

<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-167-176>

Развитие «зеленой» водородной энергетики в европейской части Российской Федерации

Э.Р. Зверева  , И.Г. Ахметова , А.И. Назаров, А.Р. Нурисламова

Казанский государственный энергетический университет,
420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, Республика Татарстан, Российская Федерация
 belvira6@list.ru

Аннотация. На пути развития водородной энергетики в Российской Федерации возник ряд серьезных проблем и вопросов в связи с инновационностью данной отрасли экономики. Эти проблемы включают в себя отсутствие опыта производства, хранения и транспортировки «зеленого» водорода. В результате внедрения «Концепции развития водородной энергетики» Российская Федерация должна стать крупнейшим экспортером водорода к 2050 г. Данная концепция оценивает объемы будущего производства водорода к 2024 г. – 200 тыс. т, 2035 г. – от 2 до 12 млн т и 2050 г. – от 15 до 50 млн т. На данный момент существуют проекты создания «зеленого» водорода электролизом воды на гидроэлектростанциях, также в Российской Федерации уже существуют и используются отдельные способы хранения водорода, но полностью отсутствует транспортная инфраструктура. В связи с этим для создания транспортной инфраструктуры рассмотрены и актуализированы пути транспортировки «зеленого» водорода с использованием экономических расчетов. Для оценки рентабельности создана инфраструктура и маршруты для транспортировки «зеленого» водорода как экспортного сырья, производимого на Нижнекамской ГЭС (г. Набережные Челны, республика Татарстан, Россия) в страны Евросоюза. В качестве транспортной инфраструктуры рассмотрены водные, наземные и трубопроводные пути, а также трассы следования груза. Произведена оценка показателей, характеризующих экономическую эффективность транспортировки «зеленого» водорода водным, железнодорожным и автомобильным транспортом, трубопроводными путями. Рассчитаны сравнительные сроки окупаемости транспортировки водорода различными видами транспорта по их основным трассам в зависимости от рыночной стоимости водорода.

Ключевые слова: «зеленый» водород, производство, транспортировка, стоимость, срок окупаемости, технология, гидроэлектростанция

Для цитирования: Зверева Э.Р., Ахметова И.Г., Назаров А.И., Нурисламова А.Р. Развитие «зеленой» водородной энергетики в европейской части Российской Федерации. *Экономика промышленности*. 2022;15(2):167–176. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-167-176>

Development of “green” hydrogen energy in the European part of the Russian Federation

E.R. Zvereva  , I.G. Akhmetova , A.I. Nazarov, A.R. Nurislamova

Kazan State Energy University,
51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Republic of Tatarstan, Russian Federation
 belvira6@list.ru

Abstract. The development of hydrogen energy in the Russian Federation has been interfered by a number of serious problems and issues connected with the innovative nature of this sector of economics. The problems include lack of experience in production, storage and transportation of “green” hydrogen. The development results within the Concept for the development of hydrogen energy present the Russian Federation as the largest exporter of hydrogen by 2050.

The Concept estimates the future hydrogen production volumes to be as high as 200,000 tons by 2024, from 2 to 12 million ton by 2035 and from 15 to 50 million ton by 2050. Currently, there are projects on producing “green” hydrogen through electrolysis of water at hydroelectric stations. Moreover, there are different methods of hydrogen storage used in the Russian Federation. However, there is no transportation infrastructure for “green” hydrogen. Therefore, in order to build up transportation infrastructure the authors use economic calculations to consider and actualize the routes for transportation of the “green” hydrogen. To evaluate the profitability the infrastructure and the routes were created for transporting the “green” hydrogen as the export raw material produced in the Niznekamskaya HES (Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russia) to the EU countries. The authors consider waterways, land routes and pipelines for delivering the “green hydrogen” as the transportation facilities and the cargo routes. They evaluate the indicators which characterize the “green” hydrogen transportation by means of waterway, railway and automobile transport and pipelines. The authors estimate the comparative payback periods for the hydrogen transportation by means of waterway, railway and automobile transport and pipelines along their main routes according to the hydrogen market price.

