Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428-438
В.С.Литвиненко, П.С.Цветков, М.В.Двойников, Г.В.Буслаев
DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5

УДК 620.92

Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики

В.С.ЛИТВИНЕНКО, П.С.ЦВЕТКОВ✉, М.В.ДВОЙНИКОВ, Г.В.БУСЛАЕВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С.Литвиненко, П.С.Цветков, М.В.Двойников, Г.В.Буслаев // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428-438. DOI: 10.31897/ PMI.2020.4.5

***Аннотация*.** Современные тенденции мирового энергетического рынка, связанные с целями устойчивого развития, в ряде случаев приводят к принятию недостаточно обоснованных политических решений. Интенсификация развития возобновляемых источников энергии – экономически спорный, но необходимый шаг с точки зрения социальных и экологических эффектов. Однако последующее развитие водородной инфраструктуры является опасной инициативой. В статье предпринята попытка рассмотреть водород с точки зрения интегральной оценки его характеристик. Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы о потенциале широкомасштабного внедрения водорода в энергетику: как химический элемент водород является врагом металлоконструкций, что значительно затрудняет выбор подходящих материалов; физические и объемные характеристики водорода снижают общую эффективность энергосистемы по сравнению с аналогичными углеводородными решениями; водородная экономика не имеет необходимой основы как с точки зрения физической инфраструктуры, так и механизмов рыночного регулирования; появление широкодоступного водорода опасно для общества из-за его высокой горючести. В результате работы был сделан вывод, что существующие пилотные водородные проекты являются позитивными, но не масштабируемыми решениями для энергетического сектора из-за отсутствия технологий для создания крупномасштабной и географически распределенной инфраструктуры, а также проработанной международной системы регулирования отрасли. Таким образом, в текущих условиях риски реализации таких проектов значительно превышают их потенциальные экологические выгоды.

***Ключевые слова*:** водород; устойчивое развитие; углеводороды; топливно-энергетический комплекс; глобальная энергетика; возобновляемые источники энергии

Введение. Энергетика является фундаментом экономики и основным драйвером ее развития. В связи с этим, вопросы обеспечения всеобщего доступа к дешевым, надежным, безопасным и экологически чистым источникам энергии являются одним из приоритетов в контексте глобального устойчивого развития. Это прямо обозначено в рамках седьмой цели и косвенно прослеживается в прочих целях устойчивого развития, достижение которых зависит от эффективности использования (рациональное производство и потребление) природных ресурсов, в том числе сырьевых.

Основным направлением развития экологически чистой энергетики является масштабное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Так, например, правительства стран Евросоюза предпринимают попытки декарбонизации экономики, направив все ресурсы на получение энергоносителей с низким углеродным следом, как за счет введения жестких мер налогового регулирования (рис.1), так и за счет реализации программ софинансирования перехода общества к альтернативной энергетике, исчисляемых триллионами евро. Эта политика является достаточно дискуссионной [21], хотя и позиционируется многими учеными, а также политическими деятелям, как единственно верная.

Вместе с тем, недостаточная экономическая эффективность ВИЭ, связанная с низким КПД процесса трансформации энергии, обсуждается на протяжении последних десятилетий. Уже сегодня стоимость электроэнергии из некоторых ВИЭ может сравниться с углеводородами, но только при существенной поддержке со стороны государства. Тем не менее, возможность получения сравнительно дешевой и децентрализованной энергии ВИЭ сопряжена с нестабильностью процесса энергогенерации и отсутствием методов сохранения избыточной энергии для последующего использования.

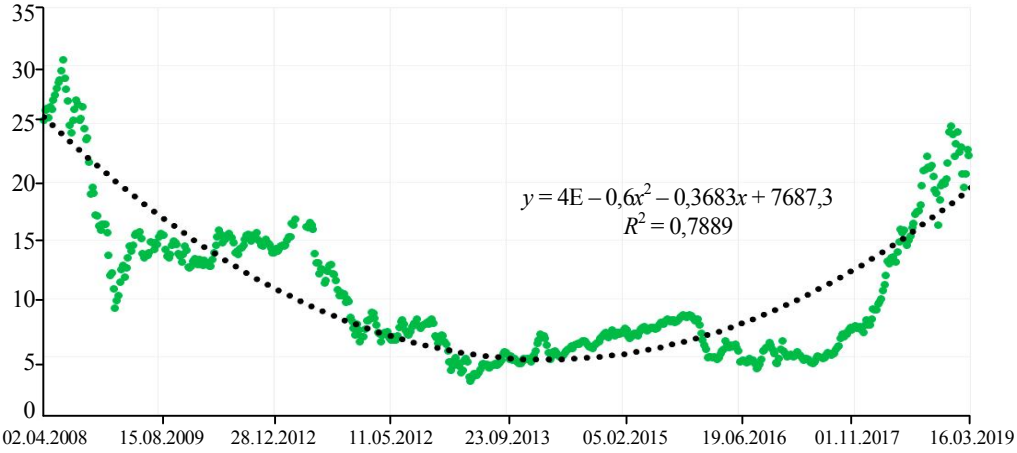


Рис.1. Средняя ставка налога на выбросы углерода в Европе, евро/т CO_2 [31]

В качестве одного из перспективных энергоносителей, способных решить эту проблему, предложен водород. Водород является потенциальным решением нескольких проблем энергогенерации, присущих как ВИЭ, так и углеводородным ресурсам. С одной стороны, его производство теоретически позволит преобразовывать, накапливать и сохранять энергию, произведенную из любого первичного ресурса [15]. С другой стороны, водород признан экологически чистым вторичным энергетическим ресурсом в связи с отсутствием каких-либо выбросов загрязняющих веществ на этапе его сжигания [16]. Несмотря на это, водородная энергетика находится на начальном этапе развития и еще не готова к масштабному и повсеместному внедрению в глобальную энергетическую систему. Следует четко понимать, что, если ВИЭ являются обсуждаемой, обширной применяемой группой технологий, то кластер технических решений водородной энергетики находится на самом начальном этапе развития, хотя первые работы в области использования водорода для обеспечения процессов устойчивого развития были начаты еще в середине прошлого века [10], а сам элемент изучается не одно столетие. Дискуссия о судьбе водорода в качестве энергоносителя в современных научных работах, как правило, проводится в одном из следующих направлений.

