных средств. Естественный радиоактивный тритий образуется при действии солнечного ветра на верхние слои атмосферы (т.е. главным образом на ядра атомов азота и кислорода). Тритий имеет период полураспада чуть больше 12 лет, поэтому в природе его крайне мало. Мировое производство и потребление промышленного трития сегодня – это несколько килограммов в год при его стоимости несколько десятков млн долл. за 1 кг. Для годовой работы одной ТЯЭС потребуется около 100 кг трития. В настоящее время его получают в специальных реакторах, где делению подвергают ядра атомов лития, облучая их нейтронами. Иными словами, речь опять идет о литии, запасы которого, как уже отмечалось выше, весьма ограничены. Поэтому тезис о том, что ТЯЭС могут стать неисчерпаемым источником энергии, пока не совсем соответствует действительности.

ИТЭР будет чисто экспериментальным объектом. Иначе говоря, это будет прототип ТЯЭС, поскольку здесь выработка электроэнергии не предполагается, а получаемое тепло будет рассеиваться в окружающую среду. Цель строящегося ИТЭР – выяснение принципиальной возможности промышленного получения энергии на ТЯЭС. Для этого будет оцениваться целый комплекс научно-технических параметров, а также стоимостные характеристики, КПД, EROI и т.д. ИТЭР сможет непрерывно работать только примерно 500 с, выдавая при этом мощность 500 МВт, затем будет следовать перерыв. Отметим также, что для удержания замкнутого шнура водородной плазмы вдали от внутренних стенок токамака будут использованы сильнейшие магнитные поля, создаваемые сверхпроводником (СП)  $Nb_3Sn$ . Криогенная система охлаждения СП-электромагнитов очень сложная (содержит в своей спецификации примерно

4500 элементов) и будет состоять из двух контуров – жидкий азот охлаждает гелиевый контур, жидкий гелий охлаждает СП-кагушки. При этом холодильные машины только гелиевого контура будут потреблять почти 16 МВт электрической мощности (столько потребляет небольшой город).

Ввод ИТЭР планировался на 2027 г. В настоящее время многие специалисты считают, что полноценные эксперименты с плазмой дейтерий-тритий начнутся не ранее 2035 г. Данная ситуация связана с тем, что создание термоядерного реактора как источника энергии – совершенно новая сверхсложная задача, в которой многие решения и технологии приходится изменять на ходу или разрабатывать заново. Отметим также, что исследовательских реакторов типа токамак в мире построено довольно много, порядка трехсот. Но, во-первых, токамак ИТЭР будет самым большим и мощным, во-вторых, ни одного прототипа ТЯЭС пока не существует.

В целом перспективы ТЯЭС, на выявление которых направлено строительство ИТЭР, остаются неясными по многим позициям. Так, если не считать проблем утилизации отработавших элементов конструкций с наведенной во время работы реактора радиоактивностью, то это проблемы обеспечения литием, больших затрат энергии и материальных средств на получение термоядерного топлива, обслуживание реактора, всего комплекса. Поэтому складывается впечатление, что оценки КПД и EROI всей ТЯЭС могут оказаться довольно неутешительными. Вместе с этим следует иметь в виду, что технологии постоянно совершенствуются и разрабатываются новые. Кроме того, успехи физики сверхпроводимости вселяют надежду, что рано или поздно будут открыты высокотемпературные или даже комнатотемпературные сверхпроводники, пригодные для различных промышленных применений. Они значительно упростят и удешевят также и ТЯЭС, помогут сэкономить огромное количество электроэнергии, финансовых и материальных ресурсов, положительным образом повлияют на величины КПД и EROI.

И последнее. Говоря о замене ископаемого углеродного топлива на водород, следует иметь в виду, что в результате будет дополнительно связываться кислород, а в атмосферу поступят дополнительные количества водяного пара. Обозначим некоторые возможные проблемы, связанные с последним обстоятельством.

