

## СТАТЬИ

УДК 621.438

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА КАК ТОПЛИВА  
ДЛЯ БУДУЩЕЙ РАБОТЫ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ****Алфаяд А.Г.Х.***ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,  
Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казань, e-mail: assemalfayad@gmail.com*

Для повышения гибкости топлива водород представляет собой возможное альтернативное топливо для газовых турбин в рамках будущего производства электроэнергии с низким уровнем выбросов, в случае производства водорода с использованием возобновляемых источников энергии. При разработке водородных газовых турбин ключевой технологией является стабильное сжигание водорода с низким содержанием оксида азота (NOx), в частности сжигание водорода с низким уровнем выбросов. Применение водорода как топлива для газовой турбины позволяет избежать различных выбросов негативных веществ, которые применяются в настоящее время, таких как природный газ. Целью данной работы является рассмотрение возможности применения водорода в качестве топлива для газовой турбины. В работе будет проведен теоретический анализ и будут обсуждаться приведенные результаты испытания газовой турбины, работающей на водороде. Также будет представлено сравнение теплоты сгорания различных видов топлива. Таким образом, разработка технологий сжигания водорода с низким уровнем выбросов является важной и сложной задачей для будущих газовых турбин, работающих на водороде. И, чтобы достигнуть максимальной эффективности от сжигания водорода, необходим тщательный выбор оборудованной турбинной установки, а именно камера сгорания.

**Ключевые слова:** водородная энергетика, выбросы газовых турбин, газотурбинная установка, тяжелые углеводороды, газообразное топливо, теплота

**POSSIBILITY OF USE OF HYDROGEN AS A FUEL  
FOR FUTURE OPERATION OF A GAS TURBINE****Alfayyad A.G.Kh.***Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies,  
Kazan, e-mail: assemalfayad@gmail.com*

To increase fuel flexibility, hydrogen is a possible alternative fuel for gas turbines in the framework of future low-emission electricity generation, in the case of hydrogen production using renewable energy sources. In the development of hydrogen gas turbines, the stable combustion of hydrogen with low nitrogen oxide (NOx) content, in particular low emission hydrogen combustion, is a key technology. The use of hydrogen as a fuel for gas turbines makes it possible to avoid various emissions of negative substances that are currently used as natural gas. The purpose of this work is to consider the possibility of using hydrogen as a fuel for a gas turbine. The paper will conduct a theoretical analysis and discuss the results of the tests on the application of a gas turbine powered by hydrogen. Comparisons of heat of combustion between different fuels will also be presented. Thus, the development of low emission hydrogen combustion technologies is an important and challenging task for future hydrogen gas turbines. And in order to achieve maximum efficiency from hydrogen combustion, a careful choice of an equipped turbine plant, namely a combustion chamber, is necessary.

**Keywords:** hydrogen energy, gas turbine emissions, gas turbine plant, heavy hydrocarbons, gaseous fuel, heat

Объем применения водорода разнообразен – в частности, его используют в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания и в камерах сгорания электростанций.

Одним из важных преимуществ водородной энергетики является разнообразие способов получения водорода. Существует несколько способов получения водорода:

- 1) паровая конверсия метана;
- 2) газификация угля;
- 3) электролиз воды;
- 4) пиролиз;
- 5) частичное окисление;
- 6) биотехнология [1].

За последнее десятилетие глобальный спрос на возобновляемую энергию быстро увеличился, что ставит новые задачи перед традиционными системами произ-

водства электроэнергии. Атомным и угольным электростанциям в будущем будет очень трудно участвовать в производстве электроэнергии, особенно в Европе. В случае преодоления новых вызовов газотурбинная технология имеет реальные шансы закрепиться и расширить свою роль в будущем производстве электроэнергии.

В прошлом «эффективность» была единственным ключевым фактором развития газовых турбин. В настоящее время гибкие системы производства электроэнергии и системы хранения энергии становятся все более важными для выполнения требований рынка возобновляемых источников энергии [2].

