

## Перспективы развития водородной энергетики на региональном примере

© 2024. А. М. Опарина, инженер, аналитик,  
И. В. Ильин, д. э. н., директор ВШБИ, зав. лабораторией,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,  
e-mail: annaoparina93@gmail.com

В связи с происходящими изменениями климата, важным фактором развития мировой энергетики является снижение её углеродного следа. Водородная энергетика может стать ответом на вопрос о переходе к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике. Статья содержит аналитический обзор перспективных методов производства водорода на примере региона – Саратовской области, его потенциальных потребителей в реальной и долгосрочной перспективе. Обзорный материал отобран при помощи анализа научных статей, опубликованных в различных базах данных, электронных библиотеках научных изданий и статей средств массовой информации, опубликованных в сети Интернет. Сделан вывод, что водород, произведённый в Саратовской области, в большей степени будет потребляться на этой же территории. Производство фосфатных удобрений и утилизация водородсодержащих газов в процессе риформинга нефти станут драйверами развития водородной энергетики в регионе. В долгосрочной перспективе развитие получит использование водорода в качестве топлива, а высокотехнологичный автономный водородный энергетический комплекс, который можно реализовать на Балаковской АЭС, будет способен производить и подавать электроэнергию в энергосистему в часы повышенной нагрузки на энергосистему. Отмечено, что Саратовская область имеет потенциал к производству биоводорода, получаемого путём переработки отходов сельского хозяйства. Государственные меры стимулирования производителей и потребителей водорода в регионе сыграют решающую роль в повышении и эффективности развития водородной энергетики в Саратовской области.

**Ключевые слова:** водородная энергетика, альтернативная энергетика, водород, биоводород, перспективы использования водорода, Саратовская область.

## Prospects of hydrogen energy development based on a regional example

© 2024. А. М. Опарина ORCID: 0000-0002-2043-1866  
I. V. Ilyin ORCID: 0000-0002-1834-4894

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia, 195251,  
e-mail: annaoparina93@gmail.com

In connection with ongoing climate change, an important factor in the development of the global energy is reducing its carbon footprint. Hydrogen energy may be the answer to the transition to environmentally friendly and resource-saving energy. The article presents an analytical review of promising methods of hydrogen production on the example of the Saratov region, as well as its potential consumers in the real and long term. The review content was selected by analyzing scientific articles published in various databases, electronic scientific libraries and media articles published on the internet. It was concluded that hydrogen produced in the Saratov region will be consumed to a greater extent in the same territory. The production of phosphate fertilizers and the utilization of hydrogen-containing gases in the oil reforming process will be the drivers of hydrogen energy development in the region. In the long term, the use of hydrogen as fuel will be developed. A high-tech autonomous hydrogen energy complex implemented at the Balakovo NPP will be capable of producing and supplying electricity to the electric power system during in the peak hours. It is noted that the Saratov region has the potential to produce biohydrogen obtained by processing agricultural waste. State measures to stimulate hydrogen producers and consumers in the region will play a decisive role in increasing the efficiency of hydrogen energy development in the Saratov region.

**Keywords:** hydrogen energy, alternative energy, biohydrogen, hydrogen, prospects for the use of hydrogen, Saratov region.

В настоящее время изменение климата является главным фактором, привлекающим внимание при обсуждении внесения изменений в повестку мировой экономики и энергетики. Снижение роста глобального потепления и выброса парниковых газов, переход к возобновляемым источникам энергии и в целом к зелёной энергетике является приоритетной задачей мирового сообщества.

Одним из приоритетов государственной энергетической политики Российской Федерации, изложенным в Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г., является переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике [1], которой является водородная энергетика.

Развитие водородной энергетики в России регулирует Концепция развития водородной энергетики в РФ, в которой говорится о водороде как об источнике накопления, хранения и доставки энергии, перспективном энергоносителе и инструменте для решения задач по развитию низкоуглеродной экономики и снижению антропогенного влияния на климат. Среди основных преимуществ водорода выделяют возможность его получения из различных источников и отсутствие выбросов углекислого газа при использовании в качестве энергоносителя [2].

К 2050 г. роль водорода в мировом энергетическом секторе может оказаться сопоставима с ролью, которую сейчас играет ископаемое топливо, кроме того, это один из наиболее эффективных способов создания долгосрочных хранилищ энергии [3].

Перспективными областями применения водорода как энергоресурса являются производство тепло- и электроэнергии, транспортная отрасль, промышленное и бытовое применение, однако водородные технологии характеризуются высокой стоимостью, средним уровнем развития и сложностями с безопасностью его прямого использования и хранения. На сегодняшний день водород в РФ занимает третье место среди наиболее востребованных в промышленности газов, уступая в количественном отношении азоту и кислороду, при этом его выработка чаще зациклена применением на тех же предприятиях-производителях, исключая возможные поставки другим потенциальным потребителям [4]. Исходя из вышесказанного, важным фактором для развития водородной энергетики в регионах является поиск непосредственных потребителей конечного продукта в разумной доступности от производителя и налаживание

логичных путей его транспортировки, ведь стоимость водорода в значительной степени удорожает именно она.

Одной из ключевых мер, способствующих развитию водородной энергетики в РФ, будет создание и развитие водородных промышленных и технологических кластеров и реализация пилотных проектов производства и экспорта низкоуглеродного водорода. Так, проектируются три производственных кластера: Северо-Западный, Восточный и Арктический. В качестве дополнения к ним может быть дополнительно создан Южный кластер, который будет использовать в качестве источника ресурсов природный газ, потенциал в области возобновляемых и других источников энергии с низким уровнем выбросов углекислого газа, регионов юга РФ. Кластер обладает непосредственной близостью к крупным экспортным портам, к нему относятся и Саратовская область [2].

