

## POWER GAS TURBINE INSTALLATIONS ON METHANE-HYDROGEN FUEL

R. R. Khakimov <sup>a</sup>, F. G. Bakirov <sup>b</sup>

*Ufa State Aviation Technical University (UGATU)*

*<sup>a</sup> ruslan-ufa1999@yandex.ru, <sup>b</sup> fgbakirov@bk.ru*

*Submitted 2022, July 1*

**Abstract.** The relevance of the chosen topic is due to the need to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere from gas turbine power plants. This can be achieved by using environmentally friendly hydrogen in the fuel. The article considers the effect of hydrogen content in the fuel mixture on greenhouse gas emissions using the Terra program. According to the results of the calculation, it was found that an increase in the proportion of hydrogen in the fuel mixture leads to a decrease in the formation of greenhouse gases. Considered are gas turbine plants that can operate on methane-hydrogen fuel. The combustion of hydrogen in large quantities in these turbines is possible due to the design features and the principle of operation of their combustion chambers.

**Keywords:** gas turbine unit; reverse ignition; fuel flexibility; dry fuel combustion; combustion chamber; Terra; DLE; AEV; CPSC; LHV.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ НА МЕТАНО-ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

Р. Р. Хакимов <sup>a</sup>, Ф. Г. Бакиров <sup>b</sup>

*ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)*

*<sup>a</sup> ruslan-ufa1999@yandex.ru, <sup>b</sup> fgbakirov@bk.ru*

*Поступила в редакцию 01.07.2022*

**Аннотация.** Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью снижения выбросов в атмосферу парниковых газов из энергетических газотурбинных установок. Добиться этого возможно применением в топливе экологически чистого водорода. В статье рассмотрено влияние содержания водорода в топливной смеси на выбросы парниковых газов, ключевым из которых является двуокись углерода, используя программу Terra. По результатам расчета показано, что увеличение доли водорода в топливной смеси приводит к снижению образования парниковых газов. Рассмотрены газотурбинные установки, имеющие возможность работы на метано-водородном топливе. Сжигание водорода в больших количествах в этих турбинах возможно, благодаря особенностям конструкций и принципу действия их камер сгорания.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка; обратное воспламенение; топливная гибкость; сухое сжигание топлива; камера сгорания; Terra; DLE; AEV; CPSC; LHV.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день производство электрической энергии на ТЭС с использованием паротурбинных установок (ПТУ) является наиболее распространенным. Однако ввиду более высокого КПД, которое, в свою очередь, приводит к снижению расхода топлива, все большее распространение получает способ производства электрической энергии с помощью применения парогазовых установок (ПГУ). Применение ПГУ позволяет увеличить КПД электростанции по выработке электроэнергии до 52–60 % [1]. В тепловой схеме парогазовой установки основным элементом, в котором осуществляется сжигание топлива, является энергетическая газотурбинная установка (ГТУ). При сжигании органического топлива (природного газа) в камере сгорания ГТУ образуется большое количество углекислого газа и частично окислов азота, приводящие, в свою очередь, к изменению климата.

В связи с обострившейся проблемой выбросов парниковых газов климатическая повестка становится значимым фактором изменений в мировой экономике и энергетике. Для изменения ситуации необходимо перейти к альтернативному топливу, при сжигании которого снизилось бы количество углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу – декарбонизации. Решением этой проблемы может стать метано-водородная смесь, которая может применяться в качестве топлива в газотурбинных установках. Благодаря своим химическим свойствам, добавление водорода обеспечивает значительное снижение выбросов углекислого газа в окружающую среду и сокращению расхода топлива.

### ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В СМЕСИ НА ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Для наглядного примера снижения выбросов вредных веществ при добавлении водорода к природному газу рассмотрим результаты моделирования термодинамического процесса горения метано-водородной смеси с разной долей водорода и метана в программе *Terra*. Программа *Terra* предназначена для расчета состава фаз, термодинамических и транспортных свойств произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями. Она позволяет моделировать предельно равновесные состояния с использованием модели идеального газа [2]. На рис. 1 представлен интерфейс программы *Terra*.

