

Обзор исследований и разработок по газотурбинным энергетическим установкам на водородном топливе

Семенов С.В., Нихамкин М.Ш., Плотников А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
e-mail: nikhamkin@mail.ru

В статье приведен обзор реализованных проектов газотурбинных двигателей на водородном топливе, использующихся в энергетических газотурбинных установках (ГТУ). Актуальность применения водорода в качестве топлива обусловлена ограниченностью углеводородных источников энергии, негативным влиянием традиционных топлив на окружающую среду, недостаточной эффективностью «зеленой» энергетики. Все крупные производители ГТУ в той или иной степени занимаются разработкой новых установок на водородсодержащем топливе или переводом на него существующих. По публикациям проанализирован опыт компаний, успешно реализовавших проекты ГТУ на водородсодержащем топливе, а также их планы по развитию данного направления. Рассмотрены основные инженерные задачи, решаемые производителями ГТУ для их использования с водородным топливом.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, газотурбинная установка, энергетическая установка, водород, водородное топливо, экологически чистое производство энергии

A review of research and development on hydrogen-fueled gas turbine power plants

Semenov S.V., Nikhamkin M.Sh., Plotnikov A.I.

Perm National Research Polytechnic University, Perm

The article provides an overview of the implemented projects of hydrogen-fueled gas turbine engines used in power plants (GTP). The relevance of using hydrogen as a fuel is due to the limited hydrocarbon energy sources, the negative impact of traditional fuels on the environment, and the insufficient efficiency of “green” energy. All major manufacturers of GTP are more or less developing new or converting existing plants to hydrogen-containing fuel. Based on publications, the experience of companies that have successfully implemented projects of GTP running on hydrogen-containing fuel, as well as their plans for the development in this direction, is analyzed. The main engineering problems solved by the manufacturers of gas turbine plants for their use with hydrogen fuel are considered.

Keywords: gas turbine engine, gas turbine plant, power plant, hydrogen, hydrogen fuel, environmentally friendly energy generation

Введение

Постоянно увеличивающаяся потребность в энергоресурсах, обусловленная ростом населения, с одной стороны, и ограниченность углеводородных источников энергии, преимущественно используемых для удовлетворения данной потребности, с другой стороны, порождают необходимость поиска новых, возобновляемых энергоносителей [1; 2]. Нефть и природный газ являются ограниченными по запасам и предложению на рынке ресурсами со сложно прогнозируемым уровнем

потребления и цен [3; 4]. Значительная часть энергии, получаемой из ископаемого топлива, расходуется на функционирование транспортных средств. Например, в США в 2020 году эта доля составила 27% [5; 6]. Использование ископаемых топлив приводит к негативному влиянию на окружающую среду. Выбросы углекислого газа и метана по мере накопления в атмосфере, по мнению некоторых ученых, могут приводить к возникновению парникового эффекта и оказывать негативное влияние на климат [7–9]. Усилия мирового сообщества направлены на замещение ископаемых источ-

ников энергии источниками, которые оказывают минимальное воздействие на окружающую среду, в первую очередь обеспечивают минимальные выбросы углекислого газа и метана: солнечная и ветряная энергетика, гидроэнергетика, геотермальные источники, биотоплива, ядерная энергетика и т.д. [10].

Перспективным в плане декарбонизации атмосферы источником энергии является водород [11–15]. Следует отметить, что свой позитивный вклад в мировую экологию он сможет внести только в случае использования его «зеленой» версии. К сожалению, большая часть производимого в настоящее время водорода относится к «серой» категории – его производство сопровождается значительными затратами электроэнергии, полученной из ископаемого топлива, и выбросами CO_2 [13]. Повысить экологичность водорода предлагают посредством добавления к процессу получения «серого» водорода технологии улавливания и хранения углекислого газа. Такой водород называют «голубым» [14; 15].

Выделяют два основных способа получения энергии из водорода:

- сжигание с последующим преобразованием выделившейся тепловой энергии в механическую;
- использование водорода в качестве реагента для химического топливного элемента, преобразующего химическую энергию в электричество.

По эффективности второй способ теоретически может значительно превосходить первый. Это возможно при развитии и удешевлении технологии изготовления топливных элементов [16–18], однако данный процесс может занять значительное время. До широкого применения топливных элементов электричество будет производиться преимущественно с использованием газотурбинных установок (ГТУ). Их перевод на водородсодержащее топливо, синтез-газ или чистый водород может оказаться перспективным решением задачи декарбонизации мировой экономики в среднесрочной перспективе. Следует отметить, что это утверждение является дискуссионным. Дело, в частности, в том, что повышение требований к эмиссии вредных веществ при работе ГТУ касается не только CO_x (< 50 ppm), но и NO_x (< 25 ppm) [19]. Водородное топливо может оказаться полезным только в снижении уровня эмиссии CO_x и значительно усложнить задачу уменьшения эмиссии NO_x в силу сложности управления процессом горения водорода.

В последние годы производители энергетических установок на базе газотурбинных двигателей вплотную занялись разработкой новых систем на водородсодержащем топливе или переводом на него существующих систем. Во многих странах действуют государственные программы поддержки этих разработок. В частности, в России распоряжением правительства № 2634-р

от 12 октября 2020 года утвержден план мероприятий по развитию водородной энергетики до 2024 года [20].

Попытки создания газотурбинных двигателей на водородном топливе были предприняты еще в середине прошлого века применительно к авиации. В 1967 году в ЦИАМ проводили наземные испытания вертолетного двигателя ГТД-350 (АО «ОДК-Климов») с использованием в качестве топлива газообразного водорода. Полученные результаты позволили перейти к созданию в 1988 году самолета Ту-155 с двигателем НК-88 (СНТК им. Н.Д. Кузнецова), работающим на жидком водороде [21; 22]. Подробный обзор современного состояния двигателей для летательных аппаратов на водородном топливе и перспектив их применения дан в работе [23].

В настоящей статье акцент сделан на опыте компаний, успешно реализовавших проекты наземных энергетических ГТУ на водородсодержащем топливе. Представляется, что этот опыт интересен с точки зрения определения реальных перспектив водородной энергетики.

Реализованные газотурбинные установки, работающие на водородсодержащем топливе

Серийные ГТУ на водородсодержащем топливе созданы лишь в нескольких компаниях: Ansaldo Energia, Capstone Turbine Corporation, GE Gas Power, Kawasaki Heavy Industries, MAN Energy Solutions, Mitsubishi Power, OPRA, Siemens Energy.

Уже почти 30 лет итальянская компания Ansaldo Energia [24] занимается как разработкой новых (H-класс) ГТУ высокой мощности (до 538 МВт) на топливах с высоким содержанием водорода (до 50%), так и доработкой существующих систем (F-класс) для обеспечения их работоспособности на смеси природного газа с водородом.