Цель данного исследования заключается в анализе перспектив развития низкоуглеродной водородной энергетики на примере региона Нижнего Поволжья – Саратовской области.

### Объекты и методы исследования

Предварительные поисковые исследования не привели к нахождению публикаций, удовлетворяющих цели исследования, поэтому на основании анализа и сравнения различных источников литературных данных решено провести экспертную оценку перспектив развития низкоуглеродной водородной энергетики на примере Саратовской области, определить основных возможных производителей водорода, а также его потребителей на заданной территории.

Материал для научного обзора отобран при помощи анализа научных статей, опубликованных в различных базах данных Scopus, Google Scholar, электронных библиотеках научных изданий eLIBRARY и КиберЛенинка. Поиск актуальных данных, отвечающих требованиям запроса, был проведён среди новостных статей средств массовой информации, опубликованных в сети Интернет, которые обладали достоверностью информации. Основная часть рассматриваемого нами материала относилась к публикациям, срок издания которых ограничивался 2019–2024 гг. Однако некоторые материалы, представляющие большой интерес для нас, датированы 2012–2018 гг.

Поиск осуществлялся по ключевым словам: «водородная энергетика + Саратовская область», «водород + Саратовская область», «биоводород + Саратовская область», «энергетическая политика + Саратовская область». Аналогично проведён поиск с использованием словосочетаний: «hydrogen energy + Saratov region», «hydrogen + Saratov region», «biohydrogen + Saratov region», «energy policy + Saratov region».

Аналогичные методики поиска материалов для аналитических обзорных статей использовались в различных опубликованных работах [4–6].

### **Результаты и обсуждение**

В результате сгорания водорода в качестве побочного продукта образуется вода, что говорит об экологической чистоте его использования [7]. С точки зрения оказанного воздействия на окружающую среду (ОС) способ получения водорода играет большую роль. Наиболее используемый метод получения водорода представляет собой паровой риформинг природного газа, при котором природный газ реагирует с паром при высокой температуре и давлении в присутствии катализатора, что приводит к образованию водорода и большого количества углекислого газа. Достаточно энергоёмким способом получения водорода (большое количество электроэнергии и воды) является электролиз воды – разложение воды на водород и кислород при помощи электрического тока. Для получения водорода также используют газификацию, термохимические и фотохимические процессы, которые, однако, дают его низкую концентрацию [8].

По способам получения водород разделяют на цветовые градации: зелёный – производится из возобновляемых источников энергии методом электролиза воды, голубой – производится из природного газа, а вредные отходы улавливаются для вторичного использования, розовый или красный – произведённый при помощи атомной энергии, серый – получают путём конверсии метана, коричневый – получают в результате газификации угля [9, 10]. При этом около 99% производимого мировой промышленностью водорода относится к серому и голубому, что подразумевает под собой большие выбросы углерода в атмосферу. Зелёный или низкоуглеродный водород должен в долгосрочной перспективе занять лидирующие позиции в масштабах производ-

ства, если мы хотим говорить о водороде как о низкоуглеродном энергетическом ресурсе.

По данным анализа рынка водорода в России, проведённого компанией Агроан, в 2022 г. произведено 2 360 133 тыс. м<sup>3</sup> водорода, а с января по июль 2023 г. – 1 349 020 тыс. м<sup>3</sup> водорода, что на 0,8% выше показателей предыдущего года за эти же месяцы. Лидером в 2023 г. стал Приволжский федеральный округ с долей 78,5% от общего объёма водорода, произведённого в России [11].

**Перспективы производства водорода на территории Саратовской области.** Производство водорода в Саратовской области, прежде всего, связано с химической отраслью промышленности. В регионе большое развитие получило производство химических источников тока (топливные элементы (ТЭ) и аккумуляторы). На территории Саратовской области располагаются два крупнейших завода по производству аккумуляторов. Один из них – это первый построенный в СССР завод, занимающийся изготовлением щелочных аккумуляторов – ООО «Завод автономных источников тока», который был построен ещё в 1931 г. В 1959 г. на базе предприятия был создан Научно-исследовательский институт химических источников тока (НИИХИТ), который занимался разработкой инновационных технологий производства аккумуляторов. Завод является основным российским производителем щелочных никель-кадмиевых аккумуляторов и батарей для городского электротранспорта, железных дорог, метрополитена, районных и сельских узлов связи, речных и морских судов. Второй – Саратовский аккумуляторный завод АО «Электроисточник» – один из старейших заводов России по производству свинцово-кислотных автомобильных аккумуляторов, основанный в 1929 г. Предприятие выпускает широкий ассортимент аккумуляторной продукции для автомобилей, автобусов, автотракторной техники. В перспективе на данных предприятиях возможным станет производство ТЭ, работающих на водороде, которые будут кроме того основным трансформатором водорода в электрическую энергию.

Работа водородных ТЭ основана на том, что химическая энергия атомов водорода в них способна превращаться в электрическую. Электрический ток, воздействуя на ионы водорода, приводит к соединению их с кислородом, на выходе образуя только воду и выделенное тепло. Коэффициент полезного действия таких ТЭ может достигнуть значения 80%. Установка таких генераторов в автомобиле –

перспективное направление развития существующих электромобилей. В итоге новые водородомобили не будут нуждаться в зарядке от электросетей [12].