Keywords: hydrogen, production, transportation, cost, payback period, technology, hydroelectric station

For citation: Zvereva E.R., Akhmetova I.G., Nazarov A.I., Nurislamova A.R. Development of “green” hydrogen energy in the European part of the Russian Federation. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2022;15(2):167–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-167-176>

«Россия» «зеленой» «водородной» «энергетики» «в европейской» «части» «Российской» «Федерации»

E.R. Зверева ✉, I.G. Ахметова, A.I. Назаров, A.R. Нурисламова

Казанский национальный исследовательский университет,
 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, 18
 ✉ 6elvira6@list.ru

Аннотация: В России «развитие» «водородной» «энергетики» «в европейской» «части» «Российской» «Федерации» «является» «одним» «из» «важных» «направлений» «развития» «экономики» «и» «энергетики» «страны». «В» «2021» «г.» «Правительством» «Российской» «Федерации» «была» «принята» «Концепция» «развития» «водородной» «энергетики» «в» «Российской» «Федерации»¹. «При» «ее» «внедрении» «возникает» «ряд» «серьезных» «вопросов» «и» «проблем». «Сформированные» «направления» «развития» «и» «ожидаемые» «результаты» «при» «ее» «реализации» «должны» «сделать» «Российскую» «Федерацию» «крупнейшим» «экспортером» «водорода» «к» «2050» «г.». «Будущие» «объемы» «производства» «водорода» «в» «России» «оцениваются» «к» «2024» «г.» «в» «200» «тыс.» «т.», «2035» «г.» «–» «от» «2» «до» «12» «млн» «т.» «и» «в» «2050» «г.» «–» «от» «15» «до» «50» «млн» «т.» [1]. «На» «пути» «развития» «водородной» «энергетики» «в» «Российской» «Федерации» «возникает» «ряд» «серьезных» «проблем» «и» «непростых» «вопросов». «Данные» «проблемы» «включают» «в» «себя»: «отсутствие» «опыта» «производства» «водорода», «и» «именно» ««зеленого»», «обладающего» «наибольшей» «востребованностью»

Ключевые слова: водород, производство, транспорт, стоимость, срок окупаемости, технология, гидроэлектростанция

Введение

В 2021 г. Распоряжением Правительства Российской Федерации была принята «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации»¹. При ее внедрении возникает ряд серьезных вопросов и проблем. Сформированные направления развития и ожидаемые результаты

при ее реализации должны сделать Российскую Федерацию крупнейшим экспортером водорода к 2050 г. Будущие объемы производства водорода в России оцениваются к 2024 г. в 200 тыс. т, 2035 г. – от 2 до 12 млн т и в 2050 г. – от 15 до 50 млн т [1]. На пути развития водородной энергетики в Российской Федерации возникает ряд серьезных проблем и непростых вопросов. Данные проблемы включают в себя: отсутствие опыта производства водорода, и именно «зеленого», обладающего наибольшей востребованностью

¹ Сайт Правительстве Российской Федерации. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYkZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf>

в будущем; особенности хранения «зеленого» водорода наиболее простым способом, как, например, в связанном виде, а также отсутствие опыта транспортировки водорода в чистом виде и, как следствие вышеперечисленного, отсутствие понимания целесообразности производства, транспортировки, хранения и использования «зеленого» водорода.

На данный момент существует несколько категорий водорода [2, 3]:

- «серый», в результате которого происходит выброс CO_2 в атмосферу, основным способом производства которого в данном случае является конверсия метана;
- выделяемый из «серого» водорода «бурый», произведенный из угля;
- «черный», произведенный из нефтепродуктов;
- «желтый», произведенный с помощью атомной энергии;
- «голубой», произведенный из природного газа, в этом случае углекислый газ накапливается в специальных хранилищах;
- «зеленый», произведенный с помощью возобновляемых источников энергии методом электролиза воды.

В качестве наиболее перспективных направлений использования водородных технологий можно выделить [4]:

- разработку и организацию серийного производства источников автономного электро- и теплоснабжения, систем аварийного (резервного) энергообеспечения и систем утилизации энергии электростанций в «провальные» часы на основе возобновляемых источников энергии с водородным аккумулированием;
- разработку и организацию серийного производства нового поколения установок газификации (переработки) биомассы, органических бытовых и промышленных отходов в целях получения синтез-газа (водорода), тепловой и электрической энергии;
- организацию производства нового экологически чистого универсального топлива на основе водородно-метановых смесей (для транспорта и стационарных энергетических установок, в том числе для систем распределенной генерации энергии);
- создание испытательно-демонстрационного полигона и центра сертификации (аттестации) водородных технологий и оборудования;
- разработку и организацию производства энергетических установок на основе твердополимерных и твердооксидных топливных элементов для специальных целей и др.

Предполагаемое применение водорода в Российской Федерации

Согласно принятой «Концепции развития водородной энергетики», тема транспортировки зеленого водорода в страны Европейского союза (ЕС) является актуальной, перспективной и экономически целесообразной.

Одним из основных потенциальных потребителей «зеленого» водорода являются страны ЕС [5], в которых приняты концепции нулевых выбросов CO_2 в атмосферу, а также Китай, являющийся основным потребителем водорода в мире на данный момент и в прогнозируемом будущем. Это связано с ростом производственных мощностей, требующих огромного количества энергии из различных источников, включая «зеленый» водород [6]. В связи с проблемами, связанными с транспортировкой «зеленого» водорода, наиболее приемлемым местом производства водорода для экспорта в страны ЕС является европейская часть Российской Федерации, а для Китая и азиатского региона – Восточная Сибирь.