Коммерчески успешными серийными ГТУ, работающими продолжительное время на водородсодержащих топливах, являются четыре модели [25]: AE94.3A, AE94.2, GT26, GT36. Первые две – относительно старые разработки компании – имеют схожую классическую конструкцию. ГТУ AE94.3A состоит из осевого 15-ступенчатого компрессора, кольцевой камеры сгорания и четырехступенчатой турбины (рис. 1). Ее максимальная мощность 495 МВт. Именно на этой ГТУ компания Ansaldo Energia осуществляла первые эксперименты по использованию смеси природного газа с водородом в качестве топлива. Долю водорода поэтапно увеличивали: с 2006 по 2010 год она составляла 15%, с 2010 по 2017-й – 18%, с 2018 года по сегодняшний день – 25%. Общая эквивалентная наработка ГТУ AE94.3A на водородсодержащем топливе составила 215 тыс. ч, а ГТУ AE94.2 – 500 тыс. ч.

Примечательно, что данные разработки были осуществлены без внесения серьезных изменений в конструкции означенных ГТУ, а также не привели к сколь угодно значительному уменьшению срока их службы. К 2023 году компания Ansaldo Energia, проводя комплекс работ по доработке камеры сгорания этих ГТУ и частичной замене ряда применяемых материалов, планирует довести долю водорода в топливе до 40%.

Несмотря на успешность применения топлив с высоким содержанием водорода в старых установках, компания Ansaldo Energia имеет отдельный класс ГТУ, специально предназначенных для использования таких топлив, – GT26 (рис. 2) и GT36. Их основным отличием являются двухзонные малоэмиссионные камеры сгорания (МЭКС), позволяющие сжигать газовые смеси с 50%-й долей водорода. В этих камерах сгорания реализуется двухстадийное (последовательное) горение, что обеспечивает низкий уровень эмиссии NO_x и CO в широком диапазоне нагрузок, а также возможность работы в режиме ежедневного пуска и останова [26]. ГТУ GT26 имеет камеру сгорания в виде двух последовательно расположенных независимых кольцевых камер сгорания, а в ГТУ GT36 последовательное горение реализовано в одной трубчатой камере сгорания, разделенной на разные зоны.

Помимо увеличения доли водорода в топливе, дальнейшую работу по совершенствованию ГТУ компания Ansaldo Energia ведет преимущественно в направлении уменьшения выбросов вредных веществ. Например, на ГТУ H-класса уровень выбросов NO_x к 2023 году планируется снизить с 25 до 15 ppm.

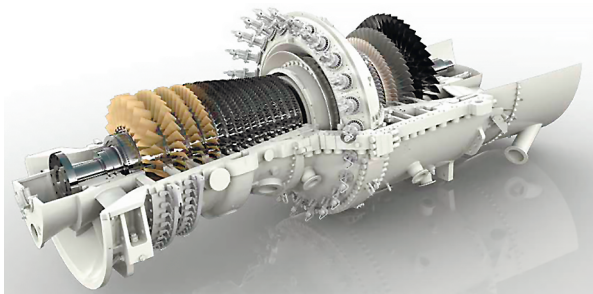


Рис. 1. ГТУ F-класса AE94.3A (Ansaldo Energia) мощностью 495 МВт [25]

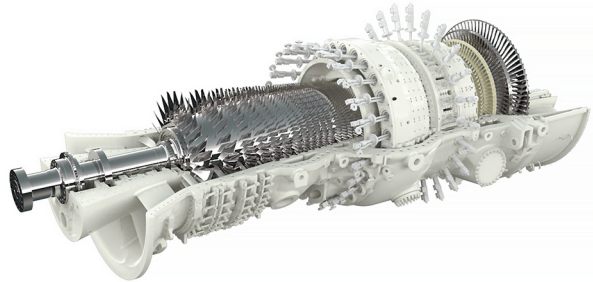


Рис. 2. ГТУ H-класса GT26 (Ansaldo Energia) мощностью 370 МВт [26]



Рис. 3. МикроГТУ C65 (Capstone) мощностью 65 кВт, работающая на чистом водороде [27]

В 2017 году компания Capstone Turbine Corporation, занимающаяся разработкой и производством ГТУ малой мощности (микроГТУ), от 30 кВт до 1 МВт, заявила, что планирует переводить свои изделия на водородное топливо. В конце 2018 года были проведены испытания, показавшие, что все модели данного производителя могут кратковременно работать на топливе с 70%-й долей водорода без серьезных изменений в конструкции. Дальнейшая доработка камеры сгорания и конструкции микроГТУ позволила увеличить долю водорода до 100% [27], а в октябре 2019 года компания заключила контракт на поставку многотопливных микроГТУ C65 (рис. 3), работающих на чистом водороде, в Австралию. Сегодня развитием технологий создания многотопливных микроГТУ занимается подразделение Capstone Green Energy.

Подразделение компании General Electric, занимающееся созданием и производством ГТУ, уже более 30 лет [28] разрабатывает решения, позволяющие использовать топлива с высоким содержанием водорода. General Electric производит ГТУ четырех классов, различающиеся температурой газа перед турбиной, конструкцией и генерируемой мощностью: В/Е, F, HA и конверсионные, т.е. созданные на базе авиационных газотурбинных двигателей (например, LM2500 мощностью 22 МВт, созданная на базе CF6-6). Все они могут работать на водородсодержащих топливах, а ГТУ класса В/Е и F – на 100%-м водороде (рис. 4) [29].

Кроме того, General Electric работает над снижением эмиссии. Для ГТУ класса F и HA компания гарантирует эмиссию NO_x меньше 9 ppm, а к 2023 году – меньше 5 ppm. Достичь этого она планирует путем дальнейшего совершенствования своей однозонной МЭКС DLN 2.6 (технология dry low NO_x , «сухая» низкая эмиссия NO_x). Данная МЭКС выполнена по трубчатой полувыносной схеме [30]. Каждое фронтное устройство состоит из шести небольших горелок: одна находится в центре, остальные пять размещены равномерно по окружности вокруг центральной. За каждой горелкой организована зона обратных токов, формируемая закруткой потока

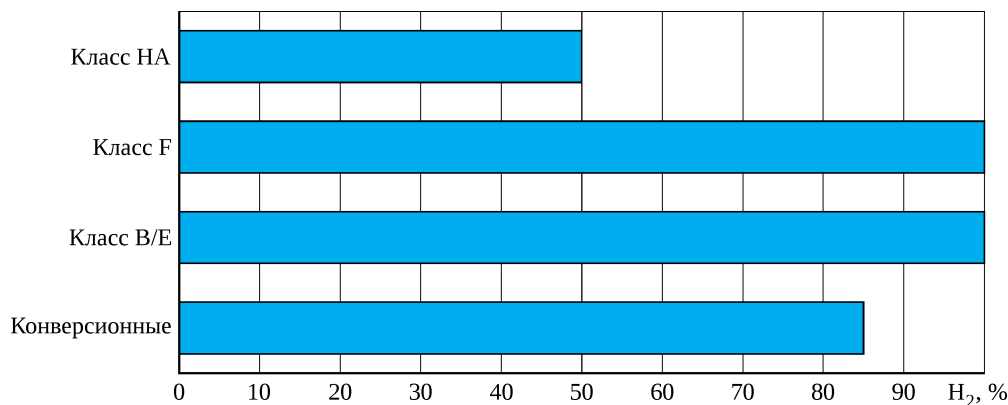


Рис. 4. Максимально допустимое объемное содержание водорода в топливе для ГТУ, производимых компанией General Electric [29]

в завихрителе. В завихрителях расположены коллекторы, подающие основное топливо в поток воздуха. В центре каждой горелки находится коллектор, через который подается пилотное топливо. Для регулирования эмиссии МЭКС в составе ГТУ используется перераспределение подачи топлива между горелками, прикрытие входного направляющего аппарата и сброс (перепуск) воздуха из компрессора на вход в ГТУ. Такое регулирование обеспечивает низкий уровень эмиссии NO_x в широком диапазоне мощности (режимов), $N = 50 \dots 100\%$ [31].