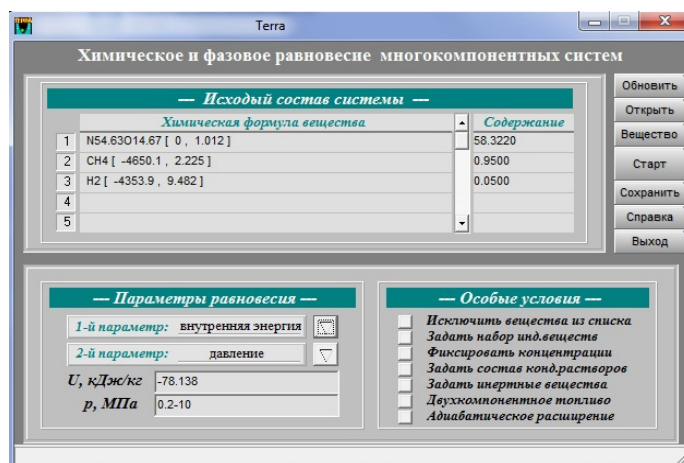
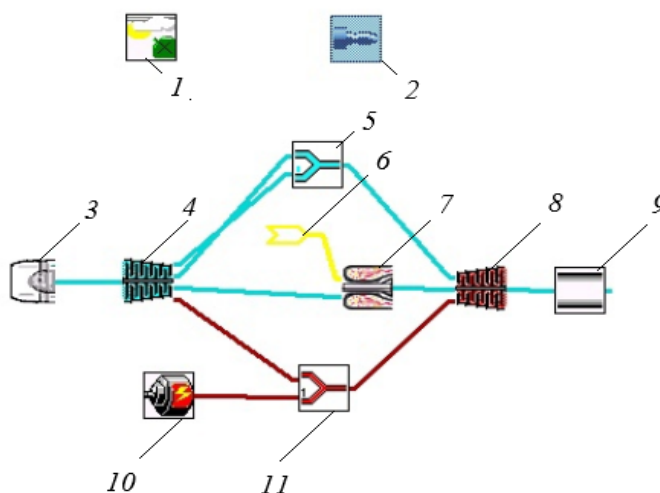


Рис. 1. Интерфейс программы *Terra*

При расчете необходимо обращать внимание не только на концентрацию веществ, но также и на температуру смеси. Предельная температура лопаток турбины, находящейся непосредственно за камерой сгорания, определяется жаропрочностью материалов, из которых они изготовлены. Превышение предельной температуры лопаток турбины приводит к ее разруше-

нию вследствие явления ползучести. В качестве предельной выбирается рабочая температура лопаток турбины газотурбинной установки ГТЭ-160, составляющая 1272,6 К, полученная при термогазодинамическом расчете газовой турбины в программе *DVIGwt*. Программа *DVIGwt* предназначена для проведения структурного и параметрического анализа газотурбинных двигателей, составления и расчета тепловых схем паротурбинных и парогазовых установок. В системе *DVIGwt* математическая модель создается из типовых элементов посредством их соединения типовыми информационными связями через соответствующие соединительные звенья элементов. Для расчета использовалась схема, представленная на рис. 2.



**Рис. 2.** Расчетная схема газотурбинной установки ГТЭ – 160:

1 – начальные условия; 2 – общие результаты; 3 – входное устройство; 4 – компрессор; 5 – смеситель; 6 – вход топлива; 7 – камера сгорания; 8 – турбина газовая; 9 – канал; 10 – источник – потребитель мощности; 11 – суммирование мощности

Изменение температуры производится путем изменения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  за счет изменения расхода водорода в камере сгорания газовой турбины.

Используя программу *Terra*, рассмотрим несколько вариантов расчета с различным содержанием водорода и метана в смеси, подобрав оптимальный коэффициент избытка воздуха для достижения оптимальной температуры перед турбиной, а также сравним концентрации веществ в смеси при различных вариантах расчета. В качестве окислителя во всех вариантах расчета выступает воздух. Условия, при которых находятся параметры равновесного состояния, задаются двумя значениями параметров: внутренней энергии и давления, значения которого задаются промежутком от 0,2 до 10 МПа. Для сокращения объема в качестве результатов выводятся параметры при давлении 0,2; 5 и 9,95 МПа. Оптимальный коэффициент воздуха  $\alpha$  и содержания водорода и метана для шести вариантов приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Исходные данные для расчета

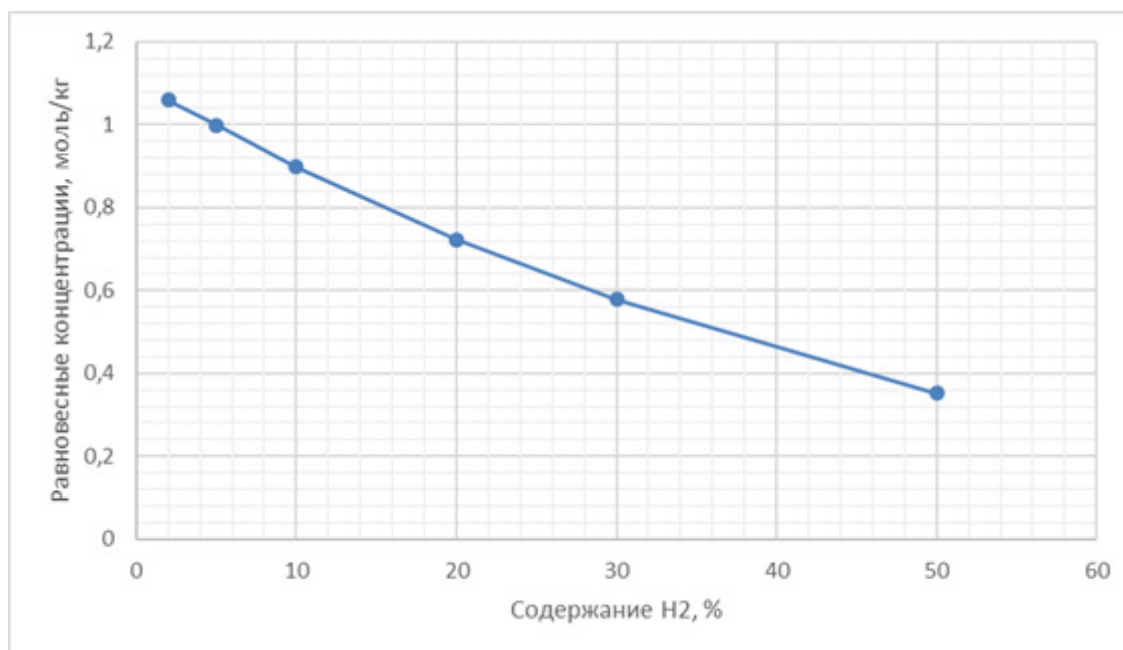
Вариант расчета	Содержание водорода $H_2$ в смеси, %	Содержание метана $CH_4$ в смеси, %	Оптимальный коэффициент избытка воздуха $\alpha$
1	2	98	3,27
2	5	95	3,27
3	10	90	3,29
4	20	80	3,34
5	30	70	3,38
6	50	50	3,44

