



ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО - КАК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННЫМ ВИДАМ ТОПЛИВА

Зверева ¹ Э.Р., Марьин ¹ Г.Е., Ахметова ¹ И.Г., Щаулов ^{2,3} В.В., Юсупов ^{2,3} К.Н.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²НПО Б энд Индастриз, г. Москва, Россия

³Национальные Энергетические Технологии, г. Москва, Россия

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке концепции перехода на водородное топливо системы теплоснабжения Мурманской области. Мурманская область, обладает уникальными природными ресурсами и тяжелыми климатическими условиями, и представляет собой уникальный регион для внедрения водородных технологий. В статье представлены результаты моделирования работы ветровых электростанций (ВЭС), прогнозируемые мощности генерации, перспективы использования водорода в системе теплоснабжения Мурманской области. В данной работе рассматриваются возможности использования «зеленой» электроэнергии, получаемой от ВИЭ - атомных, ветровых и гидроэлектростанций, с целью замены традиционных топлив, таких как дизельное топливо и мазут. ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблему топливообеспечения в Мурманской области. Разработать технологию получения водородного топлива, с последующим сжиганием на действующем энергетическом оборудовании региона. МЕТОДЫ. Для моделирования режимов работы оборудования использована программа Winpro, с последующей почасовой выкладкой мощности в программном комплексе Smartren. РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведенное исследование показало возможность модернизации существующей инфраструктуры, включая котельные и электрические сети, для внедрения водородных технологий. Например, предлагается совместное сжигание водорода с традиционными видами топлива, что позволит уменьшить удельные расходы углеводородных топлив, снизить углеродный след и объем вредных выбросов. В работе также анализируется производимый углеродный след, образующийся от сжигания различных видов топлива, и «зеленый» водород демонстрирует здесь значительное преимущество. Показано, что переход на водородные технологии может не только улучшить экологическую ситуацию в Мурманской области, но и стать экономически выгодным решением, способствующим привлечению инвестиций и развитию новых технологий в регионе. Водород может частично заменить традиционное топливо в виде мазута, если учесть транспортировку мазута до котельной, его топливоподготовку и выбросы от использования мазута, то стоимость водорода будет конкурентоспособная. Таким образом, данное исследование на примере Мурманской области, показывает перспективность внедрения водородных технологий для устойчивого развития региона.

Ключевые слова: водород; топливо; мазут; зеленая энергетика; водородная энергетика; ВЭС; альтернативное топливо.

Для цитирования: Зверева Э.Р., Марьин Г.Е., Ахметова И.Г., Щаулов В.В., Юсупов К.Н. Водородное топливо - как альтернатива традиционным видам топлива // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 187 -197. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-187-197.

HYDROGEN FUEL - AN ALTERNATIVE TO TRADITIONAL FUELS

Zvereva¹ E.R., Marin¹ G.E., Akhmetova¹ I.G., Shchaurov^{2, 3} V.V., Yusupov^{2, 3} K.N.

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²NPO B and Industries, Moscow, Russia

³National Energy Technologies, Moscow, Russia

Abstract: The relevance of the research lies in the development of a concept for transitioning to hydrogen fuel in the heating supply system of the Murmansk region. The Murmansk region

possesses unique natural resources and harsh climatic conditions, making it an exceptional area for the implementation of hydrogen technologies. The article presents the results of modeling the operation of wind power plants (WPP), projected generation capacities, and the prospects for using hydrogen in the heating supply system of the Murmansk region. This work examines the possibilities of utilizing "green" electricity generated from renewable energy sources—nuclear, wind, and hydroelectric power plants—to replace traditional fuels such as diesel and fuel oil. Objective: To address the fuel supply issue in the Murmansk region and develop a technology for producing hydrogen fuel, followed by its combustion in the region's existing energy equipment. Methods: The Winpro software was used for modeling the operational modes of equipment, with subsequent hourly power distribution in the Smartren software suite. Results: The conducted research demonstrated the feasibility of modernizing the existing infrastructure, including boiler houses and electrical networks, for the implementation of hydrogen technologies. For example, co-combustion of hydrogen with traditional types of fuel is proposed, which will reduce the specific consumption of hydrocarbon fuels, lower the carbon footprint, and decrease harmful emissions. The study also analyzes the carbon footprint generated from the combustion of various types of fuel, showing that "green" hydrogen has significant advantages in this regard. It is shown that the transition to hydrogen technologies can not only improve the environmental situation in the Murmansk region but also become an economically viable solution that attracts investments and fosters the development of new technologies in the region. Hydrogen can partially replace traditional fuel in the form of fuel oil; considering the transportation of fuel oil to the boiler house, its fuel preparation, and emissions from fuel oil use, the cost of hydrogen will be competitive. Thus, this research, using the example of the Murmansk region, demonstrates the potential for implementing hydrogen technologies for the sustainable development of the region.