Еще одной особенностью этой МЭКС является модульная структура, позволяющая устанавливать ее на самые современные модели HA-класса (рис. 5) и проводить модернизацию существующих ГТУ F-класса. Дальнейшее развитие данная камера сгорания получила в модификациях DLN 2.6+ и DLN 2.6e, отличающихся измененным премиксером и совместимостью с большим числом моделей ГТУ предыдущего поколения [32].

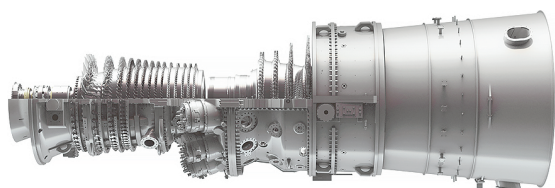


Рис. 5. ГТУ HA-класса 7HA.03 (General Electric) мощностью 430 МВт [29]

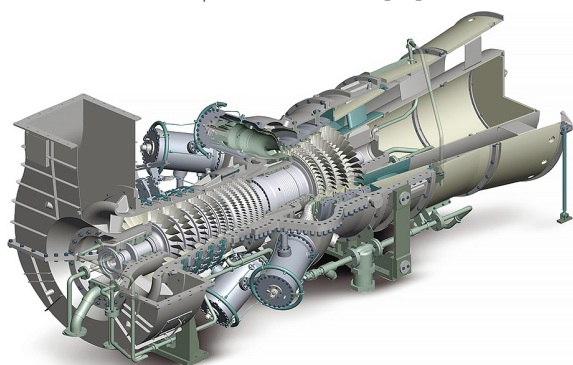


Рис. 6. ГТУ M1A-17 (Kawasaki) мощностью 1 МВт [35]

Получивший в 2019 году независимость от компании General Electric производитель комплектующих для газотурбинных двигателей Baker Hughes приступил к созданию семейства ГТУ NovaLT, способных работать на водородсодержащих смесях [33]. Программу финансируют энергетические компании Snam и Enel. Испытательным полигоном служат лаборатории компании Enel, где уже несколько лет осуществляют доработку камер сгорания, чтобы повысить стабильность горения водородсодержащих смесей, исключить проскок пламени и запирание, а также обеспечить приемлемый уровень эмиссии $\text{NO}_x - 15 \text{ ppm}$ [34].

В качестве одного из шагов в борьбе с глобальным потеплением путем декарбонизации правительство Японии в прошлом десятилетии поставило перед промышленностью задачу увеличить количество водорода в топливах, используемых в энергетических ГТУ. Первой откликнулась компания Kawasaki Heavy Industries, имеющая в своем распоряжении полный цикл применения водорода для нужд электроэнергетики, включая его производство, транспортировку и хранение [35]. На сегодняшний день применительно к ГТУ малой мощности (1 МВт, модель M1A-17) достигнута возможность сжигания 100%-го водорода в тестовом режиме (рис. 6). Экспериментальную энергетическую установку, использующую 100%-й водород в качестве топлива, построили в 2018 году в г. Кобе. Первоначально для борьбы с эмиссией использовали впрыск воды, а в 2020 году установку модернизировали, оснастив ее МЭКС с технологией MMX DLE (micro-mix dry low emission). В 2021 году данную камеру сгорания применили в газотурбинных установках мощностью от 1 до 35 МВт.

Применение новых ГТУ за рубежом запланировано на середину 2024 года, когда в г. Линген (Германия) заработает первая использующая в качестве топлива 100%-й водород энергетическая установка большой мощности (34 МВт) на базе ГТУ L30A (рис. 7) [36]. Партнером Kawasaki в данном проекте выступила круп-

Компания OPRA, являющаяся преимущественно производителем деталей для газотурбинных двигателей, создала собственное семейство ГТУ малой мощности с центробежной турбиной и планетарным редуктором (рис. 10), отличительной особенностью которых является использование малоэмиссионных камер сгорания DLE с технологией FlameSheet [40]. Технология была разработана компанией Power Systems Manufacturing в 2002 году, а окончательно доведена до практического применения на ГТУ General Electric 7FA в 2014 году. Основными задачами, которые решались с помощью данной технологии, являются: максимальное расширение спектра применяемых топлив (природный газ; сжиженный природный газ; газ, получаемый в процессе изготовления продуктов нефтехимии; синтез-газ; биогаз; водород и пр.) и увеличение диапазона рабочей мощности, при которой сохраняется низкая эмиссия NO_x ($< 9 \text{ ppm}$). Суть технологии FlameSheet заключается в стабилизации пламени в захваченном вихре, генерируемом с помощью непрерывно подаваемого плоского потока газовой смеси (рис. 11) [41].

Компания Siemens Energy имеет широкий модельный ряд ГТУ: от установок мощностью 4 МВт на базе авиационных двигателей (SGT-A05) до ГТУ мощностью 593 МВт (SGT-9000HL). При этом более 25 лет производитель работает над увеличением доли водорода в топливах. Для решения этой задачи в г. Финспонг (Швеция) был создан центр газотурбинных технологий, обеспечи-

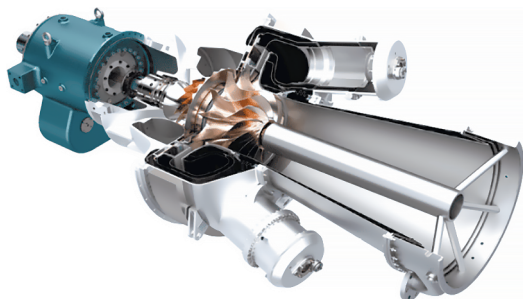


Рис. 10. ГТУ OP16-3B (OPRA) мощностью 1,8 МВт, оснащенная камерой сгорания с технологией FlameSheet [40]

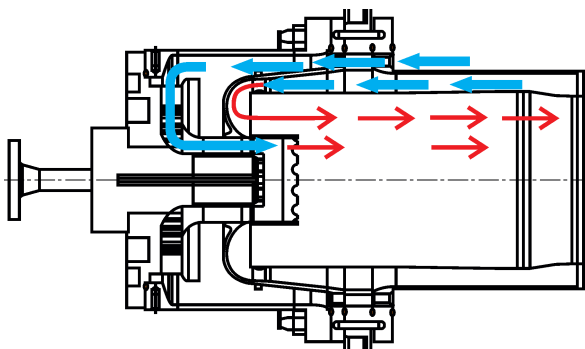


Рис. 11. Общая схема движения потока в камере сгорания, оборудованной по технологии FlameSheet [41]

вающих нулевые выбросы вредных веществ, – ZENTC (Zero Emission Hydrogen Turbine Center), где при поддержке государственных фондов испытывают и реализуют на практике технологии полного цикла использования водорода для получения электроэнергии [42].