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета представлены в табл. 2 и на рис. 3–6.

**Таблица 2.** Результаты расчета

Равновесные концентрации, моль/кг							
Вещество	Давление, МПа	Вариант расчета № 1	Вариант расчета № 2	Вариант расчета № 3	Вариант расчета № 4	Вариант расчета № 5	Вариант расчета № 6
CO <sub>2</sub>	0,2	1,0592	0,99824	0,8984	0,72275	0,57797	0,35261
	5						
	9,95						
CO	0,2	0,5792e – 6	0,5623e – 6	0,5192e – 6	0,4034e – 6	0,3180e – 6	0,1946e – 6
	5	0,1159e – 6	0,1125e – 6	0,1039e – 6	0,8070e – 7	0,6361e – 7	0,3893e – 7
	9,95	0,8211e – 7	0,7973e – 7	0,7361e – 7	0,5720e – 7	0,4509e – 7	0,2759e – 7
NO <sub>2</sub>	0,2	0,1547e – 3	0,1552e – 3	0,1560e – 3	0,1564e – 3	0,1568e – 3	0,1579e – 3
	5	0,7735e – 3	0,7760e – 3	0,7802e – 3	0,7817e – 3	0,7841e – 3	0,7897e – 3
	9,95	0,00109	0,00109	0,0011	0,0011	0,00111	0,00111
NO <sub>2</sub>	0,2	0,01392	0,01405	0,0142	0,01412	0,01411	0,0142
	5						
	9,95						