Keywords: hydrogen; fuel; fuel oil; green energy; hydrogen energy; WPP; alternative fuel.

For citation: Zvereva E.R., Marin G.E., Akhmetova I.G., Shchaulov V.V., Yusupov K.N. Hydrogen fuel - an alternative to traditional fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3): 187-197. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-187-197.

Введение (Introduction)

В настоящее время в мире и в Российской Федерации наблюдается повышение спроса на электроэнергию, спрос на возобновляемые источники энергии усиливается, при этом удаленные и изолированные районы сталкиваются с двойной проблемой, растущим спросом на энергию и ограниченным доступом к энергосистеме. Несмотря на то, что в Российской Федерации пока более распространены традиционные источники энергии, ветроэнергетика с ее масштабируемостью и низким воздействием на окружающую среду может быть использована в удаленных регионах, таких как Мурманская область [1-3]. По прогнозам, к 2028 году на долю возобновляемых источников энергии будет приходиться более 42% мирового производства электроэнергии [4,5].

Особенностью территории Российской Федерации является то, что удаленные районы и труднодоступные территории занимают большие площади. Для данных территорий, характеризующихся сложными климатическими условиями и низкой плотностью населения, энергоснабжение обеспечивается преимущественно тепловыми станциями и котельными, работающими на привозном топливе, таком как дизельное топливо, мазут и уголь. Это обуславливает более высокую стоимость электроэнергии по сравнению со среднероссийскими показателями [6].

Мурманская область находится в крайнем северо-западном углу европейской части России и включает Кольский полуостров, а также соседние западные и юго-западные территории материка. Площадь данного региона составляет 145 тысяч квадратных километров. Он богат природными ресурсами и полезными ископаемыми, среди которых наибольшее значение для экономики имеют медно-никелевые, железные и апатитонефелиновые руды, слюда, а также сырьё для строительных материалов и керамики, включая облицовочный камень. Существенную роль в экономике области играет рыболовство и переработка рыбы, выловленной в северных морях, открытом океане и внутренних водоёмах. Тем не менее, освоение природных ресурсов региона сталкивается с рядом серьезных трудностей. Существуют различные природные, экономические, технические и социальные факторы, которые затрудняют развитие этого района. К основным из них относятся суровые климатические условия, удалённость от центральных районов, низкая плотность населения и недостаточно развитая транспортная сеть. Климат

Мурманской области определяется её географическим положением за северным Полярным кругом, что приводит к довольно суровым погодным условиям. Значительное влияние на климат оказывает тёплое океаническое течение Гольфстрим, достигающее берегов Баренцева моря. В результате зима в этом регионе относительно мягкая, но длительная (до 7-8 месяцев), а лето короткое и прохладное. Особенности ветрового режима также являются характерной чертой климата Мурманской области. Зимой часто наблюдаются штили, который может резко сменяться сильными ветрами со скоростью более 10-15 м/с. Эти климатические условия способствуют повышенным потребностям в тепловой энергии, поэтому отопительный сезон в регионе длится 8-9 месяцев в году, а в некоторых населённых пунктах на побережье Баренцева моря может достигать 11-12 месяцев.

Важно отметить, что в Мурманской области отсутствуют предприятия по добыче, переработке и получение углеводородных видов топлива (угля, нефти, мазута, дизельного топлива). Поэтому для производства тепловой и электрической энергии используется привозное топливо, либо электроэнергия [7]. В таблице 1 представлен топливно-энергетический баланс региона в период до 2025-2030 год.

Таблица 1
Table 1

Топливо-энергетический баланс Мурманской области
Fuel and energy balance of the Murmansk region

	Топливо, тыс.тут		
	Уголь	Нефтепродукты	Прочее
Электроэнергетика	150,8	5,7	0
Котельные	180,2	878,2	0
ТЭЦ	115,2	224,7	0,5
Всего	446,2	1108,6	0,5
Доля в ТЭБ, %	28,69	71,28	0,03

**Источник: Прогнозный ТЭБ Мурманской области на период до 2030 года*

Как видно из таблицы 1 в топливно-энергетическом балансе Мурманской области преобладают нефтепродукты -мазут и дизельное топливо, на долю угля приходится менее 25%, доля прочих топлив, включая ВИЭ незначительна, так как эти направления только начинают развиваться в регионе.

Материалы и методы (Materials and methods)

Оценка перспектив развития водородной энергетики в Мурманской области

В последние годы прослеживается рост интереса к водородной энергетике. В 2016 году подписано Парижское соглашение, что привело к принятию новых законов, направленных на снижение углеродного следа. 4 ноября 2020 года Президентом РФ подписан Указ №666 «О сокращении выбросов парниковых газов», согласно которому к 2030 году предусмотрено сокращение выбросов CO₂ на 30% от уровня 1990 года, а в 2050 году предполагается сделать российскую экономику полностью низкоуглеродной. Для развития безуглеродной энергетики в России планируется ввести дополнительные меры, направленные на стимулирование снижения выбросов парниковых газов.