К 2020 году компанией Siemens Energy были испытаны ГТУ, работающие на топливе с разной долей водорода (рис. 12):

- конверсионные двигатели – до 100% водорода (например, SGT-A35 на основе RB211), но с использованием диффузионных камер сгорания типа WLE (wet low emissions, «сырая» МЭКС), подразумевающих непосредственный впрыск воды для улавливания NO_x и сокращающих ресурс установки;

- маломощные (до 13 МВт) промышленные ГТУ – до 30% водорода с использованием МЭКС типа DLE и до 65% с использованием диффузионных камер сгорания;

- ГТУ средней мощности (до 62 МВт) – до 50% водорода с использованием МЭКС типа DLE;

- ГТУ большой мощности (до 593 МВт) – до 30% водорода с использованием МЭКС типа DLE.

Разница в доле сжигаемого водорода для ГТУ с однопотными камерами сгорания (DLE) обусловлена разным временем их создания. Существуют три поколения топливных горелок, спроектированных исходя из разных технологических возможностей, которые позволили реализовать различные механизмы горения. С конца 2017 года компания Siemens активно внедряет аддитивные технологии (рис. 13) [43; 44].

Помимо решения проблемы горения производитель уделяет внимание проблемам газовой коррозии, охрупчивания и многоциклового усталости деталей и узлов, непосредственно контактирующих с водородом. В первую очередь, топливной аппаратуры и насосов [45]. В последние 10 лет компания Siemens активно занималась совершенствованием установок средней мощности, а к 2030 году планирует перевести все свои установки, включая самые мощные, на чистый водород [41].

Говоря об отечественном опыте использования водорода в наземных энергетических ГТУ, следует назвать проект перспективной газотурбинной установки ГТЭ-65 мощностью 65 МВт (АО «Силовые машины»). В качестве топлива в этой установке будет использоваться метано-водородная смесь, что позволит увеличить мощность ГТУ и снизить количество вредных выбросов в атмосферу [46]. Другой проект предполагает использование широко распространенной газотурбинной энергетической установки НК-16СТ (СНТК им. Н.Д. Кузнецова) мощностью 16 МВт. В работах [47; 48] расчетами и экспериментами подтверждена возможность работы этой установки на метано-водородной смеси с содержанием водорода до 48%.

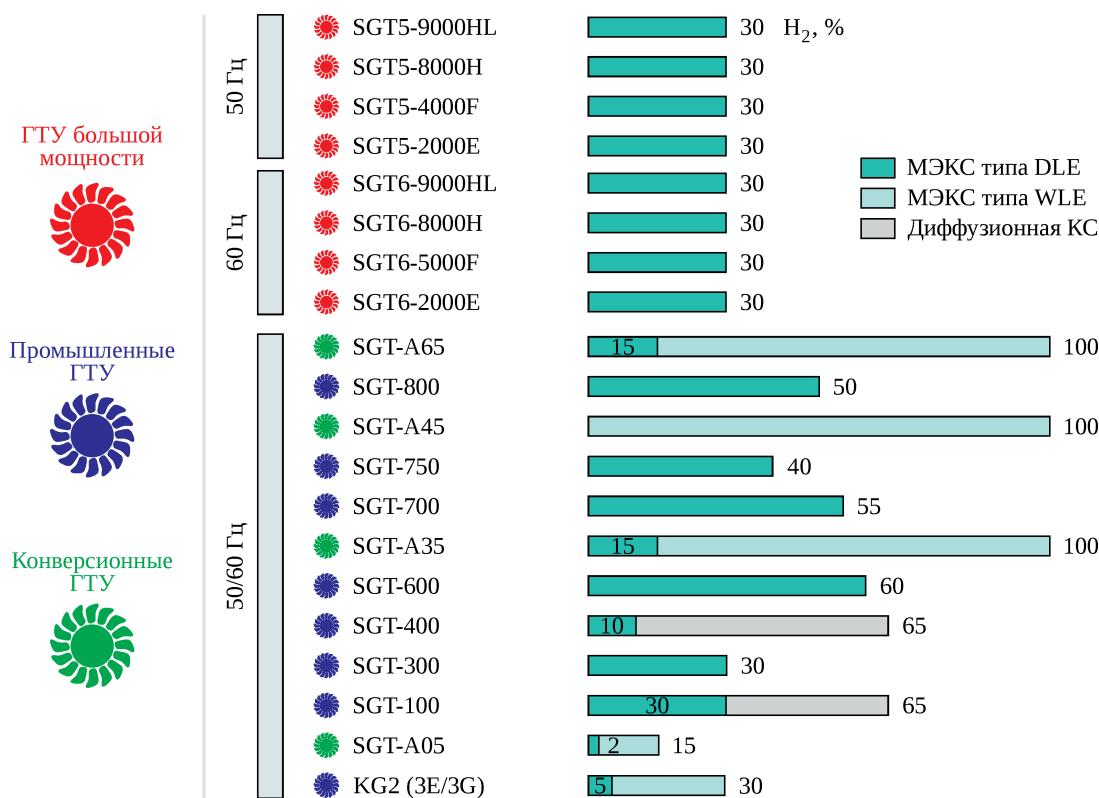


Рис. 12. Максимально допустимое объемное содержание водорода в топливной смеси водород/природный газ для ГТУ, производимых компанией Siemens Energy [43]



Рис. 13. Эволюция конструкции топливных горелок, разработанных компанией Siemens [43]: а – сварная; б – изготовленная посредством селективного лазерного спекания

Заключение

Описанный опыт реализации проектов энергетических газотурбинных установок на водородсодержащем топливе показывает следующее.

Почти все крупные производители газотурбинных двигателей в той или иной степени реализовали использование водорода в качестве топлива для энергетических ГТУ. Основным мотивом здесь является создание конкурентных преимуществ на рынке энергетических

установок в условиях усиливающихся тенденций декарбонизации атмосферы и использования возобновляемых источников энергии.

Применение ГТУ на водороде в электроэнергетике имеет смысл с точки зрения экологии только в случае использования водорода не ниже «голубой» категории, обеспечения низких уровней эмиссии, в первую очередь NO_x, а также обеспечения безопасности эксплуатации. При соблюдении данных условий использование ГТУ в энергетике представляется перспективным как минимум в среднесрочной перспективе (10...15 лет).

Основными научными и инженерными задачами, решаемыми производителями ГТУ для использования водородного топлива, являются:

- разработка модульной малоэмиссионной камеры сгорания, способной сжигать как чистый водород, так и его смеси;
- повышение сопротивляемости материалов и узлов, контактирующих с водородом, к газовой коррозии, охрупчиванию и многоциклового усталости;
- разработка новых высокопрочных теплозащитных покрытий;
- обеспечение возможности модернизации существующих газотурбинных систем.