**Рис. 3.** Зависимость равновесной концентрации CO<sub>2</sub> от содержания водорода

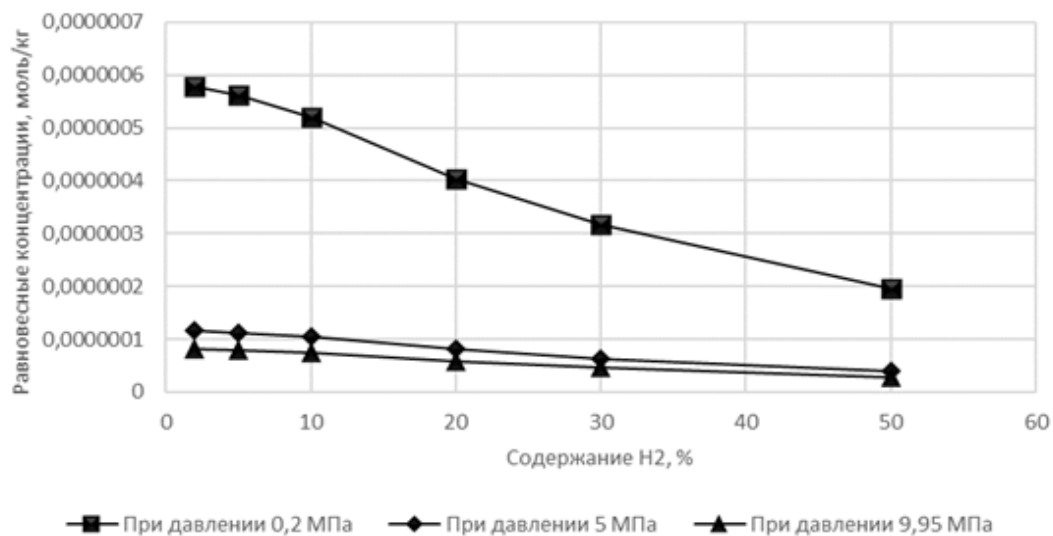


Рис. 4. Зависимость равновесной концентрации CO от содержания водорода

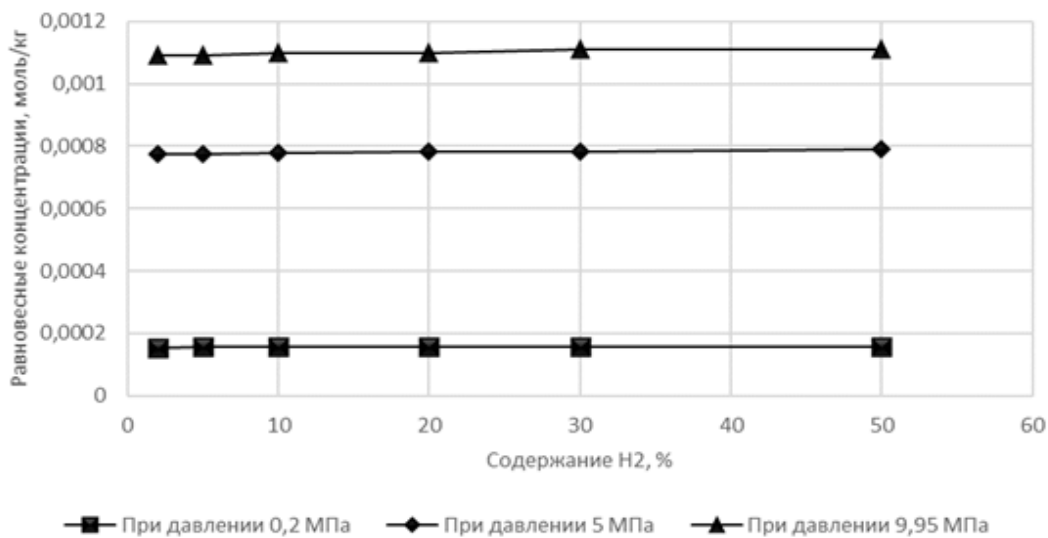


Рис. 5. Зависимость равновесной концентрации NO<sub>2</sub> от содержания водорода

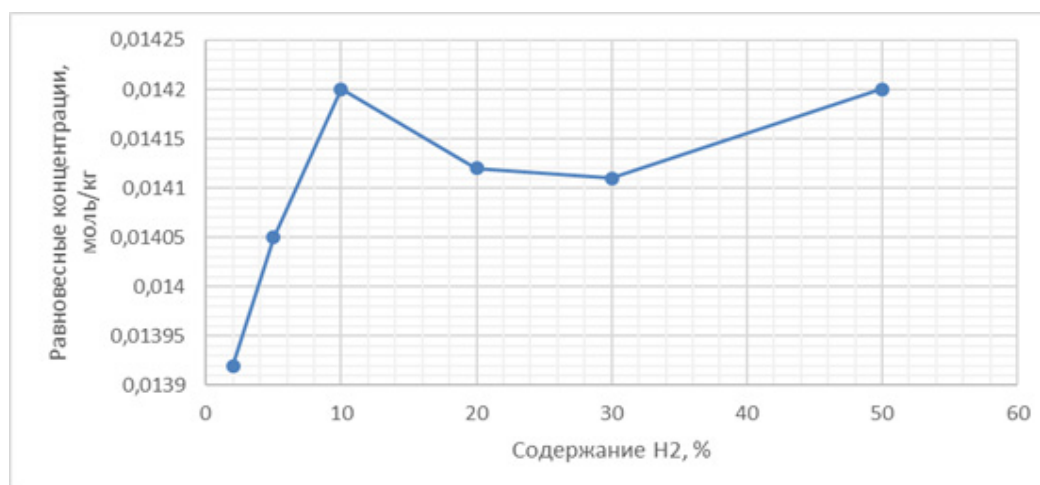


Рис. 6. Зависимость равновесной концентрации NO от содержания водорода

Анализируя результаты расчетов, приходим к выводу, что при увеличении содержания водорода в топливной смеси происходит значительное снижение концентрации оксида и диоксида углерода (углекислого газа) в продуктах сгорания. Так, при увеличении доли водорода в топливной смеси до 50 %, выбросы углекислого газа снижаются в 3 раза. Выбросы окислов азота остаются практически неизменными, так как увеличивается коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , а температура воздуха в зоне горения не возрастает. Теоретически имеется возможность использования водорода в топливной смеси 50 % и более с соответствующим коэффициентом избытка воздуха.

### ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Несмотря на свои преимущества, применение топлива с высоким содержанием водорода вызывает следующие проблемы:

- самовоспламенение: высокий риск самовоспламенения из-за более низкого времени задержки зажигания;
- обратное воспламенение: повышенный риск обратного воспламенения из-за более высокой скорости пламени или более короткого времени задержки воспламенения;
- измененный уровень термоакустических амплитуд и частот;
- более высокий перепад давления из-за более низкого индекса Воббе;
- сокращение срока службы/потребность в большем охлаждении горячих компонентов газового тракта из-за повышенной теплопередачи.

Таким образом, для устранения сдерживающих факторов применения водорода в большом количестве необходимо создавать специальные камеры сгорания. Сегодня перспективной технологией сжигания метано-водородного топлива является технология сухого сжигания топлива *Dry Low Emission (DLE)*, которая может обеспечить гибкую работу с содержанием водорода в топливе до 100 %.

Технологию *DLE* использует компания *Siemens* в своей газотурбинной установке *SGT-800* мощностью 57 МВт [3].