Для Мурманской области характерен арктический и субарктический климат, поэтому он представляет собой уникальный регион с особыми климатическими условиями и значительным потенциалом для развития гидроэлектростанций, ветроэнергетики. Суммарная мощность электростанций региона составляет порядка 3500 МВт (Кольская АЭС 1760МВт, малые ГЭС 300 МВт, тепловые электрические станции, Апатитская ТЭЦ, Мурманская ТЭЦ, ТЭЦ АО «Ковдорский ГОК», Кислогубская ПЭС, ветропарк Кольской ВЭС), при этом максимум потребления составляет порядка 1900 МВт. Тепловые электрические станции и котельные составляют основу теплоснабжения региона. Для арктических территорий России характерны ограничения, связанные с транспортной и энергетической отраслью. Основным видом топлива здесь остается мазут, на рис. 3 показана топливная структура потребления топлива. Особенностью использования мазута является сложная система топливоподготовки, хранения и доставки до потребителя, выбросы оксидов серы, а также дороговизна топлива [8,9]. Основными потребителями тепловой энергии являются города, поселки и промышленные предприятия.

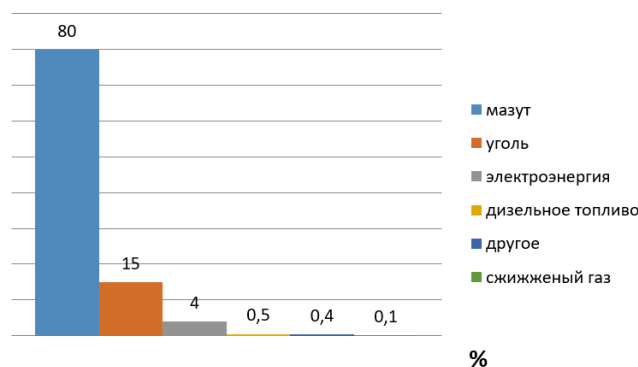


Рис.1 - Структура расхода топлива на генерацию электрической и тепловой энергии Fig. 1 - The structure of fuel consumption for the generation of electrical and thermal energy

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Мурманская область имеет существенный резерв по электрической энергии, который можно использовать для модернизации системы отопления, но для этого необходимо провести серьезную модернизацию электрических сетей, что в суровых климатических условиях является дорогостоящим мероприятием. Например, замена традиционных котельных на мазуте на современные электрические котлы потребует не только постройки новых корпусов, переноса, подвода к ним действующих тепловых трасс, но и модернизации и строительства новых электрических сетей с дублированием (ЛЭП и силовые трансформаторы). Поэтому использование водородных технологий в качестве альтернативы традиционному углеводородному топливу является перспективным направлением [10-12].

Создание в Мурманской области водородного полигона неоднократно планировалось, но на данный момент единственным регионом, в котором утверждено создание водородного полигона является Сахалинская область, где наряду с крупными проектами госкорпорации «Росатом», ОАО «РЖД» создается водородный кластер.

В настоящий момент полностью заменить мазут на водород не представляется возможным, так как устаревшее энергетическое оборудование котельных не сможет работать полностью, на 100% на водородном топливе, для этого необходимо будет заменить практически все действующее оборудование, поэтому перспективным направлением будет совместное сжигание нескольких видов топлива.

Потенциал выработки электроэнергии на ВЭС

Работа ветровых электростанций (ВЭС) с учетом стохастической природы ветра характеризуется изменчивостью и непредсказуемостью выработки электроэнергии, что обусловлено колебаниями скорости и направления ветра. Эти изменения играют ключевую роль в определении эффективности функционирования ВЭС. Для прогнозирования вероятных сценариев выработки энергии используются такие методы, как временные ряды и модели Монте-Карло, что позволяет более точно оценивать генерацию электроэнергии [13-14]. В данном исследовании анализируется работа Кольской ВЭС, где суммарная мощность 57 ветроэлектрических установок составляет 201 МВт. В рамках исследования выполнено прогнозирование работы ВЭС, произведена оценка потенциала выработки электроэнергии. Для моделирования режимов работы оборудования использована программа Winpro, с последующей почасовой выкладкой мощности в программном комплексе Smartren.

Исходные данные для моделирования:

- мощность ВЭС (аттестуемая) – 201 МВт;
- мощность ВЭУ G132 – 3,55МВт;
- количество ВЭУ - 57 шт.;
- место установки оборудования - Мурманская область.

