

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.6)

УДК 621.438:661.96

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-91-100

Газотурбинная установка малой мощности на метано-водородном топливе

Баидаа Бу Дакка, И.А. Султангузин, Ю.В. Яворовский, М.Г. Жумагулов, Н.Р. Картджанов

В настоящее время экологическая проблема актуальна для многих мировых ученых. Это связано с климатическими изменениями из-за парниковых газов (на промышленный сектор приходится около 50%). Необходимы срочные меры для их значительного сокращения.

В связи с этим наблюдается мировая тенденция к преобладанию использования возобновляемых источников энергии, наиболее значимым из которых является водородная энергетика.

Изучено влияние величины добавки водорода к метану на тепловые характеристики микрогазотурбинной установки, рассчитанной на мощность 100 кВт, а также на геометрические размеры устройства для подачи топлива при постоянных значениях объемных расходов поступающего воздуха и газообразных продуктов сгорания, образующихся в той же установке. Исследование проводилось с использованием программы EPSILON. Установлено, что добавление водорода к метану увеличивает объемный расход топлива и, следовательно, площадь сечения устройства для подачи топлива. Рост процентного содержания водорода ведет к снижению температур перед турбиной не более чем на 12 °С. При полной замене метана кислородом КПД установки падает всего на 1%. Таким образом, тепловые характеристики исследуемой микрогазотурбинной установки существенно не меняются, но необходимо изменение конструкции устройства впрыска топлива.

Ключевые слова: водород, система подачи топлива, микрогазотурбинная установка.

Для цитирования: Баидаа Бу Дакка, Султангузин И.А., Яворовский Ю.В., Жумагулов М.Г., Картджанов Н.Р. Газотурбинная установка малой мощности на метано-водородном топливе // Вестник МЭИ. 2022. № 5. С. 91—100. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-91-100.

A Small Capacity Methane-Hydrogen Blend Fueled Gas Turbine

Baydaa Bo Dakkah, I.A. Sultanguzin, Yu.V. Yavorovsky, M.G. Zhumagulov, N.R. Kartdzhanov

Nowadays the environmental problem is of issue for many scientists around the world. This is stemming from climate changes caused by greenhouse gas emissions (the industrial sector accounts for 50% of them). Therefore, urgent measures have to be taken to reduce the emissions of these gases significantly. In this connection, we are witnessing a worldwide trend toward predominant use of renewable energy sources, with the hydrogen energy being the most significant one of them.

The aim of the work was to study the effect an addition of hydrogen to methane as fuel has on the thermal characteristics of a 100 kW micro gas turbine unit and on the geometrical dimensions of the fuel admission device at constant values of the volumetric flow rates of air supplied and flue combustion gases generated in the same installation.

The study, which was carried out using the EPSILON computer program, has shown that the addition of hydrogen to methane leads to an increase in the volumetric fuel flowrate and, hence, generates the need to increase the fuel admission device cross-section area. An increase in the percentage content of hydrogen leads to a decrease of temperatures upstream of the turbine by no more than 12 °C. If methane is completely replaced by hydrogen, the power unit efficiency decreases by only 1%. Thus, the thermal characteristics of the micro gas turbine unit under study do not change significantly; however, the design of the fuel injection device has to be modified.

Key words: hydrogen, fuel admission system, micro gas turbine unit.

For citation: Baydaa Bo Dakkah, Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Zhumagulov M.G., Kartdzhanov N.R. A Small Capacity Methane-Hydrogen Blend Fueled Gas Turbine. Bulletin of MPEI. 2022;5:91—100. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-91-100.

Введение

Водород — бесцветный, не имеющий запаха и вкуса, нетоксичный двухатомный газ. Он — самый распространенный элемент во Вселенной, на его долю приходится 90% вещества во Вселенной по массе. Однако водород не часто встречается в чистом виде и обладает важными химическими свойствами, влияющими на его использование в качестве топлива [1]:

- легко соединяется с кислородом, образуя воду, необходимую для жизни;
- обладает высокой массовой теплотой сгорания (почти в 3 раза больше, чем бензин), но значение объемной теплоты сгорания довольно низкое при стандартных температуре и давлении;
- его объемная теплота сгорания может быть увеличена за счет хранения под повышенным давлением;
- легко воспламеняется (для воспламенения и сжигания требуется лишь небольшое количество энергии, может гореть, когда занимает от 4 до 74% воздуха по объему);
- горит бледно-голубым, почти невидимым пламенем, из-за чего его трудно увидеть;
- при сжигании водорода с воздухом не образуются диоксид углерода (CO_2), выбросы твердых частиц или серы; при некоторых условиях происходит выброс оксидов азота (NO_x).

Использование водорода в качестве топливного газа — важная и актуальная тема [2]. Подача его в небольших количествах в камеру сгорания, работающую на ископаемом топливе [3], значительно сократит выбросы несгоревших углеводородов, CO и CO_2 и снизит влияние антропогенного парникового эффекта. Водород можно получить из возобновляемых источников, посредством газификации биомассы, использования солнечной энергии и воды (фотоэлектрохимический и фотохимический способы) или солнечной энергии, биологических организмов и воды (фотобиологический метод).

Водород, добываемый из возобновляемых источников энергии, предлагается в качестве безуглеродного энергетического химического вещества. Существующие способы хранения позволяют использовать его в качестве топлива при необходимости [4 — 6]. При сжигании одного килограмма водорода выделяется 120 МДж тепловой энергии и 9 кг водяного пара. При сжигании одного килограмма метана — 50 МДж тепловой энергии, 2,75 кг углекислого газа и 2,25 кг водяного пара, т. е. 5 кг парниковых газов. Таким образом, для получения 120 МДж тепловой энергии требуется сжечь 2,4 кг метана, при этом в атмосферу попадет 6,6 кг углекислого газа и 5,4 кг водяного пара, т. е. 12 кг парниковых газов [7].

Многие ученые пытались найти новые источники энергии из-за истощения запасов ископаемого топлива, но оно по-прежнему остается главным энергетическим ресурсом. Уголь, нефть и природный газ — основные виды ископаемого топлива во всем мире.

