

ТЕХНОЛОГИЯ МАЛОЭМИССИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА И КОНСТРУКТИВНЫЙ ОБЛИК КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

© 2020

Ю. И. Цыбизов доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
2422490@mail.ru

Д. Д. Тюлькин аспирант;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
tyulkin.dmitriy@gmail.com

И. Е. Воротынцев аспирант;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
vorotintsev15@yandex.ru

В настоящее время основное направление совершенствования камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей и наземных газотурбинных установок связано с уменьшением концентрации вредных веществ в отработанных газах при обеспечении экономичности и эксплуатационной эффективности. Особая роль в конструктивном облике газотурбинных двигателей и газотурбинных установок отводится решению проблемы организации рабочего процесса горения, т.е. разработке малоэмиссионной системы сжигания, обеспечивающей высокую эффективность и экологическую безопасность. Таким образом, экология сегодня определяет не только облик камеры сгорания, но и двигателя в целом. Представлено обобщение результатов отработки системы малоэмиссионного сжигания топлива в различных видах камер сгорания конвертируемых (авиапроизводных) газотурбинных установок и примеры единого подхода к вопросу создания конструктивного облика малоэмиссионной камеры сгорания.

Газотурбинная установка; малоэмиссионная камера сгорания; «обеднённая» топливовоздушная смесь; малоэмиссионная система горения.

Цитирование: Цыбизов Ю.И., Тюлькин Д.Д., Воротынцев И.Е. Технология малоэмиссионного сжигания топлива и конструктивный облик камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 2. С. 107-120. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-2-107-120

Введение

Сегодня определены и действуют приоритетные направления развития авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), которые распространяются и на конвертируемые наземные газотурбинные установки (ГТУ):

- сокращение проектных разработок новых базовых двигателей;
- увеличение модификаций существующих двигателей, хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации.

Перед разработчиками авиационной и наземной техники стоит задача кардинального улучшения экологических характеристик за счёт внедрения новых технологий сжигания любых видов топлив.

В качестве новой прорывной технологии рассматривается концепция создания малоэмиссионной камеры сгорания (МКС), выполняющей требования экологической безопасности. Проблему создания МКС в основном обуславливает отсутствие завершённой теории горения и расчёта рабочего процесса подобно методу расчёта лопаточ-

ных машин. В результате большинство ведущих ОКБ развивают свои концепции создания МКС и вынуждены развивать собственную методологию и экспериментальную базу отработки горения. Негативным фактором является и отсутствие централизованной кооперации по вопросам отработки малоэмиссионной системы горения ГТУ и целевого финансирования. При этом следует отметить, что представления о конструктивном облике МКС в виде руководства для конструкторов весьма далеки от идеала. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования и обобщения результатов эксплуатации.

Из детального анализа современных требований следует, что проектируемая вновь МКС для перспективных ГТД и ГТУ должна сопровождаться увеличением температуры газов на 200...300 К, увеличением долговечности жаровой трубы в 3...4 раза при двукратном снижении доли воздуха на охлаждение стенок, двукратным и более снижением эмиссии вредных веществ по сравнению с достигнутыми уровнями сегодняшнего дня.

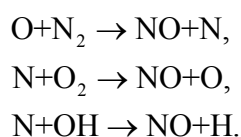
Очевидно, что решение проблемы создания МКС в первую очередь связано с наличием необходимой расчётно-экспериментальной базы исследования рабочего процесса организации горения с имитацией рабочих условий, наличием современного контрольно-измерительного и информационно-обрабатывающего комплекса, т.е. связано с большими финансовыми затратами.

Рабочий процесс горения

Наибольшее распространение получили концепция организации рабочего процесса малоэмиссионного горения – «обеднение, предварительное перемешивание и испарение» (LPP – Lean, premixed and prevaporised) и новый подход – реализация устойчивого «ультрабедного» горения, имеющего концентрационные пределы, вне которых существование устойчивого процесса невозможно [1 – 4].