На данный момент промышленно на рынке существуют водородомобили следующих марок: Toyota Mirai, Honda Clarity, Ford Airstream, Mercedes-Benz GLC F-CELL, BMW Hydrogen 7. Водород в них находится в топливном баке в сжатом виде под давлением 400 атмосфер. Водородомобили, которые производят сегодня, расходуют в среднем 0,8–1,0 кг водорода на 100 км пути. Цена одного килограмма водорода начинается с 8–10 евро. С энергетической точки зрения это эквивалентно шести литрам бензина. В России с 2029 г. КАМАЗ планирует выпускать грузовые автомобили с водородными ТЭ, первые прототипы которых представляли в 2021 г. на выставке в Москве: водробус на базе «КАМАЗ-6290» и 44-тонный прототип грузовика, имеющий систему водородных ТЭ мощностью 170 кВт (две батареи по 85 кВт) [13].

Таким образом, Саратовская область, имея на своей территории большой производственный задел в виде АО Саратовский аккумуляторный завод и ООО «Завод автономных источников тока», могла бы стать фундаментом для производства ТЭ, которые применяются на водородомобилях, несмотря на то, что сейчас это может казаться неосуществимым будущим, так как на данный момент водородные автомобили, как и водородные заправочные станции, находятся на уровне научных разработок и пилотных проектов.

Одним из наиболее экономически эффективных способов получения низкоуглеродного водорода является его централизованное производство при помощи паровой конверсии метана, водород, произведённый данным методом, стоит около 0,8 долларов за килограмм. Также широко используют метод газификации угля с обеспечением улавливания углекислого газа, конечная стоимость водорода в этом случае увеличивается на 25–30%, и электролиз воды на базе электроэнергии атомной электростанции (АЭС) и гидроэлектростанции [2].

Согласно оценкам учёных из Института энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН), на текущий момент наименее затратным способом производства водорода является паровая конверсия метана (1,7 долл./кг) [14].

В системах атомной энергетики водород можно производить минимизируя вредные атмосферные выбросы. На территории Саратовской области расположена Балаковская

АЭС – крупнейший в России производитель электроэнергии, на которой вырабатывается более 30 млрд кВт·ч ежегодно, на станции эксплуатируются реакторы типа ВВЭР-1000 (проект В-320). Увеличение доли АЭС может привести к необходимости их разгрузки – поиску потребителей. Обычно для базисной электрической нагрузки АЭС используют гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), что влечёт дополнительные технические, экономические, энергетические, экологические проблемы и геологические, сейсмические, гидрологические риски и ущербы. Это влияет на стоимость пиковой электроэнергии ГАЭС и её конкурентоспособность, ввиду этого разрабатываются альтернативные технологии аккумулирования электроэнергии, например, производство водорода за счёт ночной избыточной электроэнергии путём создания водородного энергетического комплекса, выработанные водород и кислород которых могут также реализовываться как товарная продукция [15].

Разработан автономный водородный энергетический комплекс, способный производить и подавать электроэнергию в энергосистему в часы повышенной нагрузки [16]. При этом водород, получаемый электролизом в часы снижения электрической нагрузки в энергосистеме, сжигается в кислороде. Для надёжной работы основной паровой турбины энергоблока АЭС образующийся при сжигании водородного топлива пар подаётся в дополнительную паровую турбину, которая может использоваться для обеспечения электроэнергией потребителей и собственных нужд АЭС при обесточивании. Разработка основана на экспериментальных данных Балаковской АЭС (Саратовская область) и подразумевает использование остаточного тепла реактора для выработки пара, который будет служить рабочим телом для маломощной паротурбинной установки. При этом работа водородного комплекса будет характеризоваться следующими параметрами: внепиковое энергопотребление – 11 МВт; потребление электроэнергии во внепиковое время – 273 МВт·ч; количество водорода, вырабатываемого в непиковое время работы электрических нагрузок, – 6191 кг; располагаемый массовый расход водорода в часы пик электрических нагрузок, – 0,29 кг/с; объём водорода (хранение под давлением 4,2 мВт) – 1899 м<sup>3</sup>; объём кислорода (хранение под давлением 4,2 мВт) – 900,1 м<sup>3</sup> [16].

**Перспективы производства биоводорода в Саратовской области.** В основу оценки тех-

нологий водородной энергетики с учётом их длительного влияния на ОС должен входить объём всех выбросов углекислого газа за весь период цикла использования водородных энергоносителей. С этой точки зрения правилам низкоуглеродной экономики отвечает водород, полученный с использованием технологий, имеющих низкий углеродный след, таким является биоводород.

Согласно ГОСТ Р 57079-2016, в России термин биоводород определён как водород, произведённый из биомассы и/или из разлагаемой фракции отходов, предназначенный для использования в качестве биотоплива. Биоводород может быть получен при помощи различных процессов: бескислородного фотосинтеза, ферментации, кислородного фотосинтеза, биосинтеза водорода цианобактериями с помощью комплекса ферментов нитрогеназы. Интегративные перспективы методов тёмной ферментации хорошо известны, однако реже используются промышленностью [3].

Анализ развития альтернативной энергетики в Саратовской области, проведённый нами ранее, показал, что на данной территории наиболее развито использование солнечной энергии, что связано с характерными климатическими условиями, однако, ввиду высокого образования органических отходов в данном регионе, рационально применять биомассу в качестве источника биоэнергии, например, для получения биоводорода [17].

