

# Анализ методов и характеристик систем регулирования ГТУ с малоэмиссионными камерами сгорания

Свердлов Е.Д., Пузич А.А., Дубовицкий А.Н., Владимиров А.В.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: gtu@ciam.ru

Рассмотрены уровни и диапазоны эмиссионных характеристик малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) газотурбинных установок (ГТУ), реализующих технологию сжигания бедных, предварительно перемешанных топливовоздушных смесей. Проведен анализ конструктивных характеристик МЭКС и применяемых ведущими фирмами мира систем регулирования и поддержания заданных эмиссионных характеристик во всем диапазоне условий работы ГТУ. Представлены результаты расчетных исследований влияния различных методов регулирования на характеристики ГТУ с МЭКС. Даны рекомендации применения методов регулирования в зависимости от схем организации низкоэмиссионного процесса в ГТУ.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, малоэмиссионная камера сгорания, однозонная камера сгорания, система регулирования, методы регулирования, эмиссионные характеристики, эмиссия оксидов азота, эмиссия оксида углерода, коэффициент полезного действия

## Analysis of methods and characteristics of control systems for gas turbines with low-emission combustion chambers

Sverdlov E.D., Puzich A.A., Dubovitsky A.N., Vladimirov A.V.

CIAM, Moscow

The levels and ranges of emission characteristics of low-emission combustion chambers (MEKS) of gas turbine plants, which implement the technology of combustion of lean, premixed fuel-air mixtures, are considered. The analysis of the design characteristics of the MEKS and the systems used by the world's leading companies for the regulation and maintenance of the specified emission characteristics in the entire range of operating conditions of the gas turbine plant. The results of computational studies of the influence of various control methods on the characteristics of a gas turbine with MEKS are presented. Recommendations are given for the application of control methods depending on the organization schemes of the low-emission process in the gas turbine unit.

**Keywords:** gas turbine plant, low-emission combustion chamber, single-zone combustion chamber, control system, control methods, emission characteristics, emission of nitrogen oxides, emission of carbon monoxide, efficiency

### Введение

Использование природного газа и применение малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) с технологией сжигания бедных, предварительно перемешанных топливовоздушных смесей в промышленных газотурбинных установках (ГТУ) позволили снизить выбросы  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  почти на порядок, до 10...25 ppm. Основные отличия МЭКС от обычных диффузионных камер сгорания заключаются в следующем. Малоэмиссионные камеры сгорания имеют одну или две зоны сжигания

топлива, обладают существенно большими размерами жаровых труб (ЖТ), имеют склонность к проскокам пламени в горелки и к режимам виброгорения, а также требуют оснащения газотурбинных двигателей (ГТД) специальными системами регулирования для поддержания низких уровней эмиссии вредных веществ в диапазоне условий работы.

Наиболее распространенные однозонные МЭКС (с одной зоной сжигания топлива) обеспечивают низкую эмиссию только в достаточно узком диапазоне составов и температуры продуктов сгорания.

Цель настоящей статьи – анализ характеристик систем регулирования ГТУ, применяемых ведущими фирмами мира для поддержания низких заданных уровней эмиссии во всем диапазоне условий эксплуатации.

### Особенности эмиссионных характеристик однозонных и двухзонных МЭКС ГТУ

На рис. 1 приведены эмиссионные характеристики экспериментальной однозонной МЭКС ЦИАМ [1], полученные в условиях близких к идеальным, при реализации равномерного поля концентраций и без подачи пилотного топлива ( $g$ ). Для сравнения показаны эмиссионные характеристики МЭКС ГТУ GTX100 фирмы АВВ [2]. Диапазон низкоэмиссионной работы МЭКС ЦИАМ по коэффициенту избытка воздуха составляет  $\Delta\alpha \approx 0,6$ ; для МЭКС в составе ГТУ GTX100 он меньше,  $\Delta\alpha \approx 0,3$ , и ограничен слева высокочастотным режимом виброгорения, а справа – бедным срывом пламени.

На основании данных, представленных на рис. 1, и данных об эмиссионных характеристиках однозонных МЭКС других фирм можно утверждать, что диапазон

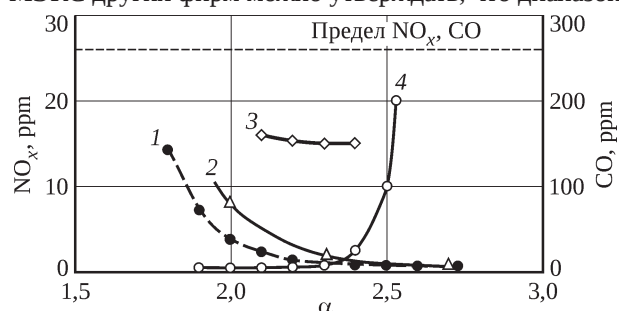


Рис. 1. Эмиссионные характеристики (15% O<sub>2</sub>) однозонных МЭКС – ЦИАМ (1, 2, 4) и ГТУ GTX100 фирмы АВВ (3),  $T_k^* = 740$  К:

- 1 – NO<sub>x</sub>,  $p_k^* = 10$  бар,  $g = 0$ ; 2 – NO<sub>x</sub>,  $p_k^* = 16$  бар,  $g = 0$ ;
- 3 – NO<sub>x</sub>,  $p_k^* = 20$  бар,  $g = 10\%$ ; 4 – CO,  $p_k^* = 10$  бар,  $g = 0$

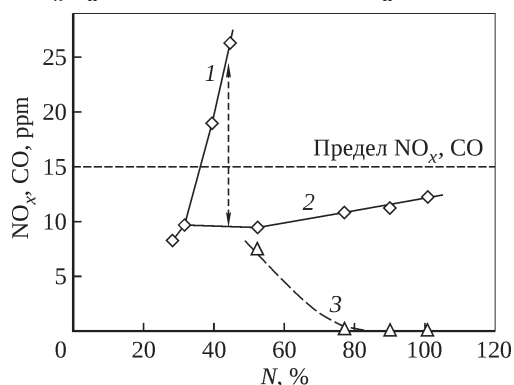


Рис. 2. Эмиссионные характеристики (15% O<sub>2</sub>) двухзонной МЭКС ГТУ L30 фирмы Kawasaki Heavy Industries [5–7]: 1 – NO<sub>x</sub>, подача топлива в основную зону; 2 – NO<sub>x</sub>, подача топлива в основную и дополнительную зоны ЖТ; 3 – CO, подача топлива в основную и дополнительную зоны ЖТ

их получения не превышает  $\Delta\alpha \approx 0,5$ , а в большинстве случаев он составляет менее  $\Delta\alpha \approx 0,3$ . При этом диапазон  $\alpha$  в условиях эксплуатации ГТУ по мощности ( $N$ ) и климату ( $T_{вх}$ ) существенно, часто в несколько раз, шире диапазона поддержания эмиссионных характеристик однозонных МЭКС. Поэтому для поддержания эмиссионных характеристик (NO<sub>x</sub> и CO) ГТУ с однозонными МЭКС в диапазоне условий эксплуатации необходимо применение специальных систем регулирования, обеспечивающих поддержание примерного постоянства температуры продуктов сгорания во фронтальной зоне МЭКС [3; 4].