В основе этой концепции лежит действие трёх механизмов образования NO_x : термический путь (или механизм Зельдовича), «быстрое» образование NO_x (механизм Фенимора), образование окислов через N_2O и образование окислов из топливного азота [2].

1. Суть механизма Зельдовича заключается в протекании следующих реакций:



Механизм называется термическим, так как первая из приведённых реакций имеет очень высокую энергию активации (межмолекулярная связь в молекуле азота чрезвычайно сильна); скорость же реакции напрямую зависит от концентрации реагентов и температуры, которой пропорциональна константа скорости. Ключевым параметром процесса горения, ответственным за наработку NO_x , таким образом, является коэффициент избытка окислителя – максимальный выход окислов наблюдается в смеси стехиометрического состава, где температура максимальна. Существенную роль играют размеры камеры и время нахождения смеси в высокотемпературной зоне.

2. «Быстрые» NO_x нарабатываются в основном на начальном участке факела, в области фронта со стороны свежей, ещё негоревшей смеси, где отсутствуют термические NO_x . Механизм образования «быстрых» окислов более сложный, поскольку в нём

участвуют радикалы CN , выступающие в горении в качестве промежуточного компонента.

3. N_2O – разрушение и окисление образовавшегося N_2 до NO с остатком части непрореагировавшего N_2 .

Главным фактором образования NO_x является температура в зоне горения [5;6]. Уровень концентрации NO_x экспоненциально возрастает с повышением температуры пламени. Для уменьшения выхода оксидов азота в первую очередь необходимо снизить температуру в зоне горения и исключить локальный заброс температуры, т.е. недостаточно достигнуть приемлемого снижения средней температуры в зоне горения камеры, если останутся локальные области высокой температуры. Следует также иметь в виду, что для высоконагруженных камер сгорания ГТД и ГТУ химические превращения в процессе горения, в отличие от представлений химической кинетики, связаны и лимитируются законами сопутствующих физических явлений.

Существенная роль здесь отводится вопросам:

– динамической составляющей химической кинетики (зависимости скорости реакций от параметров и режима работы двигателя);

– распространения пламени в скоростном турбулентном потоке (крупномасштабная или мелкомасштабная турбулентность) ограниченного объема. Рассматривается процесс взаимодействия турбулентной теплопроводности, турбулентной и молекулярной диффузии и химического превращения в зоне горения.

При этом используются два подхода для оценки механизма горения:

– «поверхностный» – горение с поверхности фронта пламени (моделирование по скорости распространения пламени);

– «объёмный» – горение в объёме (понятие о реакторе идеального смешения в зонах горения).

Два подхода практически приводят к одному результату. Обычно используется второй подход, т.к. превалирует влияние режимных параметров. Широкое распространение получил реакторный механизм горения, при котором зона горения разделяется на несколько взаимосвязанных реакторов [7].

Разрабатывается малоэмиссионная система сжигания топлива [3-5], включающая:

– малоэмиссионную камеру сгорания (МКС) с эффективной системой охлаждения элементов конструкции, обеспечивающую «ультрабедное» горение, устраняющее противоречивую связь выброса NO_x и CO и устойчивую работу во всём предусмотренном диапазоне изменения состава топливовоздушной смеси;

– специальное горелочное устройство с многостадийной схемой горения и малым временем пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур;

– автоматизированную систему регулирования по топливу и воздуху (АСУ КС), осуществляющую управление клапанами перепуска компрессора, перепуском воздуха из КС и каскадным подключением горелок для улучшения запуска и снижения выброса CO на низких режимах.

При этом требуется обеспечение полной совместимости МКС с компрессором, турбиной и другими системами ГТД и ГТУ.