Промышленные газовые турбины, работающие на ископаемом топливе, много лет широко используются в производстве электроэнергии, а также тепловой и электрической энергии в комбинированном цикле. Во многих странах они соответствуют требованиям о выбросах NO_x , CO и CO_2 (парниковом эффекте). Водород для энергетических нужд можно использовать в топливных элементах или газовых турбинах. Газовые турбины — экономичны, обладают мощностью в несколько МВт и имеют более длительный срок службы, чем современные технологии топливных элементов. Они могут работать, несмотря на присутствие соединений CO , NH_3 и O_2 , образующихся при использовании биогаза или переработке топлива [8]. В [9] проведено экспериментальное исследование по подаче небольших количеств водорода (до 4%) в горелку, работающую на углеводородном топливе (JP4), в качестве дополнительного топлива для снижения выбросов загрязняющих веществ. В результате этого обнаружено, что водород, предварительно смешанный с воздухом, снизил выбросы CO без значительного увеличения выбросов NO_x . Добавление водорода в углеводородное топливо расширяет диапазон стабильного горения в бедных топливных смесях, благодаря увеличенному пределу его воспламеняемости. Это дает стабильное сжигание при более низких температурах в зоне горения. Следовательно, образование термических оксидов азота снижается [10, 11].

Производители газовых турбин по-прежнему сталкиваются с техническими проблемами при сжигании топлива с высоким содержанием водорода. Большинство компаний проводят специальные исследования по этим вопросам. В некоторых публикациях идет речь о газовых турбинах, сжигающих только чистый водород или смеси с его высоким содержанием [12]. В [13] исследована работа камеры сгорания микрогазовой турбины на смеси топлива, состоящей из 25% водорода и 75% природного газа, с использованием программы ANSYS-Fluent для определения оптимальных условий для сгорания топлива и снижения выбросов NO_x . Установлено, что добавление H_2 не улучшает эффективность сгорания, и это противоречит экспериментальным результатам, показанным другими учеными.

Камера сгорания МГТ T100 с электрической мощностью 100 кВт предназначена для работы на метане или природном газе. Экспериментальные и численные исследования показали, что она не может работать на топливе с высоким содержанием водорода. Подтверждено, что процесс горения протекает регулярно, без каких-либо отклонений для процентного содержания H_2 до 10% об. при смешивании с метаном [14, 15].

В то же время, в области микрогазовых турбин появились работы, показывающие, что использование смеси топлива (70% об. метана и 30% об. водорода) в камере сгорания T100 позволяет обеспечить устой-

чивое горение топлива и снижает выбросы CO значительно ниже нормативных пределов [16]. Кроме того, исследования показали, что добавление водорода к метану явно влияет на процесс самовоспламенения, при этом добавление водорода к метану (до 30%) уменьшает опасность применения водорода и делает смесь пригодной для использования в обычных устройствах [17, 18].

В [19] выдвинуто предположение, что уменьшение выбросов в атмосферу CO₂ при сжигании природного газа возможно при подмешивании к природному газу водородсодержащих газов (ВСГ), включая чистый водород.

При увеличении доли водорода в топливном газе растет и количество конденсата, образующегося в конденсационном утилизаторе (в дальнейшем может использоваться для подпитки теплосети, увлажнения воздуха, подаваемого на горение, производства водородсодержащего газа методом паровой конверсии или получения водорода методом электролиза).

Многие исследования показывают, что в существующую систему транспортировки и распределения природного газа может быть добавлено до 20 или 30% (объема) водорода. Такое содержание газа позволит снизить выбросы CO₂ в атмосферу на 7...11%.

Известно, что при сжигании топлива, в составе которого концентрация сернистых соединений не превышает нормативных показателей, можно уменьшить температуру уходящих газов до 30...50 °С [19]. Таким образом, применение смесей водорода с метаном позволяет восстановить большое количество энергии, содержащейся в газах. С другой стороны, можно получить дополнительную тепловую энергию при конденсации водяного пара, образующегося при сжигании водорода. Один из основных методов, используемых для рекуперации тепла, — органический цикл Ренкина (ОЦР), повышающий эффективность турбины и позволяющий компенсировать недостаток эффективности, вызванный использованием водорода [20 — 22].

Несмотря на то, что применение водорода имеет значительные преимущества (сокращение выбросов парниковых газов, быстрое сгорание в случае топлива с низшей теплотой сгорания), большинство коммерческих камер сгорания микрогазовых турбин не способны сжигать топливо с высоким содержанием водорода, если только они не модифицированы конструктивно [16].

Также, рост концентрации водорода увеличивает температуру в камере сгорания, но повышение расхода воздуха уменьшает эту температуру, и тепловая энергия не оказывает никакого влияния на температуру в камере [23]. Следовательно, использование водорода с большим количеством воздуха не приводит к высоким температурам и не влияет на оборудование.

Основная цель статьи состоит в том, чтобы объяснить, как использование водорода в различных объемных концентрациях с метаном влияет на параметры

определённой газовой турбины и системы подачи топлива в её камеру сгорания при постоянном значении объемного расхода горючих газов.

Термодинамическое моделирование

В газотурбинной установке с регенерацией теплоты на общем валу (рис. 1) располагаются газовая турбина ГТ, компрессор К и потребитель энергии ПЭ. Компрессор засасывает атмосферный воздух, сжимает его до некоторого давления. Сжатый воздух поступает из компрессора не сразу в камеру сгорания КС, а предварительно проходит через воздушный регенератор (теплообменник ВР), в котором подогревается за счет теплоты отработавших газов. В камере сгорания идет сгорание топлива при $p = \text{const}$.