Наиболее перспективным методом производства биоводорода является получение водорода из биомассы и жидких органических отходов [18–20]. Разработано три основных способа получения биоводорода из биомассы:

- 1) получение биоводорода за счёт риформинга биогаза из биомассы органических отходов, с очисткой попутного  $\text{CO}_2$ ;
- 2) получение биоводорода при термофильном сбраживании биомассы органических отходов;
- 3) получение биоводорода из биомассы микроводорослей за счёт биофотоллиза воды.

В работе [8] описана технология получения биоводорода из микроводорослей после использования их в очистке сточных вод предприятий пищевой промышленности при одновременном удалении высокого уровня диоксида углерода из воздуха. Максимальное количество биоводорода (44,24 мл/л суспензии) получено в условиях анаэробного тёмного брожения.

Сельскохозяйственные отходы являются одним из доступных материалов для произ-

водства биоводорода [21]. Максимальное содержание по метану в биогазе было выделено при переработке отходов растениеводства (свекольной ботвы, овощных отходов), а также навоза от животноводческих комплексов и птицефабрик [22].

Сельскохозяйственная специализация Саратовской области определена производством растениеводческой продукции, среди которой важнейшими культурами являются зерновые (пшеница, ячмень, овёс), подсолнечник, картофель, свёкла, морковь, овощи и бахчевые. При этом валовый сбор зерновых и зернобобовых культур в хозяйствах всех категорий составил в 2023 г. 5925,2 тыс. т, подсолнечника – 2104,4 тыс. т, овощей открытого и закрытого грунта – 371,4 тыс. т, сахарной свёклы – 622,4 тыс. т, картофеля – 152,4 тыс. т [23]. Это говорит о значительных объёмах вырабатываемой растениеводческой продукции в регионе, что предполагает образование большого количества отходов её переработки. По данным доклада о состоянии и об охране ОС Саратовской области, в 2022 г. на территории региона образовалось 276,4 тыс. т отходов категории «растениеводство и животноводство, охота и предоставление соответствующих услуг в этих областях», что составляет 4% от общего количества всех отходов производства и потребления [24].

Таким образом, ресурсный потенциал для производства биоводорода из отходов сельского хозяйства, стоимость которых составят для предприятия-производителя только расходы на транспортировку, при условии её необходимости, в Саратовской области является высоким.

**Потенциальные потребители водорода в Саратовской области.** Потребление водорода в Саратовской области, как и его производство, связано со следующими отраслями промышленности:

- химическая и нефтехимическая промышленность (ПАО «Саратовский НПЗ», ООО «Завод автономных источников тока», ООО «Саратоворгсинтез», Балаковский филиал АО «Апатит», ОАО «Балаковорезинотехника»);
- машиностроение и металлообработка (АО «Саратовский аккумуляторный завод (Электроисточник)», ООО «Завод автономных источников тока», АО «Трансмаш», ЗАО «Промэлектроника»);
- топливная промышленность (ПАО «Саратовнефтегаз», ООО НК-САРАТОВ-НЕФТЕГАЗДОБЫЧА, ООО «Газпром трансгаз Саратов»);

– пищевая промышленность (ООО «Рус-агро-Саратов»; ООО «Русагро-Балаково»; ООО «Русагро-Аткарск»; ООО Комбинат «Дубки»).

Нужды химической промышленности в водороде обусловлены производством аммония и метанола, хлорно-щелочным производством. В нефтепереработке водород применяется для повышения глубины переработки и производства светлых нефтепродуктов, уменьшения токсичности, удаления серы и других загрязняющих веществ. Цветная металлургия благодаря применению водорода получает металлы особой чистоты из оксидов, а кислородно-водородные горелки используют для сварочных и резочных работ с металлами. Смеси монооксида углерода с водородом используют в синтезе аммиака, метилового спирта, получения парафинов, олефинов, в оксосинтезе. Пищевая промышленность при помощи водорода может заниматься превращением жидких жиров в твёрдые и гидрогенизировать их, также водород используется при проверке герметичности упаковки пищевых продуктов [25].

В России большая потребность в водороде заключена в производстве химических продуктов, в частности аммиака и метанола [14]. При производстве же «голубого» аммиака обязательно улавливается выделяющийся в процессе его получения побочный продукт – углекислый газ. «Голубой» аммиак является сырьём для экологически чистого водорода, когда аммиак получают с применением природного газа (в некоторых случаях угля), что является более «зелёной» формой получения энергии благодаря улавливанию и связыванию углерода. Производство «голубого» аммиака методом паровой конверсии метана с улавливанием  $\text{CO}_2$  планирует запустить в Саратовской области (п. Михайловский) проектная компания «СПК Горный» – дочерняя организация московского ООО «НПП Платекс». Компания ООО «НПП «Платекс» совместно с ООО «СПК «Горный» реализовывает инвестиционный проект «Строительство завода по производству минеральных удобрений на базе имущественного комплекса ФКП «Горный», чья реализация основывается на необходимости вовлечения в хозяйственный оборот имущественного комплекса бывшего объекта по уничтожению химического оружия «Горный». Общий объём инвестиций в проект оценивается в 1 млрд. долларов. На предприятии планируется производить 2100 т аммиака, 3300 т карбамида и 500 т «голубого» аммиака в сутки [26]. «Голубой» аммиак относится к

низкоуглеродным видам топлива, значитель-но снижающим воздействие на ОС и климат, благодаря улавливанию побочного продукта его производства – диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). Пилотный запуск производства планируется к 2026 г. Целевыми рынками поставки производимого «голубого» аммиака станет внутренний рынок России и страны Европы и Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Прогнозный объём производства в 2026 г. – 20 000 т аммиака в год, а в 2030 г. – 170 000 т аммиака в год. На данный момент схема проекта представляет собой следующую цепочку: паровая конверсия метана с производством «голубого» аммиака из природного газа – улавливание и утилизация  $\text{CO}_2$  с помощью микроводорослей – логистика с транспортировкой водорода заказчиком на территории России, в страны Европы и АТР – потребление за счёт долгосрочных контрактов с заказчиками на территории России, в странах Европы и АТР [27].