• В настоящее время не существует экономически эффективных способов получения водорода в промышленном масштабе, несмотря на наличие более 100 различных способов его получения (комбинации сырья и технических методов) [11].

• Отсутствует необходимая инфраструктура для масштабного развития водородной энергетики, как мобильной, так и стационарной [25]. При этом вопросы инфраструктурного развития во многих современных работах [22] ограничиваются отдельными этапами производственно-логистической цепочки (производство, транспортировка, хранение или потребление), либо их комбинациями. Это связано с тем, что, несмотря на наличие в мире порядка 3000 км водородных газопроводов [34], до сих пор затруднены оценки того, какие ресурсы должны быть привлечены для модернизации уже сложившихся энергораспределительных систем.

• Исследования в области влияния водорода на металлы проводятся уже не одно десятилетие. Еще в 1967 г. в СССР было сделано научное открытие «Водородный износ металлов» (№ 378), но реакционная способность водорода до сих пор недостаточно изучена, хотя ее негативные проявления уже являются большой технической проблемой (стресс-коррозия). Так, например, негативное воздействие водорода на металл оказало влияние на перспективы его использования в качестве топлива для современных космических кораблей. Аналогичные негативные последствия наблюдаются и в действующих трубопроводных системах, особенно это касается мест стыков конструктивных частей. Из-за стресс-коррозии Газпром заменил более 5 000 км трубопроводов большого диаметра. В каждом конкретном случае необходимо комплексное изучение пространственно-энергетического распределения водорода в металле, возникающего в процессе эксплуатации технических систем с целью оценки срока службы элементов с учетом усталостного разрушения [23].

Учитывая все это, водород следует рассматривать комплексно: как химический элемент, как энергоноситель, как сырьевой ресурс и, в целом, как источник возможностей и рисков. Рассмотрение водорода в контексте одной научной дисциплины приводит к потере существенной части информации и, как следствие, необоснованным выводам о его потенциале и барьерах для реализации.

Таким образом, цель данной статьи – интегральный анализ жизнеспособности идей о широкомасштабном развитии водородной энергетики в краткосрочной перспективе, развиваемых в рамках стратегических программ снижения углеродоемкости ряда ведущих мировых экономик.

Технологические аспекты производства, транспортировки и хранения водорода. В отличие от углеводородных ресурсов, водород, как правило, является вторичным энергетическим ресурсом, так как его добыча из природной среды крайне трудна, хотя примеры таких проектов имеются в международной практике [38].

Для производства водорода разработано множество концепций и технологий [8], которые условно можно разделить на две ключевые группы – основанные на ВИЭ («зеленый» водород) и на углеводородах («синий» и «серый» водород). Первая группа использует термохимические либо биологические процессы, вторая – процессы риформинга и пиролиза углеводородов,. Основная проблема заключается в том, что большинство доступных технологий еще не имеют достаточной апробации для их промышленного внедрения.

Производство водорода. Сегодня мировое производство водорода превышает 85 млн т. Основными потребителями являются химическая промышленность – до 70 %, нефтепереработка – более 20 %, металлургия – порядка 7 %, доля транспортной энергетики не превышает 1 % в общей структуре потребления [11].

Существует более 100 перспективных технологий производства водорода, из которых наибольшее распространение получили химические технологии конверсии углеводородного сырья (природного газа и угля) [28]. Основной промышленной технологией является паровая конверсия природного газа (SMR), хотя применяют также углекислотную конверсию (DRM), некаталитическое парциальное окисление (POX) и комбинации названных способов, среди которых крайне распространен автотермический риформинг (ATR) [17, 32].

В зависимости от источника водород условно разделяют на «зеленый», «серый», «синий» и «желтый». Это разделение не связано с цветом газа, а упрощает восприятие различий у общественности. «Зеленый» водород образуется наряду с кислородом при электролизе обычной воды. Этот процесс прост с технической точки зрения, но является крайне энергоемким. «Серый» водород получается за счет риформинга углеводородов, в результате которого также выделяются парниковые газы. Если параллельно с этим процессом реализуются цепочки захвата CO_2 [35], то полученный водород называют «синим». Он же может быть получен за счет использования технологий пиролиза углеводородов. «Желтый» водород ассоциируются с атомной энергетикой. Но, учитывая объективные проблемы с общественным восприятием этих объектов, а также их ограниченную роль в глобальном энергетическом балансе, этот водородный ресурс является незначительным [36].

Следует остановиться на крайне перспективных технологиях получения водорода из метана без доступа кислорода (прямой пиролиз, низкотемпературная плазма и др) и, соответственно, без выбросов CO_2 [2]. Подобные работы по созданию реакторов ведутся европейскими компаниями в рамках государственного и частного финансирования в BASF New Business GmbH, BASF SE, VdEh Betriebs Forschungs Institut, HTE GmbH, Linde AG, Thyssenkrupp Industrial Solutions AG, TU Dortmund, Verbundnetz Gas и других компаниях, входящих в число мировых лидеров в области снижения выбросов парниковых газов. Теоретически технологии пиролиза способны обеспечить не только нулевой, но и отрицательный углеродный след, в случае использования отходов и продукции сельского хозяйства [18]. Не углубляясь в детали технологических процессов, приведем только общую информацию о них (рис.2).

Хранение и транспортировка водорода. Транспортировка и хранение также являются слабыми звеньями водородных энергетических систем [9]. Повышение эффективности этих процессов связано с решением двух ключевых проблем: перевод водорода в форму, имеющую большую плотность (например, сжижение); повышение безопасности резервуаров и транспортных систем. Если первая проблема уже имеет некоторые практические решения, то вопросы безопасного обращения с водородом еще практически не изучены [21].

DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5

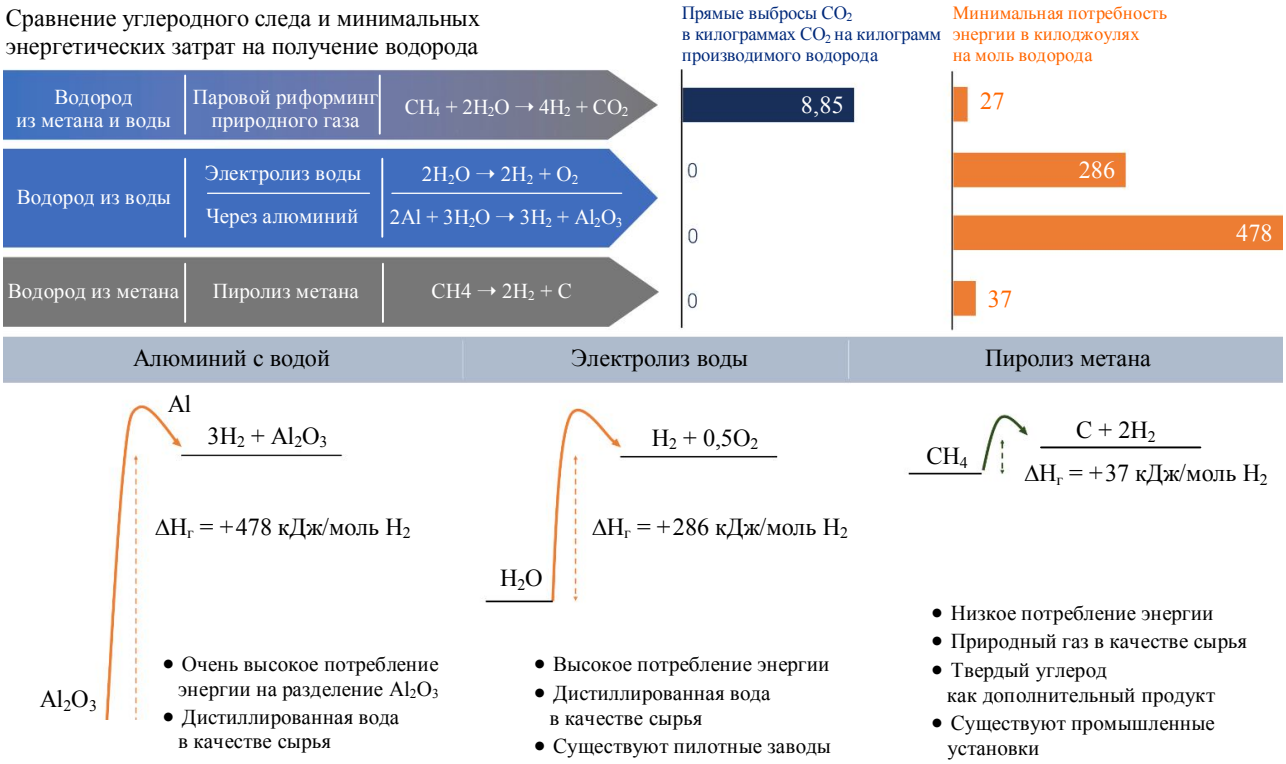


Рис.2. Сравнительный анализ способов получения водорода

Объемные и физические характеристики. В качестве примера потенциального проекта транспортировки водорода приведем «Северный поток-2» – один из наиболее обсуждаемых сегодня газотранспортных проектов.

В целях сохранения своих позиций на европейском рынке ПАО «Газпром» необходимо снизить углеродоемкость поставляемых энергетических ресурсов, чтобы соответствовать внедряемым экологическим стандартам, что подразумевает необходимость модернизации действующих и плановых технологических процессов. Под давлением Европейского Союза (ЕС) в качестве меры реагирования специалисты ПАО «Газпром» рассматривают возможность перевода турбин магистральных компрессоров на смесь метана с водородом (20 %), тогда выбросы углекислого газа ориентировочно уменьшатся на 30 %. Для этого на каждой компрессорной станции (более 250 в России) необходимо будет установить оборудование для производства водорода, либо необходимо транспортировать в ЕС природный газ уже в смешанном с водородом виде, с постепенным увеличением доли водорода по мере перехода ЕС к «углеродонейтральной» экономике.

При этом существует ряд сложностей в переводе трубопроводов на подобную смесь, связанных с физико-химическими свойствами водорода, создающими при их детальном рассмотрении нетривиальные проблемы, с которыми могут столкнуться газотранспортные системы. В частности, эффективность трубопроводной транспортировки газа напрямую зависит от объема продукции, а значит и от плотности газа. На рис.3, *а* представлена зависимость плотности смеси водорода и метана, из которой видно, что с увеличением концентрации водорода от 10 до 90 % плотность смеси снижается более чем в четыре раза.

При обосновании преимуществ водорода отмечается высокая энергоемкость этого газа, но при этом рассматривается теплота сгорания единицы массы, что не позволяет оценить реальную картину. На рис.3, *б* представлена зависимость теплоты сгорания смесей с различной концентрацией. Из рис.3 видно, что энергия, получаемая из одного объема водорода, в 3,5 раза меньше энергии, получаемой из метана.