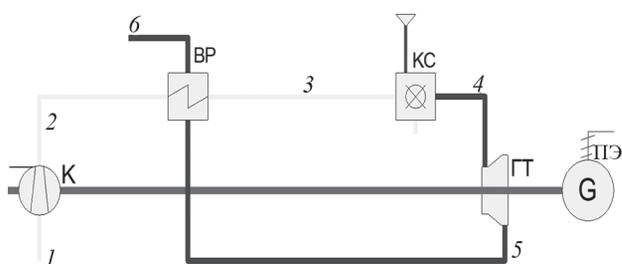


Рис. 1. Схема газотурбинной установки с регенерацией теплоты

Газы, выходящие из турбины, охлаждаются, подогревая сжатый воздух, и затем поступают в атмосферу через выпускной патрубок. Давление отработавших газов несколько превышает атмосферное (поскольку отработавшим газам нужно преодолеть сопротивление выходного патрубка).

На рисунке 2 представлена T - s -диаграмма цикла газотурбинной установки с регенерацией теплоты. Цикл состоит из адиабатного процесса сжатия воздуха в компрессоре $1 — 2'$, процесса $2' — 3$, представляюще-

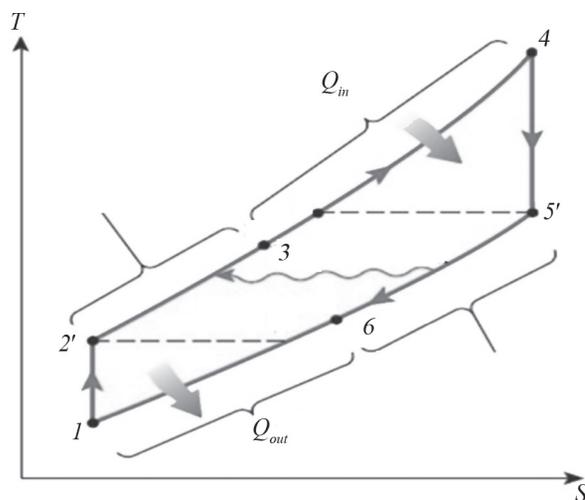


Рис. 2. T - s -диаграмма для газотурбинной установки с регенерацией теплоты

го собой изобарный подогрев воздуха в регенераторе, изобарного процесса 3 — 4, соответствующего подводу теплоты в камере сгорания за счет сгорания топлива, процесса адиабатного расширения газов 4 — 5' в турбине, изобарного охлаждения выхлопных газов в регенераторе 5' — 6 и замыкающего цикл условного изобарного процесса 6 — 1.

Используя приведенный цикл, рассчитаем следующие значения [24].

Работа компрессора в цикле W_c :

$$W_c = \dot{m}_a C_{p,a} (T_2 - T_1).$$

КПД компрессора:

$$\eta_c = (T_2' - T_1) / (T_2 - T_1).$$

Температура воздуха на выходе из компрессора в изэнтропном процессе:

$$\frac{T_2'}{T_1} = \frac{P_2}{P_1}^{\frac{\kappa_a - 1}{\kappa_a}}.$$

Подводимая теплота в камере сгорания q_{in} :

$$Q_{in} = \dot{m}_a C_{p,a} (T_4 - T_3).$$

Работа газовой турбины в регенеративном цикле ГТУ W_T :

$$W_m = \dot{m}_g C_{p,g} (T_4 - T_5).$$

Внутренний относительный КПД турбины:

$$\eta_T = (T_4 - T_5) / (T_4 - T_5').$$

Температура выходящих газов из турбины при расширении в изэнтропном процессе:

$$\frac{T_4}{T_5'} = \frac{P_2}{P_1}^{\frac{\kappa_g - 1}{\kappa_g}}.$$

Теплота q_{out} , отводимая с отработавшими газами:

$$Q_{out} = \dot{m}_g C_{p,g} (T_6 - T_1).$$

Теплота, воспринятая сжатым воздухом в регенераторе, равна теплоте, отдаваемой в нем отработавшими газами:

$$\dot{m}_a C_{p,a} (T_3 - T_2) = \dot{m}_g C_{p,g} (T_5 - T_6).$$

Эффективность рекуператора:

$$\varepsilon = (T_3 - T_2) / (T_5 - T_2).$$

Полезная работа в цикле W :

$$W = W_T - W_c.$$

Термический КПД:

$$\eta_{th} = W / Q_{in}.$$

Мощность от газотурбинной установки выразим следующим образом:

$$P = W \eta_{mech} \eta_{Gen}.$$

Общий массовый расход:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_f.$$

Соотношение воздух–топливо в камере сгорания смоделировано в соответствии со следующим уравнением:

$$AFR = \dot{m}_a / \dot{m}_f.$$

Из уравнения энергетического баланса в камере сгорания

$$\dot{m}_a C_{p,a} T_3 + \dot{m}_f C_{p,f} T_f + \dot{m}_f LHV = \dot{m}_g C_{p,g} T_4$$

выведем эффективность камеры сгорания:

$$\eta_{c,c} = (\dot{m}_g C_{p,g} T_4 - \dot{m}_a C_{p,a} T_3) / \dot{m}_f.$$

Результаты и обсуждения

Для изучения поведения микрогазотурбинной установки использована коммерческая программа EPSILON.

Микрогазотурбинная установка, работающая на метане.

Микрогазовая турбина (МГТ) представляет собой регенеративную одновальную установку. У МГТ, работающей на чистом метане при полной нагрузке с частотой вращения 70 000 об./мин [25], массовые расходы воздуха \dot{m}_a и метана \dot{m}_f составляют 0,7 и 0,00612 кг/с соответственно. В результате работы регенеративного цикла Брайтона общая эффективность установки достигает почти 33%, обеспечивая электрическую мощность 100 кВт. Схема газотурбинной установки с регенерацией теплоты, работающей на метане, приведена на рис. 3.

Технические данные микрогазотурбинной установки

Электрическая мощность, кВт..... 100
Общий КПД, %..... 33.02
Низшая теплота сгорания метана при 25°C, МДж/кг..... 50

Микрогазотурбинная установка, работающая на смеси метана и водорода.

Рассмотрено влияние объемной концентрации водорода в смеси с метаном, используемой в качестве топлива для сжигания в микрогазотурбинной энергоустановке (МГТУ), на рабочие параметры установки.