Оценка рентабельности произведенного «зеленого» водорода в европейской части Российской Федерации

В связи с уникальным свойством – высокой проникающей способностью «зеленого» водорода, связанной с наименьшими размерами молекул, и сложными способами транспортировки, основными факторами, влияющими на его стоимость, являются [7]:

1. Себестоимость его производства. На данный момент, компании, владеющие проектами производства «зеленого» водорода, оценивают его себестоимость в районе 3 долл. США/кг.
2. Потери при хранении водорода предлагается снизить путем постоянной и непрерывной транспортировки водорода до потребителя.
3. Затраты на покупку специального транспорта или транспортных емкостей.
4. Затраты при транспортировке водорода, такие как потери в объемах водорода, траты на топливо для перевозящего водород транспорта.

Так как на данный момент времени в России не существует транспортной инфраструктуры для транспортировки водорода внутри страны и в другие страны [8], в качестве примера предложено рассмотреть создание инфраструктуры и маршрутов транспортировки «зеленого» водорода как экспортного сырья, производимого на Нижнекамской ГЭС (г. Набережные Челны, Республика Татарстан, Россия), в страны ЕС,

а именно в Германию. В качестве транспортной инфраструктуры рассмотрены водные, наземные и трубопроводные пути транспортировки водорода:

1. Транспортировка водорода речным путем из города Набережные Челны до портов Германии или морским путем из Санкт-Петербурга до портовых городов Германии.

2. Транспортировка водорода железнодорожным и автомобильным транспортом от Набережных Челнов до Германии (город Дрезден).

3. Транспортировка водородопроводом из города Набережные Челны до Германии или Санкт-Петербурга.

Стоит отметить, что морской путь из Санкт-Петербурга может существовать только совместно с другими способами транспортировки водорода, описанными выше (речной, авто- и железнодорожный).

При расчете окупаемости данных путей транспортировки взята себестоимость производства водорода 3 долл. США/кг и вариативная цена его на рынке от 5 до 10 долл. США/кг. Такой диапазон цен на водород выбран в связи с проведенным Международным советом по чистому транспорту исследованием при сценарии прямого подключения: электролизер получает электроэнергию непосредственно от возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Предполагается, что в этом случае цена на водород к 2050 г. составит 6 долл. США/кг для США и 10 долл. США/кг для стран ЕС [9].

Для расчета срока окупаемости видов транспортировки использована формула

$$T = \frac{C_{об} \cdot n}{Q \cdot \Pi \cdot (C_p^{H_2} - C_c^{H_2} - C_3)}, \quad (1)$$

где $C_{об}$ – цена оборудования для транспортировки, долл. США; n – количество оборудования для непрерывных поставок, шт.; Q – годовое производство водорода, кг; Π – потери при транспортировке водорода, %; $C_p^{H_2}$ – рыночная цена за кг водорода, долл. США; $C_c^{H_2}$ – себестоимость производства кг водорода, долл. США; C_3 – стоимость затрат при транспортировке, долл. США.

Одними из основных затрат при транспортировке водорода являются налоги, обслуживание и потребление топлива для различных маршрутов, которые позволят создать более полную экономическую картину транспортировки водорода. Для этого была определена формула (2) для расчета годовых затрат, связанных с потреблением топлива для водных и автомобильных маршрутов, и формула (3) для оценки стоимости транспортировки 1 кг водорода:

$$C_o = Q_T \cdot C_T, \quad (2)$$

где C_o – общая стоимость топлива, использованного при транспортировке, долл. США; Q_T – расход топлива за время маршрута, т; C_T – рыночная цена топлива, долл. США;

$$C_3 = \frac{C_o}{M}, \quad (3)$$

где M – водородная грузоподъемность транспорта, кг.

При использовании формулы расчета срока окупаемости в нее заложена непрерывность транспортировки водорода. Для этого построена формула (4), которая позволяет оценить количество транспорта, требуемого для непрерывной транспортировки до потребителя:

$$n = \frac{Q_{H_2}}{(365/t) \cdot M},$$

где Q_{H_2} – годовые объемы производства водорода, т; t – время маршрута, сут.

Транспортировка водорода

железнодорожным и автомобильным транспортом

В связи с небольшими объемами производства водорода на Нижнекамской ГЭС целесообразно транспортировать водород железнодорожным либо автомобильным транспортом. Оба маршрута имеют примерно одинаковую протяженность и время транспорта в пути, около 2–3 сут.