При изменении мощности ГТУ с двухзонной МЭКС низкоэмиссионная работа поддерживается в диапазоне  $N = 30 \dots 100\%$  без применения дополнительных систем регулирования расхода воздуха [5–7] (рис. 2). Это достигается за счет перевода и сжигания значительной доли расхода топлива в дополнительной зоне, расположенной ближе к концу ЖТ, ниже (по потоку) основной зоны обратных токов (ЗОТ). Такая схема организации рабочего процесса наиболее перспективна при температуре перед турбиной ГТУ  $T_t^* \geq 1700$  К.

Применение двухзонного (или двухстадийного) горения для МЭКС является определенным новшеством в борьбе с выбросами вредных веществ. Но для понимания методов регулирования ГТУ необходимо обратиться к опыту организации горения традиционных МЭКС.

### Анализ характеристик однозонных МЭКС и систем регулирования ГТУ большой мощности ведущих фирм мира

**ГТУ GT13E2 мощностью 203 МВт (фирма Alstom).** В ГТУ GT13E2 применяется кольцевая МЭКС [8; 9] (рис. 3) с низкоэмиссионными горелками АЕV (advanced EV), которые являются результатом многолетних разработок фирмы Alstom.

Низкоэмиссионные горелки располагаются на фронтальной плите на двух радиусах жаровой трубы. Конструктивно каждая горелка представляет собой конус со щелями, через которые внутрь горелки втекает воздух. Вдоль щелей расположены отверстия, через которые перпендикулярно потоку воздуха подается топливо. В горелке АЕV выполнены четыре щели для подачи воздуха. После конического участка располагается цилиндрический участок смешения. Благодаря участку смешения удается добиться очень высокой однородности топливовоздушной смеси.

Для регулирования ГТУ на режимах частичной мощности применяется *прикрытие входных направляющих аппаратов* (ВНА) компрессора. При прикрытии лопаток уменьшается расход воздуха и снижается мощ-

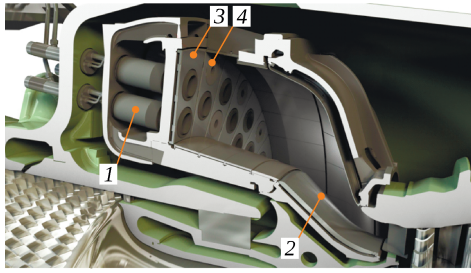


Рис. 3. Камера сгорания ГТУ GT13E2 [8]:

- 1 – низкоэмиссионные горелки AEV; 2 – газосборник;
- 3 – фронтная плита; 4 – акустический демпфер

ность ГТУ. Кроме того, прикрытие ВНА применяется для регулирования расхода воздуха при снижении температуры воздуха на входе в компрессор.

На рис. 4 приведено изменение угла установки лопаток ВНА ( $\alpha_{\text{ВНА}}$ ), температуры воздуха на выходе из компрессора ( $T_{\text{к}}^*$ ), средней температуры пламени ( $T_{\text{пл.ср}}$ ) и температуры газа на входе ( $T_{\text{г}}^*$ ) и выходе ( $T_{\text{т}}^*$ ) турбины при снижении режима ГТУ. При снижении мощности ( $N$ ) регулирование осуществляется таким образом, чтобы происходило поддержание или небольшое снижение температуры пламени.

После того как угол  $\alpha_{\text{ВНА}}$  достигает предельно допустимого значения, при дальнейшем снижении  $N$

регулирование ВНА больше не осуществляется. При дальнейшем снижении мощности начинается интенсивный рост эмиссии CO. Таким образом, регулирование ВНА осуществляется не при всех значениях мощности, а только в некотором диапазоне.

Фирма Alstom провела доработку компрессора ГТУ GT13E2, благодаря чему расширила диапазон регулирования ВНА (рис. 4 и рис. 5). Прикрытие ВНА компрессора начинается сразу при снижении мощности ГТУ от 100%. После того как лопатки направляющих аппаратов выходят на максимальную степень прикрытия, при дальнейшем уменьшении мощности повышается доля пилотного топлива (PFR). Это обеспечивает устойчивую работу камеры при уровне температур пламени ниже значения, которое является пределом бедного срыва горения топливовоздушной смеси для многих МЭКС.

После модернизации компрессора и его ВНА диапазон получения низкоэмиссионных характеристик расширился с 60...100% до 40...100% мощности ГТУ (рис. 6). Выбранные принципы управления позволяют быстро и плавно менять режимы мощности. После закрытия ВНА на предельную величину регулирование эмиссионных характеристик и стабилизация горения осуществляются с помощью увеличения PFR.

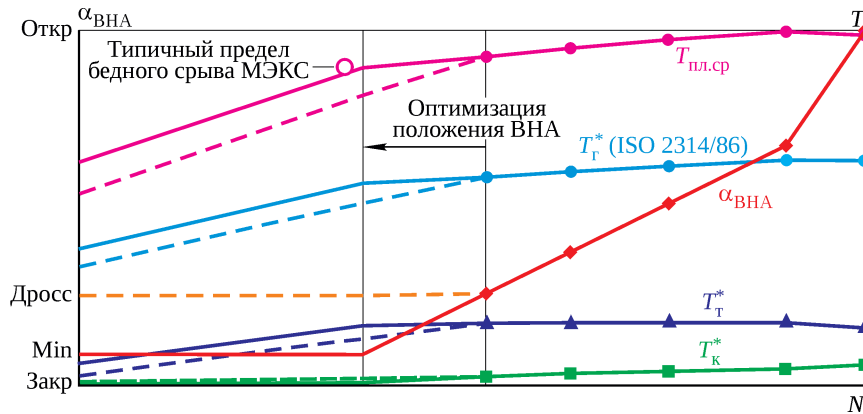


Рис. 4. Концепция регулирования ГТУ GT13E2 с горелками AEV [8]