Расчетная мощность ВЭУ определяется по следующему соотношению:

$$P_{вэу} = C_p * \frac{\rho * v^3}{2} * \frac{\pi * D^2}{4} * \eta_{эл} * \eta_{мех}, \quad (1)$$

где $P_{вэу}$ - мощность ВЭУ, Вт;

C_p – коэффициент мощности установки;

ρ – плотность воздуха, изменяется сезонно, зависит от давления и температуры, кг/м³;

v – скорость ветра, м/с;

D – диаметр ветроколеса, м;

$\eta_{эл}$ – КПД генератора;

$\eta_{мех}$ – КПД ветроустановки.

Согласно исследованиям EWEA, Андерсона, Beurskens and Jensen для расчета количества, вырабатываемой электроэнергии в год, можно использовать следующее соотношение:

$$\mathcal{E} = K * V_m^3 * A_t * N, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}$ – величина, вырабатываемой электроэнергии в год, кВт*ч;

K – численный коэффициент, учитывающий значение средней скорости и частоту изменения скорости ветра;

V_m – среднегодовая скорость ветра через сечение поверхности, образуемая лопастями ветротурбины, м/с;

A_t – сечение поверхности, образуемой лопастями ветротурбины, м²;

N – число ВЭУ, шт.

На рисунке 2 показано расположение ВЭУ на территории Мурманской области.

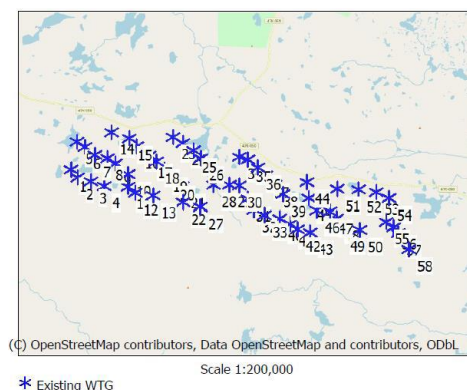


Рис. 2 - Расположение ВЭУ

Fig. 2 - Wind turbine location

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По итогам моделирования были получены следующие результаты: годовая выработка электроэнергии составила 735 689 МВт*ч, при этом коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) достиг значения 41,7%. На рисунке 3 представлены распределения скорости ветра и распределение по закону Вейбулла. Закон Вейбулла представляет собой статистическую модель, которая описывает распределение вероятностей для разных типов данных, включая скорость ветра. Этот закон широко применяется в ветроэнергетике для анализа и прогнозирования ветровых ресурсов. Закон Вейбулла позволяет оценить среднюю скорость ветра и его колебания на конкретной территории, что является важным для проектирования ветровых электростанций. Применение этого распределения помогает определить наиболее подходящие места для установки ветряных турбин, прогнозировать выработку электроэнергии и оценивать риски, связанные с изменениями в ветровых условиях. Таким образом, распределение ветровой нагрузки и закон Вейбулла играют ключевую роль в эффективном использовании ветровых ресурсов и обеспечении надежности работы ветровых электростанций.

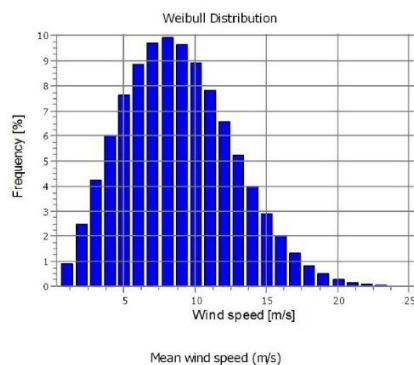


Рис. 3 - Распределение ветровой нагрузки

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

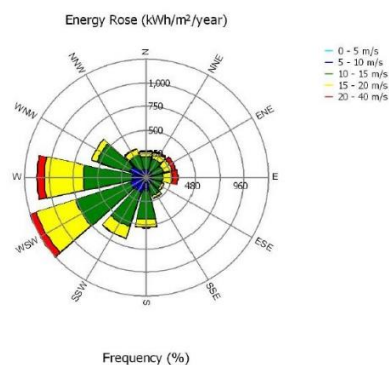


Fig. 3 - Wind load distribution

В результате моделирования получен средний КИУМ в 38%, что позволяет говорить о среднегодовой выработке порядка 80 МВт. Выработка электроэнергии на ВЭС непостоянно и зависит от многих факторов, поэтому по результатам моделирования были сделаны предположения, что среднечасовое распределение мощности Кольской ВЭС показывает, что в 75 % времени среднечасовая мощность Кольской ВЭС будет более 29 МВт, в 50% - более 73,7 МВт, в 25 % - более 121,6 МВт.

Обсуждения (discussions)

Оценка перспектив использования водорода

В настоящий момент производство водорода на изолированных территориях возможно в основном с помощью электролиза. Электролиз водорода представляет собой процесс разложения воды на водород и кислород с использованием электрического тока [15,16]. Этот метод считается одним из наиболее эффективных способов получения чистого «зеленого» водорода, который может применяться в различных сферах, включая энергетику, металлургию, нефтепереработку, химию, пищевую промышленность и транспорт и др.