Камера сгорания турбины *SGT-800* (рис. 7) снабжена горелками 3-го поколения, имеющими четыре тангенциальных отверстия для входа воздуха, смесительную трубу, соединенную с концом завихрителя, конус, который удлиняет секцию смешивания. Смесительная трубка оснащена четырьмя рядами отверстий, через которые воздух поступает в пограничный слой в качестве дополнительной защиты от обратного воспламенения, решая тем самым одну из основных проблем водородного топлива.

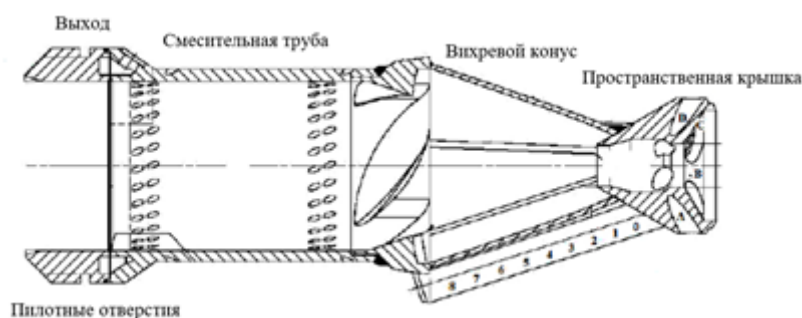


Рис. 7. Газотурбинная установка *SGT-800*

Впрыск топлива производится в четыре отверстия (A, B, C и D на рис. 7), расположенных в пространственной крышке. Газообразное топливо также впрыскивается через отверстия в цилиндрах вихревого конуса (номера 0–8 на рис. 7). Все эти отверстия для впрыска топлива создают крошечные струи, которые пересекаются с воздушным потоком, позволяя ему равно-

мерно перемешаться. Вихревой конус имеет четыре воздушные прорези, через которые сжатый воздух входит в конус. В отверстии каждой из этих воздушных прорезей расположен цилиндр впрыска топлива. Направляющие отверстия расположены на внешнем кольце выхода горелки и могут применяться для впрыска как газообразного, так и жидкого топлива, и применяются для стабилизации процесса горения.

Завихрение, создаваемое вихревым конусом, улучшает смешивание воздуха и топлива по смесительной трубе, пока не достигнет выхода камеры сгорания. Затем смесь радиально расширяется из-за завихрения, смешивается с продуктами сгорания в камере сгорания и воспламеняется из-за высоких температур. Вблизи выходного отверстия камеры сгорания происходит вихревой пробор, а ниже по потоку от этого пробора находится центральная зона рециркуляции, где происходит рециркуляция продуктов сгорания. Вихревой пробор и центральная зона рециркуляции обеспечивают естественную стабилизацию пламени.

Благодаря хорошей топливной гибкости обеспечивается высокое содержание инертных газов, водорода и тяжелых углеводородов в составе газового топлива и водорода. По результатам испытаний установлена возможность использования топлива с объемным содержанием водорода в природном газе до 75 % [4].

Известна газовая турбина *GT36* компании *Ansaldo Energia*, мощностью 500 МВт [5]. По своей сути является глубокой модернизацией газовой турбины *GT26*. Отличительной особенностью прототипа *GT36* – газотурбинной установки *GT26* является технология последовательного сгорания в двух последовательно расположенных независимых компактных кольцевых камерах сгорания, что дает исключительно высокую эффективность ГТУ и пониженную эмиссию выхлопных газов в широком диапазоне нагрузок, а также возможность работы в режиме ежедневного пуска и останова при работе с номинальной нагрузкой. Данная система получила название последовательного сгорания при постоянном давлении (*CPSC*). Общий вид системы *CPSC* представлен на рис. 8. В газотурбинной установке *GT36* концепция последовательного сгорания сохраняется, но она реализуется в трубчатой камере сгорания, а не в двух кольцевых, используемых в *GT26* [6].

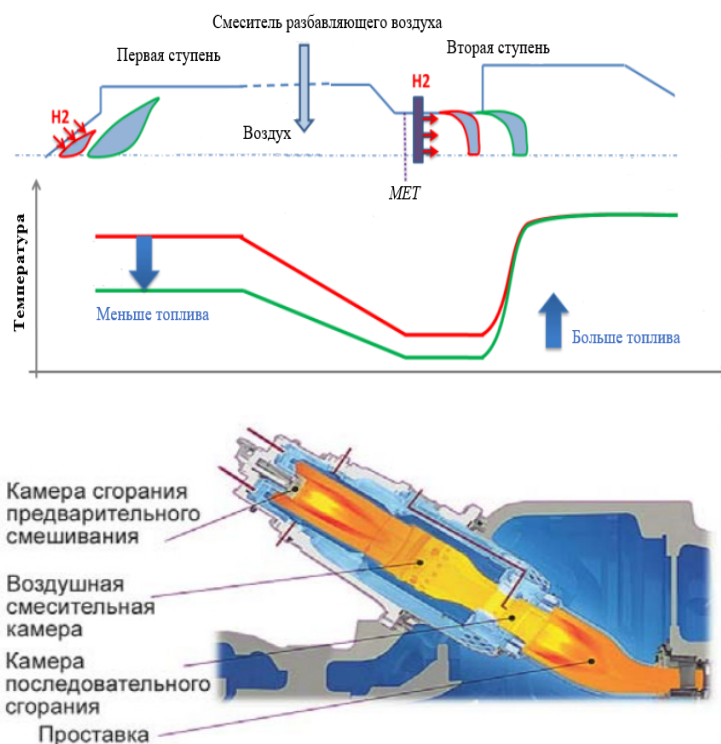


Рис. 8. Система последовательного сгорания при постоянном давлении (*CPSC*) газотурбинной установки *GT36*