Определились направления конструирования МКС стационарных и авиапроизводных ГТУ, имеющих как общие сходства, так и кардинальные различия. Наибольшее распространение получили следующие виды конструкций КС:

– трубчатые, состоящие из набора жаровых труб малого диаметра, расположенных в пространстве между компрессором и турбиной (рис.1) и имеющих индивидуаль-

ный наружный корпус, и «башенные» как частный случай трубчатой камеры, у которой имеются одна или две жаровые трубы, расположенные перпендикулярно к оси газогенератора (рис. 2);

– трубчато-кольцевые, включая выносные жаровые трубы (ВЖТ), расположенные на корпусе турбины под углом к оси ГТУ и заканчивающиеся индивидуальным либо общим кольцевым газосборником в пространстве между компрессором и турбиной, соединяемые обычно друг с другом патрубками пламепереброса (рис. 3);

– кольцевые, имеющие одну жаровую трубу (рис. 4);

– нетрадиционные (керамические и т.д.), в которых отсутствует охлаждение стенок жаровых труб, что обуславливает снижение эмиссии NO_x и CO (за счёт горячего пристеночного слоя), а также отсутствует охлаждение турбинных ступеней, что приводит к увеличению КПД.

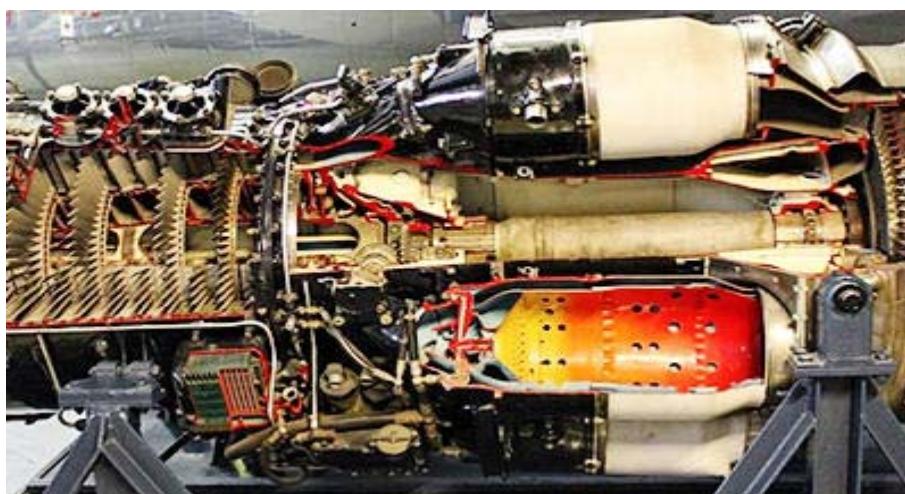


Рис. 1. Традиционная трубчатая КС

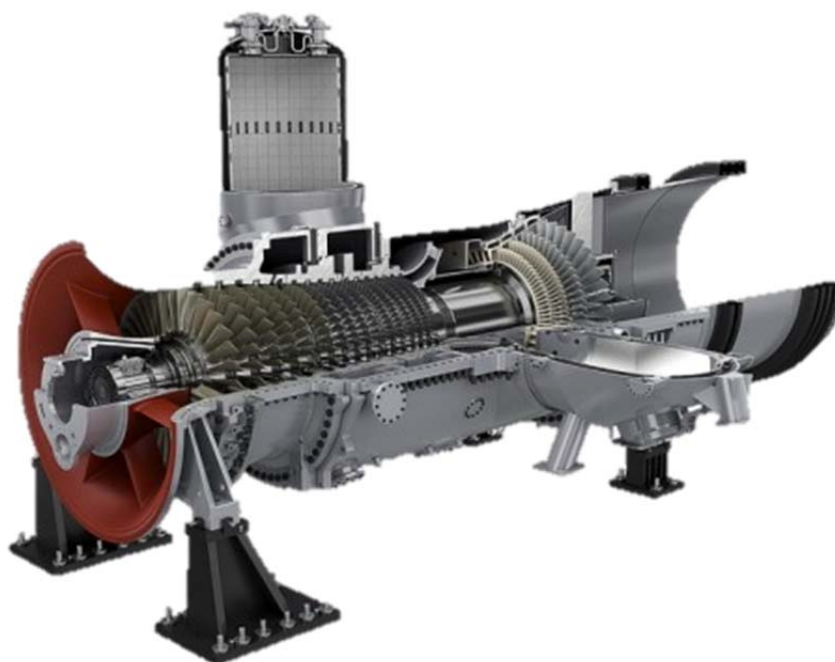


Рис. 2. ГТУ SGT5-2000e с трубчатой «башенной» камерой сгорания

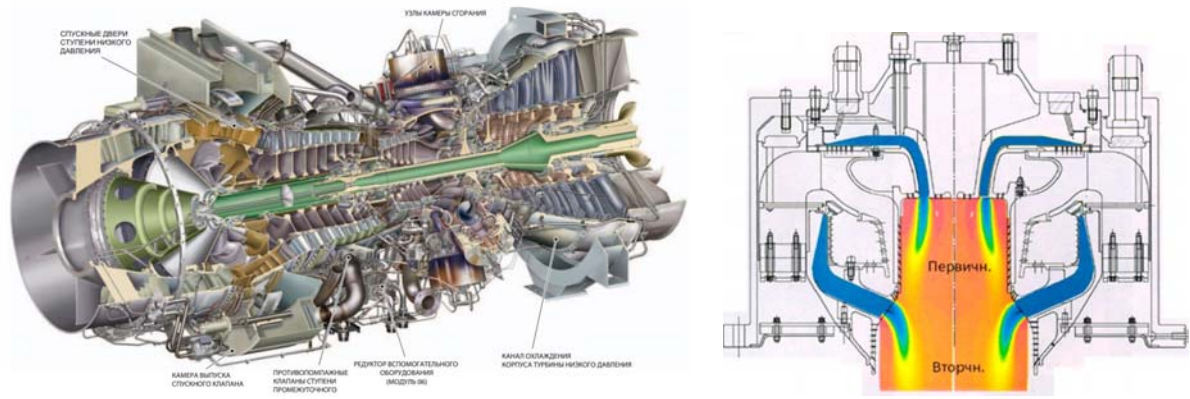


Рис. 3. Общий вид ГТУ TRENT 60DLE с выносными жаровыми трубами

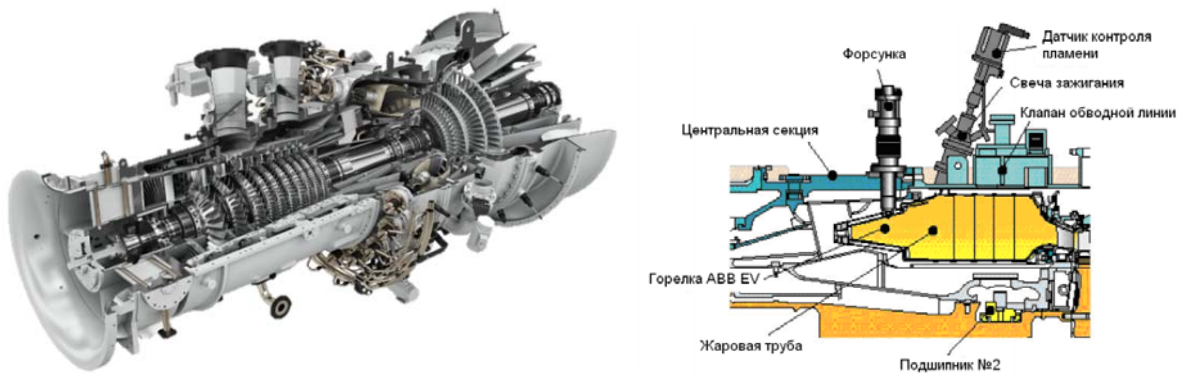


Рис. 4. Общий вид ГТУ SGT-600 с кольцевой камерой сгорания

На рис. 5, 6 представлены данные о применении различных видов конструктивных схем камер сгорания отечественных и зарубежных стационарных и конвертируемых ГТУ [5].