Одним из негативных факторов являются потери при транспортировке сжиженного водорода. Так, потери водорода при транспортировке железнодорожным транспортом с помощью цистерн постоянны и связаны с непрерывным испарением водорода и обусловлены выполнением необходимых технологических операций. При захлаживании автоцистерны, которое производится не менее двух раз в год, теряется до 30 % водорода от объема емкости. Потери от несовершенства вакуумной теплоизоляции цистерны составляют 0,5 %/сут. объема. При каждой заправке цистерн имеются потери, связанные с испарением первой порции водорода, и, по оценкам экспертов, они составляют около 4 %. Потери на создание перепада давления между установкой сжижения и емкостью составляют примерно 1,5 % [10].

На данный момент на рынке России уже существуют авто- и железнодорожные цистерны для сжиженного водорода, представленные ОАО «Криогенмаш». Также для транспортировки водорода железнодорожным транспортом

предлагается использование ISO-контейнеров со встроенными резервуарами для хранения водорода. Объем железнодорожных цистерн ОАО «Криогенмаш» составляет 100 м³, что позволяет транспортировать около 4 т водорода в каждой. Цена на данные цистерны составляет 200 тыс. долл. США, продолжительность маршрута – 6 сут. Для расчетов стоимости необходимо учитывать налоговый сбор при доставке грузов железнодорожными путями. Например, выбираем подходящий аналог налоговых сборов при доставке сжиженного газа для маршрута длиной в 2400 км, таким является путь Сургут–Саранск (2300 км). Для данного маршрута налоговый сбор составляет 7755 руб./т (103,4 долл. США/т) [11]. Из этого следует, что цена транспортировки будет составлять 0,103 долл. США/1 кг водорода. Количество вагонов-цистерн для непрерывной транспортировки можно рассчитать по формуле (4):

$$n = \frac{2500}{(365/6) \cdot 4} = 10,27 \text{ шт.}$$

Следовательно, необходимо 10 вагонов-цистерн.

Срок окупаемости данного вида транспортировки при цене водорода в 10 долл. США/кг, рассчитывается по формуле (1):

$$T = \frac{200000 \cdot 10}{2500 \cdot 0,9 \cdot (10 - 3 - 0,103)} = 0,128 \text{ лет} = 47 \text{ сут.}$$

Таким образом, срок окупаемости составит 47 сут. (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Срок окупаемости железнодорожного и автотранспортного маршрута

Payback period of the railway and motor transport route

Показатель, сут.	Рыночная цена водорода, долл. США/кг					
	5	6	7	8	9	10
Срок окупаемости железнодорожного маршрута	171	112	83	66	55	47
Срок окупаемости автотранспортного маршрута	516	284	213	170	142	122

Представленные ОАО «Криогенмаш» автоцистерны ППЦ-45 имеют объем 45 м³ и вмещают в себя 2,7 т водорода [12]. Их цена на рынке вместе с грузовиком-тягачом будет составлять примерно 350 тыс. долл. США. Продолжительность маршрута примем за 6 сут. Затраты на транспортировку в данном случае, без учета различных налоговых сборов, будут заключаться в потребле-

нии топлива. Так, тягач марки «Мерседес» потребляет около 22 л дизельного топлива на 100 км, следовательно, за весь маршрут будет потрачено примерно 1050 л дизельного топлива. Произведя расчет по формулам (2) и (3), при цене дизельного топлива 0,9 долл. США/литр стоимость доставки 1 кг водорода составит 0,35 долл. США:

$$C_0 = 1050 \cdot 0,9 = 945 \text{ долл. США};$$

$$C_3 = \frac{945}{2700} = 0,35 \text{ долл. США/кг H}_2.$$

Количество автоцистерн, рассчитываем по формуле (4):

$$n = \frac{2500}{(365/6) \cdot 2,7} = 15,22 \text{ шт.}$$

Следовательно, количество автоцистерн – 15 шт.

Срок окупаемости данного вида транспортировки при цене водорода в 10 долл. США/кг рассчитывается по формуле (1):

$$T = \frac{350000 \cdot 15}{2500 \cdot 0,9 \cdot (10 - 3 - 0,35)} = 0,333 \text{ лет} = 122 \text{ сут.}$$

Таким образом, срок окупаемости составит 122 сут. (см. табл. 1).

Проведя расчеты разреза цен на 1 кг водорода от 5 до 10 долл. США, отчетливо видим, что наиболее дешевыми оказались способы транспортировки железнодорожным и автомобильным транспортом. Однако стоит отметить, что с увеличением времени транспортировки до пункта назначения потери будут расти, а следовательно, возрастет и срок окупаемости данных способов. Также стоит отметить, что не были учтены 30 % потерь от объема автоцистерны в год в результате ее захлаживания.