На рис.4, *а* представлено увеличение требуемой энергии на сжатие 1 кг смеси для повышения давления на 1 МПа по мере увеличения доли водорода. Можно сделать вывод, что энергозатраты увеличиваются примерно в 8,5 раза, что делает процесс трубопроводной доставки водородосодержащих смесей менее энергоэффективным. Связано это с тем, что кинематиче-

DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5

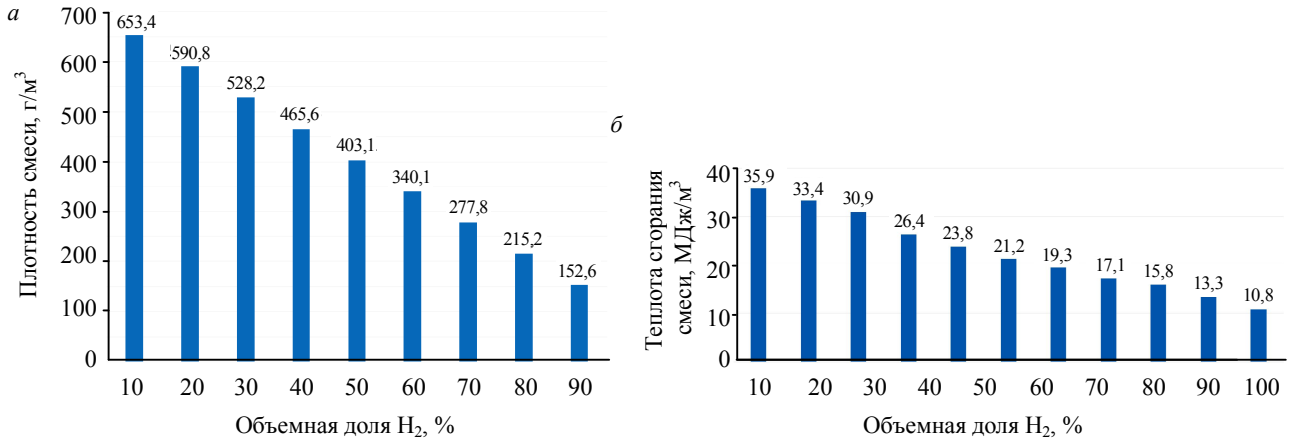


Рис.3. Зависимости плотности смеси с метаном (*а*) и теплоты сгорания (*б*) от объемной доли водорода

ская вязкость водорода при нормальных условиях составляет 91,05 против 14,7 сСт у метана, являющегося основой природного газа. Вследствие большей кинематической вязкости метано-водородной смеси происходит рост потерь давления в трубопроводе, что влечет за собой необходимость создания больших избыточных давлений на компрессорных станциях для уже построенных трубопроводов, либо уменьшение расстояния между компрессорами для проектируемых трубопроводных систем.

С точки зрения взрывоопасности смеси метана с водородом, необходимо понимать, как изменяется область воспламенения такого газа с увеличением объемной доли H_2. Как видно из рис.4, *б*, на котором представлены зависимости нижнего (НКПР) и верхнего (ВКПР) концентрационных пределов распространения пламени, с увеличением доли водорода в смеси увеличивается и область воспламенения. При этом НКПР изменяется незначительно, тогда как ВКПР растет с 15 до 74 % в смеси с воздухом в качестве окислителя. Смесь с концентрацией горючего газа, входящей в область воспламенения, является взрывоопасной. Чем шире диапазон области воспламенения и ниже НКПР, тем более взрывоопасен горючий газ.

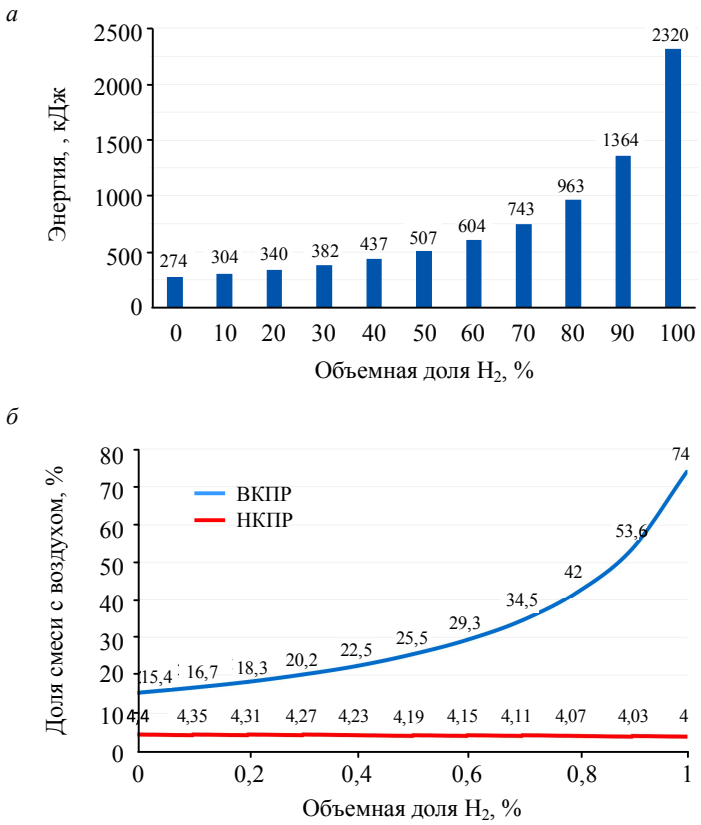


Рис.4. Зависимость затрат энергии на сжатие 1 кг метано-водородной смеси давлением 1 МПа (*а*), изменение области воспламенения смеси метана с водородом (*б*)

Как альтернатива трубопроводному транспорту рассматривается технология сжижения водорода по аналогии со сжиженным природным газом, что позволяет диверсифицировать рынки сбыта и упростить процесс хранения. Метан сжижается при атмосферном давлении и температуре ниже –161,5 °С, превращаясь в жидкость с плотностью 415 кг/м^3, имеющую объем в 600 раз меньше своей газообразной формы. Водород сжижается при атмосферном давлении и температуре −252,87 °С, уменьшаясь в объеме в 848 раз. Следует учитывать, что чем ближе температура вещества к абсолютному нулю, тем больше в нем начинают проявляться квантовые свойства, такие как сверхтекучесть, сверхпроводимость и др., требующие дополнительного изучения для каждого контактирующего с

жидким водородом материала. Плотность жидкого водорода составляет порядка 70 кг/м^3, что в 5,9 раза меньше, чем плотность сжиженного природного газа, а это значит, что при одинаковых условиях в одном и том же объеме резервуара можно хранить или транспортировать почти в 5,9 раз больше сжиженного природного газа, чем жидкого водорода.