С целью изучения работы МГТУ для выработки 100 кВт электрической мощности при работе установки на смеси метана и водорода в качестве топлива при тех же условиях окружающей среды рассмотрено 20 вариантов, в которых объемная концентрация водорода, добавляемого в топливо, варьируется от 0 до 100%. Исследование проводили с помощью программы EPSILON при следующих условиях, гарантирующих, что газотурбинная установка остается неизменной по

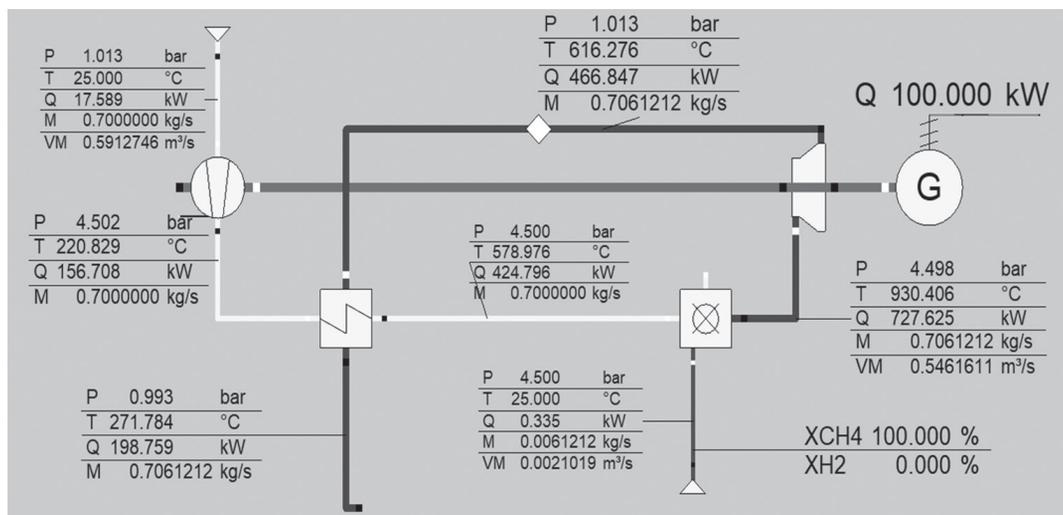


Рис. 3. Схема газотурбинной установки с регенерацией теплоты, работающей на метане

своей технической и тепловой конструкциям, за исключением диаметра устройства для подачи топлива, изменяемого по мере варьирования объемной концентрации водорода в топливном газе:

- МГТ рассчитана для выработки мощности 100 кВт;
- параметры воздуха, поступающего в компрессор, постоянны и равны: $T_1 = 25 \text{ °C}$; $P_1 = 1,013 \text{ бар}$; $M_1 = 0,7 \text{ кг/с}$;
- давление воздуха на выходе компрессора постоянно и составляет 4,5 бар;
- размер используемой камеры сгорания — постоянен, таким образом, объем горючих газов, образующихся при сгорании топлива в камере сгорания, также постоянен и равен $0,546 \text{ м}^3/\text{с}$;
- КПД компрессора $\eta_{к\text{с}}$, газовой турбины $\eta_{г\text{т}}$, камеры сгорания $\eta_{к\text{с}}$ и генератора $\eta_{г}$ постоянны и равны 80, 85, 99 и 80%, соответственно.

Влияние водорода на массовый \dot{m}_f и объемный \dot{v}_f расход используемого топлива.

На рисунке 4 продемонстрировано, что изменение концентрации водорода, добавляемого в топливо, существенно влияет как на объемный, так и на массовый расход топлива. По мере увеличения концентрации водорода массовый расход топливной смеси метан–водород уменьшается, в то время как объемный — увеличивается. Это связано со снижением объемной низшей теплоты сгорания водорода в результате уменьшения плотности водорода.

Технические данные микрогазотурбинной установки

Массовая низшая теплота сгорания H_2 , МДж/кг	120
Объемная низшая теплота сгорания H_2 , МДж/м ³	10,8
Плотность H_2 при стандартных условиях, кг/м ³	0,09

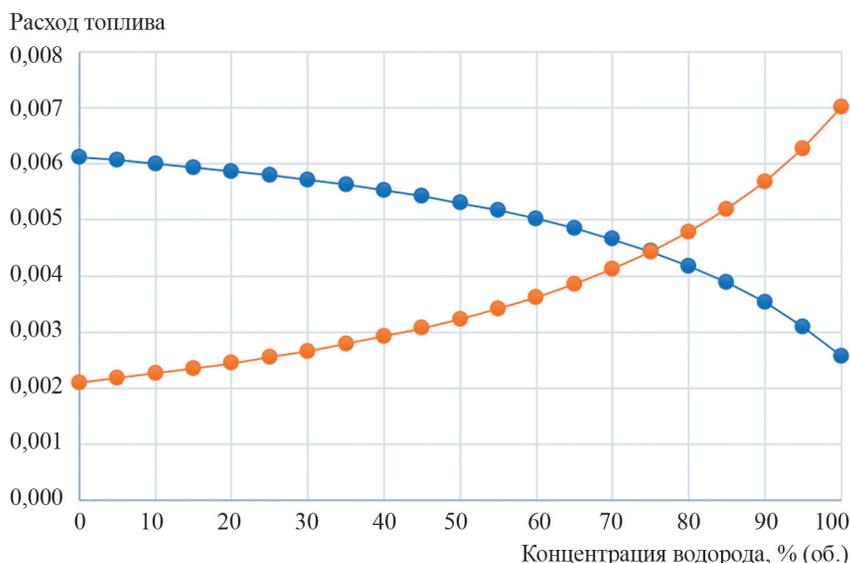


Рис. 4. Зависимости объемного (●) и массового (●) расхода топлива от объемной концентрации водорода

Изменение объемного расхода топлива в камере сгорания требует изменения площади выходного сечения устройства для подачи топлива. На рисунке 5 видно, что по мере роста объемного процента водорода, добавляемого в топливо, общая площадь выходного сечения устройства для подачи топлива (кривая A_f), необходимого для подачи топлива, увеличивается, поскольку скорость подачи топлива в камере постоянна. Очевидно, что площадь выходного сечения устройства для подачи топлива, необходимая для подачи метана, уменьшается (кривая A_{CH_4}), а площадь выходного сечения устройства для подачи водорода увеличивается (кривая A_{H_2}).