Транспортировка водорода водородопроводом

В трубопроводах низкого давления (0,1 МПа и ниже) скорость газа составляет 10 м/с, а в магистральных (68 МПа) – в 2 раза выше. При одинаковых диаметрах трубы и перепаде давления скорость потока водорода почти в 3 раза выше, чем у метана. Удельная стоимость транспортировки водорода снижается с увеличением дальности, хотя рост сопротивления потоку частично компенсируется различием в вязкости. Для передачи по трубопроводу равного количества газа для водорода требуется примерно в 4,6 раза больше энергии, чем для природного газа, и при транспортировке на расстояние 2,54 тыс. км будет передано только 8070 % исходного водорода (рис. 1) [13].

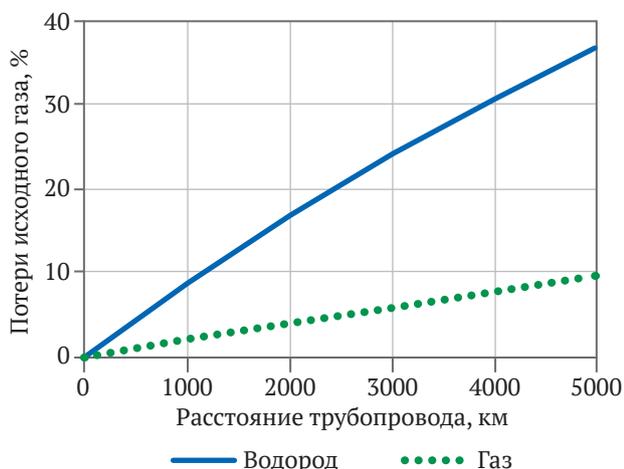


Рис. 1. Зависимость потерь исходного газа при перекачке от расстояния трубопровода

Fig. 1. Dependence of initial gas losses during pumping on the distance of the pipeline

Создание нового водородопровода, дублирующего газопроводную магистраль из Набережных Челнов до Санкт-Петербурга длиной около 1250 км, будет иметь около 10 % потерь. Примерную оценку создания данного трубопровода можно сделать по системе газопроводов «Северный поток», где стоимость 1 км газопровода составила 3,9 млн долл. США. Из этого можно сделать вывод, что предположительная оценка водородопровода составит почти 5 млрд долл. США. Оценка стоимости водородопровода до Германии, произведенная таким же образом, имеющая длину в 2500 км, при том, что потери при транспортировке ожидаются около 20 %, составит 10 млрд долл. США.

Из произведенных расчетов срок окупаемости данных водородопроводов при цене на водород в 10 долл. США/кг значительно больше по сравнению с другими путями транспортировки водорода (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Срок окупаемости водородопроводов
Payback period for pipelines

Показатель, год	Рыночная цена водорода, долл. США/кг					
	5	6	7	8	9	10
Срок окупаемости водородопровода из Набережных Челнов до Германии	2535	1682	1258	1005	837	717
Срок окупаемости водородопровода из Набережных Челнов до Санкт-Петербурга	1118	744	557	445	371	318

Формирование единой трубопроводной водородной энергетической системы ГЭС, расположенных в Европейской части России (Загорская, Нижегородская, Чебоксарская, Камская, Жигулевская, Саратовская, Волжская, Чиркейская, Воткинская и Нижнекамская ГЭС) (рис. 2), с созданием на каждой ГЭС производств «зеленого» водорода позволит увеличить годовое производство до 25 тыс. т, что в свою очередь увеличит сроки окупаемости данного (табл. 3).



Рис. 2. Предполагаемая общая водородная энергетическая система ГЭС европейской части России

Fig. 2. Proposed shared hydrogen energy system European part of Russia

Таблица 3 / Table 3

Срок окупаемости водородопровода, соединяющего ГЭС европейской части России
Payback period of a hydrogen pipeline connecting HPSs in the European part of Russia

Показатель, год	Рыночная цена водорода, долл. США/кг						
	5	6	7	8	9	10	20
Срок окупаемости водородопровода, соединяющего ГЭС Европейской части России	436	289	216	173	144	123	51

Общая протяженность российской части водородопровода будет составлять около 2800 км. Стоимость проекта составляет ~ 15 млрд долл. США.

Создание государственной программы субсидирования производства и транспортировки водорода позволит значительно снизить сроки окупаемости проекта [14].

Транспортировка водорода водным путем

На данный момент в мире уже существует морское судно, которое предназначено для транспортировки сжиженного водорода. Данным судном является японский «Suiso Frontier» фирмы Kawasaki Heavy Industries, которое было спущено на воду в 2020 г. [15]. Характеристики данного судна: водоизмещение – 9000 т, максимальная вместимость сжиженного водорода – 75 т. Стоимость данного проекта составила 350 млн долл. США. По заявлению Kawasaki Group потери при транспортировке водорода данным судном сведены к нулю [16].