Концентрация газов, составляющих атмосферу, как известно, практически постоянна, за исключением  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . По поводу последнего проводится постоянный мониторинг. Так, данные, полученные, например, 8 сентября 2021 г., показали, что концентрация  $\text{CO}_2$  достигла величины 413.45 ppm. Год назад, 8 сентября 2020 г., было 411.98 ppm [32]. Иными словами, концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере растет катастрофически быстро (об этом говорят и все предыдущие измерения), и она уже примерно в 1.5 раза превышает доиндустриальный уровень (280 ppm), отсчитываемый от 1850 г. Что касается массы водяных паров в атмосфере, то, по данным из разных источников, она составляет  $\sim 10^{13}$  т (масса  $\text{CO}_2$  примерно на порядок ниже). Для сравнения отметим, что масса всей атмосферы Земли равна  $5.3 \times 10^{15}$  т. Такую оценку легко получить, зная атмосферное давление у земной поверхности и площадь последней.

Допустим, что к 2050 г. планируемая декарбонизация состоялась, и вместо ископаемого топлива ежегодно сжигается  $\sim 10$  млрд т водорода, что дает дополнительно порядка  $10^{11}$  т  $\text{H}_2\text{O}$  или добавку величиной примерно 1% от общего сегодняшнего количества  $\text{H}_2\text{O}$  в атмосфере. С одной стороны, это не много, а водяной пар не самый сильный парниковый газ, так что последствия могут быть несущественными. С другой стороны, не следует забывать, что именно водяной пар вносит в парниковый эффект наибольший вклад, поскольку в атмосфере его намного больше, чем всех остальных парниковых газов вместе взятых. Рост количества водяного пара может приводить к увеличению облачности, т.е. к уменьшению поступления тепла от Солнца. Вместе с этим данный процесс может усилить и парниковый эффект. Поскольку процессы в

атмосфере очень сложные, зависят от множества взаимосвязанных параметров, постольку даже малые их изменения могут запустить какие-то новые процессы, в том числе нежелательные в долгосрочной перспективе.

Поэтому несмотря на то, что главным источником атмосферного водяного пара служит мировой океан, представляется целесообразным тщательно проанализировать последствия частичной или полной замены атмосферного техногенного газа  $\text{CO}_2$  на такой же пар  $\text{H}_2\text{O}$ . Сделать это современные вычислительные мощности позволяют.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе дан анализ сегодняшних достижений и перспективных направлений в борьбе с потеплением климата путем декарбонизации мировой экономики. Показано, что, несмотря на интенсивное строительство в последние десятилетия электростанций на “зеленых” ВИЭ, их вклад в мировое производство энергии остается пока небольшим, невелики и ресурсы современной водородной энергетики. Отмечено, что сохраняется зависимость всех “зеленых” ВИЭ (ГЭС, СЭС и ВЭС) от ископаемых видов топлива, описаны экологические проблемы, связанные с эксплуатацией таких электростанций и переработкой их отслуживших элементов. Так что “зелеными” эти ВИЭ можно назвать лишь условно. Отмечено, что СЭС и ВЭС характеризуются невысокими коэффициентами EROI. Для водорода EROI откровенно низок, а его стоимость остается еще слишком большой, поэтому коммерческие перспективы данного энергоносителя пока не совсем ясны.

В работе также показано, что планируемые действия по декарбонизации мировой экономики не сбалансированы и противоречивы, так что выглядят пока трудно реализуемыми. В частности, непонятно, где и как получать энергию одновременно на производство миллиардов тонн водорода (если считать, что это и есть альтернативный энергоноситель), на переработку отслуживших деталей СЭС, ВЭС и АКБ, которых ожидается многие миллионы тонн ежегодно, на подзарядку АКБ, откуда извлекать необходимое количество лития. В наличии имеются пока желания, декларации, субсидии для производителей и потребителей, несоответствия существующих прогнозов современным реалиям и возможностям ближайшего будущего. Так что наряду с научно-технологическими проблемами необходимо решать и организационные.

Что касается новых разработок атомной энергетики (АЭТС на базе обычных реакторов или ВТГР, комплексов на базе РБН), то они выглядят вполне перспективно, но требуют практической проверки, на что может уйти не одно десятилетие. Перспективы ТЯЭС пока остаются неясными по многим позициям.

Первоочередные задачи на сегодня – это поиск эффективных путей получения электролизного водорода, разработка “зеленых” ВИЭ и АКБ с высоким ресурсом, а также приемлемых путей переработки их отслуживших деталей.