В камере сгорания предварительного смешения первой ступени используются аэродинамические конструкции для стабилизации распространяющегося пламени, что обеспечивает стабильность пламени и эффективность сгорания в широком рабочем диапазоне.

В последовательной камере сгорания напротив, управление производится самовоспламенением. Эти два противоположных метода управления пламенем обеспечивают существенное преимущество в минимизации выбросов  $\text{NO}_x$  при базовой нагрузке.

При высоких температурах горения при базовой нагрузке значительной возможностью для контроля выбросов  $\text{NO}_x$  является сокращение времени пребывания. Этого можно добиться, оптимизировав объем последовательной камеры сгорания, где происходит высокотемпературное горение, но требуется малое время пребывания, для ограничения выбросов  $\text{NO}_x$ , что противоречит, в свою очередь, требованию о более длительном времени пребывания при частичной нагрузке для полного выгорания монооксида углерода и достижения максимального динамического диапазона [7].

В системе *CPSC* повышенная гибкость размеров последовательной камеры сгорания обеспечивается за счет возможности регулирования положения вторичного пламени, управляемого самовоспламенением.

При базовой нагрузке, когда желательно сократить время пребывания, температура на выходе из смесителя (*MET*) – температура, соответствующая процессу самовоспламенения в последовательной камере сгорания – снижена, заставляя пламя быть расположенным ниже по потоку и обеспечивая сокращение времени пребывания после воспламенения.

При работе с малой частичной нагрузкой температура на выходе из смесителя увеличивается, что позволяет сформировать пламя последовательной камеры сгорания значительно выше по течению и, следовательно, увеличивается время пребывания для выгорания.

Присущая системе *CPSC* гибкость может быть применена аналогичным образом, чтобы обеспечить надежный, низкий уровень показателей выбросов для широкого спектра видов топлива. Для каждого типа топлива может быть определен рабочий подход путем регулировки через температуру на выходе из смесителя, которая позволяет поддерживать оба положения пламени. Для низкомолекулярных реактивных топлив (например, метана) температура на выходе из смесителя, т.е. температура пламени первой ступени, увеличивается, чтобы обеспечить максимальные динамические характеристики, в то время как для топлива с более высокой реактивностью (например, с высоким содержанием водорода или более высоким содержанием углеводородов) она уменьшается за счет снижения температуры пламени в первой ступени (от красного до зеленого на рис. 8). Это, с одной стороны, объясняет повышенную склонность стабилизированного пламени к обратному воспламенению. В то же время – и в этом заключается преимущество последовательного сжигания – это также объясняет изменение времени задержки самовоспламенения и, следовательно, положение пламени во второй ступени, положение которой при одной и той же температуре пламени можно регулировать в разных положениях (красное и зеленое пламя на рис. 8). Это можно наблюдать на рис. 9, где показано время задержки воспламенения во второй ступени в виде функции температуры и типа топлива.



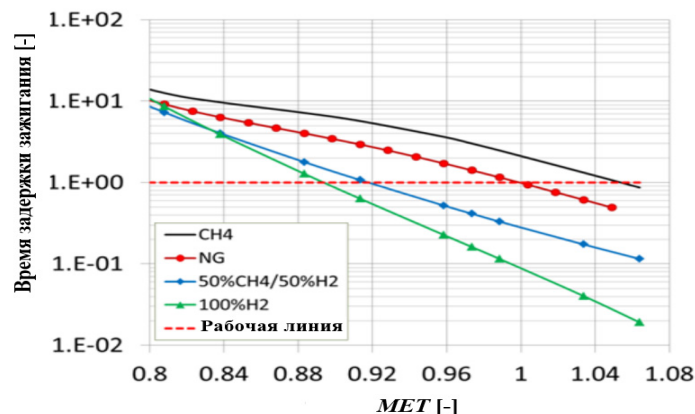


Рис. 9. Время задержки воспламенения во второй ступени в зависимости от температуры на входе для топлив с различной реакционной способностью

Красная пунктирная линия при нормированном времени задержки воспламенения, равном 1, показывает, что регулировка температуры на выходе из смесителя позволяет получить одинаковое положение пламени для широкого диапазона реакционной способности топлива (от чистого метана до чистого водорода). Этот факт позволяет работать с топливом различной реактивности, используя одну и ту же камеру сгорания.

Таким образом, благодаря использованию технологии CPSC, газотурбинная установка GT36 может эксплуатироваться с объемным содержанием водорода в природном газе до 50 % [8].