Сложность при транспорте и хранении заключается еще и в том, что при хранении жидкого водорода в специальных термически изолированных контейнерах трудно поддерживать его стабильность при той низкой температуре, которая требуется для сохранения в жидком состоянии. При этом за счет испарения растет давление в резервуаре до тех пор, пока не сработает предохранительный клапан, сбрасывающий давление. Хотя негативного экологического эффекта эта процедура не несет, но она приводит к существенным потерям водорода в случае длительного хранения.

Нельзя игнорировать и тот факт, что водород обладает чрезвычайно высокой проницаемостью (диаметр молекулы $2{,}47 \cdot 10^{-8}$ см), его молекулы быстрее молекул всех других газов распространяются в среде другого вещества и проходят практически через любые металлы. Из-за высокой проницаемости водорода предъявляются жесткие требования к сварным швам и герметичности соединений. Способность водорода проникать через нагретый металл создает трудности и опасности в работе с ним при высоких температурах и давлениях. Так как проницаемость водорода прямо пропорциональна перепаду давлений, температуре и времени, то при длительном хранении сжатый водород способен улетучиваться даже из герметичных резервуаров.

Таким образом, ключевые физические и объемные характеристики свидетельствуют о том, что транспортировка водорода по трубопроводным системам, а также специфика его хранения, не только существенно снижает общий КПД, но и ведет к увеличению взрывоопасности такой инфраструктуры.

Химические процессы воздействия водорода на металлы. Существуют и другие проблемы, среди которых одной из наиболее критичных является взаимодействие водорода с металлом трубопровода [19].

Скопление даже незначительных объемов водорода в ловушках кристаллических решеток, а также на границах неметаллических включений вызывает рост внутренних напряжений в стали и, как следствие, провоцирует образование в ней трещин и последующее разрушение. При этом условий для образования свободного водорода в газонаполненных трубопроводах достаточно много, в том числе и из-за влияния особых термодинамических факторов.

С точки зрения электрохимии процесс сульфидного коррозионного растрескивания инициируется продуктами катодного восстановления ионов водорода (рис.5, *а*). Общепринятый механизм углекислотной коррозии связан с рядом электрохимических реакций (рис.5, *б*), протекающих на поверхности стали.

В литературе [13, 27] рассматривается взаимосвязь парциального давления водорода в транспортируемой смеси с процессом водородного охрупчивания. Как видно из таблицы, при увеличении давления смеси и объемной доли водорода увеличивается и парциальное давление H_2, что приводит к ускорению скорости диффузии водорода в сталь.

Водород в глобальной энергетической повестке. Роль сырьевых ресурсов и инновационных технологии их добычи, переработки и потребления в рамках устойчивого развития мировой экономики является недооцененной. Так, например, концепцией общей ценности, обозначенной в рамках отраслевой матрицы целей устойчивого развития, сырьевые отрасли экономики поставлены в один ряд с прочими отраслями, без учета специфических межотраслевых связей [10].

На этом фоне сырьевой сектор мировой экономики испытывает проблемы с доступом к инвестиционным ресурсам, а также влияние дискриминационной политики, не позволяющей в полной мере реализовать стратегические инициативы по поиску путей перехода на путь устойчивого развития [3, 4].

Одновременно с этим, многими странами ставится задача достижения углеродной нейтральности, что требует полного отказа от сжигания углеводородных

Парциальное давление водорода в смеси в зависимости от его объемной доли

Давление смеси, МПа	Объемная доля водорода в смеси, %				
	20	40	60	80	100
70,0	14	28	42	56	70
6,0	1,2	2,4	3,6	4,8	6
1,1	0,22	0,44	0,66	0,88	1,1
0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1

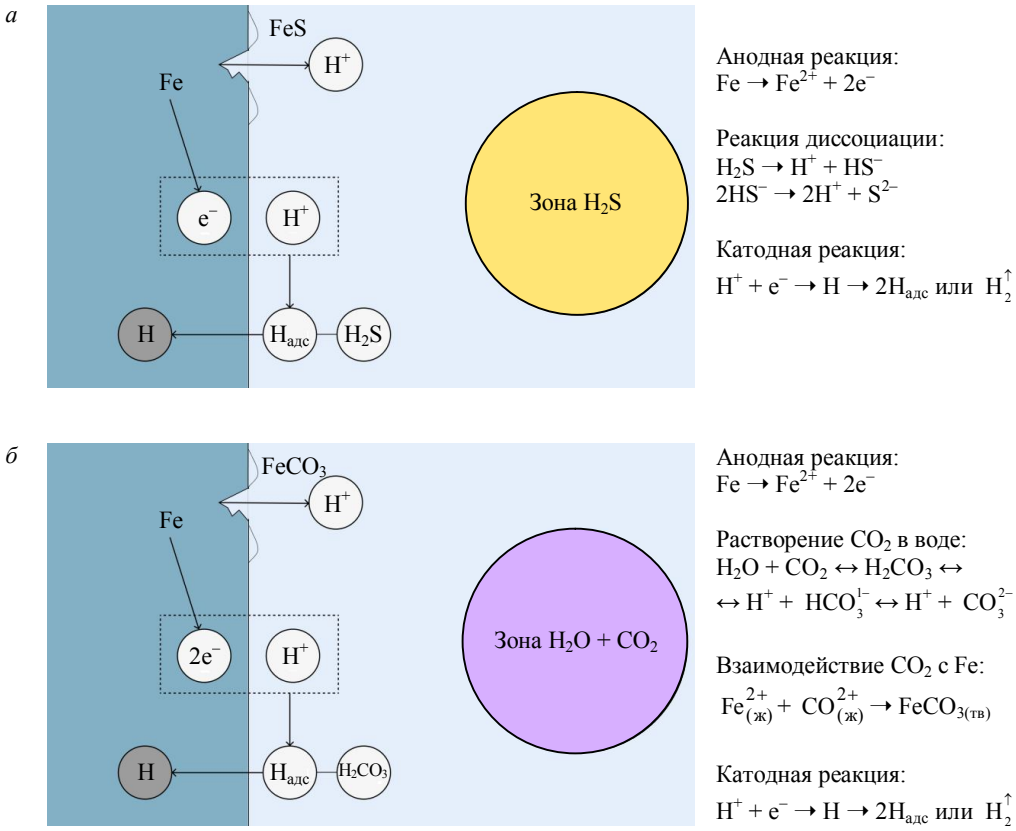


Рис.5. Электродный процесс взаимодействия сероводородсодержащей среды (*а*) и углекислотной среды (*б*) с металлической поверхностью [1]