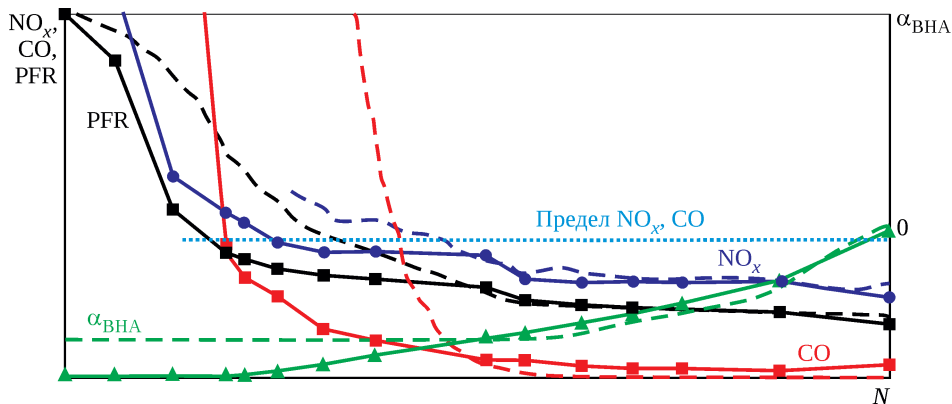


Рис. 5. Эмиссионные характеристики ГТУ GT13E2 с горелками AEV для обычного (штриховые линии) и расширенного (сплошные линии) диапазонов работы [8; 9]

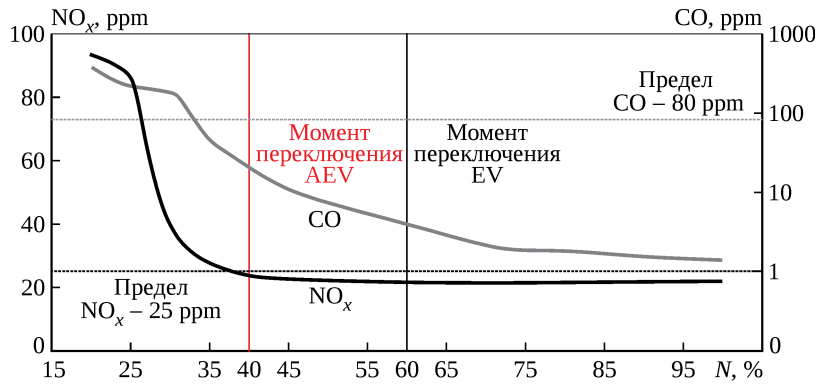


Рис. 6. Эмиссионные характеристики ГТУ GT13E2 на разных режимах мощности после модернизации компрессора [8; 9]

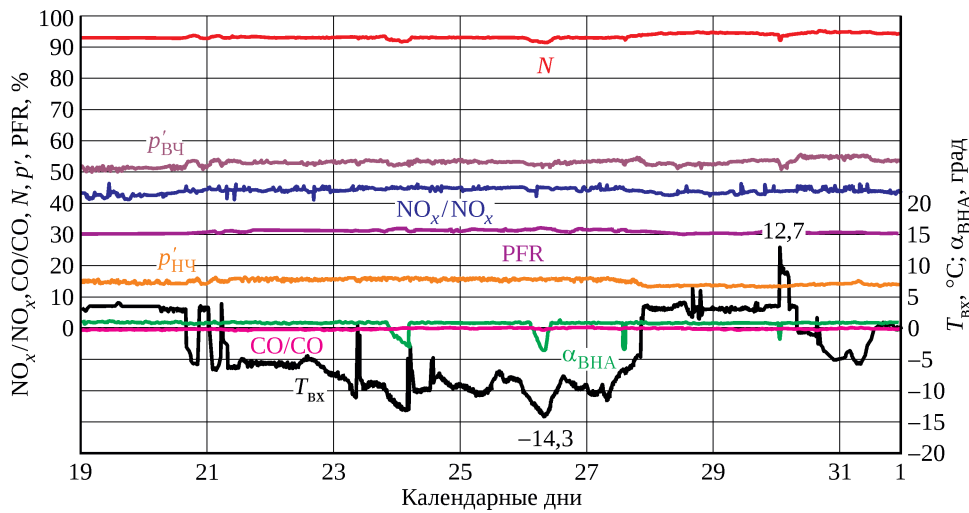


Рис. 7. Данные о работе ГТУ GT13E2 (январь – февраль 2010 г.) при низких температурах воздуха,  $N \approx 90\%$  [8; 9]

На рис. 7 приведены данные о работе ГТУ на режиме  $N \approx 90\%$  при низких температурах окружающего воздуха: положение ВНА компрессора, температура на входе в компрессор ( $T_{вх}$ ), высокочастотные ( $p'_{вч}$ ) и низкочастотные ( $p'_{нч}$ ) пульсации давления в камере сгорания (% от критического уровня), PFR (% от максимума), отношение  $NO_x$  и CO в идеальных погодных условиях при  $T_{вх} = +15^\circ C$  к  $NO_x$  и CO в условиях эксперимента. Прикрытие направляющих аппаратов началось при  $T_{вх} < -10^\circ C$ . При более высоких температурах, до  $T_{вх} = +13^\circ C$ , направляющие аппараты были полностью открыты. В этом диапазоне температур регулирование не осуществлялось. Доля пилотного топлива во всем диапазоне температур не изменялась ( $\Delta PFR < 1\%$ ).

**ГТУ MS7001FA мощностью 168 МВт (фирма General Electric, 1996).** МЭКС DLN-2.6 (технология dry low  $NO_x$ ) в составе ГТУ фирмы GE показала эмиссию  $NO_x$  и CO (15%  $O_2$ ) 9 ppm в диапазоне мощности 50...100% [10; 11].

Камера сгорания (рис. 8) выполнена по трубчатой полувыносной схеме. Каждое фронтное устройство состоит из шести небольших горелок: одна находится в центре, остальные пять размещены равномерно по

окружности вокруг центральной. За каждой горелкой организована ЗОТ, формируемая закруткой потока в завихрителе. В завихрителях расположены коллекторы, подающие основное топливо в поток воздуха. В центре каждой горелки находится коллектор, через который подается пилотное топливо.

Основное топливо подается в горелку из внешнего канала в пилоны, размещенные в лопатках завихрителя.