Использование водорода в качестве авиационного топлива имеет огромные эко-

логические преимущества по сравнению с существующими системами за счет устранения монооксида углерода (CO), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), оксидов серы (SO<sub>x</sub>), несгоревших углеводородов и дыма. Выбросы водородных двигателей относительно невелики и состоят из воды и оксидов азота (NO<sub>x</sub>), каждый из которых оказывает некоторое воздействие на окружающую среду, однако в целом значительно меньше, чем у обычных современных двигателей. Воздействие NO<sub>x</sub> как парникового газа хорошо известно, и можно предпринять шаги для минимизации этих выбросов в водородных газотурбинных двигателях. В результате, судя по выбросам двигателей, водород является экологически безопасным вариантом для использования в будущих силовых установках [3].

Таким образом, газовая турбина в будущем должна предлагать больше эксплуатационных возможностей, таких как большее количество пусков, более низкие выбросы при частичной нагрузке, возможность горячего пуска, короткое время пуска, низкие эксплуатационные расходы и гибкость в отношении топлива для удовлетворения требований рынка возобновляемых источников энергии.

*Общие сведения о применении ГТУ, работающей на водороде*

Ключевая технология, необходимая для масштабного использования водорода в газовой электроэнергетике, – водородная турбина. По оценке компании Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS), на существующих газотурбинных установках можно увеличить долю водорода до 20% в смеси его с природным газом без существенных изменений в конструкции. MHPS успешно испытала в Японии сверхмощную газовую турбину серии J в работе на топливной смеси из природного газа (70%) и водорода (30%). Испытания были проведены на заводе в Такасаго на парогазовой установке мощностью 700 МВт (КПД – 63% с температурой газов после камеры сгорания ГТУ – 1600 °C). Для сжигания топлива использовались горелки с вихревым перемешиванием. Благодаря водороду выбросы CO<sub>2</sub> сократились на 10%, а выбросы оксидов азота, по мнению компании, «остались на удовлетворительном уровне» [4].

Из-за больших различий в физических свойствах водорода по сравнению с другими видами топлива, такими как природный газ, сжигание водородных газов является очень сложной задачей, особенно для сжигания с низким уровнем выбросов. Компания Kawasaki Heavy Industries разработала три

различных варианта системы сжигания H<sub>2</sub>, которые показаны на рис. 1.

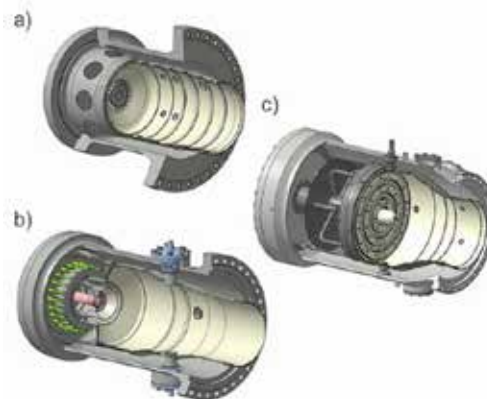


Рис. 1. Различные системы сжигания водорода: а) диффузионное пламя, б) дополнительная горелка, в) горелка микро-микс [2]

Диффузионная пламенная камера сгорания на рис. 1а, может работать на 100% водороде и 100% природном газе, а также на их смесях. Впрыск воды используется для достижения низкого уровня выбросов.

Первая газовая турбина с такой диффузионно-пламенной камерой сгорания была использована в проекте «Разработка технологии «умного» сообщества путем использования водородных систем». Этот проект субсидируется NEDO (Организация по развитию новых энергетических и промышленных технологий). Успешный ввод в эксплуатацию состоялся 19 и 20 апреля 2018 г. на демонстрационном заводе в Кобе. На рис. 2 показан интерфейс управления технологическим процессом во время режима работы на 100% водородном топливе. Выходная электрическая мощность составляет около 1,5 МВт.