Построение судна подобного типа, предназначенное для речной навигации транспортировки водорода, должно иметь не более 5000 т водоизмещения. Предположительная оценка построения данного судна составляет 200 млн долл. США, а его транспортная возможность – 30 т жидкого водорода.

На данный момент средняя длительность морской навигации из порта Санкт-Петербурга до портовых городов Германии составляет 7 сут., следовательно, время одного маршрута – 14 сут. За это время кораблю потребуется 400 т судового топлива – флотского мазута. Речная навигация от Набережных Челнов до Санкт-Петербурга составляет 10 сут., вкпе с морской навигацией длительность составит 17 сут., следовательно, время одного маршрута будет примерно 34 сут. За это время аналогичные суда затрачивают около 600 т флотского мазута [17]. Одна тонна флотского мазута марки Ф-5 на данный момент стоит около 20 тыс. руб., что при цене доллара в 104 руб. (курс доллара США на 23.03.2022), составляет 192 долл. США/т.

Так, стоимость доставки 1 кг водорода составит (формулы (2) и (3)) 1,41 долл. США для морского пути из Санкт-Петербурга до Германии и 5,32 долл. США для комбинированного пути (речного и морского из Набережных Челнов до Германии):

$$C_0 = 400 \cdot 266 = 106\,400 \text{ долл. США};$$

$$C_0 = 600 \cdot 266 = 159\,600 \text{ долл. США};$$

$$C_3 = \frac{106\,400}{75\,000} = 1,41 \text{ долл. США/кг H}_2;$$

$$C_3 = \frac{159\,600}{30\,000} = 5,32 \text{ долл. США/кг H}_2.$$

Рассчитаем необходимое число судов для непрерывного цикла транспортировки из Санкт-Петербурга до Германии морским и речным путем соответственно:

$$n = \frac{2500}{(365/14) \cdot 75} = 1,27 \text{ шт.};$$

$$n = \frac{2500}{(365/34) \cdot 30} = 7,76 \text{ шт.}$$

Таким образом, потребуется 1 судно класса «Suiso Frontier», а также 8 речных судов, аналогов «Suiso Frontier» для маршрута из Набережных Челнов до Германии.

Используя полученные данные, можно произвести расчет окупаемости данных видов транспортировки. В случае транспортировки морским и речным путем без учета транспортировки до Санкт-Петербурга, исходя из формулы (1), срок окупаемости при рыночной цене водорода 10 долл. США/1 кг составит соответственно:

$$T = \frac{350 \cdot 10^6 \cdot 1}{2500 \cdot 1 \cdot (10 - 3 - 1,41)} = 25,044 \text{ лет};$$

$$T = \frac{200 \cdot 10^6 \cdot 8}{2500 \cdot 1 \cdot (10 - 3 - 5,32)} = 380,9 \text{ лет.}$$

Исходя из проведенных расчетов при рыночной цене килограмма водорода в 10 долл. США морской маршрут, с некоторыми исключениями, окупится примерно за 25 лет, а речной – лишь спустя 381 год. Но, проведя расчеты разреза цен на 1 кг водорода от 5 до 10 долл. США, можно установить, что речной вид транспортировки имеет отрицательные значения окупаемости при рыночной цене водорода за килограмм от 5 до 8 долл. США, что фактически делает данный вид перевозки водорода убыточным и нецелесообразным (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Срок окупаемости водных маршрутов

Payback period of water routes

Показатель, год	Рыночная цена водорода, долл. США/кг					
	5	6	7	8	9	10
Срок окупаемости речного маршрута	-193	-276	-485	-2000	941	381
Срок окупаемости морского маршрута	237	88	54	39	31	25

В связи с отсутствием инвестиционной привлекательности речного маршрута при использовании речных аналогов «Suiso Frontier» предлагается исследовать и рассмотреть транспортировку «зеленого» водорода путем речных контейнерных перевозок посредством загрузки его в ISO-контейнеры. Данный способ позволит аккумулировать «зеленый» водород с объектов Волго-Камско-

го каскада и актуализировать общую водородную энергетическую систему ГЭС (см. рис. 2) путем изменения транспортировки с трубопроводной на речную. Это позволит уменьшить потери, связанные с транспортировкой водорода на большие расстояния, а также даст возможность использовать суда с более простой конструкцией.

Заключение

На данный момент производство «зеленого» водорода находится на начальном этапе развития. Научно-технический прогресс в этом направлении позволит снизить себестоимость производства водорода путем снижения затрат на его транспортировку и хранение.