Процесс электролиза включает несколько ключевых этапов. Сначала вода очищается, и готовится раствор, в котором она обычно смешивается с электролитом (например, щелочным или кислотным раствором) для повышения проводимости. Установка состоит из двух электродов — анода и катода, которые помещены в электролит. При прохождении электрического тока через воду на аноде происходит окисление, а на катоде — восстановление. На аноде происходит реакция: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$, а на катоде: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$. В результате из воды выделяются молекулы водорода и кислорода.

Преимущества электролиза включают его экологическую чистоту, поскольку при правильной организации процесса он может быть полностью безуглеродным, «зеленым», если используются возобновляемые источники энергии. Получаемый водород обладает высокой степенью чистоты, что делает его пригодным для различных промышленных производств [17]. Кроме того, процесс можно масштабировать, начиная от небольших установок и заканчивая крупными промышленными системами.

Основным документом для оценки потенциала использования водорода в системе теплоснабжения является Схема теплоснабжения муниципального образования г. Мурманск на период с 2019 по 2039 годы. В пределах города функционирует один крупный источник комбинированной выработки тепловой и электрической энергии — Мурманская ТЭЦ, а также 11 отопительных котельных и 1 промышленно-отопительная котельная. Централизованное теплоснабжение охватывает более 90% потребителей жилищного фонда. Основным и резервным топливом на всех источниках является мазут марки М-100 с теплотой сгорания около 8937 ккал/кг, аварийное топливо не предусмотрено. Топливо доставляется на источники с помощью железнодорожного транспорта, а подъездные пути и склады для хранения принадлежат АО «Мурманская ТЭЦ».

В настоящее время производство водородного топлива можно осуществлять как на площадке производителя электроэнергии, так и непосредственно на месте потребления водорода. Произведенный водород необходимо по трубопроводам направить на сжатие, так как хранение необходимо производить при высоком давлении (15,35 или 70 МПа), далее специальным транспортом доставить потребителю. Побочным продуктом при получении водорода является кислород высокой чистоты, который также будет собран и отправлен потребителю (например, медицинским учреждениям). Для примера рассмотрим потребителя, с постоянным расходом водорода 30 м³/ч. Для транспортировки до потребителя понадобится 5 баллонов в час по 40 литров (при давлении 150 бар в баллоне будет 6 м³ водорода), в сутки необходимо 120 баллонов. Строительство водородного трубопровода в суровых климатических условиях Мурманской области нецелесообразно.

Интересное решение — это размещение электролизера для производства водорода в непосредственной близости от потребителя водорода. В этом случае электроэнергия подается с сети, а оборудование размещается рядом с потребителем. Особенностью данной схемы является то, что производство водорода является одновременно и основным и резервным топливом. С учетом наличия генераторов водорода на всех крупных ТЭС данное решение можно считать отработанным. Но для реализации данного решения необходимо произвести модернизацию электрохозяйства, так как при использовании мощных электролизеров необходимо строительство ЛЭП и установка понижающих трансформаторов, поэтому такую схему необходимо реализовывать только при новом строительстве станции.

Основные производители и типы котельных агрегатов, установленных на ТЭЦ и котельных в г. Мурманске:

-ООО «Белгородский котельный завод» (ТП-30Р, ТП-35У, БМ-35Р, ГМ-50, ГМ-50-14/250)

-Машиностроительный завод «Татра» (ПТВМ-50)

-ОАО «Дорогобужский котельный завод» (ПТВМ-100, КВГМ-100)

-ОАО «Бийский котельный завод» (ДКВр-20-13/250)

-ООО «РЭМЕКС» (Турботерм)

С точки зрения представительности по количеству водогрейных котельных агрегатов и установленной мощности, лидером среди производителей является ОАО «Дорогобужский котельный завод» с моделями ПТВМ-100 и КВГМ-100. Поэтому в качестве приоритетных пилотных котельных агрегатов для внедрения водородных технологий рекомендуется рассматривать ПТВМ-100 и КВГМ-100. Основной задачей в этом случае станет модернизация существующих горелок для обеспечения возможности сжигания водорода. Котел КВГМ-100 оборудован тремя газомазутными горелками типа РГМГ – 30, теплопроизводительностью 33,4 Гкал/час каждая, производительность горелки по мазуту марки М-100 – 3540 кг/ч, по природному газу – 3925 м³/ч. Диапазон рабочего регулирования горелки 20-100 % от номинальной тепловой мощности. Основные компоненты горелки включают ротационную форсунку с коробом и патрубком первичного воздуха, газовую часть, устройство для направления вторичного воздуха и кольцо-раму (рис.4).