Влияние водорода на температуру воздуха, поступающего в камеру сгорания T_3 .

На рисунке 6 показано, что при увеличении объемной концентрации водорода, смешиваемого с метаном,

температура воздуха на входе камеры сгорания снижается. Она меняется почти на $10,8\text{ }^\circ\text{C}$. Падение температуры можно объяснить уменьшением массового расхода, а также снижением температуры газов, выходящих из турбины, отдающих часть своего тепла воздуху внутри теплообменника ВР.

Влияние водорода на температуру газов сгорания, поступающих в турбину T_4 .

По результатам расчетов установлено, что повышение объемной концентрации водорода в топливе, используемом в камере сгорания, ведет к снижению температуры газов на входе турбины. Это падение составляет около $12\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7). Температура воздуха, поступающего в камеру сгорания, понижается, и в то же время количество топлива, подаваемого в камеру сгорания, уменьшается. Таким образом, температура

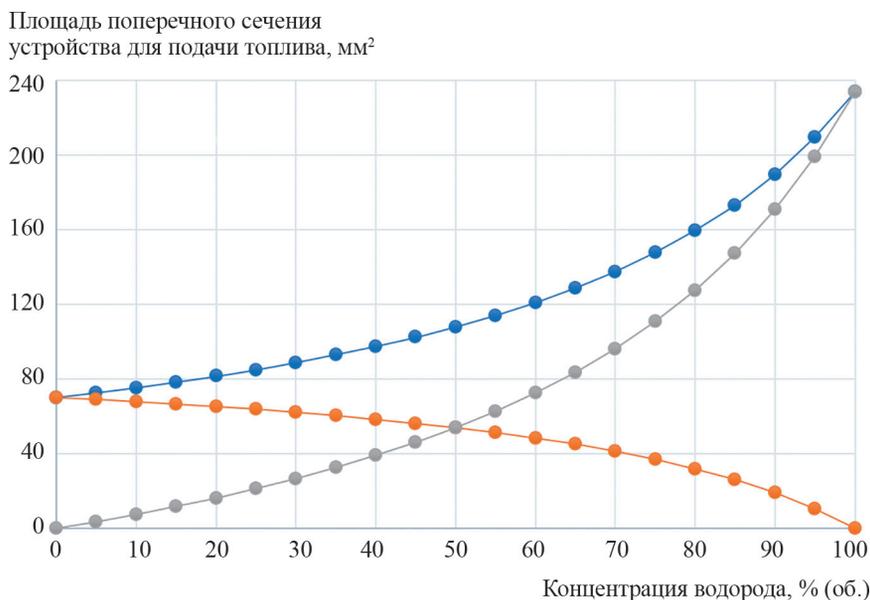


Рис. 5. Зависимость площади выходного сечения устройства для подачи топлива от объемной концентрации водорода:

● — A_f ; ● — A_{CH_4} ; ● — A_{H_2}

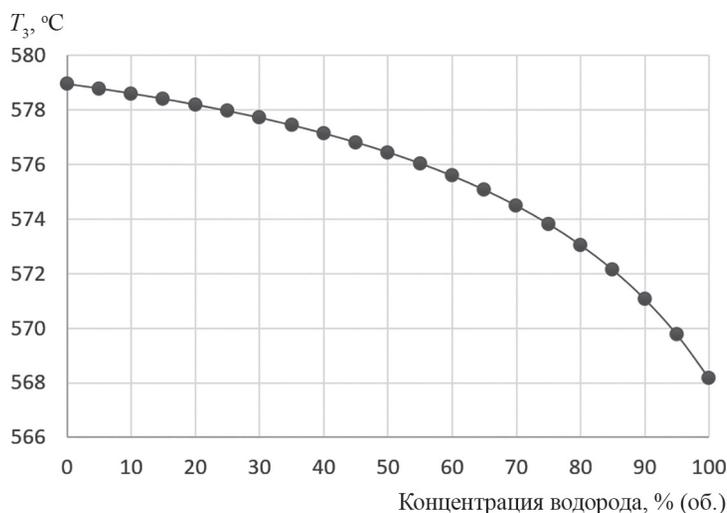
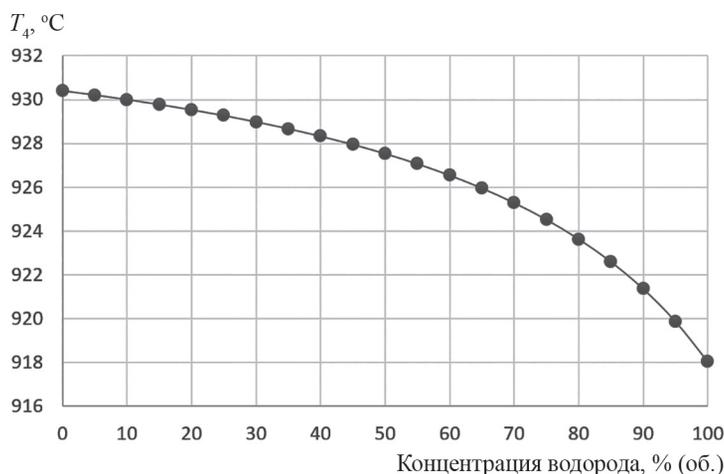


Рис. 6. Зависимость температуры воздуха T_3 от объемной концентрации водорода

Рис. 7. Зависимость температуры газов T_4 от объёмной концентрации водорода

газов, поступающих в газовую турбину, снижается, несмотря на увеличение количества тепловой энергии, подаваемой в камеру сгорания.

Влияние водорода на температуру газов, выходящих из турбины T_5 .

Температура воздуха на выходе турбины уменьшается с повышением объёмной концентрации водорода в топливе. Изменение составляет около 11 °C. Это происходит из-за низкой температуры газов, поступающих в турбину, в то время как КПД газовой турбины остается постоянным (рис. 8).

Влияние водорода на температуру продуктов сгорания, выбрасываемых в атмосферу T_6 .