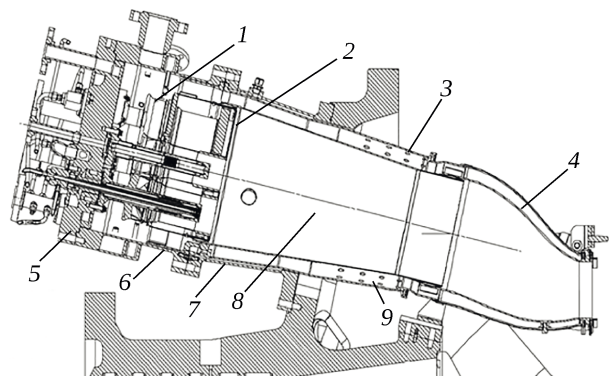


Рис. 8. Схема камеры сгорания DLN-2.6 [10; 11]:

- 1 – топливная форсунка; 2 – фронтная плита;
- 3 – охлаждающие отверстия; 4 – газосборник;
- 5 – торцевая крышка; 6 – направляющие;
- 7 – корпус; 8 – жаровая труба; 9 – футеровка

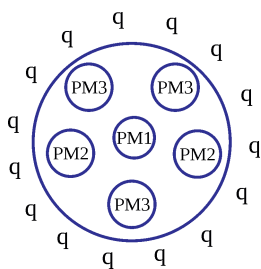


Рис. 9. Схема подачи топлива в горелку МЭКС DLN-2.6 [10; 11]

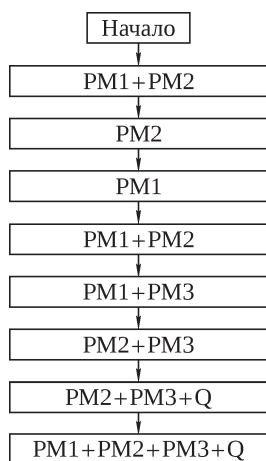


Рис. 10. Схема переключения подачи топлива в горелки при наборе мощности [10; 11]

Отверстия для подачи пилотного топлива находятся на торце коллектора, расположенного в центре горелки. Все горелки от запуска до режима максимальной мощности работают только в режиме предварительного перемешивания. Это происходит из-за того, что радиальная эпюра полей концентрации основного топлива имеет максимальные значения в приосевой зоне и в ЗОТ, что и позволяет обходиться без подачи пилотного топлива в ЗОТ.

Для исключения условий проскока пламени на пилоны, через которые основное топливо подается в поток воздуха, установлены обтекатели, препятствующие стабилизации пламени за пилонами. К 1999 г. камеры сгорания этого типа достигли наработки в 500 000 ч без единого случая проскока пламени.

Горелки МЭКС DLN-2.6 имеют сложную систему

подачи топлива с несколькими коллекторами, управляемыми независимо друг от друга. Шесть завихрителей горелок распределены по трем разным коллекторам (рис. 9): к коллектору PM1 подключен один завихритель, к PM2 – два, к PM3 – три. Есть еще коллектор подачи топлива Q (четвертичный), к которому в каждой горелке подключены 15 пилонов (q), размещенных равномерно по окружности и находящихся выше горелки по течению. Через четвертичную систему подается только небольшое количество топлива на режимах большой мощности, единственной ее функцией является контроль пульсаций давления в камере сгорания.

Для регулирования эмиссии МЭКС в составе ГТУ используется *перераспределение подачи топлива* между горелками, *прикрытие ВНА* и *сброс (перепуск) воздуха из компрессора на вход в ГТУ*.

При запуске ГТУ розжиг камеры сгорания производится при работе контуров PM1 и PM2 (рис. 10). После розжига контур PM1 отключается, и на PM2 ГТУ выходит на режим частоты вращения 95%. Далее запускается контур PM1, а PM2 отключается, и ГТУ выходит на режим номинальной частоты вращения (100%) без нагрузки и синхронизируется с сетью. При дальнейшем повышении мощности на 10% снова включается

коллектор PM2. На режиме  $N = 25\%$  выключается PM2 и включается коллектор PM3 (работают PM1 и PM3). Далее, при  $N = 40\%$ , выключается PM1, снова включается PM2 (работают PM2 и PM3). Дополнительно могут подключаться сопла четвертичной системы подачи топлива. Начиная с  $N = 45\%$ , снова включается центральное сопло (работают PM1, PM2 и PM3), также может подключаться Q. То есть на режимах  $N > 45\%$  мощности работают все горелки фронтального устройства и при необходимости может подключаться четвертичная система.

При снижении мощности и отключении ГТУ от сети последовательность действий обратная, а соответствующий переход осуществляется на чуть более низком режиме нагрузки, чем при наборе мощности.

Стоит подчеркнуть, что регулирование камеры сгорания переключением подачи топлива и отключением горелок производится только до  $N = 45\%$  (за исключением четвертичной системы, по которой подается только очень небольшой расход топлива для борьбы с виброгорением). В пределах рабочего диапазона мощности такой метод регулирования не применяется.

Для регулирования камеры сгорания в пределах рабочего диапазона мощности используется прикрытие ВНА. Направляющие аппараты регулируют расход воздуха, начиная с  $N = 50\%$ . В диапазоне  $N = 50 \dots 65\%$ , кроме того, осуществляется перепуск воздуха из компрессора на вход ГТУ, в воздухозаборник.

В диапазоне низкой мощности ( $N < 45\%$ ) при регулировании схемы подачи топлива перераспределением его в отдельные горелки эмиссия  $\text{NO}_x$  и CO превышает заданные значения (рис. 11). В рабочем диапазоне мощности ( $N = 50 \dots 100\%$ ) при регулировании с помощью ВНА и перепуска воздуха из-за компрессора эмиссионные характеристики находятся на низком уровне, не превышая 9 ppm.

**ГТУ M501G мощностью 254 МВт (фирма Mitsubishi Heavy Industries).** Впервые фирма Mitsubishi ввела в эксплуатацию ГТУ M501G с малоэмиссионной камерой сгорания, использующей технологию сухой низкой эмиссии  $\text{NO}_x$  (DLN) в 1984 г. С тех пор фирма развивает и совершенствует свои МЭКС [12; 13].