Количество измеренных выбросов NO<sub>x</sub> при 100% сгорании водорода составляет 50 ppm (16% об. O<sub>2</sub>) [2].

*Горение водорода*

Газообразный водород обладает высокой реакционной способностью и поэтому имеет очень высокую скорость ламинарного горения. При добавлении к топливам с более медленным горением водород расширяет пределы воспламеняемости и увеличивает распространение пламени. Это может привести к более эффективному сгоранию и снижению выбросов опасных загрязнителей воздуха и парниковых газов [5]. Показано [6], что водород увеличивает скорость ламинарного пламени за счет кинетических, тепловых и диффузионных эффектов.

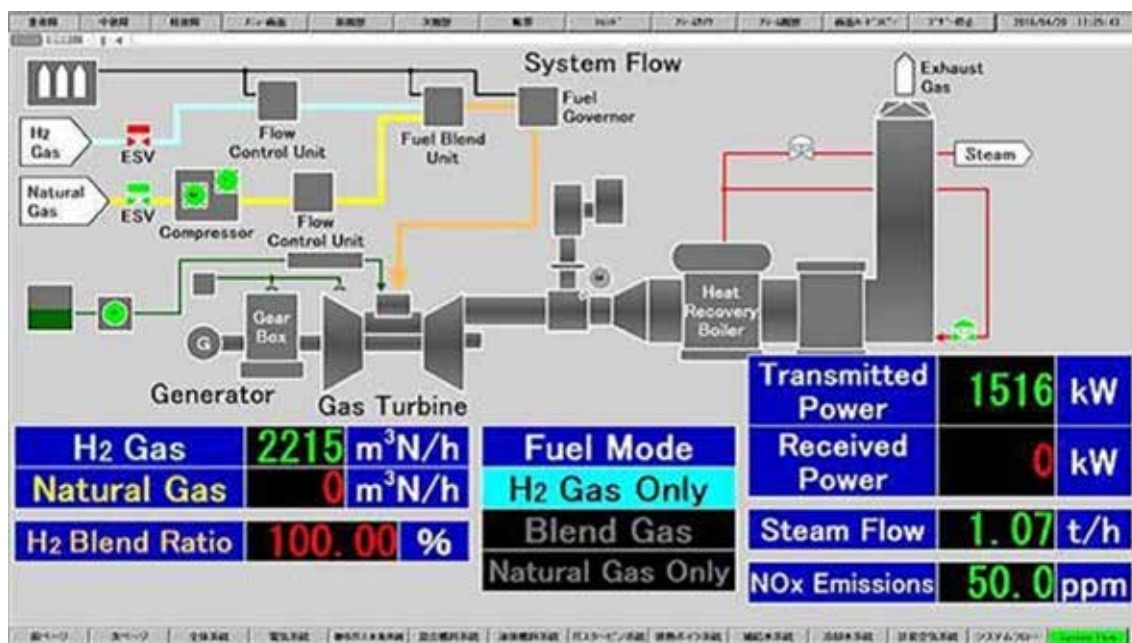


Рис. 2. Интерфейс управления технологическим процессом на заводе в Кобе [2]

Кинетический эффект вносит наибольший вклад в увеличение скорости пламени, в то время как диффузионные эффекты настолько малы, что ими можно пренебречь [6].