Исходя из произведенных оценок предложенных транспортных маршрутов, наиболее дешевыми и доступными в технологичном плане являются железнодорожные маршруты. Однако этот вид транспорта является лишь частично доступным для транспортировки водорода, так как не везде существует требуемая железнодорожная инфраструктура.

К незначительно уступающим по экономической эффективности железнодорожному транспорту относится автотранспорт, так же являющийся дешевым и доступным видом транспортировки водорода.

Транспортировка водорода водородопроводами, исходя из произведенных оценок, является малоприменимой для малых производственных объемов водорода. Однако экономическая эффективность водородопровода увеличивается при его более масштабном применении. Создание общей водородной энергетической системы для европейской части России увеличит объемы производства «зеленого» водорода в стране, что позволяет оценить данный вид транспортировки как основной в будущем.

Водные маршруты транспортировки заметно уступают другим видам транспорта: речной способ представляется совсем не жизнеспособным, а морской выглядит непомерно дорогим. Однако эти способы транспортировки также имеют определенные перспективы. Например, создание речных контейнерных перевозок «зеленого» водорода посредством загрузки его в более продвинутые ISO-контейнеры по объектам Волго-Камского каскада позволит заменить общую водородную энергетическую систему ГЭС с трубопроводной на речную. Это позволит уменьшить потери от протяженности трубопровода, а также позволит использовать суда с более простой конструкцией, контейнеровозы, и тем самым снизить стоимость судна, и, следовательно, его окупаемость.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р «Об утверждении Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации». URL: <https://docs.cntd.ru/document/608226547>
2. Sperling D., Cannon J. Hydrogen energy transition: moving toward the post petroleum age in transportation. Amsterdam; Boston: Elsevier; 2004. 266 p.
3. Anwar S., Khan F., Zhang Y., Djire A. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(63):32284–32317. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.191>
4. Фатеев В.Н. Водородные технологии для инновационной энергетики. *Компетентность*. 2011;7(88):4–6.
5. World's first liquefied hydrogen carrier SUIISO FRONTIER launches building an international hydrogen energy supply chain aimed at carbon – free society. 11 December 2019. URL: https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487 (дата обращения: 25.02.2022).
6. Kevin T.U. Prospects of a hydrogen economy with Chinese characteristics. 21 October 2020. *Études de l'Ifri*. URL: <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/prospects-hydrogen-economy-chinese-characteristics> (дата обращения: 25.02.2022).
7. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике: учеб. пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета; 2014. 229 с.
8. Gusev A.L., Zhizni S.Z., Timokhov V.M. Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(56):31353–31366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>
9. Japan's ambitious hydrogen strategy goes on maiden voyage. 27 April 2020. URL: <https://www.en-former.com/en/japans-ambitious-hydrogen-strategy-goes-on-maiden-voyage/> (дата обращения: 25.02.2022).
10. Christensen A. Assessment of hydrogen production costs from electrolysis: United States and Europe. 4 June 2020. URL: <https://theicct.org/publication/assessment-of-hydrogen-production-costs-from-electrolysis-united-states-and-europe/> (дата обращения: 02.03.2022).
11. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубровкин Н.Ф. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справ. изд. М.: Химия; 1989. 672 с.

12. Железнодорожные тарифы. БТЦ Сургут с 20.12.2021. URL: <https://gnpholding.gazprom.ru/processed-gas-products/lpg/tariff/> (дата обращения: 25.02.2022)

13. Алексеева С.И., Козлов Р.О., Самсонов В.Н., Фатеев О.К. Системы хранения водорода. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2009;4(10):68–75.

14. Раменский А.Ю. Водород в качестве топлива: предмет и цели стандартизации. *Альтернативная энергетика и экология*. 2015;(1(165)):33–44.

15. Алексеева С.И., Козлов Р.О., Фатеев О.К. Транспортировка водорода. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011;3(21):18–24.

16. Каталог Криогенмаш 2008. URL: https://www.studmed.ru/view/katalog-kriogenmash-2008_feb46cb3550.html?page=3 (дата обращения: 25.02.2022).

17. Волго-Балтийский канал (Волго-Балт) – карта и описание, шлюзы и гидроузлы, характеристики и история. URL: <https://www.locman.net/volgobalt.htm> (дата обращения: 18.02.2022).

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation No. 2162-r dated August 5, 2021 “On Approval of the Concept of Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation”. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/608226547>

2. Sperling D., Cannon J. Hydrogen energy transition: moving toward the post petroleum age in transportation. Amsterdam; Boston: Elsevier; 2004. 266 p.