Камера сгорания ГТУ M501G (рис. 12) конструктивно относится к полувыносному типу, на ГТУ M501G установлено 16 жаровых труб и фронтальных устройств. Для формирования зоны обратных токов в камере сгорания служит плохо обтекаемое тело – стабилизатор, расположенный в центре фронтального устройства (рис. 13). Вокруг стабилизатора равномерно по окружности расположены восемь маленьких горелок, в каждой из которых поток воздуха, текущий через нее, закручивается лопатками. Здесь же в поток воздуха подается топливо и начинается процесс формирования гомогенной бедной топливовоздушной смеси. В центре

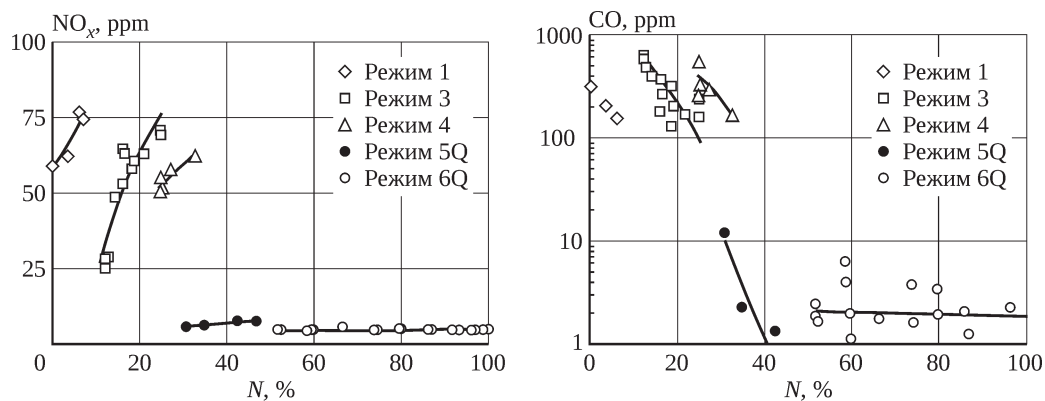


Рис. 11. Эмиссионные характеристики (15% O<sub>2</sub>) ГТУ MS7001FA на разных режимах мощности [10; 11]

стабилизатора расположена форсунка, подающая диффузионное топливо. Диффузионная пламя поддерживает устойчивое горение гомогенной топливоздушной смеси.

Для регулирования камеры сгорания на режимах частичной мощности применяется клапан перепуска воздуха в конец жаровой трубы и поворот лопаток ВНА компрессора. Клапан перепуска воздуха (см. рис. 12) обеспечивает подачу воздуха из корпуса камеры сгора-

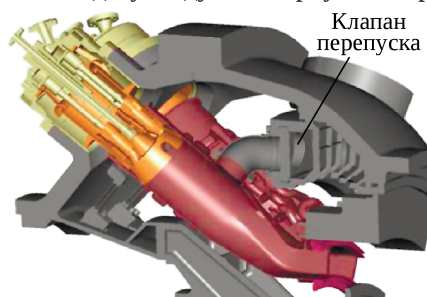


Рис. 12. Схема МЭКС ГТУ M501G [12; 13]



Рис. 13. Фронтное устройство МЭКС ГТУ M501G [12; 13]

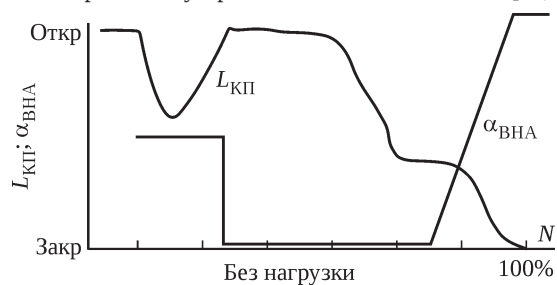


Рис. 14. Концепция регулирования ГТУ M501G [12; 13]

ния во вторичную зону жаровой трубы, минуя фронтное устройство и зону горения.

Открытие клапана перепуска воздуха ( $L_{КП}$ ) и одновременное прикрытие ВНА компрессора ( $\alpha_{ВНА}$ ) начинается при снижении мощности от 100% (рис. 14). При дальнейшем снижении режима, после того как ВНА достиг максимально допустимой степени прикрытия, перепуск воздуха через клапан продолжает увеличиваться.

На сегодняшний день камера сгорания газовой турбины M501G обеспечивает эмиссию NO<sub>x</sub> и CO в пределах 15 и 9 ppm соответственно в диапазоне мощности 50...100%.

На рис. 14 видно, что клапан перепуска воздуха используется не только для поддержания эмиссионных характеристик на основных режимах работы, но и для обогащения смеси во фронтной зоне МЭКС при ее запуске [12; 13].

От примеров применения на практике методов регулирования ГТУ перейдем к их расчетным исследованиям.

### Расчетное исследование влияния методов регулирования на характеристики ГТУ с озонными МЭКС

Расчеты характеристик ГТУ с различными системами регулирования проведены в ЦИАМ с использованием математической модели двигателя. Результаты, приведенные на рис. 15 – рис. 17, носят предварительный характер и позволяют сравнить влияние разных методов регулирования на характеристики ГТУ с МЭКС.

Расчетами показано необходимое изменение относительного расхода воздуха ( $G_r$ ), который требуется сбросить, изменить с помощью ВНА или перепустить в конец ЖТ для поддержания температуры продуктов сгорания и эмиссии, а также КПД ГТУ ( $\eta$ ) в зависимости от режима мощности и температуры воздуха на входе от  $-40$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Представлены характеристики ГТУ с наиболее часто применяемыми системами регулирования.

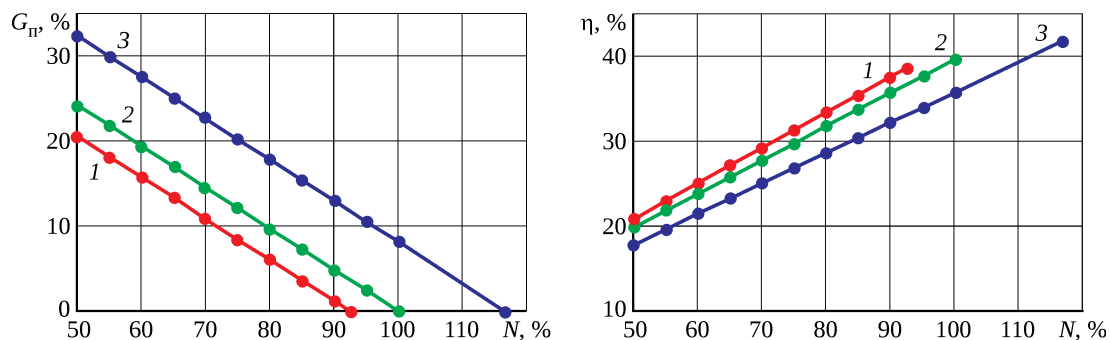


Рис. 15. Регулирование ГТУ сбросом воздуха в атмосферу:  
 1 –  $T_{\text{вх}} = +40^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{\text{вх}} = +15^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T_{\text{вх}} = -40^\circ\text{C}$