Отмечается также, что несмотря на все трудности, “зеленые” ВИЭ уже начинают исполнять важную экологическую функцию экономии углеродных ресурсов. А поскольку рано или поздно ископаемое топливо иссякнет, постольку поиск, разработку и ввод новых альтернативных источников энергии следует всячески приветствовать, а уже имеющуюся “зеленую” энергетику развивать и совершенствовать.

Поскольку проблем очень много, и они очень сложные, то делается вывод, что углеродное топливо и к 2050 г. останется востребованным, а проблема декарбонизации будет решена в более отдаленной перспективе.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ на 2019–2021 гг. (тема № АААА-А19-119020190099-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Березкин В.И.* Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы. СПб.: АРТЭГО, 2013. 450 с.
2. *Березкин В.И.* Введение в физическую адсорбцию и технологию углеродных адсорбентов. СПб.: Виктория плюс, 2013. 409 с.
3. *Березкин В.И.* Экологическая безопасность в контексте новых технологий выработки энергии и достижений фундаментальной науки в области сверхпроводимости // Региональная экология. 2018. № 2(52). С. 103–122. <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-2-103-122>
4. *Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н.* Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 2008. 134 с.
5. *Егоров А.* Перепись водорода // Газпром. 2019. № 9. С. 42–43. <https://www.gazprom.ru/f/posts/91/915005/gazprom-magazine-2019-9.pdf>.
6. *Кайнова А.В., Сухарев Ю.П., Власичев Г.Н.* Реакторные установки сверхмалой мощности // Труды Нижегородского Государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева. 2018. № 1(120). С. 108–116. <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2018/01/2018-01.pdf>
7. *Каперзов А.О., Герасимов В.С., Буяков С.А.* Особенности и риски, связанные с утилизацией литий-ионных батарей. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5c87839059b73700b00c9f79/osobennosti-i-riski-svzaznnyie-s-utilizaciei-litiiionnyh-batarei-5c93ef1519fa6800b3c9c359> (дата обращения: 12.06.2021).
8. *Новак А.* Водород: энергия “чистого” будущего // Энергетическая политика. 2021. № 4(158). С. 6–11. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_4158\\_6](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_4158_6)
9. *Новак А.* Сообщение вице-преьера правительства РФ на ПМЭФ’21 (SPIEF’21) // Газета СПб. Ведомости. 07.06.2021.
10. *Плющев В.Е., Степин Б.Д.* Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. М.-Л.: Химия, 1970. 407 с.
11. *Петин С.Н.* Энергетическая эффективность производства и потребления водорода // Вестник Московского энергетического института. 2019. № 2. С. 29–36. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-2-29-36>
12. Получение водорода электролизом воды. URL: <https://poznayka.org/s67773t1.html> (дата обращения: 12.06.2021).
13. *Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я.* Атомно-водородная энергетика – пути развития // Энергия. 2004. № 1. С. 3–9. [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=216](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=216).
14. “Росатом” начал строить уникальный реактор БРЕСТ в Томской области. URL: <https://ria.ru/20210608/energoblok-1736090576.html> (дата обращения: 12.06.2021).
15. *Сафронов А.Ф., Голоскоков А.Н.* EROEI как показатель эффективности добычи и производства энергоресурсов // Бурение и нефть. 2010. № 12/13. <https://burneft.ru/archive/issues/2010-12/13>.
16. *Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кременецкий А.А.* Геохимия лития, рубидия и цезия. М.: Недра, 1980. 233 с.
17. Справочник химика (в 3 т.). Под ред. Б.П. Никольского. Л., М.: ГНТИ хим. лит.-ры. Т. 1. 1962. 1071 с.
18. *Филиппов С., Голодницкий А., Кашин А.* Топливные элементы и водородная энергетика // Энергетическая политика. 2020. № 11. С. 28–39. <https://energypolicy.ru>.
19. *Шульгинов Н.Г.* Не надо спешить расставаться с углеводородами, надо наравне с традиционными видами энергетики развивать ВИЭ // Энергетическая политика. 2021. № 5. С. 4–13. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_5159\\_4](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_5159_4).
20. BP Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition. 72 p.
21. BP Statistical Review of World Energy 2020. 69th edition. 68 p.
22. *Hall C.A.S.* Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem // Ecology. 1972. V. 53. P. 585–604.
23. *Murphy D.J., Hall C.A.S.* Year in review EROI or energy return on (energy) invested // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2010. V. 1185. P. 102–118. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x>
24. *Rana R. L., Lombardi M., Giungato P., Tricase C.* Trends in Scientific Literature on Energy Return Ratio of Renewable Energy Sources for Supporting Policymakers // Adm. Sci. 2020. 10(2), 21. <https://doi.org/10.3390/admsci10020021>
25. Аккумулятор Tesla Model S. Что внутри? URL: <https://korea1.ru/vybor/akkumulyator-tesla-model-s-cto-vnutri-razbiraem-tyagovye-litii-ionnye-batarei-tesla-cto> (дата обращения: 12.06.2021).