Несмотря на то, что все производители газовых турбин предприняли значительные усилия, чтобы более четко определить, какое количество водорода может быть допустимо для существующих продуктов газовых турбин, какие вредные последствия могут быть вызваны (например, более высокие выбросы NO<sub>x</sub>, сокращение срока службы компонентов тракта горячего газа) и какие – немедленные и долгосрочные – меры могут быть предприняты для решения проблем, предстоит еще большая работа по подготовке газовых турбин для работы с газообразным топливом с высоким содержанием водорода (в основном водород, смешанный с природным газом). Большой опыт работы с топливом с высоким содержанием водорода был накоплен с продуктами для газовых турбин, разработанными для сжигания синтез-газа (полученного в результате газификации ископаемого топлива или биомассы) с концентрацией H<sub>2</sub> в диапазоне от 30 до 60% об. H<sub>2</sub> в зависимости от используемого сырья и технологии газификации (остальным топливным компонентом является в основном монооксид углерода CO). Чтобы справиться с растущим количеством водорода (в результате электролиза воды), подмешиваемого к природному газу, не-

обходимо пересмотреть и адаптировать опыт, накопленный в отношении синтез-газа. Соответственно, большинство OEM-производителей газовых турбин могут предложить специализированные продукты для газовых турбин (первоначально разработанные для применения в синтез-газе), которые также могут работать на смесях природного газа и водорода со значительно высоким содержанием H<sub>2</sub> (около 60% по объему, в некоторых случаях даже до 100% H<sub>2</sub>). Эти газотурбинные двигатели, тем не менее, требуют специальной технологии сгорания (диффузионная горелка, разбавление азотом и/или паром, впрыск воды), чтобы справиться со сложными свойствами высокореактивных топливных смесей, и чаще всего все еще не работают, обеспечивают такие же низкие значения выбросов NO<sub>x</sub> (25 ppm), которые гарантируют газовые турбины, работающие на природном газе [7].

#### Теплота сгорания

При сгорании топлива выделяется тепло. Количество тепла, выделяемое различными видами топлива при сгорании, выражается в теплотворной способности [8]. Под теплотой сгорания понимают количество тепла в кДж, которое выделяет при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива, или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при нормальных физических условиях. Различают высшую и низшую теплоту сгорания [8].