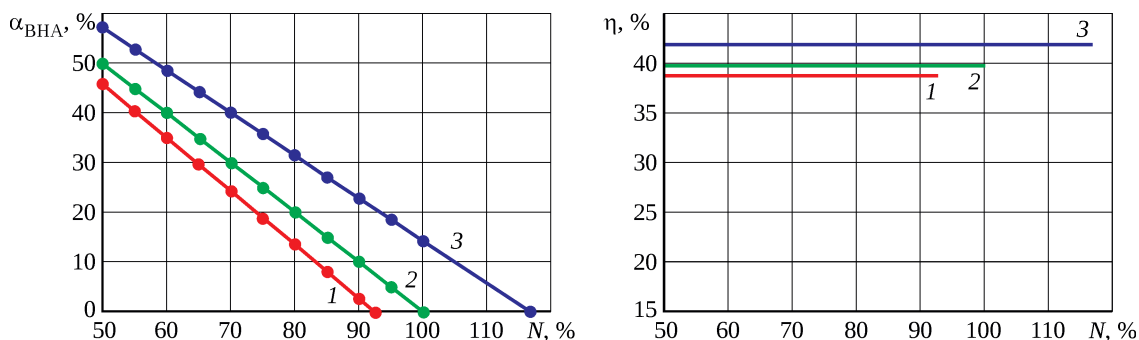


Рис. 16. Регулирование ВНА компрессора:  
 1 –  $T_{\text{вх}} = +40^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{\text{вх}} = +15^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T_{\text{вх}} = -40^\circ\text{C}$

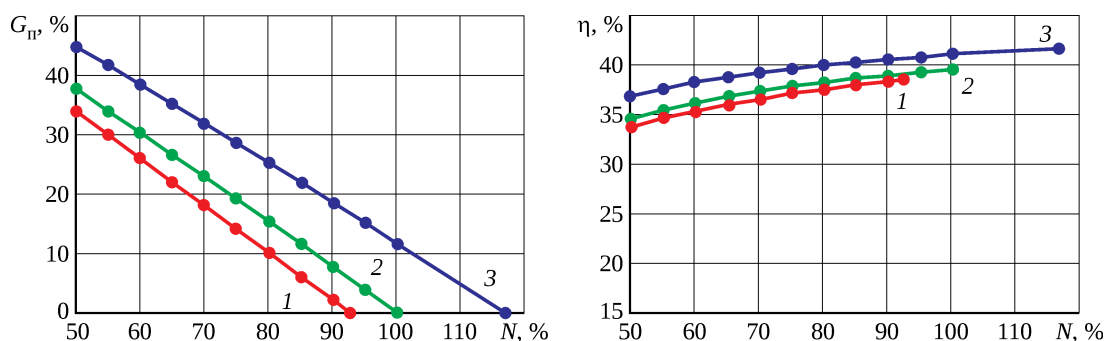


Рис. 17. Регулирование ГТУ перепуском воздуха в конец жаровой трубы:  
 1 –  $T_{\text{вх}} = +40^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{\text{вх}} = +15^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T_{\text{вх}} = -40^\circ\text{C}$

При регулировании камеры сгорания сбросом воздуха из компрессора в атмосферу происходит очень сильное снижение КПД ГТУ, примерно в два раза на режиме  $N = 50\%$ , с 39...42 до 18...21% (см. рис. 15). С точки зрения КПД этот метод регулирования является самым невыгодным. Количество сбрасываемого воздуха на режиме  $N = 50\%$  составляет 20...33% общего расхода через компрессор.

Физический смысл регулирования ГТУ сбросом (перепуском) воздуха состоит в следующем. В ГТУ с обычными диффузионными камерами сгорания сброс мощности производится благодаря снижению температуры газа на входе в турбину. Однозонная МЭКС должна работать с постоянной температурой продуктов сгорания, и для нее такой способ регулирования не подходит. При регулировании с помощью клапана

сброса воздуха происходит уменьшение расхода продуктов сгорания через турбину при неизменном расходе воздуха через компрессор. Поэтому работа турбины и работа всей ГТУ уменьшается при постоянной температуре продуктов сгорания.

При расчете регулирования ВНА (см. рис. 16) считалось, что КПД компрессора и потери давления во входном устройстве при закрытии лопаток не изменяются. В действительности же произойдет некоторое снижение КПД и увеличение потерь, однако, насколько эти параметры изменятся, определить не удалось. Поэтому КПД ГТУ при регулировании ВНА на режимах пониженной мощности может быть завышен.

При регулировании камеры сгорания прикрытием ВНА компрессора КПД снизится по сравнению с обычной дроссельной характеристикой, при этом расход

воздуха через компрессор к режиму  $N = 50\%$  должен уменьшиться на 46...57%. При столь значительном уменьшении расхода воздуха обеспечение устойчивой работы компрессора может стать проблемой.

В случае применения клапана перепуска воздуха в конце ЖТ результаты расчета показывают, что расход перепускаемого воздуха достигает к режиму  $N = 50\%$  величин 35...45%, в зависимости от температуры на входе в компрессор (см. рис. 17). При этом КПД ГТУ падает всего лишь на 5%, что делает этот метод регулирования достаточно перспективным. Но его применение требует решения проблемы неравномерности полей температуры перед турбиной, возникающей при открытии клапана перепуска.

## Анализ результатов исследования

Кроме ГТУ большой мощности, анализ характеристик систем регулирования охватывал и ГТУ средней мощности [14–16]. Все зарубежные разработчики для поддержания эмиссионных характеристик в диапазоне условий эксплуатации ГТУ с однозонными МЭКС имеют различные системы регулирования. Нет ни одной ГТУ, управление которой сводилось бы только к изменению коэффициента избытка воздуха или доли пилотного топлива в МЭКС.

В исследованных ГТУ (14 единиц) часто при дросселировании применяются два способа регулирования: как правило, это изменение доли пилотного топлива в сочетании с другим способом. В ГТУ GT13E2 фирмы Alstom и MGT6100 фирмы MAN Diesel & Turbo изменение PFR сочетается с регулированием ВНА компрессора, в ГТУ SGT-300 фирмы Siemens – с перепуском воздуха из компрессора, в ГТУ LM6000+ фирмы General Electric, наряду с отключением части горелок, используется сброс воздуха из компрессора в атмосферу.

В половине из рассмотренных ГТУ применяются сложные системы, сочетающие три или четыре способа регулирования. Так, в ГТУ SGT6-6000G и SGT6-5000F фирмы Siemens используются три способа: регулирование ВНА компрессора, перепуск воздуха в турбину и в выхлоп и изменение доли пилотного топлива. Самые сложные системы регулирования имеют ГТУ SGT5-8000H (Siemens), MS7001FA и MS6001B (General Electric), сочетающие отключение подачи топлива в отдельные горелки, регулирование ВНА компрессора и сброс воздуха на вход в компрессор.