ресурсов и продукции на их основе. Колоссальные финансовые ресурсы направляются на защиту неконкурентоспособных сегодня отраслей возобновляемой энергетики и сопряженных с ними амбициозных стратегий, в частности, нацеленных на развитие водородной экономики. Эта политика наносит серьезный удар по сложившейся структуре энергоснабжения и прежде всего по традиционным рынкам нефти, газа и особенно угля.

С позиции экологии водород выглядит более привлекательным, чем углеводороды, хотя бы потому, что сгорает только с образованием воды, не образуя парниковых газов. Однако даже этот факт нельзя считать абсолютной истиной. Так, например, опыт компании Enel по строительству водородной электростанции вблизи Вены показал, что стоимость генерации электроэнергии на таких объектах в пять раз выше обычных газовых ТЭС, а выбросы азота перекрывают любые эффекты снижения выбросов CO_2 [14].

Следует признать, что многочисленные теоретические и практические лабораторные исследования водородных технологий [5] подтверждают, что получение водорода и его использование в электрогенераторах – уже решенная задача. Тем не менее, КПД трансформационных процессов далек от оптимального [29], из-за чего возможность использования этих технологий в широком масштабе, равно как и их способность конкурировать на свободном рынке с традиционными углеводородными ресурсами, вызывают обоснованное недоверие и скепсис.

Можно сказать, что стоимость производства водорода сравнительно велика и не позволяет конкурировать с традиционными углеводородами в силу начального этапа развития технологий. В работе [12] проведен сравнительный анализ 19 технологий производства водородного топлива, на основе которого авторы сделали ряд важных выводов с точки зрения потенциала развития углеводородных ресурсов. Во-первых, среди всех рассмотренных вариантов риформинг углеводородного сырья имеет наивысшую энергетическую эффективность. Во-вторых, эксергетическая эффективность риформинга углеводородов является одной из наиболее высоких (45-50 %), опережается только газификацией биомассы (60 %). В-третьих, показано, что наиболее дешевый водород может быть получен также из углеводородного сырья с ценой порядка 0,75 дол/кг H_2.

Использование таких технологий как электролиз воды позволяет получить водород со стоимостью выше в 1,5 раза и более.

Стоимостные преимущества производства водорода на основе углеводородов отмечаются и в работе [28], согласно которым стоимость производства на основе природного газа колеблется в диапазоне от 1,34 (без секвестрации CO_2) до 2,27 дол/кг (с секвестрацией), на основе угля – от 1,34 до 1,64 дол/кг, тогда как большинство прочих методов получения в 1,5-6 раз дороже. Наиболее экономически эффективным является производство водорода за счет пиролиза метана, что позволяет достичь цены 1,22 дол/кг. Авторы не выделяют одну потенциально лидирующую технологию производства, а утверждают, что преимущество стоит отдавать гибридным методам.

Аналогичные результаты [6] свидетельствуют о том, что наиболее высокая техническая и экономическая эффективность, а также уровень готовности и уровень надежности наблюдаются у технических цепочек, основанных на углеводородных ресурсах.

Если вести речь о создании автотранспортной инфраструктуры, то многочисленные положительные результаты по созданию прототипов водородных автомобилей не являются показателем готовности отрасли и, тем более, общества [26]. Вызывает сомнение то, что это производство может быть массовым по объективным причинам. Во-первых, для обеспечения эксплуатации водородного транспорта требуются заправки, создание которых проблематично с учетом свойств газа (реакционная способность и высокая горючесть) [7]. Во-вторых, объемные характеристики водорода делают его менее привлекательным даже по сравнению с бензином [21].

Необходимо понимать, что обширное использование водородных технологий несет колоссальные риски для общества. Это касается как различных проектов автотранспортной инфраструктуры [24], так и трубопроводной доставки газа [20, 30].

Процессы производства, транспортировки и использования водорода в первую очередь требуют наличия высококвалифицированных и подготовленных кадров, которые смогут обеспечить безопасность функционирования таких систем. Кроме того, необходим ряд жестких требований, стандартов и нормативов, обеспечивающих безопасность. В настоящий момент таких механизмов отраслевого регулирования в мировой практике нет.

Таким образом, в условиях геополитического противостояния активное продвижение водородных технологий на уровень глобальной энергосистемы для замещения угля, нефти и газа, а также выделение колоссальных ресурсов ЕС на такие программы представляется преимущественно политической, нежели экономической или экологической инициативой.

Заключение. Для понимания процессов обеспечения всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам глобальной энергии требуются глубокие знания о поиске и внедрении передовых технологий, способствующих ускорению энергетического перехода.

Рассмотрение водорода в рамках политики снижения углеродоемкости ЕС в качестве энергоносителя и средства хранения избыточной энергии требует междисциплинарного подхода и интегрального мышления, не ограниченного аналитическим инструментарием оценки его экологических характеристик. Фрагментарный анализ ситуации, без учета свойств водорода как химического элемента, искажает реальную картину и, в случае с прогнозированием водородной инфраструктуры, может привести к завышенным ожиданиям технологических и технических возможностей. Интегральный подход к этому вопросу позволит организовать и согласовать отдельные научные знания о водороде как о ресурсе глобальной энергетики, потенциал которого может быть реализован в долгосрочной перспективе.