Рис. 4 - Горелка типа РГМГ -30

Fig. 4 - RGMG -30 type burner

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Топливо подается через гибкий шланг по стационарной консольной трубе, расположенной внутри полого вала форсунки. Затем оно попадает в кольцевую полость питателя и далее по топливным каналам вытекает на внутреннюю поверхность распыливающего стакана. Первичный воздух, который участвует в распылении топлива и формировании факела, поступает от автономного вентилятора первичного воздуха. Он проходит через патрубок с шибером в короб первичного воздуха, а затем через специальные окна в кожухе форсунки направляется к осевому завихрителю первичного воздуха, который имеет профильные лопатки, установленные под углом 30° к оси горелки. Часть первичного воздуха также проходит через воздушные каналы питателя внутрь стакана. Привод вала форсунки осуществляется от электродвигателя с помощью клиноременной передачи. Котел ПТВМ-100 оснащен 16 комбинированными газомазутными горелками, расположенными в два яруса по 8 на фронтальной и задней стенах.

Горелки типа МГМГ-8 (рис.5) обычно используются на котлах, где регулирование тепловой мощности происходит за счет изменения количества работающих горелок. Конструкция горелки МГМГ-8 предполагает периферийный подвод газа, а закрутка воздуха осуществляется с помощью осевых регистров. Производительность горелки по мазуту марки М-100 составляет 790 кг/ч, по природному газу — 980 м³/ч, а максимальный расход воздуха — 10440 м³/ч.



Рис. 5 - Горелка типа МГМГ-8

Fig. 5 - MGMG-8 type burner

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Газомазутная горелка с механической форсункой состоит из ряда ключевых компонентов: механической мазутной форсунки, рамы горелки, оснащенной кольцевым газовым коллектором и газовым патрубком, поворотного воздушного короба с присоединительными фланцами, а также регистра-завихрителя воздуха. В процессе работы на мазуте топливо поступает в штуцер механической форсунки, проходит через трубку форсунки, распыляется в завихрителе под давлением и затем смешивается с вихревым потоком воздуха. Воздух поступает в корпус горелки через воздухопровод, получает вращательное движение в регистре (завихрителе), смешивается с топливом и далее направляется в топочную камеру котлоагрегата.

В качестве пилотной горелки для отработки технологии перехода на водородное топливо предлагается рассматривать МГМГ-8 в силу относительно малой тепловой мощности (6,9 Гкал/ч) и простоты конструкции (отсутствие ротационной форсунки как в горелках типа РГМГ-30). На данный момент ни одна российская компания не освоила серийное производство водородных котлов или водородных горелок. Разработкой отдельных компонентов и лабораторных стендов занимаются несколько научных организаций, включая АНО «Водородные технологические решения», МФТИ, МАИ и ОАО «НПО «ЦКТИ». В частности, АНО «Водородные Технологические Решения» создала стенд для изучения процессов горения водородсодержащих газов (с соотношением метана и водорода 78% и 22% соответственно) в конденсационном котле. В МФТИ разрабатывается водогрейный котел с тепловой мощностью 100 кВт, при расходе водорода 0,005 кг/с и воздуха 0,1 кг/с, с расчетной температурой в камере сгорания 1400 °С.

Таким образом, при разработке стратегии развития региона, целесообразно сосредоточиться на внедрение технологий низкоуглеродной энергетики, основываясь в первую очередь на доступности энергетических ресурсов, что будет способствовать устойчивому развитию региона. Замена дизельного топлива и мазута на электрическую энергию в энергетическом секторе может ежегодно приносить ежегодно экономию в 8 миллиардов рублей в год, благодаря «зеленым» сертификатам. Эти средства могут быть направлены на модернизацию инфраструктуры региона, включая реконструкцию теплосетей.

Водородные проекты должны стать катализатором технологического прогресса, как это уже происходит в Сахалинской области. Подобные инициативы могут привлечь как федеральное, так и корпоративное финансирование. Поэтому важно развивать компетенции в области производства водорода и его применения в теплоснабжении.

В качестве приоритетных котельных агрегатов для внедрения водородных технологий рекомендуется рассматривать ПТВМ-100 и КВГМ-100 (ОАО «Дорогобужский котельный завод»). Вопрос снижения экологической нагрузки требует системного анализа. В частности, с учетом возможности использования электроэнергии Кольской ВЭС, целесообразно изучить опыт Минской ТЭЦ-2, где в 2021 году были установлены два водогрейных электродвигателя мощностью 17 Гкал/ч каждый. Это решение было принято из-за наличия относительно дешевой электроэнергии в энергосистеме, что стало актуальным на фоне необходимости загрузки Белорусской АЭС, введенной в эксплуатацию в 2020 году.

В России существует несколько компаний, производящих высоковольтные электродвигатели большой мощности, таких как ХК «Сибпромэнерго» и ЗАО «Завод Сибирского Технологического Машиностроения». В качестве возможного сценария можно рассмотреть реконструкцию одной из котельных в Мурманске с введением в эксплуатацию водородных котлов и высоковольтных электродвигателей мощностью от 5 до 15 Гкал/ч.