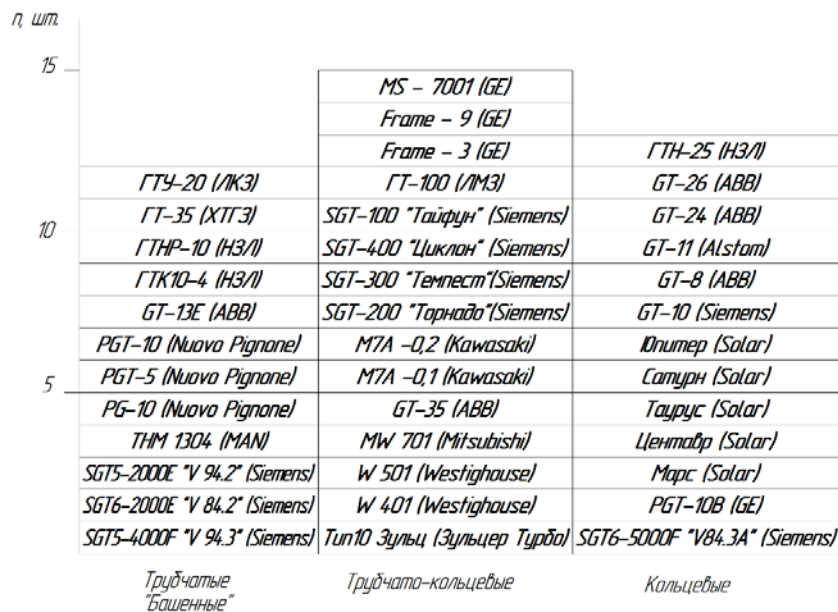


Рис. 5. Гистограммы применимости конструктивных схем камер сгорания (по расположению в тракте газогенератора) стационарных ГТУ

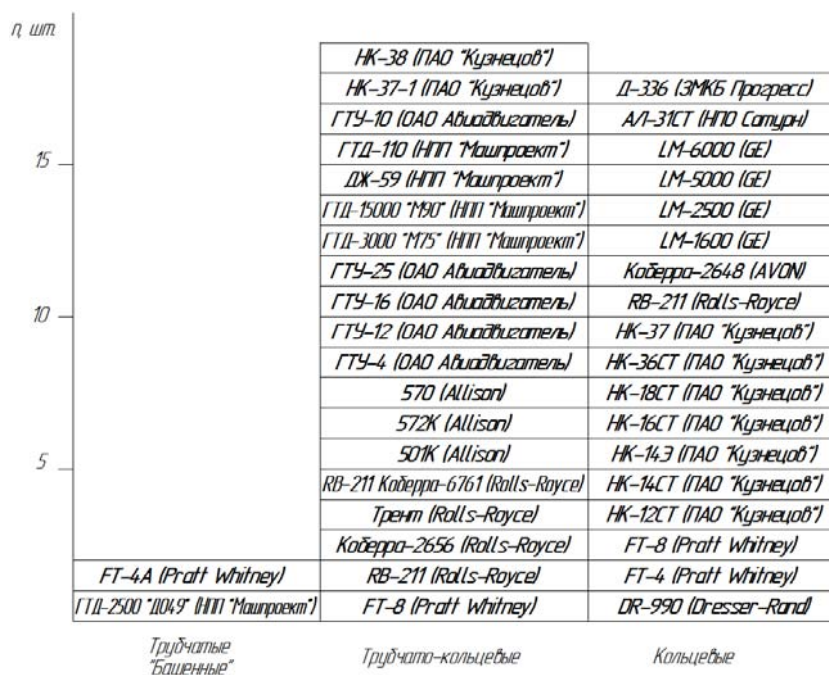


Рис. 6. Гистограммы применимости конструктивных схем камер сгорания (по расположению в тракте газогенератора) конвертированных ГТУ