Химические источники тока можно применять в качестве экологически чистого энергоносителя для автомобильной промышленности. Однако, одним из недостатков их использования является ёмкость матрицы, которая не способна обеспечить продолжительную работу устройства в автономном режиме. Решение этой проблемы – применение водородных соединений металлов в качестве катодов для химических источников тока [28].

Существующая инфраструктура саратовских предприятий (АО Саратовский аккумуляторный завод и ООО «Завод автономных источников тока») по производству химических источников тока (аккумуляторов) позволит с минимальными капитальными затратами организовать выпуск водородных ТЭ, которые будут иметь спрос для автомобилей на водородном топливе.

В некоторых европейских странах водород смешивают с природным газом в небольших безопасных количествах при добавлении в существующие газотранспортные и газораспределительные сети подачи природного газа [29]. В Саратовской области ведётся добыча нефти и газа, основные компании – это ООО «ДИАЛЛ АЛЪЯНС», ООО «ННК-Саратовнефтегаздобыча», ПАО НК «РуссНефть». Данные предприятия являются крупными поставщиками природного газа, для повышения энергетической ёмкости производимой газовой смеси возможна добавка в неё водорода. Применение данной технологии на нефтегазовых предприятиях Саратовской области позволит повысить энергетические характеристики подаваемого в сети газа.

ПАО «Саратовский НПЗ» ещё в 2014 г. ввёл в эксплуатацию установку короткоцикло-вой адсорбции водорода (КЦА), максимальная производительность которой достигала 4000 м<sup>3</sup> в час. Чистота вырабатываемого на ней водорода составила 99,9%. Этот водород использовали в установках по изомеризации и риформингу бензина, которые увеличивают цикл работы установленных на них катализаторов. Данная установка способна производить разделение газовой смеси на водород высокой частоты, азот, кислород, метан, этилен и другие компоненты. Внедрённую инновационную разработку произвело ОАО «Криогенмаш», в её состав вошли 2 полволоконных мембранных газоразделительных модуля компании «UBE», при этом расход электроэнергии во время работы не превышает 0,5 кВт в час, что повышает экологические характеристики подобного производства [30, 31]. ПАО «Саратовский НПЗ» является как перспективным производителем водорода, так и уверенным его потребителем.

Но основе поиска на тендерных площадках России, ЕИС Закупки, Ростендер, Контур Закупки, выявлены следующие промышленные предприятия Саратовской области, которые участвовали в закупках газообразного водорода в 2024 г.: это ПАО «Саратовский НПЗ» (40 л) и БФ АО «Апатит» (42 м<sup>3</sup>), что подтверждает наличие потенциальных потребителей водорода в описываемом регионе.

### Заключение

Ввиду того, что хранение и длительная транспортировка больших объёмов газообразного водорода затруднена и экономически не выгодна, произведённый в Саратовской области водород в большей степени будет потребляться на этой же территории, а крупнейшие производители водорода станут одновременно и его основными потребителями.

В Саратовской области химическая и нефтеперерабатывающая промышленность отличается высоким развитием, в виду этого все описанные выше инновационные методы производства и потребления водорода имеют большой потенциал для реализации в данном регионе. Так, производство фосфатных удобрений и утилизация водородсодержащих газов в процессе риформинга нефти станут настоящими драйверами развития водородной энергетики в регионе. Крупный инвестиционный проект «СПК «Горный» – завод минеральных удобрений, даст возможность для

производства «голубого» аммиака, который благодаря улавливанию диоксида углерода в процессе производства будет значительно снижать нагрузку на ОС. В долгосрочной перспективе, развитие получит использование водорода в качестве топлива – водородные ТЭ для автомобилей, а высокотехнологичный автономный водородный энергетический комплекс, который можно реализовать на Балаковской АЭС, будет способен производить и подавать электроэнергию в энергосистему в часы повышенной нагрузки. Авторы считают, что для Саратовской области перспективно и целесообразно развивать направление по производству водородных ТЭ на существующих мощностях АО Саратовский аккумуляторный завод и ООО «Завод автономных источников тока» с их грамотной модернизацией.

Саратовская область имеет потенциал производства низкоуглеродного водорода – биоводорода, произведённого путём переработки отходов сельского хозяйства, за счёт риформинга биогаза из биомассы органических отходов, с попутной очисткой CO<sub>2</sub> или методом термофильного сбраживания.