26. Аккумуляторы электромобилей: особенности применения. URL: <https://e-cars.tech/2020/11/04/akkumulyatory-elektromobilej-osobennosti-primeneniya/> (дата обращения: 12.06.2021).
27. В США тоже начали запрещать автомобили с ДВС. URL: [https://auto.mail.ru/article/81117-v\\_ssha\\_tozhe\\_nachali\\_zapreshchat\\_avtomobili\\_s\\_dvs](https://auto.mail.ru/article/81117-v_ssha_tozhe_nachali_zapreshchat_avtomobili_s_dvs) (дата обращения: 12.06.2021).
28. Жертвы экологически чистой энергии: сколько птиц гибнет от ветрогенераторов. URL: <https://www.pornmeh.ru/science/news-579664-vuyasnilos-skolko-ptic-gibnet-ot-vetrogenera-torov> (дата обращения: 12.06.2021).
29. Крупнейшие солнечные электростанции в мире. URL: <https://zen.yandex.ru/media/energo-fizik/krupneishie-solnechnye-elektrostantsii-v-mire-5d1769809865f000acee46ab> (дата обращения: 12.06.2021).
30. Крупнейший ветропарк Ганьсу, заменяющий собой десяток АЭС. URL: <https://fishki.net/3448225-krupnejshij-vetropark-ganysu-zamenjajuwij-soboj-desjatok-ajes.html> (дата обращения: 12.06.2021).
31. Переработка аккумуляторов и батареек. URL: <https://nature-time.ru/2013/12/pererabotka-akkumulyatorov-i-bataareek> (дата обращения: 12.06.2021).
32. Последние Daily CO<sub>2</sub>. URL: <https://ru.co2.earth/daily-co2> (дата обращения: 08.09.2021).
33. Производство лития в мире. Мировые запасы литиевых ресурсов. URL: <https://reaestate.ru/proizvodstvo-litiya-v-mire-mirovye-zapasy-litievyyh-resursov> (дата обращения: 12.06.2021).
34. Статистика производства новых автомобилей. URL: <https://auto.vercity.ru/statistics/production/2021> (дата обращения: 12.06.2021).
35. Топ-10 крупнейших альтернативных электростанций мира. URL: <https://zen.yandex.ru/media/megastroyki/top10-krupneishih-alternativnyh-elektrostantsii-mira-5cbf5417ae4f3800b29a5c14> (дата обращения: 12.06.2021).
36. Тяговые аккумуляторы для автомобилей. URL: <https://efut.ru/a/135-tjagovye-akkumuljatory-dlja-jelektromobilej.html> (дата обращения: 12.06.2021).
37. Tesla построила крупнейшую в мире литий-ионную батарею в Австралии. URL: <https://www.ridus.ru/news/266068> (дата обращения: 12.06.2021).
38. Three Gorges Dam. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Three\\_Gorges\\_Dam](https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Gorges_Dam) (дата обращения: 12.06.2021).
39. What happens to all the old wind turbines? URL: <https://www.bbc.com/news/business-51325101> (дата обращения: 12.06.2021).
40. World Energy Outlook 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (дата обращения: 12.06.2021).