В компании *General Electric* давно занимаются исследованием газовых турбин на водородном топливе, особое внимание уделяя газотурбинной установке GT13e2 мощностью 210 МВт [9].

Камера сгорания оборудована горелками *AEV* (*Advanced Environmentally friendly V-shaped burner*), аналогичным горелкам DLE 3-го поколения. Камера сгорания с горелками *AEV* представляет собой систему для сухого сжигания топлива и спроектирована на основе концепции ступенчатого сжигания с двумя ступенями подачи топлива.

Камера сгорания состоит из четырех четвертных корпусов, которые создают поле стабилизированного вихревого потока воздуха на выходе из нее. За корпусами определенная зона смешивания создает идеальную смесь топливного газа и воздуха для горения. Газ основной ступени впрыскивается через небольшие инжекционные отверстия в пазах между корпусами.

Газ передней ступени впрыскивается через несколько отверстий в передней поверхности камеры сгорания, как показано на рис. 10.



Рис. 10. Поперечное сечение камеры сгорания с горелками *AEV*, работающей на газе

В нижнем диапазоне нагрузок в камеру сгорания подается большое количество газа первой ступени, что обеспечивает очень надежную работу камеры сгорания в отношении гашения пламени и пульсаций. При более высокой нагрузке требуется меньше внешнего впрыска топлива и, соответственно, достигается меньший уровень выбросов.

Геометрия камеры сгорания оптимизирована для обеспечения низкого перепада давления воздуха для горения при высоких скоростях потока. В результате высоких скоростей потока камера сгорания обеспечивает также большой запас прочности от обратного воспламенения реактивного топлива, такого как водород.

Топливная гибкость камеры сгорания была доказана в ходе нескольких испытаний под высоким давлением и подтверждена в действующих турбинах *GT13E2*. На рис. 11 представлен диапазон исследуемых газов в виде облака точек в индексе Воббе по сравнению с низшей теплотворной способностью (*LHV*). Указанные области представляют собой испытанные виды топлива, которые продемонстрировали безопасную и соответствующую требованиям сухую эксплуатацию без необходимости разбавления (паром) на испытательных установках или газовых турбинах.

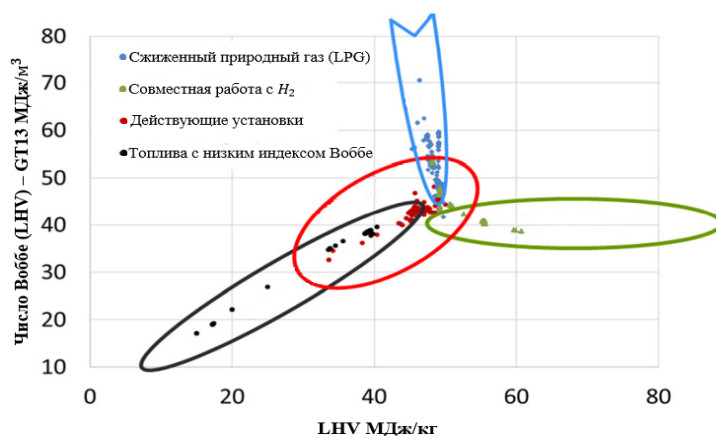


Рис. 11. Топливная способность горелки *GT13E2 AEV*. Сравнение индекса Воббе и низшей теплотворной способности (*LHV*)

Во время первой серии испытаний под высоким давлением топливо на природном газе разбавляли азотом или  $\text{CO}_2$  для имитации топливных газов с более низкой теплотворной способностью. Во время испытаний более низкая теплотворная способность (*LHV*) находилась в диапазоне от 15 до 50 МДж/кг. Во второй серии испытаний под высоким давлением реактивность топлива была повышена путем смешивания природного газа с водородом [10].

Смеси топливных газов с максимальным объемным содержанием водорода до 60 % были успешно протестированы со стандартной камерой сгорания. Во время испытаний с применением водорода на оборудовании не было зафиксировано значительных отклонений температуры и изменения скорости пламени.

Активные разработки газовых турбин, способных работать на метано-водородном топливе, ведутся также компаниями *Mitsubishi Hitachi Power Systems*, *Solar Turbines*, *Baker Hughes*, *MAN Energy Solutions*. Отдельно стоит выделить отечественную компанию «Силовые машины», которая разработала горелочное устройство для газотурбинной установки средней мощности ГТЭ-65, способное сжигать метано-водородную смесь. В настоящее время проводятся испытания горелочного устройства. На начальном этапе в качестве топлива используется метан, к которому в ходе экспериментов будут постепенно добавлять водород, увеличивая процентное

соотношение в смеси с метаном и изучая характеристики горения. По итогам испытаний планируется довести долю водорода до 90–100 % [11].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Являясь широко используемой технологией в современной энергетике, газотурбинные установки могут способствовать к плавному переходу к безуглеродному будущему. Для ускорения этого процесса необходимо тесное сотрудничество между производителями, конечными потребителями и научным сообществом. Необходимы исследования и разработки для преодоления действующих проблем сжигания топлива с высокой объемной долей водорода. Изменение свойств продуктов сгорания при сжигании водорода также требует разработки новых материалов и технологий охлаждения для горячих компонентов газового тракта турбин.