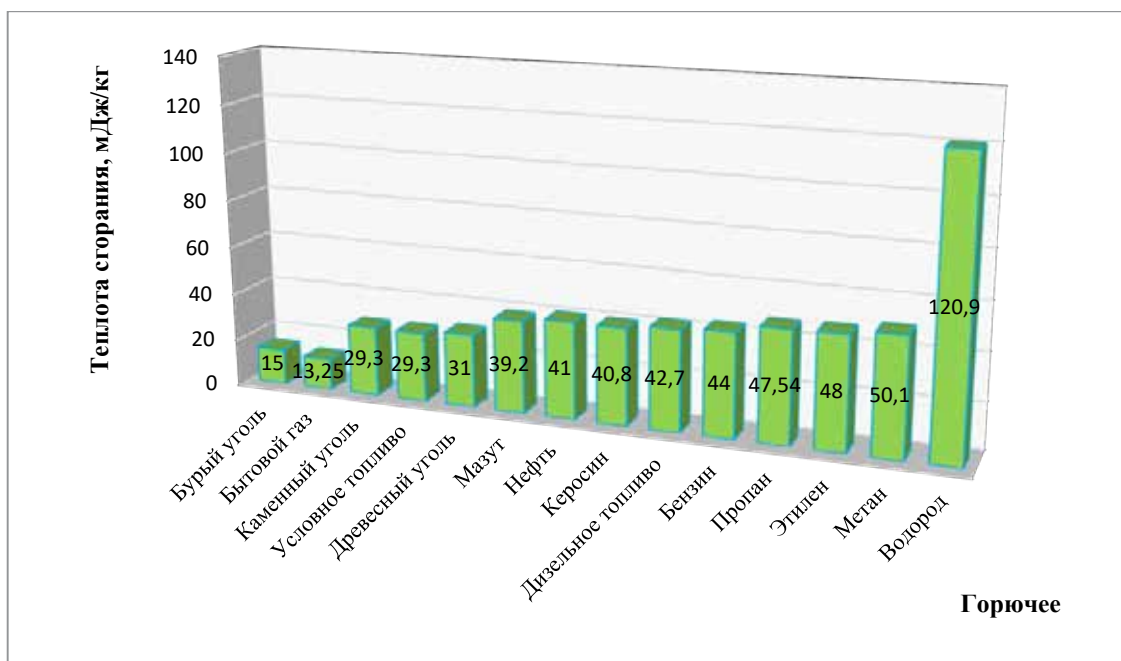


Рис. 3. Удельная теплота сгорания веществ

В газообразных продуктах сгорания любого топлива содержатся водяные пары, образующиеся в результате сгорания водорода и испарения влаги топлива. Если продукты сгорания охладить до конденсации водяных паров, в них содержащихся, то освободится тепло, затраченное на парообразование влаги.

В промышленных установках, сжигающих топливо, в тепловых двигателях различного типа газообразные продукты сгорания выбрасываются в атмосферу при таких, как правило, температурах, при которых конденсации водяных паров не происходит и, следовательно, теплота их конденсации не высвобождается для использования. Теплотехнические расчеты в подобных случаях производят по низшей теплоте сгорания.

Если процессы теплообмена между газообразными продуктами сгорания и контактируемой с ними жидкостью (контактные водонагреватели) протекают, как правило, с настолько глубоким охлаждением, что водяные пары, содержащиеся в газах, конденсируются. Высвобождаемая при этом теплота используется на подогрев жидкости в аппарате. В этих и подобных случаях теплотехнические расчёты следует вести по высшей теплоте сгорания [9]. Теплоты сгорания индивидуальных веществ представлены на рис. 3 физико-химических величин.

#### Обзор результатов по применению ГТУ, работающей на водороде

Предыдущие исследования, о которых сообщалось в литературе по изучению роли водорода в энергетической системе, включали: подробные исследования горения для изучения влияния на стабильность пламени; исследования технических последствий подмешивания водорода в процесс сгорания в газовых турбинах; и исследования роли водорода в будущих энергетических системах в целом. Добавление водорода в газовые турбины влияет на стабильность пламени, поскольку водород изменяет химический состав горения [10]. Влияние на стабильность пламени было изучено несколькими группами, подчеркнувшими важность этого фактора. В работе [11] пришли к выводу, что метан, обогащенный водородом, значительно влияет на пределы обратного воспламенения, особенно для так называемого П-образного пламени. В работе [12] исследовали стабильность пламени при изменении формы пламени для различных долей водорода и пришли к выводу, что срыв пламени представляет собой риск при переходе между формами пламени. В работе [13] исследовали стабильность пламени синтез-газа, обогащенного водородом, и обнаружили пониженную стабильность пламени при 50 об. % водорода. В работе [14] изучили влияние термоакустической нестабильности сме-



сей водорода и метана и пришли к выводу, что большинство экспериментальных измерений указывают на нестабильность при соотношении компонентов смеси выше 25 об.% водорода. Тем не менее в работе [15], смоделировав концепцию ступенчатого сжигания, пришли к выводу, что 50 об.% водорода можно смешать с метаном без снижения выходной мощности. В отдельном исследовании [16] подтвердили результаты работы [15] в испытательном центре и пришли к выводу, что стабильное горение может быть достигнуто при содержании водорода до 70 об.% с использованием ступенчатого сжигания, а при уровнях > 70 об.% ожидается лишь незначительное снижение выходной мощности. Аналогичные результаты были получены в работе [17], которые успешно провели испытание с полной газовой турбиной («испытание полного двигателя») с 60% водорода при сохранении стабильного горения и оксида азота (NOx) выбросы на уровне < 25 частей на миллион (ppm). Кроме того, поставщики газовых турбин заявили, что в некоторых из их газовых турбин в настоящее время возможно соотношение смешивания до 60%, а некоторые поставщики стремятся увеличить это до 100% объединение производителей турбин [18]. Процесс горения и стабильность пламени

необходимы для работы газовой турбины. Следовательно, необходимы более детальные исследования, чтобы понять полностью обогащенное водородом горение. Несмотря на заявления производителей о соотношениях смешивания от 60% до 100% по объему, фактический опыт использования водорода в газовых турбинах с обычными камерами сгорания с предварительным смешиванием в течение более длительных периодов времени до сих пор ограничивался более низкими долями водорода [10], например 12% водорода, который подается в газовую турбину в течение 18 000 эквивалентных часов работы, как сообщают в работе [19].