## **Decarbonization as a Means of Combating Climate Warming and the Problems of “Green” Energy**

**V. I. Berezkin\***

*St. Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences — St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, Russia*

*\*E-mail: v.berezkin@inbox.ru*

The article analyzes the current efforts to combat climate warming by moving towards the ultimate goal announced by many countries as the complete decarbonization of their economies by 2050. The main trends in reducing harmful effects on the natural environment by replacing fossil fuels with renewable and environmentally friendly (“green”) sources — hydrogen, wind, solar, and water energy are considered. Promising developments of atomic energy in this context are also described. The state of affairs in the field of thermonuclear power plants is noted. It is shown that “green” energy sources, in the strict sense, do not exist today, and the designated ways to achieve zero emission of harmful substances are quite contradictory and therefore look difficult to implement so far. At the same time, it was noted that it is vital to develop “green” energy not only from the point of view of nature protection, but also due to the fact that traditional fossil energy sources will sooner or later be exhausted. It is indicated which problems will need to be solved. It is shown that there are a lot of them and they are very complex. It is concluded that the level of modern technologies and the ideas existing here let to suggest that carbon fuel as a primary energy source will remain in demand by 2050. And since the achievement of decarbonization is also associated with prob-

lems whose solutions have not yet been found or tested in practice, the path in this direction is likely to be longer.

*Keywords:* climate warming, decarbonization of the world economy, “green” energy sources

## REFERENCES

1. Berezkin V.I. Uglerod: zamknutyte nanochastitsy, makrostruktury, materialy. SPb.: ARTEGO, 2013. 450 s.
2. Berezkin V.I. Vvedeniye v fizicheskuyu adsorbtsiyu i tekhnologiyu ugleodnykh adsorbentov. SPb.: Viktoriya plus, 2013. 409 s.
3. Berezkin V.I. Ekologicheskaya bezopastnost' v kontekste novykh tekhnologii vyrabotki energii i dostizhenii fundamental'noi nauki v oblasti sverkhprovodimosti // Regional'naya Ekologiya. 2018. № 2 (52). S. 103–122. Doi: 10.30694/1026-5600-2018-2-103-122.
4. Grebennik V.N., Kukharkin N.E., Ponomarev-Stepnoi N.N. Vysokotemperturnye gazoohlazhdaemye reaktory — innovatsyonnoe napravleniye razvitiya atomnoi energetiki. M.: Energoatomizdat. 2008. 134 s.
5. Egorov A. Perepis' vodoroda. // Gazprom. 2019. № 9. S. 42–43. <https://www.gazprom.ru/f/posts/91/915005/gazprom-magazine-2019-9.pdf>.
6. Kainova A.V., Sukharev Yu.P., Vlasichev G.N. Reaktornye ustanovki sverkhmaloi moshchnosti // Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseyeva // 2018. № 1(120). S. 108–116.
7. Kaperzov A.O., Gerasimov V.S., Buryakov S.A. Osobennosti i riski, svyazannye s utilizatsiei litiionnykh batarei. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5c87839059b73700b00c9f79/osobennosti-i-riski-svazannye-s-utilizatsiei-litiionnykh-batarei-5c93ef1519fa6800b3c9c359> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
8. Novak A. Vodorod: energiya “chistogo” budushchego // Energeticheskaya politika. 2021. № 4(158). S. 6–11. Doi: 10.46920/2409-5516\_2021\_4158\_6.
9. Novak A. Soobshcheniye vitse-prem'era pravitel'stva RF na PMEF'21 (SPIEF'21) // Gazeta SPb. Vedomosti 07.06.2021.
10. Plyushchev V.E., Stepin B.D. Khimiya i tekhnologiya soedinenii litiya, rubidiya i tseziya. M.-L.: Khimiya, 1970. 407 s.
11. Petin S.N. Energeticheskaya effektivnost' proizvodstva i potrebleniya vodoroda // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. 2019. № 2. S. 29–36. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-2-29-36>.
12. Polucheniye vodoroda elrktrolizom vody. URL: <https://poznayka.org/s67773t1.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
13. Ponomarev-Stepnoi N.N., Stolyarevskii A.Ya. Atomno-vodorodnaya energetika — puti razvitiya. // Energiya. 2004. № 1. S. 3–9. [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=216](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=216).
14. “Rosatom” nachal stroit' unikal'nyi reaktor BREST v Tomskoi oblasti. URL: <https://ria.ru/20210608/energoblok-1736090576.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
15. Safronov A.F., Goloskokov A.N. EROEI kak pokazatel' effektivnosti dobychi i proizvodstva energoresursov // Bureniye i nef't'. 2010. № 12/13. <https://burneft.ru/archive/issues/2010-12/13>.
16. Solodov N.A., Balashov L.S., Kremenetskii A.A. Geokhimiya litiya, rubidiya i tseziya. M.: Nedra, 1980. 233 s.
17. Spravochnik khimika (v 3 t.). Pod red. B.P. Nikol'skogo. L., M.: GNTI khim. lit-ry. T. 1. 1962. 1071 s.
18. Filippov S., Golodnitskii A., Kashin A. Toplivnye elementy i vodorodnaya energetika // Energeticheskaya politika 2020. № 11. S. 28–39. <https://energypolicy.ru>.
19. Shul'ginov N. G. Ne nado speshit' rasstavat'sya s uglevodorodami, nado naravne s traditsionnymi vidami energetiki razvivat' VIE // Energeticheskaya politika. 2021. № 5. S. 4–13. <https://energypolicy.ru>. Doi: 10.46920/2409-5516\_2021\_5159\_4.
20. BP Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition. 72 p.
21. BP Statistical Review of World Energy 2020. 69th edition. 68 p.
22. Hall C.A.S. Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem // Ecology. 1972. V. 53. P. 585–604.
23. Murphy D.J., Hall C.A.S. Year in review EROI or energy return on (energy) invested // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2010. V. 1185. P. 102–118. Doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x.
24. Rana R.L., Lombardi M., Giungato P., Tricase C. Trends in Scientific Literature on Energy Return Ratio of Renewable Energy Sources for Supporting Policymakers // Adm. Sci. 2020. 10(2), 21. <https://doi.org/10.3390/admsci10020021>.
25. URL: <https://korea1.ru/vybor/akkumulyator-tesla-model-s-chto-vnutri-razbiraem-tyagovye-litii-ionnye-batarei-tesla-chto> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
26. URL: <https://e-cars.tech/2020/11/04/akkumulyatory-elektromobilej-osobennosti-primeneniya/> (data obrashcheniya: 12.06.2021).