В таблице 2 представлено сравнение углеродного следа различных видов топлива. Из данных видно, что «зеленый» водород обладает значительным углеродным преимуществом по сравнению с другими источниками энергии.

Таблица 2

Table 2

Углеродный след
The carbon footprint

Тип топлива	Углеродный след	
	кгСО ₂ /кг топлива	кг (МВт*ч)/Гкал
Природный газ	2,59	120,5
Водород	0	34,8
Мазут	3,22	102
Дизельное топливо	3,06	98

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Экономическая эффективность использования электроэнергии от возобновляемых источников энергии в Мурманской области вместо дизельного топлива и мазута М-100 определяется двумя основными факторами: конечной стоимостью тепловой энергии и экологическим эффектом, связанным со снижением углеродного следа, уменьшением транспортных расходов и расходов на топливоподготовку, а также уменьшением вредных выбросов, образующихся при сжигании топлива.

Заключение (Conclusions)

Декарбонизация, повышение энергоэффективности, экологической безопасности, устойчивого развития энергетической отрасли являются одними из преимуществ применения водородного топлива. Водород может использоваться в различных секторах экономики, таких как производство тепловой и электрической энергии, металлургии, нефтехимии, а также в химической и пищевой промышленности. В данном исследовании рассматривается производство водорода с использованием электроэнергии, полученной от ветровых электростанций (ВЭС) в Мурманской области.

Проведенное моделирование работы ветровых электростанций, а также анализ характеристик распределения ветра и распределения Вейбулла позволили прогнозировать генерируемые мощности. Мурманская область характеризуется сложным климатом, поэтому произведенный водород может стать альтернативой традиционным импортируемым топливам. Замена устаревшего генерирующего оборудования является дорогостоящей задачей для региона, поэтому предлагается схема использования водородного топлива на действующих котельных, в качестве добавления к основному.

Литература

1. Новак А.В. Баланс углеводородных и возобновляемых источников энергии - климатическая и энергетическая безопасность планеты // Энергетическая политика. – 2021. – № 6(160). – С. 4-11.
2. Илюшин П.В., Кучеров Ю.Н. Подходы к оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной генерации // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 5. С. 2-7.
3. Полетаев И. Р. Энергоэффективность и развитие экономики в современных условиях // Энергетическая политика. – 2024. – № 2(193). – С. 84-89. – DOI 10.46920/2409-5516_2024_2193_84.
4. MohadesehShabani, SohrabKordrostami, MonirehJahaniSayyadNoveiri, Renewable energy performance analysis using fuzzy dynamic directional distance function model under natural and managerial disposability, Applied Energy, Volume 352, 2023, 121940.
5. Перминов, Э. М. Перспективы развития возобновляемых источников энергии в XXI веке // Энергетик. – 2016. – № 4. – С. 41-44.
6. Башков Д. Ю. Вызовы и проблемы развития энергетики в отдельных регионах и мире в целом // Экономика строительства. – 2024. – № 7. – С. 30-33.
7. Кузнецов Н. М., Лазарев Н.М. Экологические и экономические аспекты использования электроэнергии для теплоснабжения в Мурманской области // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 6. – С. 45-50.
8. Минин, В. А., Лазарева М. А. Кольская энергосистема: этапы становления, современное состояние и перспективы развития // Электрические станции. – 2023. – № 11(1108). – С. 22-28. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.003.
9. Зверева Э. Р., Дударовская О. Г., Дмитриев А. В. Повышение эффективности смещения мазута с твердой присадкой статическими проточными смесителями // Промышленная энергетика. – 2021. – № 9. – С. 47-51.
10. Филимонов А. Г., Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 3-13.
11. Зверева Э. Р., Марьин Г. Е., Ахметова И. Г., Зверев Л. О. Перспективы получения зеленого водорода на мини-ГЭС для транспорта // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 9(426). – С. 96-110.
12. Кулагин В. А., Грушевенко Д. А. Сможет ли водород стать топливом будущего? // Теплоэнергетика. – 2020. – № 4. – С. 3-17.
13. Кретов Д. А., Рузанов Р.В., Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2-1(35). – С. 20.
14. Kuntsevich, P. The method of reliable estimation and forecasting of capacity of alternative energy generating equipment / P. Kuntsevich // Research in Agricultural Electric Engineering. – 2015. – No. 2. – P. 63-66.

15. Yutong Wu, Guoqing Xu, Junbo Zhou, Dapeng Cao, Research progress of the porous membranes in alkaline water electrolysis for green hydrogen production, Chemical Engineering Journal, Volume 505, 2025, 159291.

16. Joungho Park, Sungho Kang, Sunwoo Kim, Hana Kim, Hyun-Seok Cho, Jay H. Lee, Comparative techno-economic evaluation of alkaline and proton exchange membrane electrolysis for hydrogen production amidst renewable energy source volatility, Energy Conversion and Management, Volume 325, 2025, 119423

17. Марьин Г. Е., Осипов Б. М., Ахметшин А. Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 84-92.