Отсюда следует, что преобладают кольцевые и трубчато-кольцевые конструкции КС. Практический опыт создания и эксплуатации ГТУ показывает, что удовлетворение постоянно «ожесточающимся» требованиям и нормам связано со сложностью организации рабочего процесса горения и порождает большое многообразие конструкций КС и их основных элементов и деталей, которые необходимо унифицировать применительно к этим двум наиболее распространённым видам.

В результате анализа наиболее распространённых в эксплуатации видов КС установлены основные особенности их работы, которые необходимо иметь в виду при проектировании вновь или модернизации КС.

Отметим основные преимущества кольцевых камер сгорания:

1. Отсутствие проблем при запуске камеры сгорания, т.к. обеспечивается надёжный пламепереброс по кольцевому фронтальному устройству.
2. Простая система зажигания. Обычно достаточно двух воспламенителей или свечей непосредственного розжига вместо большего их количества в ВЖТ (по числу труб).
3. Облегчаются проблемы формирования температурного поля и полей скоростей в окружном и радиальном направлениях.
4. Облегчаются проблемы организации перепуска воздуха.
5. Меньшая потребная площадь охлаждения жаровой трубы.
6. Простые конструктивные решения по корпусам камеры, её габаритам и металлоёмкости.

Отметим основные преимущества камер сгорания с выносными жаровыми трубами:

1. Рабочий процесс более устойчив к виброгорению на переходных режимах.
2. Высокая эксплуатационная технологичность и ремонтпригодность.
3. Мобильность конструкции в эксплуатации и доводке вследствие модульности каждой ВЖТ (сокращение затрат при создании ГТУ и эксплуатации).

4. Рабочий процесс менее чувствителен к точности регулирования состава смеси по зонам горения, т.к. дежурная зона расположена по потоку впереди основной и обеспечивает естественную огневую поддержку процессам в основной зоне.

5. Конструктивная схема более перспективна с точки зрения экологической модернизации – переходу на керамические и каталитические жаровые трубы.

Малоэмиссионное сжигание топлива

Известно, что пути развития техники и новых технологий, достижение существенных результатов в любой области науки и техники основаны на обобщении полученного опыта, т.е. на достаточно полном заделе выполненных собственных разработок. Разработанная в Самарском регионе (ПАО «КУЗНЕЦОВ», АО «Металлист-Самара», «Самарский университет») система малоэмиссионного горения, апробированная в эксплуатации на конвертированных двигателях НК-38СТ (2005 г.), НК-37 (2007 г. при наработке свыше 32000 часов) и НК-36СТ (2015 г.) с эмиссией NO_x от 10 до 30 мг/м³ (15% O_2) и приемлемым уровнем эмиссии CO , соответствует экологическим характеристикам лучших зарубежных ГТУ и является базовой технологией для выполнения перспективных норм, а также для выполнения требований по надёжности и эксплуатационной эффективности.

Отработан рабочий процесс малоэмиссионного сжигания, характерными особенностями которого являются [8;9]:

- хорошее смешение топлива с воздухом перед подачей в зону горения;
- состав смеси (ТВС), обеспечивающий низкую температуру пламени (1800 К);
- необходимость огневой поддержки основной зоны горения диффузионным факелом;
- отработка возможности разрыва «отрицательной» взаимосвязи NO_x и CO , CH .

Преодолены основные сопутствующие недостатки:

- трудности в обеспечении устойчивости горения (на переходных режимах), запуске, в обеспечении «тонкой» программы регулирования подачи топлива (АСУ КС);
- проблемы в снижении эмиссии CO и CH (недожог).