В работе [20] исследовали возможности применения водорода и различных видов топлива в качестве основного топлива для минимизации выбросов и улучшения характеристик работы газотурбинной установки. По их результатам исследования получены основные характеристики двигателя ГТУ при работе на разных видах топлива, представлено на рис. 4. Авторы пришли к выводу, что применение водорода в качестве топлива для газовых турбин позволяет сократить не только расходы на топливоподготовку, но и минимизировать выбросы и улучшить характеристики работы газотурбинной установки.

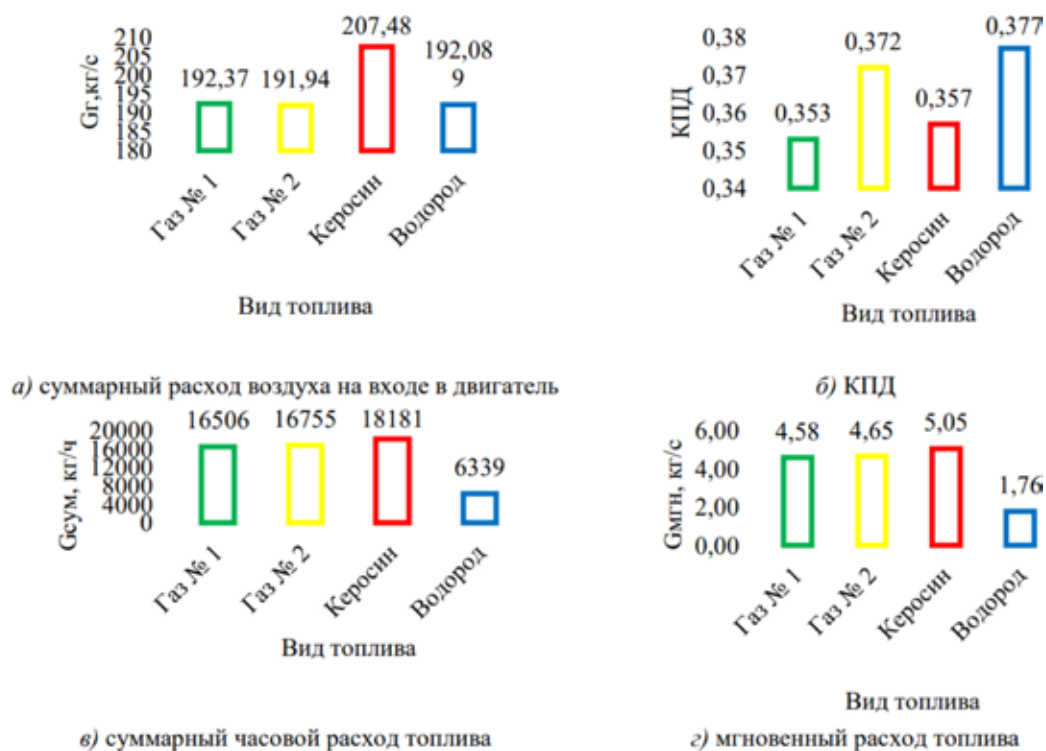


Рис. 4. Основные характеристики двигателя при работе на разных видах топлива [20]