Государственные меры стимулирования производителей и потребителей водорода в регионе могут сыграть решающую роль в повышении и эффективности развития водородной энергетики в Саратовской области. Несмотря на то, что это требует дальнейших вложений в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, инфраструктуру, ввод в действие новых стандартов, подготовку специализированных кадров и др., это будет иметь большое значение для роста экономических показателей региона, даст серьёзный толчок развитию его научно-технического потенциала. Развитие водородной энергетики в Саратовской области, как участника Южного производственного кластера, также может быть успешно ориентировано на экспортный рынок – страны Ближнего Востока, которые рождают значительный спрос на водород.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Технологические вызовы и социально-экономические преобразования в контексте зелёных переходов» (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022).*

### Литература

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства

Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р [Электронный ресурс] <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYt4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (Дата обращения: 29.01.2024).

2. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р [Электронный ресурс] <https://www.gazprom.ru/f/posts/79/839376/soncept-hydrogen-energy.pdf> (Дата обращения: 23.01.2024).

3. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д., Глаголева А. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. М.: Центр энергетики Московской школы управления Сколково, 2019. 61 с. doi: 10.13140/RG.2.2.15540.91524

4. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Печенкин А.В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 79–91. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-79-91

5. Разманова С.В. Перспективы развития водородной энергетики в Российской Федерации // Георесурсы. 2023. Т. 25. № 3. С. 216–226. doi: 10.18599/grs.2023.3.25

6. Скугорова С.Г., Домрачева Л.И., Трефилова Л.В., Стариков П.А., Ашихмина Т.Я. Биозащита древесины от микробных повреждений (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 6–15. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-006-015

7. Singh V., Das D. Potential of hydrogen production from biomass // Science and engineering of hydrogen-based energy technologies: Hydrogen production and practical applications in energy generation / Ed. P.E.V. de Miranda. Academic Press, 2019. P. 123–164. doi: 10.1016/B978-0-12-814251-6.00003-4

8. Velmozhina K., Shinkevich P., Zhazhkov V., Politaeva N., Korablev V., Vladimirov I., Morales T.C. Production of biohydrogen from microalgae biomass after wastewater treatment and air purification from CO<sub>2</sub> // Processes. 2023. V. 11. No. 10. Article No. 2978. doi: 10.3390/pr11102978

9. Велесюк А. Водородная энергетика – тренд XXI века [Электронный ресурс] [https://archive.atomicexpert.com/hydrogen\\_energy](https://archive.atomicexpert.com/hydrogen_energy) (Дата обращения: 23.11.2023).

10. Liu W., Wan Y., Xiong Y., Gao P. Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen // Int. J. Hydrogen Energy. 2022. V. 47. No. 58. P. 24584–24591. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.193

11. Обзор российского рынка водорода. Июль 2023. Прогноз развития до 2027 года [Электронный ресурс] <https://dzen.ru/a/ZPb25bOKyjqG2EO> (Дата обращения: 03.07.2024).

12. Дегтярев К. Как работает водородный топливный элемент и почему автомобили с таким «двигателем» ещё не ездят по всему миру [Электронный ресурс] <https://e-plus.media/technologies/kak-rabotaet-vodorodnyj-toplivnyj-element-i-pochemu-avtomobili-s-takim-dvigatелем-eshche-ne-ezdyat-po-vsemu-miru/>

vodorodnyj-toplivnyj-element-i-pochemu-avtomobili-s-takim-dvigatelem-eshhe-ne-ezdyat-po-vsemu-miru/ (Дата обращения: 23.01.2024).

13. Паймулин В. 806 миллиардов выручки через 6 лет: что в закрытой части «плана Когогина»? [Электронный ресурс] <https://www.business-gazeta.ru/article/626662> (Дата обращения: 23.03.2024).

14. Веселов Ф., Соляник А. Экономика производства водорода с учётом экспорта и российского рынка // Энергетическая политика. 2022. № 4. С. 58–67. doi: 10.46920/2409-5516\_2022\_4170\_58

15. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Оценка эффективности получения водорода на базе внепиковой электроэнергии АЭС // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). 2016. № 5–6. С. 59–70. doi: 10.15518/isjaee.2016.05-06.006

16. Yurin V.E., Egorov A.N. Multi-channel general reservation of NPP own needs on the basis of combination with autonomous hydrogen energy complex // Int. J. Hydrogen Energy. 2024. V. 60. P. 1068–1076. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.225

17. Опарина А.М., Политаева Н.А., Ильин И.В. Глобальные перспективы перехода на зелёную энергетику в Саратовской области // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 314–330. doi: 10.35885/1684-7318-2023-3-314-330

18. Preethi, Mohamed Usman T.M., Rajesh Banu J., Gunasekaran M., Kumar G. Biohydrogen production from industrial wastewater: An overview // Bioresour. Technol. Rep. 2019. V. 7. Article No. 100287. doi: 10.1016/j.biteb.2019.100287

19. Zhu G., Li J., Liu C., Huang X., Liu L. Simultaneous production of bio-hydrogen and methane from soybean protein processing wastewater treatment using anaerobic baffled reactor (ABR) // Desalin. Water Treat. 2013. V. 53. No. 10. P. 2675–2685. doi: 10.1080/19443994.2013.868836

20. Fedorov M., Maslikov V., Korablev V., Politaeva N., Chusov, A., Molodtsov D. Production of biohydrogen from organ-containing waste for use in fuel cells // Energies. 2022. V. 15. No. 21. Article No. 8019. doi: 10.3390/en15218019

21. Li Y.C., Liu Y.F., Chu C.Y., Chang P.L., Hsu C.W., Lin P.J., Wu S.Y. Techno-economic evaluation of biohydrogen production from wastewater and agricultural waste // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. No. 20. P. 15704–15710. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.043

22. Маевский А.П. Анализ энергетического потенциала навозных стоков животноводческих комплексов и птицефабрик // Технические системы и технологические процессы: сб. статей Международ. научно-практич. конф. Самара: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2018. С. 116–120.