Почти все производители проводили многолетние испытания своих установок, поэтапно увеличивая долю водорода в топливе. Наиболее высокого уровня готов-

Таблица. Данные о максимальном достигнутом уровне водорода в топливе для ГТУ

Производитель ГТУ	Конверсионные ГТУ	До 15 МВт	До 65 МВт	До 600 МВт
Ansaldo Energia	–	–	18%	50%
Capstone Turbine Corporation	–	100%	–	–
General Electric	85% (22 МВт, LM2500)	–	100%	50%
Baker Hughes	–	100%	–	–
Kawasaki Heavy Industries	–	100%	100%	–
MAN Energy Solutions	–	20%	–	–
Mitsubishi Power	–	100%	30%	30%
OPRA	–	100%	–	–
Siemens Energy	100% (35 МВт, SGT-A35)	65%	100%	30%

ности технологии к использованию чистого водорода в качестве топлива достигли компании General Electric, Siemens и Kawasaki (таблица), реализовавшие полный цикл использования водородных энергетических установок на базе ГТУ. За последние 10 лет эти компании выполнили ряд крупных научно-исследовательских работ по созданию работающих на водороде малоэмиссионных камер сгорания, а также по квалификации кон-

струкционных материалов, используемых в водородной среде, и созданию новых теплозащитных покрытий.

В целом следует отметить, что, несмотря на противоречивость представлений о реальных возможностях использования водородного топлива, и зарубежные, и некоторые отечественные компании пытаются обеспечить возможность работы своих газотурбинных установок на водородсодержащих смесях.

Литература

1. Hosseini S.E., Butler B. An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles // *International Journal of Green Energy*. 2019. Vol. 17, iss. 1. P. 13–37.
2. Short-term energy outlook : December 2021 / U.S. Energy Information Administration. 2021. 15 p., 15 p. ill. and tab. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/steo/archives/dec21.pdf> (accessed: 09.12.2021).
3. Громов А.И. Мировой рынок нефти в период глобальной энергетической трансформации: ожидания и опасения // *Энергетическая политика*. 2018. № 3. С. 75–86. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovoy-rynok-nefti-v-period-globalnoy-energeticheskoy-transformatsii-ozhidaniya-i-opaseniya> (дата обращения: 09.12.2021).
4. Состояние рынка природного газа в условиях пандемии COVID-19 и нестабильности спроса / А.А. Лазник, Р.Д. Жарков, Н.Ю. Родыгина, В.И. Мусихин // *Российский внешнеэкономический вестник*. 2021. № 5. С. 101–115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-rynka-prirodnogo-gaza-v-usloviyah-pandemii-covid-19-i-nestabilnosti-sprosa> (дата обращения: 19.12.2021).
5. Ritchie H., Roser M. Fossil fuels // *Our World in Data* : site. URL: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (accessed: 09.12.2021).
6. Energy use for transportation // U.S. Energy Information Administration : Independent statistics & analysis : site. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation.php> (дата обращения: 19.12.2021).
7. Gao Y., Gao X., Zhang X. The 2°C global temperature target and the evolution of the long-term goal of addressing climate change – from the United Nations Framework Convention on Climate Change to the Paris Agreement // *Engineering*. 2017. Vol. 3, iss. 2. P. 272–278.
8. Громов А.И. Стратегия ЕС по сокращению выбросов метана: новые вызовы для российского газа // *Энергетическая политика*. 2021. № 5 (159). С. 26–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-es-po-sokrascheniyu-vybrosov-metana-novye-vyzovy-dlya-rossiyskogo-gaza> (дата обращения: 09.12.2021).
9. Schneider T., O’Gorman P.A., Levine X.J. Water vapor and the dynamics of climate changes // *Reviews of Geophysics*. 2010. Vol. 48, iss. 3. Art. RG3001. 22 p.
10. Adoption of the Paris Agreement : proposal by the President : draft decision -/CP.21 / United Nations, Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties, Twenty-first session. 2015. 32 p. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
11. Иктисанов В.А., Шкруднев Ф.Д. Декарбонизация: взгляд со стороны // *Энергетическая политика*. 2021. № 8 (162). С. 42–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dekarbonizatsiya-vzglyad-so-storony> (дата обращения: 09.12.2021).

-
12. Performance evaluation of biogas upgrading systems from swine farm to biomethane production for renewable hydrogen source / Ch. Worawimut, S. Vivanpatarakij, A. Watanapa, W. Wiyaratn, S. Assabumrungrat // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, iss. 41. P. 23135–23148.
 13. «Зеленый» и/или «голубой» водород / М.Х. Сосна, М.В. Масленникова, М.В. Крючков, М.В. Пустовалов // *Нефтегазохимия*. 2020. № 3/4. С. 21–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenyy-i-ili-goluboy-vodorod> (дата обращения: 01.12.2021).
 14. Marchant N. Grey, blue, green – why are there so many colours of hydrogen? // *World Economic Forum* : site. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/> (accessed: 11.12.2021). Publ. date: 27.07.2021.
 15. Leitch D. Hydrogen: the great energy hope, or a whole lot of hype? // *Renew economy* : Clean energy news and analysis : site. URL: <https://reneweconomy.com.au/hydrogen-the-great-energy-hope-or-a-whole-lot-of-hype-16691/> (accessed: 11.12.2021). Publ. date: 15.07.2020.
 16. Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies / S.P.S. Badwal, S.S. Giddey, C. Munnings, A.I. Bhatt and A.F. Hollenkamp // *Frontiers in Chemistry*. 2014. Vol. 2. Art. 79. 28 p.
 17. Haseli Y. Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43, iss. 18. P. 9015–9021.
 18. Ritchie H., Roser M. Electricity mix // *Our world in data* : site. URL: <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (accessed: 22.12.2021).
 19. Данильчук Е. Вызов будущего российским промышленным установкам // *Neftgaz.RU* : сайт. URL: <https://neftgaz.ru/news/vtrende/710869-vyzov-budushchego-rossiyskim-promyshlennym-ustanovkam/> (дата обращения: 10.01.2022). Дата публ.: 29.11.2021.
 20. Правительство Российской Федерации. Распоряжение : от 12 октября 2020 г. № 2634-р : Москва // *Официальный интернет-портал правовой информации*. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010220027> (дата обращения: 04.08.2022).
 21. 50 лет первым в нашей стране испытаниям авиадвигателя на водороде // *Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова* : сайт. URL: <https://ciam.ru/press-center/news/50-years-of-the-first-soviet-testing-of-an-aircraft-engine-on-hydrogen/> (дата обращения: 20.03.2022). Дата публ.: 27.10.2017.
 22. ЦИАМ 1980–2000. Научный вклад в создание авиационных двигателей : в 2 кн. / под общ. науч. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М. : Машиностроение, 2000.
 23. Палкин В.А. Обзор работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива в авиации // *Авиационные двигатели*. 2021. № 4 (13). С. 63–84.
 24. Gas turbines // *Ansaldo Energia* : site. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/business-lines/new-units/gas-turbines> (accessed: 19.12.2021).
 25. Ansaldo Energia solutions for hydrogen combustion: fast-forward to a hydrogen fueled gas turbines // *Ansaldo Energia* : site. URL: [https://www.ansaldoenergia.com/PublishingImages/Idrogeno/Ansaldo Energia Solutions For Hydrogen Combustion.pdf](https://www.ansaldoenergia.com/PublishingImages/Idrogeno/Ansaldo%20Energia%20Solutions%20For%20Hydrogen%20Combustion.pdf) (accessed: 19.12.2021).
 26. Hiddeman M., Marx P. Operating experience with the latest upgrade of Alstom’s sequential combustion GT26 gas turbine // *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air* : June 14–18, 2010, Glasgow, UK. Vol. 1: Aircraft engine; Ceramics; Coal, biomass and alternative fuels; Education; Electric power; Manufacturing materials and metallurgy. P. 861–867. GT2010-23571.
 27. Capstone Turbine Corporation announces significant progress in microturbine hydrogen testing // *Capstone Green Energy* : site. URL: <https://www.capstonegreenenergy.com/info/news/press-releases/detail/3799/> (accessed: 10.01.2022). Publ. date: 24.08.2020.
 28. Cocchi S., Sigali S. Development of a low-NO_x hydrogen-fuelled combustor for 10 MW class gas turbines // *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air* : June 14–18, 2010, Glasgow, UK. Vol. 2: Combustion, fuels and emissions, pt. A/B. P. 1025–1035. GT2010-23348.
 29. Hydrogen fueled gas turbines // *GE Gas Power* : site. URL: <https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines> (accessed: 06.01.2022).
 30. Анализ методов и характеристик систем регулирования ГТУ с малоэмиссионными камерами сгорания / Свердлов Е.Д., Пузич А.А., Дубовицкий А.Н., Владимиров А.В. // *Авиационные двигатели*. 2021. № 1 (10). С. 47–56.
 31. Davis L.B., Black S.H. Dry low NO_x combustion systems for GE heavy-duty gas turbines / *GE Power Systems*. Schenectady, NY, 1999. ii, 22 [2] p. GER-3568G.
-