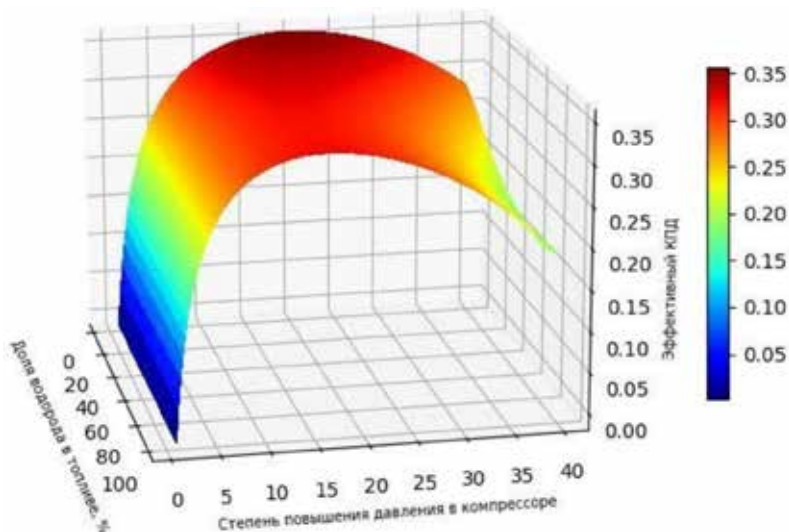


Рис. 5. Графики зависимостей эффективного КПД от степени повышения давления и доли водорода в топливе при  $T^* = 1100\text{ K}$  [21]

В работе [21] исследовали влияние водорода в топливе на эффективные показатели ГТУ при различном содержании водорода в смеси с природным газом. Их результаты показывают, что низшая теплота сгорания уменьшается по мере увеличения доли водорода. Это связано с тем, что основными элементами топлива, которые выделяют больше нижней теплоты сгорания, являются углеводороды. Несмотря на то, что высшая теплота сгорания водорода выше, чем у метана, при сгорании водорода образуется большое количество воды, поэтому часть теплоты, выделившаяся при его горении, уходит на ее испарение, поэтому по сравнению с углеводородами он имеет меньшую низшую теплоту сгорания, а следовательно, при сжигании топлива выделяется меньше теплоты. На рис. 5 представлены графики зависимости эффективного КПД, как можно видеть из графиков, при повышении доли водорода происходит снижение КПД, а максимум находится при его содержании равном 0%. Это происходит из-за сильного увеличения относительного расхода топлива.

Исходя из вышеописанных исследований, промышленных заявлений и опыта, мы предполагаем, что газовые турбины разрабатываемой в настоящее время технологии смогут использовать для топлива с высокой долей водорода или даже 100% водорода.

В сочетании с использованием возобновляемых источников энергии для его производства водород представляет собой возможное альтернативное топливо для газовых

турбин в рамках будущего производства электроэнергии с низким уровнем выбросов.

Ввод в эксплуатацию первой в мире диффузионно-пламенной камеры сгорания с газовой турбиной, работающей на 100% водороде, был успешно проведен в Кобе, Япония.

Кроме того, испытательная горелка микро-микс (Micro-Mix) с низким уровнем выбросов, работающая на водороде, прошла успешные испытания в атмосферных условиях и под давлением и доказала свою способность работать с низким содержанием  $\text{NO}_x$  в сухом состоянии в широком рабочем диапазоне.

Таким образом, газовая турбина в будущем должна предлагать больше эксплуатационных возможностей, таких как большее количество пусков, более низкие выбросы при частичной нагрузке, возможность горячего пуска, короткое время пуска, низкие эксплуатационные расходы и гибкость в отношении топлива для удовлетворения требований рынка возобновляемых источников энергии.

#### Список литературы

1. Marin G.E., Mendeleev D.I., Osipov B.M. A study on the operation of a gas turbine unit using hydrogen as fuel. Journal of Physics: Conference Series. 2021. No 1891 (1). P. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012055.
2. Nurettin T.M., Ashikaga A.H., Harald F. Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems. Gas for energy. 2018. Vol. 1. P. 1–5.
3. Marek C.J., Timothy D.S., Rishna K. Low-Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection, NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio 44135, 41 AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit AIAA–2005–3776, Tucson, Arizona, July 10–13, 2005.