27. URL: [https://auto.mail.ru/article/81117-v\\_ssha\\_tozhe\\_nachali\\_zapreshchat\\_avtomobili\\_s\\_dvs](https://auto.mail.ru/article/81117-v_ssha_tozhe_nachali_zapreshchat_avtomobili_s_dvs) (data obrashcheniya: 12.06.2021).
28. URL: <https://www.popmech.ru/science/news-579664-vyasnilos-skolko-ptic-gibnet-ot-etro-generatorov> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
29. URL: <https://zen.yandex.ru/media/energofiksik/krupneishie-solnechnye-elektrostantsii-v-mire-5d1769809865f000acee46ab> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
30. URL: <https://fishki.net/3448225-krupnejshij-vetropark-ganysu-zamenjajuwij-soboj-desjatak-ajes.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
31. URL: <https://nature-time.ru/2013/12/pererabotka-akkumulyatorov-i-batareek> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
32. URL: <https://ru.co2.earth/daily-co2> (data obrashcheniya: 08.09.2021).
33. URL: <https://reaestate.ru/proizvodstvo-litiya-v-mire-mirovye-zapasy-litievyyh-resursov> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
34. URL: <https://auto.vercity.ru/statistics/production/2021> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
35. URL: <https://zen.yandex.ru/media/megastroyki/top10-krupneishih-alternativnyh-elektrostantsii-mira-5cbf5417ae4f3800b29a5c14> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
36. URL: <https://efut.ru/a/135-tjagovye-akkumuljatory-dlja-jelektromobilej.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
37. Tesla postroila krupneishuyu v mire litii-ionnuyu batareyu v Avstralii. URL: <https://www.ridus.ru/news/266068> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
38. Three Gorges Dam. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Three\\_Gorges\\_Dam](https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Gorges_Dam) (data obrashcheniya: 12.06.2021).
39. What happens to all the old wind turbines? URL: <https://www.bbc.com/news/business-51325101> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
40. World Energy Outlook 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (data obrashcheniya: 12.06.2021).