При вводе водорода температура газов, выбрасываемых в атмосферу, немного увеличивается (примерно на 1,5 °C). Это вызвано изменением термодинамических свойств продуктов сгорания при увеличении в них содержания паров воды (рис. 9).

Влияние добавления водорода на КПД установки.

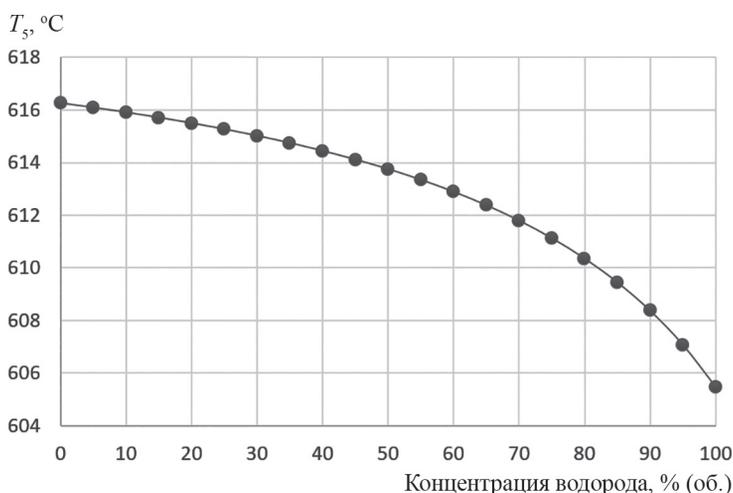
Рассчитан КПД цикла микрогазовой турбины (рис. 10). Из диаграммы рис. 10 следует, что он постепен-

но снижается по мере увеличения процентного содержания водорода, добавляемого к сжигаемому топливу, но изменение составляет не более 1%, когда метан полностью заменяется водородом. Это связано с тем, что использование метана с водородом требует меньшего массового расхода, поступающего в турбину, по сравнению с массовым расходом, поступающим в турбину при использовании только метана в качестве топлива, что снижает нагрузку на турбину, в то время как работа компрессора остается постоянной. Следовательно, уменьшение величин мощности и эффективности МГТ происходит в результате разницы между массовыми расходами турбомашин.

Заключение

В результате проведенных исследований доказано, что добавление водорода к метану существенно не повлияло на тепловые характеристики микрогазотурбинной установки для выработки 100 кВт электрической мощности и привело в следующем:

- при полной замене метана водородом КПД снизился на 1%;
- мощность уменьшилась не более чем на 235 Вт;

Рис. 8. Зависимость температуры газов T_5 от объёмной концентрации водорода

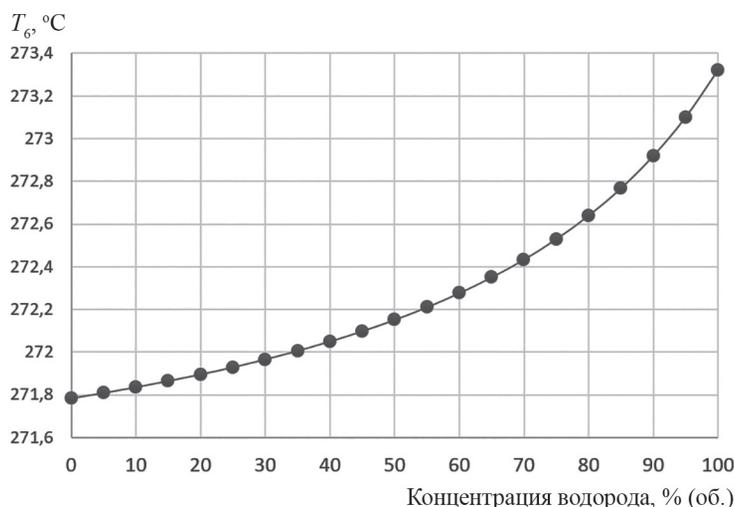


Рис. 9. Зависимость температуры выбросов T_6 от объёмной концентрации водорода

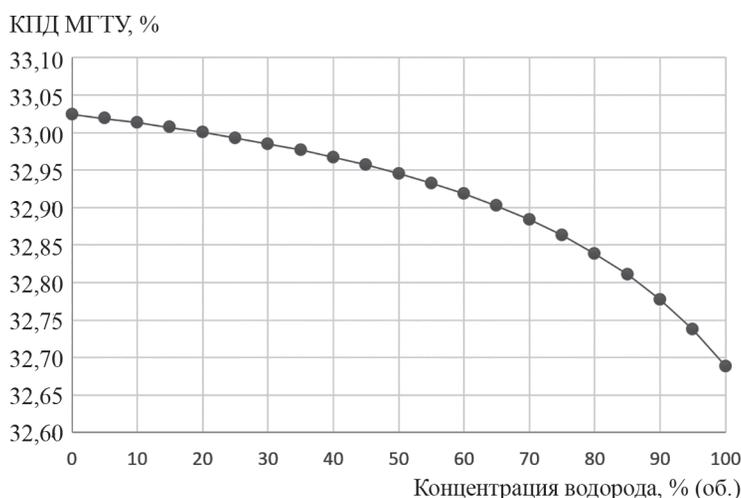


Рис. 10. Зависимость КПД МГТУ от объёмной концентрации водорода

• температуры в разных рабочих точках менялись не более чем на 12 °С.

Следует отметить, что проблема заключается в высоком значении объемного расхода топлива, что, в свою очередь, ведет к необходимости замены устройства для подачи топлива. Из-за этого следует более детально изучить процесс в камере сгорания по мере изменения инженерной конструкции устройства для подачи топлива.

Литература

1. **Alliche M., Chikh S.** Study of Non-premixed Turbulent Flame of Hydrogen/air Downstream Co-current Injector // *Hydrogen Energy*. 2018. V. 43. No. 6. Pp. 3577—3585.
2. **Minakawa K., Miyajima T., Yuasa S.** Development of a Hydrogen-fueled Micro Gas Turbine with a Lean Premixed Combustor // *Proc. 33rd Jt. Propuls. Conf. Exhib.* 1997. Pp. 1—6.
3. **Schefer R.W.** Reduced Turbine Emissions Using Hydrogen-Enriched Fuels // *Proc. Hydrog. Progr. Rev.* 2002. Pp. 1—16.