Односторонняя и сравнительно простая политика поддержки одной группы технологий на основе водорода оказывает существенное негативное влияние на формирование и реализацию научно-обоснованных портфельных энергетических стратегий [33], которые учитывали бы не только потребности экологии, но и возможности научно-технического прогресса.

В статье выполнен междисциплинарный анализ состоятельности убеждений, что вопреки химическим и физическим особенностям водород может рассматриваться как ресурс глобальной энергетики. На основе этого анализа сделаны следующие выводы.

1. Сырьевой сектор играет одну из ведущих ролей в достижении целей устойчивого развития мировой экономики. Наблюдаемые сегодня тенденции интенсификации энергогенерации на

DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5

основе ВИЭ и вовлечения в процессы энергоснабжения водорода могут оказаться нереализуемыми инициативами в силу объективных недостатков существующих технологий.

2. В большинстве современных исследований стоимость водорода определяется на основе отдельных этапов производственно-логистической цепочки, либо их комбинаций (производство, транспортировка, хранение), однако практически не рассматриваются вопросы, связанные с необходимостью модернизации всей энергетической инфраструктуры региона внедрения проекта. В рамках такой модернизации следует принимать в расчет не только ресурсоемкость замены отдельных узлов энергораспределительной сети, но и негативное влияние водорода на металлические конструкции и, как следствие, снижение срока их эксплуатации, что имеет прямое влияние на финансовые результаты таких проектов.

3. Влияние водорода на различные металлы до сих пор до конца не изучено. В связи с этим возникают проблемы отсутствия международных стандартов безопасности и правил использования водородной инфраструктуры. Такие правила необходимы для создания полноценной системы энергоснабжения, особенно, если речь идет о международных поставках, так как при увеличении концентрации водорода в транспортируемой газовой смеси существенно возрастает и ее взрывоопасность.

4. Дискуссии о конкурентоспособности отдельных этапов технологических цепочек водородной энергетики ведутся на протяжении десятилетий. Объединение технологий со сравнительно низкими КПД (например ВИЭ – электричество – водород – транспортировка – электричество) приведет к синергетическому падению эффективности системы в целом, что делает ее конкурентоспособность по сравнению с традиционными углеводородными ресурсами, как минимум, спорной.

5. Ранее наиболее амбициозные из реализуемых стратегий развития зеленой энергетики строились на комбинации ВИЭ и углеводородных ресурсов (преимущественно природного газа), в результате чего возможно было достичь эколого-экономического баланса энергетической системы. С практическим воплощением водородной стратегии этот эколого-экономический баланс будет потерян, так как «водородное звено» либо катастрофически снижает экономическую эффективность технологической цепочки, в том числе за счет необходимости обеспечения целого комплекса мер безопасности инфраструктуры, либо приводит к дополнительным экологическим последствия, пример чего показал опыт компании Enel.

6. Несмотря на перспективность водорода на долгосрочных горизонтах планирования, в настоящий момент уровень готовности мировой экономики к развитию водородной инфраструктуры еще ниже, чем у возобновляемой энергетики. Полностью отсутствуют механизмы функционирования рынков, технологии и инфраструктура, позволяющие эффективно осуществлять производство, распределение и хранение водорода, наблюдаются колоссальные проблемы с безопасностью использования и характерные для технологий, находящихся на начальных этапах развития.

Таким образом, в статье сделана попытка вовлечь в дискуссионное поле ученых и практиков для обширного обсуждения и проведения совместных междисциплинарных исследований, направленных на выработку комплексного подхода к пониманию роли водорода в будущей глобальной энергетической системе. Выделенные теоретические и практические аспекты не позволяют говорить о реальной возможности внедрения общедоступной водородной энергетики в ближайшей перспективе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности механизма коррозионного растрескивания под напряжением металла труб в средах, содержащих сероводород и диоксид углерода / К.Б.Конищев, А.М.Семенов, А.С.Чабан, Н.А.Лобанова, Р.В.Кашковский // Вести газовой науки. 2019. № 3 (40). С. 60-66.

2. Перспективы промышленной добычи метана в условиях шахты им. В.М.Бажанова с использованием вертикальных скважин, пробуренных с поверхности / В.Р.Алабьев, В.Д.Ашихмин, О.В.Плаксиенко, Р.А.Тишин // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 3-9. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.3

3. *Юрак В.В.* Против устойчивого развития: сценарии будущего / В.В.Юрак, А.В.Душин, Л.А.Мочалова // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 242-247. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.242

4. *Alekseenko V.A.* Metallisation and environmental management of mining site soils / V.A.Alekseenko, M.A.Pashkevich, A.V.Alekseenko // Journal of Geochemical Exploration. 2017. Vol. 174. P. 121-127.

5. *Acar C.* Review and evaluation of hydrogen production options for better environment / C.Acar, I.Dincer // Journal of cleaner production. 2019. Vol. 218. P. 835-849. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.046

6. *Acar C.* Sustainability analysis of different hydrogen production options using hesitant fuzzy AHP / C.Acar, A.Beskese, G.T.Temur // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. Iss. 39. P. 18059-18076. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.024

7. *Apostolou D.* A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure / D.Apostolou, G.Xydis // Current status and future prospects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 113. P. 109292. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109292

8. *Cetinkaya E.* Life cycle assessment of various hydrogen production methods / E.Cetinkaya, I.Dincer, G.F.Naterer // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. № 3. P. 2071-2080.

9. Comparison of Hydrogen Transportation Methods for Hydrogen Refueling Station / J.Ma, S.Liu, W.Zhou, X.Pan // Journal of Tongji University (Natural Science). 2008. Vol. 36. № 5. P. 615-619.

10. Compact. U.G. KPMG. SDG Industry Matrix. 2015. URL: https://home.kpmg/content/dam/kpmg/be/pdf/Markets/sdg-industry-matrix-industrial-manufacturing.pdf

11. *Dawood F.* Hydrogen production for energy: An overview / F.Dawood, M.Anda, G.M.Shafiullah // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. № 7. P. 3847-3869. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059

12. *Dincer I.* Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability / I.Dincer, C.Acar // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40. Iss. 34. P. 11094-11111.