-
32. Active on-line protective tuning adjustment technique to achieve better availability and performance in pre-mix DLN combustion / C. Koeneke, M. Nomura, H. Iba, T. Kawakami, T. Koga // ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference : June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA. Vol. 1. P. 949–953. GT2003-38954.
 33. Snam and Baker Hughes test world's first hydrogen blend turbine for gas networks // Baker Hughes : site. URL: <https://www.bakerhughes.com/company/news/snam-and-baker-hughes-test-worlds-first-hydrogen-blend-turbine-gas-networks> (accessed: 01.06.2022). Publ. date: 20.07.2020.
 34. Hydrogen fueled dry low NO_x gas turbine combustor conceptual design / M. Cerutti, S. Cocchi, R. Modi, S. Sigali, G. Bruti // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition : June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany. Vol. 4B: Combustion, fuels and emissions. GT2014-26136. 11 p.
 35. Energy // Kawasaki : Powering your potential : site / Kawasaki Heavy Industries. URL: <https://global.kawasaki.com/en/energy/index.html> (accessed: 23.12.2021).
 36. One of the world's first 100% hydrogen-to-power demonstrations on industrial scale launches in Lingen, Germany / RWE, Kawasaki // Kawasaki : Powering your potential : site / Kawasaki Heavy Industries. URL: https://global.kawasaki.com/news_211209-2e.pdf (accessed: 10.01.2022). Publ. date: 09.12.2021.
 37. Gas turbine combustion technology // Man Energy Solutions : Future in the making : site. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/oil-and-gas-process-industry-documents/gas-_turbine-_combustion1.pdf?sfvrsn=46e8a9df_12 (accessed: 10.01.2022).
 38. Institute of Test and Simulation for Gas Turbines // DLR : German Aerospace Center : site. URL: <https://www.dlr.de/content/en/institutes/institute-of-test-and-simulation-for-gasturbines.html> (accessed: 10.01.2022).
 39. Creating a sustainable future through hydrogen generation // Mitsubishi Power : site / Mitsubishi Heavy Industries. URL: <https://power.mhi.com/special/hydrogen> (accessed: 10.01.2022).
 40. Development and atmospheric testing of a high hydrogen FlameSheet™ combustor for the OP16 gas turbine / T. Bouten, J. Withag, L.-U. Axelsson, J. Koomen, D. Jansen, P. Stuttaford // ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition : June 7–11, 2021, virtual, online. Vol. 3A: Combustion, fuels, and emissions. GT2021-59236. 8 p.
 41. FlameSheet™ combustor engine and rig validation for operational and fuel flexibility with low emissions / P. Stuttaford, H. Rizkalla, K. Oumejjoud, N. Demougeot, J. Bosnoian, F. Hernandez, M. Yaquinto, A.P. Mohammed, D. Terrell, R. Weller // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition : June 13–17, 2016, Seoul, South Korea. Vol. 4A: Combustion, fuels and emissions. GT2016-56696. 11 p.
 42. Zero Emission Hydrogen Turbine Center // Siemens Energy : site. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/priorities/future-technologies/hydrogen/zehtc.html> (accessed: 10.01.2022).
 43. Hydrogen power with Siemens Gas Turbines : Reliable carbon-free power with flexibility : white paper : April 2020 / K. Bohan, E. Verena Klapdor, B. Prade, A. Haeggmark, G. Bulat, N. Prasad, M. Welch, P. Adamsson, T. Johnke ; ed. U. Rohr ; Siemens. Siemens Gas and Power, 2020. 22 p. URL: <https://www.infrastructureasia.org/-/media/Articles-for-ASIA-Panel/Siemens-Energy---Hydrogen-Power-with-Siemens-Gas-Turbines.pdf?la=en&hash=1B91FADA342293EFB56CDBE312083FE1B64DA111> (accessed: 10.01.2022).
 44. Streamlined frameworks for advancing metal based additive manufacturing technologies / W. Fu, C. Haberland, E.V. Klapdor, D. Rule, S. Piegert // Journal of the Global Power and Propulsion Society. 2018. Vol. 2. P. 317–328.
 45. Adam P., Bode R., Groissboeck M. Hydrogen turbomachinery : Ready pipeline compressor stations for 100% hydrogen // Turbomachinery International. 2020. Vol. 61, no. 6 (November/December). P. 18–20. URL: <https://www.turbomachinerymag.com/view/readying-pipeline-compressor-stations-for-100-hydrogen> (accessed: 01.04.2022).
 46. «Силовые машины» в сотрудничестве с Самарским университетом разработают первую в России газотурбинную установку на метано-водородном топливе // Силовые машины : сайт. URL: <https://power-m.ru/press-center/news/silovye-mashiny-v-sotrudnichestve-s-samarskim-universitetom-razrabotayut-pervuyu-v-rossii-gazoturbinnuyu-ustanovku-na-metano-vodorodnom-toplive> (дата обращения: 01.04.2022). Дата публ.: 24.12.2020.
 47. Бакланов А.В. Возможность использования метано-водородного топлива в конвертированных газотурбинных двигателях для энергетических установок // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. P. 82–93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-ispolzovaniya-metano-vodorodnogo-topliva-v-konvertirovannyh-gazoturbinyh-dvigatelyah-dlya-energeticheskikh-ustanovok> (дата обращения: 01.04.2022).
 48. Концепция создания крупномасштабных систем производства и распределения метано-водородного топлива как эффективного альтернативного энергоносителя / В.А. Казарян, В.Г. Хлопцов, В.А. Михаленко, А.Я. Столяревский // Газовая промышленность. 2018. № 11 (777). P. 114–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya>
-