Крайне важно знать влияние содержания водорода в топливной смеси на характеристики газовой турбины, связанные с циклами рекуперации тепла, такими как органический цикл Ренкина. Изучение экологического аспекта в связи с изменением состава газов, выбрасываемых в атмосферу, также осталось за рамками настоящей работы и будет рассмотрено в дальнейшем.

References

1. **Alliche M., Chikh S.** Study of Non-premixed Turbulent Flame of Hydrogen/air Downstream Co-current Injector. *Hydrogen Energy*. 2018;43;6:3577—3585.
2. **Minakawa K., Miyajima T., Yuasa S.** Development of a Hydrogen-fueled Micro Gas Turbine with a Lean Premixed Combustor. *Proc. 33rd Jt. Propuls. Conf. Exhib.* 1997:1—6.
3. **Schefer R.W.** Reduced Turbine Emissions Using Hydrogen-Enriched Fuels. *Proc. Hydrog. Progr. Rev.* 2002:1—16.

4. **Mostafaiepour A. e. a.** Localization of Solar-hydrogen Power Plants in the Province of Kerman // *Adv. Energy Res.* 2017. V. 5. No. 2. Pp. 179—205.
5. **Menia S. e. a.** Hydrogen Production by Methanol Aqueous Electrolysis Using Photovoltaic Energy: Algerian Potential // *Hydrogen Energy.* 2017. V. 42. No. 13. Pp. 8661—8669.
6. **Gökalp I., Lebas E.** Alternative Fuels for Industrial Gas Turbines // *Appl. Therm. Eng.* 2004. V. 24. No. 11—12. Pp. 1655—1663.
7. **Буров В.Д., Савитенко М.А., Рыбаков Б.А.** Сжигание водородосодержащих газов в газотурбинных установках // *Турбины и дизели.* 2021. № 3—4. С. 16.—24.
8. **Cappelletti A., Martelli F.** Investigation of a Pure Hydrogen Fueled Gas Turbine Burner // *Hydrogen Energy.* 2017. V. 42. No. 15. Pp. 10513—10523.
9. **Juste G.L.** Hydrogen Injection as Additional Fuel in Gas Turbine Combustor. Evaluation of Effects // *Hydrogen Energy.* 2006. V. 31. No. 14. Pp. 2112—2121.
10. **Schefer R.W., White C., Keller J.** Lean Hydrogen Combustion // *Lean Combustion.* N.-Y.: Elsevier, 2008. Pp. 213—254.
11. **Kim H.S., Arghode V.K., Gupta A.K.** Flame Characteristics of Hydrogen-enriched Methane-air Premixed Swirling Flames // *Hydrogen Energy.* V. 34. No. 2. Pp. 1063—1073.
12. **Chacartegui R. e. a.** Analysis of Main Gaseous Emissions of Heavy Duty Gas Turbines Burning Several Syngas Fuels // *Fuel Proc. Technol.* 2011. V. 92. No. 2. Pp. 213—220.
13. **De Robbio R.** Innovative Combustion Analysis of a Micro-gas Turbine Burner Supplied with Hydrogen-natural Gas Mixtures // *Energy Proc.* 2017. V. 126. Pp. 858—866.
14. **Reale F. e. a.** A Micro-gas Turbine Fuelled by Methane-hydrogen Blends // *Appl. Mech. Mater.* 2012. V. 232. Pp. 792—796, 2012.
15. **Tuccillo R. e. a.** Methane-hydrogen Blends in Micro-gas Turbines: Comparison of Different Combustor Concepts. // *Proc. Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition.* 2019. V. 8.
16. **Reale F., Sannino R.** Water and Steam Injection in Micro-gas Turbine Supplied by Hydrogen Enriched Fuels: Numerical Investigation and Performance Analysis // *Hydrogen Energy.* 2021. V. 46. No. 47. Pp. 24366—24381.
17. **Frolov S.M., Medvedev S.N., Basevich V.Y., Frolov F.S.** Self-ignition of Hydrocarbon-hydrogen-air mixtures // *Hydrogen Energy.* 2013. V. 38. No. 10. Pp. 4177—4184.
18. **Rudy W., Dabkowski A., Teodorczyk A.** Experimental and Numerical Study on Spontaneous Ignition of Hydrogen and Hydrogen-methane Jets in Air // *Hydrogen Energy.* 2014. V. 39. No. 35. Pp. 20388—20395.
19. **Савитенко М.А., Рыбаков Б.А.** Снижение выбросов парниковых газов в водогрейных и паровых котлах // *Энергетика и промышленность России.* 2021. № 17—18. С. 420—421.
20. **Бу Дакка Б., Султангузин И.А., Яворовский Ю.В.** Рекуперация тепла с использованием орга-
4. **Mostafaiepour A. e. a.** Localization of Solar-hydrogen Power Plants in the Province of Kerman. *Adv. Energy Res.* 2017;5;2:179—205.
5. **Menia S. e. a.** Hydrogen Production by Methanol Aqueous Electrolysis Using Photovoltaic Energy: Algerian Potential. *Hydrogen Energy.* 2017;42;13:8661—8669.
6. **Gökalp I., Lebas E.** Alternative Fuels for Industrial Gas Turbines. *Appl. Therm. Eng.* 2004;24;11—12:1655—1663.
7. **Burov V.D., Savitenko M.A., Rybakov B.A.** Szhiganie Vodorodosoderzhshchikh Gazov v Gazoturbinykh Ustanovkakh. *Turbiny i Dizeli.* 2021;3—4:16.—24. (in Russian).
8. **Cappelletti A., Martelli F.** Investigation of a Pure Hydrogen Fueled Gas Turbine Burner. *Hydrogen Energy.* 2017;42;15:10513—10523.
9. **Juste G.L.** Hydrogen Injection as Additional Fuel in Gas Turbine Combustor. Evaluation of Effects. *Hydrogen Energy.* 2006;31;14:2112—2121.
10. **Schefer R.W., White C., Keller J.** Lean Hydrogen Combustion. *Lean Combustion.* N.-Y.: Elsevier, 2008:213—254.
11. **Kim H.S., Arghode V.K., Gupta A.K.** Flame Characteristics of Hydrogen-enriched Methane-air Premixed Swirling Flames. *Hydrogen Energy;* 34;2:1063—1073.
12. **Chacartegui R. e. a.** Analysis of Main Gaseous Emissions of Heavy Duty Gas Turbines Burning Several Syngas Fuels. *Fuel Proc. Technol.* 2011;92;2:213—220.
13. **De Robbio R.** Innovative Combustion Analysis of a Micro-gas Turbine Burner Supplied with Hydrogen-natural Gas Mixtures. *Energy Proc.* 2017;126:858—866.
14. **Reale F. e. a.** A Micro-gas Turbine Fuelled by Methane-hydrogen Blends. *Appl. Mech. Mater.* 2012;232:792—796, 2012.
15. **Tuccillo R. e. a.** Methane-hydrogen Blends in Micro-gas Turbines: Comparison of Different Combustor Concepts. *Proc. Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition.* 2019;8.
16. **Reale F., Sannino R.** Water and Steam Injection in Micro-gas Turbine Supplied by Hydrogen Enriched Fuels: Numerical Investigation and Performance Analysis. *Hydrogen Energy.* 2021;46;47:24366—24381.
17. **Frolov S.M., Medvedev S.N., Basevich V.Y., Frolov F.S.** Self-ignition of Hydrocarbon-hydrogen-air mixtures. *Hydrogen Energy.* 2013;38;10:4177—4184.
18. **Rudy W., Dabkowski A., Teodorczyk A.** Experimental and Numerical Study on Spontaneous Ignition of Hydrogen and Hydrogen-methane Jets in Air. *Hydrogen Energy.* 2014;39;35:20388—20395.
19. **Savitenko M.A., Rybakov B.A.** Snizhenie Vybrosov Parnikovykh Gazov v Vodogreynykh i Parovykh Kotlakh. *Energetika i Promyshlennost' Rossii.* 2021;17—18:420—421. (in Russian).
20. **Bu Dakka B., Sultanguzin I.A., Yavorovskiy Yu.V.** Rekuperatsiya Tepla s Ispol'zovaniem Organicheskogo