13. Effect of Hydrogen Partial Pressure on the Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Type304 Stainless Steel in High-pressure H_2/Ar Mixed Gas / Koide Kenichi, Minami Takao, Anraku Toshirou, Akihiro Iwase, Inoue Hiroyuki // ISIJ International. 2015. Vol. 55. Iss. 11. P. 2477-2482. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-232

14. ENEL's Fusina zero emission combined cycle: experiencing hydrogen combustion / I.Brunetti, N.Rossi, S.Sigali, G.Sonato, S.Cocchi, R.Modi // Powergen Europe. Amsterdam. 2010.

15. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review / A.M.Abdalla, S.Hossain, O.B.Nisfindy, A.T.Azad, M.Dawood, A.K.Azad // Energy conversion and management. 2018. Vol. 165. P. 602-627.

16. *Hosseini S.E.* Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy / S.E.Hosseini, M.A.Wahid // International Journal of Energy Research. 2019. Vol. 44. Iss. 6. P. 4110-4131. DOI: org/10.1002/er4930

17. Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies / Edited by Ke Liu, Chunshan Song. VeluSubramani. John Wiley & Sons, 2010. 564 p.

18. Hydrogen as an energy vector / Z.Abdin, A.Zafaranloo, A.Rafiee, W.Mérida, W.Lipiński, K.R.Khalilpour // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 120. № 109620. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109620

19. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: A critical review / Z.Labidine Messaoudani, F.Rigas, M.D.B.Hamid, C.R.C.Hassan // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. № 39. P. 17511-17525. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.171

20. *Karwat H.* Ignitors to mitigate the risk of hydrogen explosions – A critical review // Nuclear engineering and design. 1990. Vol. 118. № 2. P. 267-271. DOI: 10.1016/0029-5493(90)90064-5

21. *Litvinenko V.* The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas // Resources. 2020. Vol. 9. № 5. P. 59-81. DOI: 10.3390/resources9050059

22. *Li L.* Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review / L.Li, H.Manier, M.A.Manier // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 103. P. 342-360. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.060

23. Lifetime simulation of thermo-mechanically loaded components / M.Riedler, H.Leitner, B.Prillhofer et al. // Meccanica. 2007. Vol. 42. P. 47-59. Doi.org/10.1007/s11012-006-9020-z

24. Leakage-type-based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA / J.Sakamoto, R.Sato, J.Nakayama, N.Kasai, T.Shibutani, A.Miyake // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. Iss. 46. P. 21564-21570. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.060

25. *Moreno-Benito M.* Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development / M.Moreno-Benito, P.Agnolucci, L.G.Papageorgiou // Computers & Chemical Engineering. 2017. Vol. 102. P. 110-127. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.08.005

26. *Martin A.* Users in the design of Hydrogen Energy Systems: A systematic review / A.Martin, M.F.Agnoletti, E.Brangier // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. Iss. 21. P. 11889-11900. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.163

27. *Nagumo Michihiko.* Fundamentals of Hydrogen Embrittlement. Springer. Singapore. 2016. 239 p. DOI: 10.1007/978-981-10-0161-1

28. *Nikolaidis P.* A comparative overview of hydrogen production processes / P.Nikolaidis, A.Poullikkas // Renewable and sustainable energy reviews. 2017. Vol. 67. P. 597-611. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.044

29. *Romm J.J.* The hype about hydrogen: fact and fiction in the race to save the climate. Island Press, 2004. 256 p.

30. Risk identification for the introduction of advanced science and technology: A case study of a hydrogen energy system for smooth social implementation / S.Hienuki, K.Noguchi, T.Shibutani, M.Fuse, H.Noguchi, A.Miyake // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. Iss. 30. P. 15027-15040. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.234

31. Sandbag Climate Campaign CIC. URL: https://ember-climate.org/carbon-price-viewer (дата обращения 30.01.2020).

32. Syngas production, application and environmental impact / Edited by A. Indarto and J. Palguandi. New York: Nova Science Publishers, 2013. 365 p.

33. *Schmidt T.S.* Measuring the temporal dynamics of policy mixes–An empirical analysis of renewable energy policy mixes' balance and design features in nine countries / T.S.Schmidt, S.Sewerin // Research Policy. 2019. Vol. 48. Iss. 10. № 103557. DOI: 10.1016/j.respol.2018.03.012

34. The cost of pipelining climate change mitigation: An overview of the economics of CH_4, CO_2 and H_2 transportation / B.C.C.van der Zwaan, K.Schoots, R.Rivera-Tinoco, G.P.J.Verbong // Applied Energy. 2011. Vol. 88. № 11. P. 3821-3831.

35. *Tcvetkov P.* The Changing Role of CO_2 in the Transition to a Circular Economy: Review of Carbon Sequestration Projects / P.Tcvetkov, A.Cherepovitsyn, S.Fedoseev // Sustainability. 2019. Vol. 20. Iss. 11. № 5834. DOI: 10.3390/su11205834

36. The measure on mitigating hydrogen risk during LOCA accident in nuclear power plant / X.Meng, X.Lyu, B.Wang, S.Liu, Y.Yu, Z.Guo // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 136. № 107032. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.107032

37. *Winter C.J.* Hydrogen energy – a “sustainable development” towards a world energy supply system for future decades / C.J.Winter, J.Nitsch // International Journal of Hydrogen Energy. 1989. Vol. 14. № 11. P. 785-796.

38. *Zgonnik V.* The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 203. P. 103140. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103140

Авторы: **В.С.Литвиненко,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *rectorat@spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **П.С.Цветков,** *канд. экон. наук*, *доцент*, *Tsvetkov_PS@pers.spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **М.В.Двойников,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *dvoynikov_mv@pers.spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Г.В.Буслаев,** *канд. техн. наук*, *доцент*, *buslaev_gv@pers.spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья поступила в редакцию 13.05.2020.
Статья принята к публикации 24.06.2020.