4. Гриб Н. Водородная энергетика: мифы и реальность // Национальный отраслевой журнал 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngv.ru/upload/iblock/224/224b8a5647503ebe18e4180a43431d41.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
5. Nilsson E.H., Larfeldt J., Author V.K. Hydrogen gas as fuel in gas turbines. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/EF2015-121+Hydrogen+fuel+gas+turbines.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
6. Tang C.L., Huang Z.H., Law C.K. Determination, correlation, and mechanistic interpretation of effects of hydrogen addition on laminar flame speeds of hydrocarbon-air mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011. Vol. 33. P. 921–928.
7. Etn. global. Hydrogen Gas Turbines. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/01/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
8. Arun A.C., Mahesh V.M., Sanith P., David S., Rajesh K.P. Comparison of Calorific Values of Various Fuels from Different Petrol Stations. *International Refereed Journal of Engineering and Science*. 2017. Vol. 6. P. 26–29.
9. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В., Байкин С.С. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. 139 с.
10. Simon O., Mikael O., Filip J. Exploring the competitiveness of hydrogen-fueled gas turbines in future energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. P. 624–644.
11. Liu X., Michael B., Arman A.S., Senbin Y., Robert Z.S., Zhongshan L., Per P., Xue S.B., Marcus A., Daniel L. Investigation of turbulent premixed methane/air and hydrogen-enriched methane/air flames in a laboratory-scale gas turbine model combustor. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (24). P. 13377–13388.
12. An Q., Sina K., Jeffrey B., Sangsig Y. Flame stabilization mechanisms and shape transitions in a 3D printed, hydrogen enriched, methane/air low-swirl burner. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (27). P. 14764–14779.
13. Li H., Li G., Jiang Y. Laminar burning velocities and flame instabilities of diluted H<sub>2</sub>/CO/air mixtures under different hydrogen fractions. *Int J Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43 (33). P. 16344–16354.
14. Zhang J., Ratner A. Experimental study on the excitation of thermoacoustic instability of hydrogen-methane/air premixed flames under atmospheric and elevated pressure conditions. *Int J Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44 (39). P. 21324–21335.
15. Ciani A., Fru G., Wood J.P. Superior fuel and operation flexibility of sequential combustion in Ansaldo Energia gas turbines. In: *Proceedings of Global Power and Propulsion Society*. 2019. [Электронный ресурс]. URL: [http://gpps.global/wp-content/uploads/2021/02/GPPS-TC-2019\\_paper\\_32.pdf](http://gpps.global/wp-content/uploads/2021/02/GPPS-TC-2019_paper_32.pdf) (дата обращения: 21.03.2022).
16. Bothien M.R., Ciani A., Wood J.P., Fruechtel G. Toward decarbonized power generation with gas turbines by using sequential combustion for burning hydrogen. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019. Vol. 141. P. GTP-1 – GTP-27.
17. Magnusson R., Andersson M. Operation of SGT-600 (24 MW) DLE Gas Turbine With Over 60% H<sub>2</sub> in Natural Gas. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. 2020.
18. ETN. Hydrogen gas turbines – the path towards a zero-carbon gas turbine. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://etnglobal/wp-content/uploads/2020/02/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
19. Bonzani F. V94.3 – a Special application: fuelling hydrogen enriched natural gas. *Proc. PowerGen*, 2008.
20. Марьян 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. № 2 (23). С. 84–92.
21. Балакин А.М., Бадамшин А.Р., Матвеев Ю.В., Лаптев М.А., Барсков В.В. Особенности работы газотурбинной установки на смеси водорода и природного газа // Санкт-Петербургский политехнический университет. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/papers/53-57.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).