23. Посевные площади, валовой сбор и урожайность сельскохозяйственных культур в 2023 году [Электронный ресурс] [https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/04\\_Посевные%20площади\\_29\\_03\\_24.pdf](https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/04_Посевные%20площади_29_03_24.pdf) (Дата обращения: 29.03.2024).

24. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Саратовской области в 2022 году [Электронный ресурс] [https://www.minforest.saratov.gov.ru/info/?SECTION\\_ID=65&ELEMENT\\_ID=4622](https://www.minforest.saratov.gov.ru/info/?SECTION_ID=65&ELEMENT_ID=4622) (Дата обращения: 23.01.2024).

25. Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.З., Нурисламова А.Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 70–83. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83

26. Завод по производству минудобрений с выходом на речную инфраструктуру планируется создать в Саратовской области [Электронный ресурс] <https://portnews.ru/news/329809/> (Дата обращения: 23.01.2024).

27. Атлас российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака [Электронный ресурс] [https://www.bcci.bg/resources/files/%D0%90%D0%A2%D0%9B%D0%90%D0%A1\\_%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%A0%D0%9E%D0%94\\_%D0%A0%D0%A3%D0%A1.pdf](https://www.bcci.bg/resources/files/%D0%90%D0%A2%D0%9B%D0%90%D0%A1_%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%A0%D0%9E%D0%94_%D0%A0%D0%A3%D0%A1.pdf) (Дата обращения: 23.01.2024).

28. Лукьянова В.О., Гоц И.Ю. Анализ влияния величины катодной поляризации на количество сорбированного водорода Al-Sm сплавом из электрохимических измерений // Электрохимическая энергетика. 2020. Т. 20. № 4. С. 206–213. doi: 10.18500/1608-4039-2020-20-4-206-213

29. Макарян И.А., Седов И.В. Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики // Российский химический журнал. 2021. Т. 65. № 2. С. 3–21. doi: 10.6060/rcj.2021652.1

30. Виноградов Н.Е., Талакин О.Г., Каграманов Г.Г. Мембранное выделение водорода из выбросных газов // Химическая промышленность сегодня. 2013. № 5. С. 29–39.

31. ОАО «Саратовский НПЗ» ввело в эксплуатацию установку короткоциклового адсорбции водорода [Электронный ресурс] <https://limited.rosneft.ru/press/news/item/173428/> (Дата обращения: 23.01.2024).

## References

1. Energy strategy of the Russian Federation for the period until 2035: Order of the Government of the Russian Federation dated 06.09.2020 No. 1523-r [Internet resource] <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (Accessed: 29.01.2024) (in Russian).

2. The concept for the development of hydrogen energy in the Russian Federation: Order of the Government of the Russian Federation dated 05.08.2021 No. 2162-r [Internet resource] <https://www.gazprom.ru/f/posts/79/839376/soncept-hydrogen-energy.pdf> (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).

3. Mitrova T., Melnikov Yu., Chugunov D., Glagoleva A. Hydrogen economy – the path to low-carbon development.

Moskva: Energy Center of the Moscow School of Management Skolkovo, 2019. 61 p. (in Russian). doi: 10.13140/RG.2.2.15540.91524

4. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonov A.G., Pechenkin A.V. Prospects for the development of hydrogen power engineering in Tatarstan // Power engineering: research, equipment, technology. 2020. V. 22. No. 6. P. 79–91 (in Russian). doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-79-91

5. Razmanova S.V. Prospects for the development of hydrogen energy in the Russian Federation // Georesursy. 2023. V. 25. No. 3. P. 216–226 (in Russian). doi: 10.18599/grs.2023.3.25

6. Skugoreva S.G., Domracheva L.I., Trefilova L.V., Starikov P.A., Ashikhmina T.Ya. Bioprotection of wood from microbial damage (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 6–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-006-015

7. Singh V., Das D. Potential of hydrogen production from biomass // Science and engineering of hydrogen-based energy technologies: Hydrogen production and practical applications in energy generation / Ed. P.E.V. de Miranda. Academic Press, 2019. P. 123–164. doi: 10.1016/B978-0-12-814251-6.00003-4

8. Velmozhina K., Shinkevich P., Zhazhkov V., Politaeva N., Korablev V., Vladimirov I., Morales T.C. Production of biohydrogen from microalgae biomass after wastewater treatment and air purification from CO<sub>2</sub> // Processes. 2023. V. 11. No. 10. Article No. 2978. doi: 10.3390/pr11102978

9. Velesyuk A. Hydrogen energy is a trend of the 21st century [Internet resource] [https://archive.atomicexpert.com/hydrogen\\_energy](https://archive.atomicexpert.com/hydrogen_energy) (Accessed: 23.11.2023) (in Russian).

10. Liu W., Wan Y., Xiong Y., Gao P. Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen // Int. J. Hydrogen Energy. 2022. V. 47. No. 58. P. 24584–24591. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.193

11. Review of the Russian hydrogen market. July 2023. Development forecast until 2027 [Internet resource] <https://dzen.ru/a/ZPb25bOKyjqG2EO> (Accessed: 03.07.2024) (in Russian).