Наиболее часто в исследованных ГТУ применяются такие способы регулирования, как сброс (перепуск) воздуха из компрессора и прикрытие ВНА компрессора (восемь ГТУ). При регулировании перепуском часть воздуха из компрессора сбрасывается в выхлопную систему, либо в турбину, либо на вход в компрес-

сор. Фирма Siemens в своих ГТУ использует перепуск в турбину и в выхлоп одновременно, по нескольким трубопроводам.

Также сброс воздуха в атмосферу ограниченно используется в ГТУ фирмы General Electric, где основное управление осуществляется посредством регулирования ВНА компрессора. Сброс воздуха применяется в диапазоне мощности 50...65% и служит для предупреждения помпажа из-за слишком сильного прикрытия ВНА компрессора. В целом комбинация сброса и регулирования ВНА применяется на шести ГТУ.

Интересный вариант регулирования перепуском применен фирмой Mitsubishi в ГТУ M501G. Воздух из-за компрессора поступает во вторичную зону камеры сгорания, где перемешивается с продуктами сгорания и поступает в турбину. Для формирования равномерного поля температур на входе в турбину расстояние от места подачи воздуха в газосборник до турбины было максимально увеличено, что потребовало увеличения длины газосборника. Перепуск воздуха обеспечивает также благоприятные условия запуска и стабилизацию горения на пониженных режимах работы ГТУ.

В целом регулирование прикрытием ВНА компрессора более предпочтительно, чем сброс (перепуск) воздуха, так как при сбросе воздуха значительно снижается КПД и увеличивается расход топлива ГТУ. Исключением является перепуск во вторичную зону камеры сгорания.

Также распространенным способом регулирования является отключение части горелок в многогорелочном фронтном устройстве МЭКС с горелками малого размера или отключение части коллекторов подачи топлива (пять ГТУ). Этот способ широко используется в камерах сгорания фирмы General Electric, в основном на режимах запуска и в диапазоне мощности  $N < 50\%$ , на которых выбросы вредных веществ не нормируются.

В таблице приведена статистика использования методов регулирования в рассмотренных ГТУ. Наиболее распространенным методом регулирования и поддержания эмиссионных характеристик и высокого КПД является изменение расхода воздуха с помощью прикрытия ВНА компрессора. Отключение подачи основного топлива в отдельные горелки применяется в МЭКС с многогорелочным фронтным устройством и малыми размерами горелок, в основном на пониженных режи-

**Таблица.** Методы регулирования МЭКС в различных ГТУ

Метод	Доля ГТУ	Преимущественные условия применения
Регулирование ВНА компрессора	67%	$N = 50...100\%$
Сброс (перепуск) воздуха из компрессора	58%	$N = 50...100\%$
Отключение подачи топлива в отдельные горелки/контуры горелок	42%	$N \leq 50\%$
Перепуск воздуха во вторичную зону камеры сгорания	8%	$N = 50...100\%$



мах работы ГТУ, поскольку этот способ приводит к снижению полноты сгорания и росту эмиссии CO.

Перепуск воздуха в конец жаровой трубы использован на одной из рассмотренных ГТУ. Его применение не снижает КПД ГТУ, но может приводить к неравномерности температуры газа перед турбиной и требует специальных решений по расположению клапана и места перепуска воздуха в конец жаровой трубы.

В целом эти методы регулирования ГТУ позволяют достигнуть уровня эмиссии NO<sub>x</sub> 25 ppm и CO 10 ppm в диапазоне мощности 50...100%, а наилучшие из них – уровня 9 ppm NO<sub>x</sub> и 9 ppm CO. При этом показатель 9 ppm достигается на границах диапазона регулирования, а при более благоприятных условиях эмиссия оказывается еще ниже.

Фирма General Electric приводит данные по эмиссии ГТУ MS7001FA с системой сжигания топлива DLN1+ в течение 14 месяцев работы: при температурах воздуха на входе в компрессор  $T_{вх} = 10...40^{\circ}\text{C}$  во всех приведенных точках замера эмиссия NO<sub>x</sub> остается менее 5 ppm, а CO – менее 2 ppm [17].

ГТУ GT13E2 фирмы Alstom за счет прикрытия ВНА компрессора показала низкую эмиссию при температуре воздуха  $T_{вх} = 10^{\circ}\text{C}$ .

## Заключение

Исследованы иностранные ГТУ с однозонными малоэмиссионными камерами сгорания: GT13E2, GT11N2 (Alstom), M501G (Mitsubishi Heavy Industries), SGT-300, SGT6-6000G, SGT6-5000F, SGT-750, SGT5-8000H (Siemens), MGT 6100 (MAN Diesel & Turbo), MS7001FA, MS6001B, LM6000+ (General Electric) и др.

Большинство зарубежных ГТУ разработаны как специализированные стационарные ГТУ большой мощности. ГТУ LM6000+ создана на базе авиационного двигателя CF6.

Анализ условий образования вредных выбросов показал, что для поддержания эмиссионных характеристик в широком диапазоне условий эксплуатации ГТУ необходимо поддерживать температуру продуктов сгорания в МЭКС и применять специальные методы регулирования.

Диапазон поддержания эмиссионных характеристик в рассмотренных ГТУ ограничен диапазоном мощности  $N = 50...100\%$  (в отдельных случаях 40...100% мощности).

Для поддержания эмиссионных характеристик ГТУ с однозонными МЭКС ведущие фирмы мира, в зависимости от их опыта и возможности применения на разрабатываемой ГТУ, используют следующие методы регулирования:

– регулирование ВНА компрессора;

– сброс воздуха из-за компрессора или из его ступеней в атмосферу;

– перепуск воздуха из-за компрессора или из его ступеней на вход в компрессор;

– перепуск воздуха из-за компрессора или из его ступеней на выход турбины;

– перепуск воздуха из-за компрессора на вход в турбину;

– отключение подачи топлива в отдельные горелки или в контуры горелок.

Эти методы используются и для обеспечения условий запуска, и для стабилизации горения топлива на пониженных режимах работы ГТУ.

Статистический анализ показывает, что в исследованных ГТУ перечисленные методы регулирования применялись следующим образом (по частоте использования): регулирование ВНА компрессора – 67%; сброс воздуха из компрессора (на вход в ГТУ или на выход из турбины) – 58%; отключение подачи топлива в отдельные горелки или контуры горелок – 42%; перепуск воздуха во вторичную зону камеры сгорания – 8%. Чаще всего для поддержания эмиссионных характеристик применяют сочетание нескольких методов (регулирование ВНА компрессора, сброс воздуха из компрессора, отключение подачи топлива в отдельные горелки).

Регулирование ВНА компрессора применяют в широком диапазоне параметров ГТУ, и в первую очередь на основных низкоэмиссионных режимах работы, в диапазоне мощности  $N = 50...100\%$ . Такой способ регулирования не приводит к значительному падению КПД ГТУ и к неравномерности полей температуры газа перед турбиной.