References

1. Hosseini S.E., Butler B. An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles // *International Journal of Green Energy*. 2019. Vol. 17, iss. 1. P. 13–37.
2. Short-term energy outlook : December 2021 / U.S. Energy Information Administration. 2021. 15 p., 15 p. ill. and tab. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/steo/archives/dec21.pdf> (accessed: 09.12.2021).
3. Gromov A.I. World oil market during global energy transformation: expectations and concerns. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*. 2018. No. 3. P. 75–86. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovoy-rynok-nefti-v-period-globalnoy-energeticheskoy-transformatsii-ozhidaniya-i-opaseniya> (accessed: 09.12.2021).
4. Laznik A.A., Zharkov R.D., Rodygina N.Yu., Musikhin V.I. Natural gas market under COVID-19 pandemic and unstable demand. *Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik [Russian Foreign Economic Bulletin]*. 2021. No. 5. P. 101–115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-rynka-prirodnogo-gaza-v-usloviyah-pandemii-covid-19-i-nestabilnosti-sprosa> (accessed: 19.12.2021).
5. Ritchie H., Roser M. Fossil fuels // *Our World in Data* : site. URL: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (accessed: 09.12.2021).
6. Energy use for transportation // U.S. Energy Information Administration : Independent statistics & analysis : site. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation.php> (accessed: 19.12.2021).
7. Gao Y., Gao X., Zhang X. The 2°C global temperature target and the evolution of the long-term goal of addressing climate change – from the United Nations Framework Convention on Climate Change to the Paris Agreement // *Engineering*. 2017. Vol. 3, iss. 2. P. 272–278.
8. Gromov A.I. EU strategy to reduce methane emissions: new challenges for Russian gas. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*. 2021. No. 5 (159). P. 26–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-es-po-sokrascheniyu-vybrosov-metana-novye-vyzovy-dlya-rossiyskogo-gaza> (accessed: 09.12.2021).
9. Schneider T., O’Gorman P.A., Levine X.J. Water vapor and the dynamics of climate changes // *Reviews of Geophysics*. 2010. Vol. 48, iss. 3. Art. RG3001. 22 p.
10. Adoption of the Paris Agreement : proposal by the President : draft decision -/CP.21 / United Nations, Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties, Twenty-first session. 2015. 32 p. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
11. Iktisanov V.A., Shkrudnev F.D. Decarbonization: outside view. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*. 2021. No. 8 (162). P. 42–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dekarbonizatsiya-vzglyad-so-storony> (accessed: 09.12.2021).
12. Performance evaluation of biogas upgrading systems from swine farm to biomethane production for renewable hydrogen source / Ch. Worawimut, S. Vivanpatarakij, A. Watanapa, W. Wiyaratn, S. Assabumrungrat // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, iss. 41. P. 23135–23148.
13. Sosna M.Kh., Maslennikova M.V., Kryuchkov M.V., Pustovalov M.V. «Green» and/or «blue» hydrogen. *Neftegazokhimiya [Oil & Gas Chemistry]*. 2020. No. 3/4. P. 21–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenyy-i-ili-goluboy-vodorod> (accessed: 01.12.2021).
14. Marchant N. Grey, blue, green – why are there so many colours of hydrogen? // *World Economic Forum* : site. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/> (accessed: 11.12.2021). Publ. date: 27.07.2021.
15. Leitch D. Hydrogen: the great energy hope, or a whole lot of hype? // *Renew economy* : Clean energy news and analysis : site. URL: <https://reneweconomy.com.au/hydrogen-the-great-energy-hope-or-a-whole-lot-of-hype-16691/> (accessed: 11.12.2021). Publ. date: 15.07.2020.
16. Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies / S.P.S. Badwal, S.S. Giddey, C. Munnings, A.I. Bhatt and A.F. Hollenkamp // *Frontiers in Chemistry*. 2014. Vol. 2. Art. 79. 28 p.
17. Haseli Y. Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43, iss. 18. P. 9015–9021.
18. Ritchie H., Roser M. Electricity mix // *Our world in data* : site. URL: <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (accessed: 22.12.2021).
19. Danil’chuk E. Vyzov budushchego rossiiskim promyshlennym ustanovkam [The future challenges for Russian industrial gas-turbine units]. *Neftegaz.ru*: website. URL: <https://neftegaz.ru/news/vtrende/710869-vyzov-budushchego-rossiiskim-promyshlennym-ustanovkam/> (accessed: 10.01.2022). Publ. date: 29.11.2021.