12. Degtyarev K. How does a hydrogen fuel cell work and why cars with such an “engine” are not yet driving around the world [Internet resource] <https://e-plus.media/technologies/kak-rabotaet-vodorodnyj-toplivnyj-element-i-pochemu-avtomobili-s-takim-dvigatелеm-eshhe-ne-ezdyat-po-vsemu-miru/> (Accessed: 23.01.2024) (in Russian).

13. Paymulin V. 806 billion in revenue in 6 years: what’s in the closed part of the “Kogogin plan”? [Internet resource] <https://www.business-gazeta.ru/article/626662> (Accessed: 23.03.2024).

14. Veselov F., Solyanik A. Economics of hydrogen production, taking into account exports and the Russian

market // Energy Policy. 2022. No. 4. P. 58–67 (in Russian). doi: 10.46920/2409-5516\_2022\_4170\_58

15. Aminov R.Z., Bairamov A.N. Performance evaluation of hydrogen production on base of the off-peak electricity of atomic power station // Alternative Energy and Ecology (ISJAE). 2016. No. 5–6. P. 59–70 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2016.05-06.006

16. Yurin V.E., Egorov A.N. Multi-channel general reservation of NPP own needs on the basis of combination with autonomous hydrogen energy complex // Int. J. Hydrogen Energy. 2024. V. 60. P. 1068–1076. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.225

17. Oparina A.M., Politaeva N.A., Illin I.V. Global perspectives of transition to green energy generation in the Saratov region // Povolzhskiy Journal of Ecology. 2023. No. 3. P. 314–330 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-3-314-330

18. Preethi, Mohamed Usman T.M., Rajesh Banu J., Gunasekaran M., Kumar G. Biohydrogen production from industrial wastewater: An overview // Bioresour. Technol. Rep. 2019. V. 7. Article No. 100287. doi: 10.1016/j.biteb.2019.100287

19. Zhu G., Li J., Liu C., Huang X., Liu L. Simultaneous production of bio-hydrogen and methane from soybean protein processing wastewater treatment using anaerobic baffled reactor (ABR) // Desalin. Water Treat. 2013. V. 53 No. 10. P. 2675–2685. doi: 10.1080/19443994.2013.868836

20. Fedorov M., Maslikov V., Korablev V., Politaeva N., Chusov A., Molodtsov D. Production of biohydrogen from organ-containing waste for use in fuel cells // Energies. 2022. V. 15. No. 21. Article No. 8019. doi: 10.3390/en15218019

21. Li Y.C., Liu Y.F., Chu C.Y., Chang P.L., Hsu C.W., Lin P.J., Wu S.Y. Techno-economic evaluation of biohydrogen production from wastewater and agricultural waste // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. No. 20. P. 15704–15710. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.043

22. Mayevsky A.R. Analysis of the energy potential of manure waste from livestock complexes and poultry farms // Technical systems and technological processes: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Samara: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu “Aeterna”, 2018. P. 116–120 (in Russian).

23. Sown area, gross harvest and yield of agricultural crops in 2023 [Internet resource] [https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/04\\_Sown%20areas\\_29\\_03\\_24.pdf](https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/04_Sown%20areas_29_03_24.pdf) (Accessed: 29.03.2024) (in Russian).

24. Report on the state and protection of the environment of the Saratov region in 2022 [Internet resource] [https://www.minforest.saratov.gov.ru/info/?SECTION\\_ID=65&ELEMENT\\_ID=4622](https://www.minforest.saratov.gov.ru/info/?SECTION_ID=65&ELEMENT_ID=4622) (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).

25. Yarullin R.S., Salikhov I.Z., Cherezov D.Z., Nurislamova A.R. Prospects for hydrogen technologies in the energy sector and the chemical industry // Power engineering: research, equipment, technology. 2021. V. 23. No. 2. P. 70–83 (in Russian). doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83

26. A plant for the production of mineral fertilizers with access to the river infrastructure is planned to be created in the Saratov region [Internet resource] <https://portnews.ru/news/329809/> (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).

27. Atlas of Russian projects for the production of low-carbon and carbon-free hydrogen and ammonia [Internet resource] [https://www.bcci.bg/resources/files/%D0%90%D0%A2%D0%9B%D0%90%D0%A1\\_%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%A0%D0%9E%D0%94\\_%D0%A0%D0%A3%D0%A1.pdf](https://www.bcci.bg/resources/files/%D0%90%D0%A2%D0%9B%D0%90%D0%A1_%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%A0%D0%9E%D0%94_%D0%A0%D0%A3%D0%A1.pdf) (Accessed: 23.01.2024) (in Russian).

28. Lukyanova V.O., Gots I.Yu. Analysis of the influence of the cathodic polarization value on the amount of hydrogen sorption of Al-Sm with the alloy of electrochemical measurements // Electrochemical energetics. 2020. V. 20. No. 4. P. 206–213 (in Russian). doi: 10.18500/1608-4039-2020-20-4-206-213

29. Makaryan I.A., Sedov I.V. State and prospects for development of global hydrogen power engineering // Russian Chemistry Journal. 2021. V. 65. No. 2. P. 3–21. doi: 10.6060/rcj.2021652.1

30. Vinogradov N.E., Talakin O.G., Kagramanov G.G. Membrane separation of hydrogen from exhaust gases // Khimicheskaja promyshlennost' segodnja. 2013. No. 5. P. 29–39 (in Russian).

31. JSC Saratov Oil Refinery commissioned a short-cycle hydrogen adsorption unit [Internet resource] <https://limited.rosneft.ru/press/news/item/173428/> (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).