нического цикла Ренкина // Вестник МЭИ. 2021. № 5. С. 51—57.

21. **Bo Dakkah B. e. a.** Experimental Study of the Recovery of Low Heat Using the Organic Rankine Cycle // Proc. III Intern. Youth Conf. Radio Electronics and Electrical and Power Eng. 2021. Pp. 1—5.

22. **Bo Dakkah B. e. a.** Choosing the Suitable Working Fluid to Recover Heat from Low-temperature Sources // Ibid. Pp. 1—5.

23. **Ilbas M., Yilmaz I.** Experimental Analysis of the Effects of Hydrogen Addition on Methane Combustion // Energy Res. 2012. V. 36. No. 5. Pp. 643—647.

24. **Momin E.A. e. a.** Regenerative Gas Turbine Power Plant: Performance & Evaluation // Proc. 25th Intern. Compressor Eng. Conf. Purdue, 2021. Pp. 1—12.

25. **Reale F., Iannotta V., Tuccillo R.** Numerical Study of a Micro-gas Turbine Integrated with a Supercritical CO₂ Brayton Cycle Turbine // Proc. Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition. 2018.

Tsikla Renkina. Vestnik MEI. 2021;5:51—57. (in Russian).

21. **Bo Dakkah B. e. a.** Experimental Study of the Recovery of Low Heat Using the Organic Rankine Cycle. Proc. III Intern. Youth Conf. Radio Electronics and Electrical and Power Eng. 2021:1—5.

22. **Bo Dakkah B. e. a.** Choosing the Suitable Working Fluid to Recover Heat from Low-temperature Sources. Ibid:1—5.

23. **Ilbas M., Yilmaz I.** Experimental Analysis of the Effects of Hydrogen Addition on Methane Combustion. Energy Res. 2012;36;5:643—647.

24. **Momin E.A. e. a.** Regenerative Gas Turbine Power Plant: Performance & Evaluation. Proc. 25th Intern. Compressor Eng. Conf. Purdue, 2021:1—12.

25. **Reale F., Iannotta V., Tuccillo R.** Numerical Study of a Micro-gas Turbine Integrated with a Supercritical CO₂ Brayton Cycle Turbine. Proc. Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition. 2018.

Сведения об авторах:

Бу Дакка Баидаа — аспирантка кафедры промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: eng.baydaabod@gmail.com

Султангузин Ильдар Айдарович — доктор технических наук, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: SultanguzinIA@mpei.ru

Яворовский Юрий Викторович — кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: YavorovskyYV@mpei.ru

Жумагулов Михаил Григорьевич — PhD, ассоциированный профессор, доцент кафедры теплоэнергетики Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан, e-mail: mikelike2000@yandex.ru

Картджанов Нурлан Режепбаевич — докторант кафедры теплоэнергетики Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан, e-mail: nurlanke16@gmail.com

Information about authors:

Bo Dakkah B. — Ph.D.-student of Industrial Heat Engineering System Dept., NRU MPEI, e-mail: eng.baydaabod@gmail.com

Sultanguzin Idar A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Industrial Heat Engineering System Dept., NRU MPEI, e-mail: SultanguzinIA@mpei.ru

Yavorovsky Yuriy V. — Ph.D. (Techn.), Head of Industrial Heat Engineering System Dept., NRU MPEI, e-mail: YavorovskyYV@mpei.ru

Zhumagulov Mikhail G. — PhD, Associate Professor, Assistant Professor of Thermal Power Engineering Dept., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, e-mail: mikelike2000@yandex.ru

Kartdzhanov Nurlan R. — Doctoral Student of Thermal Power Engineering Dept., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, e-mail: nurlanke16@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 24.03.2022

The article received to the editor: 24.03.2022