Авторы публикации

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Марьин Георгий Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ахметова Ирина Гареевна - д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Щаулов Владимир Валерьевич – генеральный директор НПО Б энд Индастриз, генеральный директор Национальные Энергетические Технологии, г. Москва, Россия.

Юсупов Кимал Наилевич – директор по развитию НПО Б энд Индастриз, директор по развитию Национальные Энергетические Технологии, г. Москва, Россия.

References

1. Novak A.V. Balance of Hydrocarbon and Renewable Energy Sources - Climate and Energy Security of the Planet // Energy Policy. – 2021. – No. 6(160). – P. 4-11.

2. Ilyushin P.V., Kuchero Yu.N. Approaches to Assessing the Possibility of Reliable Power Supply for Consumers through the Construction of Distributed Generation Facilities // Electro. Electrical Engineering, Power Engineering, Electrical Engineering Industry. 2014. No. 5. P. 2-7.

3. Poletayev I.R. Energy Efficiency and Economic Development in Modern Conditions // Energy Policy. – 2024. – No. 2(193). – P. 84-89. – DOI 10.46920/2409-5516_2024_2193_84.

4. Mohadeseh Shabani, Sohrab Kordrostami, Monireh Jahani Sayyad Noveiri, Renewable Energy Performance Analysis Using Fuzzy Dynamic Directional Distance Function Model under Natural and Managerial Disposability, Applied Energy, Volume 352, 2023, 121940.

5. Perminov E.M. Prospects for the Development of Renewable Energy Sources in the 21st Century // Energetik. – 2016. – No. 4. – P. 41-44.

6. Bashkov D.Yu. Challenges and Problems of Energy Development in Individual Regions and the World as a Whole // Construction Economics. – 2024. – No. 7. – P. 30-33.

7. Kuznetsov N.M., Lazarev N.M. Environmental and Economic Aspects of Using Electricity for Heating in the Murmansk Region // Energy Security and Energy Saving. – 2023. – No. 6. – P. 45-50.

8. Minin V.A., Lazareva M.A. Kola Energy System: Stages of Formation, Current State and Development Prospects // Electric Stations. – 2023. – No. 11(1108). – P. 22-28. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.003.

9. Zvereva E.R., Dudorovskaya O.G., Dmitriev A.V. Increasing the Efficiency of Mixing Fuel Oil with a Solid Additive Using Static Flow Mixers // Industrial Energy. – 2021. – No. 9. – P. 47-51.

11. Filimonov A.G., Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D. Global Energy Integration: New Opportunities for Hydrogen Technologies // Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems. – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 3-13.

12. Zvereva E.R., Mar'yan G.E., Akhmetova I.G., Zverev L.O. Prospects for the Production of Green Hydrogen at Mini-HPPs for Transport // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology. – 2024. – No. 9(426). – P. 96-110.

13. Kulagin V.A., Grushevchenko D.A. Can Hydrogen Become the Fuel of the Future? // Thermal Energy. – 2020. – No. 4. – P. 3-17.

14.Kretov D.A., Ruzanov R.V. Forecasting Electricity Consumption of an Energy Supply Company Using Artificial Neural Networks // Engineering Herald of Don. – 2015. – No. 2-1(35). – P. 20.

Kuntsevich P. The Method of Reliable Estimation and Forecasting of Capacity of Alternative Energy Generating Equipment / P. Kuntsevich // Research in Agricultural Electric Engineering. – 2015. – No. 2. – P. 63-66.

15.Yutong Wu, Guoqing Xu, Junbo Zhou, Dapeng Cao, Research Progress of the Porous Membranes in Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production, Chemical Engineering Journal, Volume 505, 2025, 159291.

16.Joungho Park, Sungho Kang, Sunwoo Kim, Hana Kim, Hyun-Seok Cho, Jay H. Lee, Comparative Techno-Economic Evaluation of Alkaline and Proton Exchange Membrane Electrolysis for Hydrogen Production Amidst Renewable Energy Source Volatility, Energy Conversion and Management, Volume 325, 2025, 119423.

17.Marin G.E., Osipov B.M., Akhmetshin A.R. Investigation of the Use of Hydrogen as Fuel to Improve the Energy and Environmental Performance of Gas Turbine Installations // Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems. – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 84-92.

Authors of the publication

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

George E. Marin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir V. Shchaulov– General Director of NPO B and Industries, general Director of National Energy Technologies, Moscow, Russia.

Kimal N. Yusupov – Development – Director of NPO B and Industries, development Director of National Energy Technologies, Moscow, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **16.03.2025 г.**

Отредактировано **27.03.2025 г.**

Принято **13.05.2025 г.**