Модернизация уже существующих и эксплуатируемых газовых турбин на тепловых станциях также является важным этапом перехода к безуглеродной энергетике. Для использования водорода в качестве топлива в этом случае необходим анализ используемых камер сгорания, системы управления, системы зажигания и возможности их модернизации.

Также в качестве отдельного направления исследований на перспективу можно рассматривать применение СПГ-топлива и сжиженного водорода, а также их смесей в качестве топлива для самолетов гражданской авиации. Тем более, что такой опыт исследований и испытаний авиационных ГТД, включая полетные испытания, был приобретен еще в СССР.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стерман Л. С., Лавыгин В. М., Тишин С. Г.** Тепловые и атомные электрические станции. М.: МЭИ, 2008. 464 с. [ L. S. Sterman, V. M. Lavygin, S. G. Silence, *Thermal and nuclear power stations*, (in Russian). Moscow: MEI, 2008. ]
2. **Белов Г. В., Трусов Б. Г.** Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 96 с. [ G. V. Belov, B. G. Trusov, *Thermodynamic modeling of chemically reacting systems*, (in Russian). Moscow: MG TU im. N. E. Bauman, 2013. ]
3. **SGT-800** Industrial gas turbine // SIEMENS ENERGY. [Электронный ресурс]. URL: SGT-800 | Industrial Gas Turbine | Gas Turbines | Manufacturer | Siemens Energy Global (siemens-energy.com) (дата обращения 29.05.2022). [ SGT-800 Industrial gas turbine // SIEMENS ENERGY (2022, May 29), [Online]. Available: SGT-800 | Industrial Gas Turbine | Gas Turbines | Manufacturer | Siemens Energy Global (siemens-energy.com) ]
4. **Hydrogen** power with Siemens gas turbines / K. Bohan, et al. // Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG. [Electronic resource]. URL: <https://www.infrastructureasia.org/-/media/Articles-for-ASIA-Panel/Siemens-Energy-Hydrogen-Power-with-Siemens-Gas-Turbines.pdf?la=en&hash=1B91FADA342293EFB56CDBE312083FE1B64DA111> (accessed 29.05.2022).
5. **Смирнов А. А.** Наследие Alstom или новый виток конкурентной борьбы на рынке сверхмощных газотурбинных установок // Газотурбинные технологии. 2016. № 8 (143). С. 2–5. [ A. A. Smirnov, "Alstom heritage or a new round of competition in the market for super-powerful gas turbines", (in Russian), in *Gazoturbinnye tehnologii*, no. 8 (143), pp. 2-5, 2016. ]
6. **Хаммель Ф.** Опыт эксплуатации последней модификации ГТУ GT26 компании Alstom // Турбины и Дизели. 2013. № 6. С. 4–13. [ F. Hummel, "Operating experience of the latest modification of Alstom's GT26 GTU", (in Russian), in *Turbiny i Dizeli*, № 6, pp. 4-13, 2013. ]
7. **Bothien M. R., Ciani A.** 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, Iss. 12. Article number 121013.
8. **Ansaldo** Energia and Equinor in Hydrogen Gas Turbine Tests // World-Energy. [Electronic resource]. URL: <https://www.world-energy.org/article/3213.html> (accessed 07.06.2022).
9. **GT13E2** heavy duty gas turbine // GE Gas Power. [Electronic resource]. URL: <https://www.ge.com/gas-power/products/gas-turbines/gt-13e2> (accessed 02.06.2022).
10. **Development** and Implementation of the AEV Burner for the Alstom GT13E2 / M. Zajadatz, et al. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Energy. 2013. Vol. 135, Iss. 6. Article number 061503.
11. **Создано** экспериментальное горелочное устройство для первой отечественной ГТУ на метано-водородном топливе // Силовые машины. [Электронный ресурс]. URL: <https://power-m.ru/press-center/news/sozdano-eksperimentalnoe-gorelochnoe-ustroystvo-dlya-pervoy-otechestvennoy-gtu-na-metano-vodorodnom-/?> (дата обращения 09.06.2022). [ An experimental burner device for the first domestic gas turbine unit on methane-hydrogen fuel was created // Power machines (2022, Jun. 09). [Online]. Available: <https://power-m.ru/press-center/news/sozdano-eksperimentalnoe-gorelochnoe-ustroystvo-dlya-pervoy-otechestvennoy-gtu-na-metano-vodorodnom-/?> ]

---

**ОБ АВТОРАХ**

**ХАКИМОВ Руслан Радикович**, маг. каф. АТиТ УГАТУ.

**БАКИРОВ Фёдор Гайфуллович**, д-р техн. наук, проф. каф. АТиТ УГАТУ.

**КНАКИМОВ, Ruslan Radikovich**, Master student (USATU).

**BAKIROV, Fedor Gayfullovich**, Dr. of Tech. Sci., Prof. in the Dept. of Aviation of the thermal engineering and heat power engineering (USATU).

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 4 (98), pp. 4-15, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).