3. Anwar S., Khan F., Zhang Y., Djire A. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(63):32284–32317. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.191>

4. Fateev V.N. Hydrogen technologies for innovative energy. *Kompetentnost'*. 2011;7(88):4–6. (In Russ.)

5. World’s first liquefied hydrogen carrier SUIISO FRONTIER launches building an international hydrogen energy supply chain aimed at carbon – free society. December 11, 2019. (In Russ.). URL: https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487 (accessed on 25.02.2022).

6. Kevin T.U. Prospects of a hydrogen economy with Chinese characteristics. October 21, 2020. *Études de l’Ifri*. URL: <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/prospects-hydrogen-economy-chinese-characteristics> (accessed on 25.02.2022).

7. Radchenko R.V., Mokrushin A.S., Tyulpa V.V. Hydrogen in power engineering. Ekaterinburg: Ural Univ. Publ.; 2014. 229 p. (In Russ.)

8. Gusev A.L., Zhizni S.Z., Timokhov V.M. Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(56):31353–31366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>

9. Japan’s ambitious hydrogen strategy goes on maiden voyage. April 27, 2020. URL: <https://www.enformer.com/en/japans-ambitious-hydrogen-strategy-goes-on-maiden-voyage> (accessed on 25.02.2022).

10. Christensen A. Assessment of hydrogen production costs from electrolysis: United States and Europe. June 4, 2020. URL: <https://theicct.org/publication/assessment-of-hydrogen-production-costs-from-electrolysis-united-states-and-europe> (accessed on 02.03.2022).

11. Hamburg D.Yu., Semenov V.P., Dubrovkin N.F., Hydrogen. Properties, receipt, storage, transportation, application. Moscow: Khimiya; 1989. 672 p. (In Russ.)

12. Railway fares. BC Surgut from 20.12.2021. (In Russ.). URL: <https://gnpholding.gazprom.ru/processed-gas-products/lpg/tariff/> (accessed on 25.02.2022).

13. Alekseeva S.I., Kozlov R.O., Samsonov V.N., Fateev O.K. Hydrogen storage systems. *Transport na alternativnom toplive*. 2009;(4(10)):68–75. (In Russ.)

14. Ramenskiy A.Yu. Hydrogen as a fuel: the object and the purpose of standardization. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2015;(1(165)):33–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.01.03>

15. Alekseeva S.I., Kozlov R.O., Fateev O.K. Transportation of hydrogen. *Transport na alternativnom toplive*. 2011;3(21):18–24. (In Russ.)

16. Cryogenmash Catalog 2008. (In Russ.). URL: https://www.studmed.ru/view/katalog-kriogenmash-2008_feb46cb3550.html?page=3 (accessed on 25.02.2022).

17. Volga-Baltic Canal (Volgo-Balt) – map and description, locks and hydroelectric facilities, characteristics and history. (In Russ.). URL: <https://www.locman.net/volgobalt.htm> (accessed on 18.02.2022).

Информация об авторах

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии в энергетике и нефтегазопереработке, Казанский государственный энергетический университет, 420066, Республика Татарстан, Казань, ул. Красносельская, д. 51, Республика Татарстан, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-6312>; e-mail: 6elvira6@list.ru

Information about authors

Elvira R. Zvereva – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technologies in Energy and Oil and Gas Processing, Kazan State Energy University, 51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-6312>; e-mail: 6elvira6@list.ru

Ахметова Ирина Гареевна – д-р техн. наук, доцент, проректор по развитию и инновациям, заведующий кафедры экономики и организация производства, Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, Республика Татарстан, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-2005>; e-mail: irina_akhmetova@mail.ru

Назаров Алексей Игоревич – аспирант кафедры технологии в энергетике и нефтегазопереработке, Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, Республика Татарстан, Российская Федерация; e-mail: ialexnazarov@gmail.com

Нурисламова Аделя Раилевна – специалист по маркетингу, Управление научных исследований, инноваций и разработок, Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, Республика Татарстан, Российская Федерация; e-mail: adelya.fatikhova@mail.ru

Irina G. Akhmetova – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Vice-Rector for Development and Innovation, Head of the Department Economics and Organization of Production, Kazan State Energy University, 51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-2005>; e-mail: irina_akhmetova@mail.ru

Alexey I. Nazarov – Postgraduate Student of the Department of Technology in Energy and Oil and Gas Processing, Kazan State Energy University, 51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Republic of Tatarstan, Russian Federation; e-mail: ialexnazarov@gmail.com

Adelya R. Nurislamova – Marketing Specialist of the Department of Scientific Research, Innovation and Development, Kazan State Energy University, 51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Republic of Tatarstan, Russian Federation; e-mail: adelya.fatikhova@mail.ru

Поступила в редакцию **29.03.2022**; поступила после доработки **27.05.2022**; принята к публикации **29.05.2022**
Received **29.03.2022**; Revised **27.05.2022**; Accepted **29.05.2022**