-
20. The Government of the Russian Federation. Directive no. 2634-r dated October 12, 2020: Moscow. Official Internet portal of legal information. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010220027> (accessed: 08.04.2022).
 21. 50 let pervym v nashei strane ispytaniyam aviadvigatelya na vodorode [50-year anniversary of the first tests of hydrogen aircraft engine in our country]. Central Institute of Aviation Motors: website. URL: <https://ciam.ru/press-center/news/-50-years-of-the-first-soviet-testing-of-an-aircraft-engine-on-hydrogen/> (accessed: 03.20.2022). Publ. date: 27.10.2017.
 22. CIAM 1980–2000. Nauchnyi vklad v sozдание aviatsionnykh dvigatelei [Scientific contribution to the development of aircraft engines]. In 2 books. Scientific general edition by V.A. Skibin and V.I. Solonin. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 2000.
 23. Palkin V.A. Review of the abroad works on an application of alternative fuels in aviation. *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines]. 2021. No. 4 (13). P. 63–84.
 24. Gas turbines // Ansaldo Energia : site. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/business-lines/new-units/gas-turbines> (accessed: 19.12.2021).
 25. Ansaldo Energia solutions for hydrogen combustion: fast-forward to a hydrogen fueled gas turbines // Ansaldo Energia : site. URL: https://www.ansaldoenergia.com/PublishingImages/Idrogeno/Ansaldo_Energia_Solutions_For_Hydrogen_Combustion.pdf (accessed: 19.12.2021).
 26. Hiddeman M., Marx P. Operating experience with the latest upgrade of Alstom’s sequential combustion GT26 gas turbine // ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air : June 14–18, 2010, Glasgow, UK. Vol. 1: Aircraft engine; Ceramics; Coal, biomass and alternative fuels; Education; Electric power; Manufacturing materials and metallurgy. P. 861–867. GT2010-23571.
 27. Capstone Turbine Corporation announces significant progress in microturbine hydrogen testing // Capstone Green Energy : site. URL: <https://www.capstonegreenenergy.com/info/news/press-releases/detail/3799/> (accessed: 10.01.2022). Publ. date: 24.08.2020.
 28. Cocchi S., Sigali S. Development of a low-NO_x hydrogen-fuelled combustor for 10 MW class gas turbines // ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air : June 14–18, 2010, Glasgow, UK. Vol. 2: Combustion, fuels and emissions, pt. A/B. P. 1025–1035. GT2010-23348.
 29. Hydrogen fueled gas turbines // GE Gas Power : site. URL: <https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines> (accessed: 06.01.2022).
 30. Sverdlov E.D., Puzich A.A., Dubovitsky A.N., Vladimirov A.V. Analysis of methods and characteristics of control systems for gas turbines with low-emission combustion chambers. *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines]. 2021. No. 1 (10). P. 47–56.
 31. Davis L.B., Black S.H. Dry low NO_x combustion systems for GE heavy-duty gas turbines / GE Power Systems. Schenectady, NY, 1999. ii, 22 [2] p. GER-3568G.
 32. Active on-line protective tuning adjustment technique to achieve better availability and performance in pre-mix DLN combustion / C. Koeneke, M. Nomura, H. Iba, T. Kawakami, T. Koga // ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference : June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA. Vol. 1. P. 949–953. GT2003-38954.
 33. Snam and Baker Hughes test world’s first hydrogen blend turbine for gas networks // Baker Hughes : site. URL: <https://www.bakerhughes.com/company/news/snam-and-baker-hughes-test-worlds-first-hydrogen-blend-turbine-gas-networks> (accessed: 01.06.2022). Publ. date: 20.07.2020.
 34. Hydrogen fueled dry low NO_x gas turbine combustor conceptual design / M. Cerutti, S. Cocchi, R. Modi, S. Sigali, G. Bruti // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition : June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany. Vol. 4B: Combustion, fuels and emissions. GT2014-26136. 11 p.
 35. Energy // Kawasaki : Powering your potential : site / Kawasaki Heavy Industries. URL: <https://global.kawasaki.com/en/energy/index.html> (accessed: 23.12.2021).
 36. One of the world’s first 100% hydrogen-to-power demonstrations on industrial scale launches in Lingen, Germany / RWE, Kawasaki // Kawasaki : Powering your potential : site / Kawasaki Heavy Industries. URL: https://global.kawasaki.com/news_211209-2e.pdf (accessed: 10.01.2022). Publ. date: 09.12.2021.
 37. Gas turbine combustion technology // Man Energy Solutions : Future in the making : site. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/oil-and-gas-process-industry-documents/gas_turbine_combustion1.pdf?sfvrsn=46e8a9df_12 (accessed: 10.01.2022).
 38. Institute of Test and Simulation for Gas Turbines // DLR : German Aerospace Center : site. URL: <https://www.dlr.de/content/en/institutes/institute-of-test-and-simulation-for-gasturbines.html> (accessed: 10.01.2022).
-

-
39. Creating a sustainable future through hydrogen generation // Mitsubishi Power : site / Mitsubishi Heavy Industries. URL: <https://power.mhi.com/special/hydrogen> (accessed: 10.01.2022).
 40. Development and atmospheric testing of a high hydrogen FlameSheet™ combustor for the OP16 gas turbine / T. Bouten, J. Withag, L.-U. Axelsson, J. Koomen, D. Jansen, P. Stuttaford // ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition : June 7–11, 2021, virtual, online. Vol. 3A: Combustion, fuels, and emissions. GT2021-59236. 8 p.
 41. FlameSheet™ combustor engine and rig validation for operational and fuel flexibility with low emissions / P. Stuttaford, H. Rizkalla, K. Oumejjoud, N. Demougeot, J. Bosnoian, F. Hernandez, M. Yaquinto, A.P. Mohammed, D. Terrell, R. Weller // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition : June 13–17, 2016, Seoul, South Korea. Vol. 4A: Combustion, fuels and emissions. GT2016-56696. 11 p.
 42. Zero Emission Hydrogen Turbine Center // Siemens Energy : site. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/priorities/future-technologies/hydrogen/zehtc.html> (accessed: 10.01.2022).
 43. Hydrogen power with Siemens Gas Turbines : Reliable carbon-free power with flexibility : white paper : April 2020 / K. Bohan, E. Verena Klapdor, B. Prade, A. Haeggmark, G. Bulat, N. Prasad, M. Welch, P. Adamsson, T. Johnke ; ed. U. Rohr ; Siemens. Siemens Gas and Power, 2020. 22 p. URL: <https://www.infrastructureasia.org/-/media/Articles-for-ASIA-Panel/Siemens-Energy---Hydrogen-Power-with-Siemens-Gas-Turbines.pdf?la=en&hash=1B91FADA342293EFB56CDBE312083FE1B64DA111> (accessed: 10.01.2022).
 44. Streamlined frameworks for advancing metal based additive manufacturing technologies / W. Fu, C. Haberland, E.V. Klapdor, D. Rule, S. Piegert // Journal of the Global Power and Propulsion Society. 2018. Vol. 2. P. 317–328.
 45. Adam P., Bode R., Groissboeck M. Hydrogen turbomachinery : Readying pipeline compressor stations for 100% hydrogen // Turbomachinery International. 2020. Vol. 61, no. 6 (November/December). P. 18–20. URL: <https://www.turbomachinerymag.com/view/readying-pipeline-compressor-stations-for-100-hydrogen> (accessed: 01.04.2022).
 46. In cooperation with Samara University, Power Machines will develop Russia's first gas turbine plant powered by methane-hydrogen mixture. Power Machines: website. URL: https://power-m.ru/en/press-center/news/in-cooperation-with-samara-university-power-machines-will-develop-russia-s-first-gas-turbine-plant-p/?sphrase_id=117048 (accessed: 01.04.2022). Publ. date: 24.12.2020.
 47. Baklanov A.V. The possibility of using methane-hydrogen fuel in converted gas turbine engines for power plants. Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal [Siberian Aerospace Journal]. 2021. Vol. 22, no. 1. P. 82–93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-ispolzovaniya-metano-vodorodnogo-topliva-v-konvertirovannyh-gazoturbinnnyh-dvigatelyah-dlya-energeticheskikh-ustanovok> (accessed: 01.04.2022).
 48. Kazaryan V.A., Khloptsov V.G., Mikhalenko V.A., Stolyarevsky A.Ya. Concept of creation of the largescale systems of production and distribution of methane-hydrogen fuel as an effective alternative energy carrier. Gazovaia promyshlennost' [Gas Industry of Russia]. 2018. No. 11 (777). P. 114–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-sozdaniya-krupnomasshtabnyh-sistem-proizvodstva-i-raspredeleniya-metano-vodorodnogo-topliva-kak-effektivnogo> (accessed: 01.04.2022).

Материалы получены редакцией 02.06.2022