Сброс (перепуск) воздуха из компрессора – наиболее простой способ регулирования, однако он приводит к значительному падению КПД ГТУ. Перепуск воздуха на вход в компрессор в зимнее время применяют также для повышения температуры воздуха на входе, в том числе для исключения образования и налипания льда на лопатках компрессора.

Отключение подачи воздуха в отдельные горелки или в контуры горелок применяют для МЭКС, имеющих многорелочное фронтное устройство с горелками относительно малых размеров. Обычно такой метод регулирования применяют на низких режимах ( $N \leq 50\%$ ) для исключения бедного срыва пламени, поскольку на основных режимах он приводит к снижению полноты сгорания и росту эмиссии CO.

Перепуск воздуха в конец жаровой трубы (на вход в турбину) не приводит к существенному снижению КПД ГТУ, однако требует повышенного расхода перепускаемого воздуха, по сравнению с перепуском воздуха на вход в ГТУ, и может приводить к неравномерности полей температуры газа перед турбиной.

---

У двухзонных малоэмиссионных камер сгорания, которые начали применять в последнее время в связи с ростом температуры перед турбиной ( $T_r^* \geq 1700$  K), диапазон малоэмиссионной работы существенно

шире, чем у однозонных МЭКС, что позволяет существенно ограничить или полностью исключить применение специальных систем регулирования расхода воздуха.

## Литература / Reference

1. Low emission combustor developed for industrial gas turbine with  $\text{NO}_x/\text{CO}$  level  $< 5$  ppm / G.K. Vedeshkin et al. 2007. (Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2007, Tokyo, December 3–7, 2007 ; IGTC2007-ID-160).
2. Farmer R. GTX100 combined cycles net-rated 60 to 120 MW and 54% efficiency // Gas Turbine World. 1997. Vol. 27, no. 3 (May – June). P. 51–53.
3. Development of the DLE combustor for L30A gas turbine / T. Sakurazawa, T. Oda, S. Takami, A. Okuto, Y. Kinoshita // ASME Turbo Expo 2015 : Turbine Technical Conference and Exposition, June 15–19, 2015, Montreal, Quebec, Canada. Vol. 4B: Combustion, fuels and emissions. GT2015-42904. 7 p.
4. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М. ; Л. : Изд-во Акад. наук СССР, 1947. 148 с.  
Zel'dovich Ya.B., Sadovnikov P.Ia., Frank-Kamenetskii D.A. Okislenie azota pri gorenii [Oxidation of nitrogen during combustion]. Moscow, Leningrad: Publishing house Acad. Science USSR, 1947. 148 p.
5. Mellor A.M. Semi-empirical correlations for gas-turbine emissions, ignition, and flame stabilisation // Progress in Energy and Combustion Science. 1980. Vol. 6, iss. 4. P. 347–358.
6. Large-eddy simulation of turbulent combustion in multi combustors for L30A gas turbine engine / K. Hirano, Y. Nonaka, Y. Kinoshita, M. Muto, R. Kurose // ASME Turbo Expo 2015 : Turbine Technical Conference and Exposition, June 15–19, 2015, Montreal, Quebec, Canada. Vol. 4B: Combustion, fuels and emissions. GT2015-42545. 8 p.
7. Development of high efficient 30MW class gas turbine: the Kawasaki L30A / R. Tanaka et al. // ASME Turbo Expo 2012 : Turbine Technical Conference and Exposition, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. Vol. 3: Cycle innovations; Education; Electric power; Fans and blowers; Industrial and cogeneration. P. 883–889. GT2012-68668.
8. On key features of the AEV burner engine implementation for operational flexibility / M.R. Bothien, D.A. Pennell, M. Zajadatz, K. Döbbling // ASME Turbo Expo 2013 : Turbine Technical Conference and Exposition, June 3–7, 2013, San Antonio, Texas, USA. Vol. 1B: Combustion, fuels and emissions. GT2013-95693. 9 p.
9. Development and implementation of the AEV burner for the Alstom GT13E2 / M. Zajadatz, D. Pennell, S. Bernero, B. Paikert, R. Zoli, K. Döbbling // ASME Turbo Expo 2012 : Turbine Technical Conference and Exposition, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. Vol. 2: Combustion, fuels and emissions, pt. A/B. P. 351–360. GT2012-68471.
10. Vandervort C.L. 9 ppm  $\text{NO}_x/\text{CO}$  combustion system for “F” class industrial gas turbines // ASME Turbo Expo 2000 : Power for Land, Sea, and Air, May 8–11, 2000, Munich, Germany. Vol. 2. 2000-GT-0086. 7 p.
11. Davis L.B., Black S.H. Dry low  $\text{NO}_x$  combustion systems for GE heavy-duty gas turbines / GE Power Systems. Schenectady, NY, 1999. ii, 22 p. GER-3568G.
12. Active on-line protective tuning adjustment technique to achieve better availability and performance in pre-mix DLN combustion / C. Koeneke et al. // 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.
13. Advanced dry low  $\text{NO}_x$  combustor for Mitsubishi “G” class gas turbines / S. Tanimura, M. Nose, K. Ishizaka, S. Takiguchi, J. Rodriguez // ASME Turbo Expo 2008 : Power for Land, Sea, and Air, June 9–13, 2008, Berlin, Germany. Vol. 3: Combustion, fuels and emissions, pt. A/B. P. 607–615. GT2008-50819.
14. Dry low emissions combustor development / N.D. Joshi et al. // ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, June 2–5, 1998, Stockholm, Sweden. Vol. 3: Coal, biomass and alternative fuels; Combustion and fuels; Oil and gas applications; Cycle innovations. 98-GT-310. 7 p.
15. Hellberg A., Andersson T., Häggmark A. Design, testing and performance of the recently developed 37 MW Siemens SGT-750 // ASME Turbo Expo 2012 : Turbine Technical Conf. and Exposition, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. Vol. 6: Oil and gas applications; Concentrating solar power plants; Steam turbines; Wind energy. P. 45–50. GT2012-68249.
16. SGT-750 – 37 MW gas turbine / A. Hellberg et al. 2011. 10 p. (19th Symposium of the Industrial Application of Gas Turbines Committee, Banff, Alberta, Canada, October 17–19, 2011 ; 11-IAGT-305).
17. E-class DLN technology advancements, DLN1+ / L.L. Thomas et al. // ASME Turbo Expo 2011 : Turbine Technical Conference and Exposition, June 6–10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada. Vol. 2. P. 835–845. GT2011-45944.

Материалы получены редакцией 30.10.2020

---