Установлено, что для высоконагруженных камер сгорания ГТД и ГТУ химические превращения, в отличие от представлений химической кинетики, связаны и лимитируются законами сопутствующих физических явлений. При низких температурах и давлениях в камере сгорания имеют место низкие концентрации NO и NO_2 и высокие концентрации CO . Напротив, при высоких значениях π_k^* и T_r^* оксид углерода полностью выгорает, а концентрация NO_x резко возрастает.

Сформулированы основные задачи создания современной МКС с горением «ультрабедной» заранее перемешанной топливовоздушной смеси:

1. Создание эффективного смесителя – гомогенизатора с уровнем пульсаций концентраций горючего не более 5%.

2. Расширение границ «бедного» срыва горения до $\alpha_{фр}$ (коэффициент избытка воздуха горелки) $\geq 2,5 - 3$ без подпитки пилотным топливом зоны рециркуляции.

3. Интенсификация турбулентного горения для сжигания «ультрабедной» топливовоздушной смеси на приемлемой длине.

4. Снижение уровня термоакустической неустойчивости горения и величины пульсаций давления до уровня 0,5–1%.

5. Организация эффективного конвективного охлаждения стенок жаровой трубы (без подачи охлаждающего воздуха в зону горения).

6. Решение проблем «проскока» пламени в смеситель в условиях повышенных давлений и температур газа.

7. Освоение и внедрение в производство современных передовых технологий проектирования и изготовления.

Формирование облика МКС есть обеспечение итогового результата, т.е. триады: экологичность, экономичность, эксплуатационная эффективность. Облик КС выбирается на базе прототипа с учётом традиций и накопленного опыта, технологической и производственной базы, сроков создания. За прототип выбирается КС с известными характеристиками, наиболее близко отвечающая предъявляемым требованиям. Таким аналогом для проектирования является МКС ГТУ семейства НК.

На выбор облика и вид конструкции КС ГТУ влияют следующие основные факторы:

– назначение, размерность и параметры термодинамического цикла ГТУ (степень сжатия π_k , температура за компрессором T_k^* , температура газа перед турбиной T_r^* , эффективный КПД $\eta_{эф}$);

– тип ГТУ (стационарные, как правило одновальные, и авиапроизводные – двух- и трёхвальные);

– приобретённый опыт создания и эксплуатации (научно-технический задел), производственная и экспериментальная база, квалификация конструкторского и технологического кадрового состава фирмы-разработчика;

– необходимое финансирование и квалифицированное руководство процессом проектирования и отработки рабочего процесса.

Результаты обобщения исследований по созданию КС наземных ГТУ

Разработана собственная технология организации малоэмиссионного горения (отечественный аналог зарубежных технологий DLN, DLE), созданы производственная и испытательная базы. Технология включает как комплекс расчётных моделей и технических решений по организации малоэмиссионного горения, так и освоение новых технологий изготовления основных элементов конструкции МКС.

Расчётные модели (3D-моделирование неравновесного течения реагирующего потока, расчёт эмиссии NO_x и CO , расчёт амплитудно-частотных характеристик пульсаций давления с учётом влияния когерентных вихревых структур, модели теплообмена и прочности элементов конструкции и др.) разработаны и верифицированы по результатам экспериментальных модельных и натурных исследований.

На рис.7, 8 в качестве примера положительного опыта отработки эмиссионных характеристик показана эволюция (с 1984 по 2015 гг.) конструкции КС ГТУ семейства НК, эксплуатируемых до настоящего времени [9]. В качестве исходной базовой (рис. 7, а) представлена КС ГТУ НК-16СТ, прототипом которой являлась многофорсунная КС ГТД НК8-2У самолёта ТУ-154, а на рис. 7, б – современная кольцевая МКС семейства ГТУ НК.

На рис. 8 приведены гистограммы изменения уровня эмиссии ГТУ семейства НК, приведённых на рис. 7, в зависимости от используемой конструкции КС.

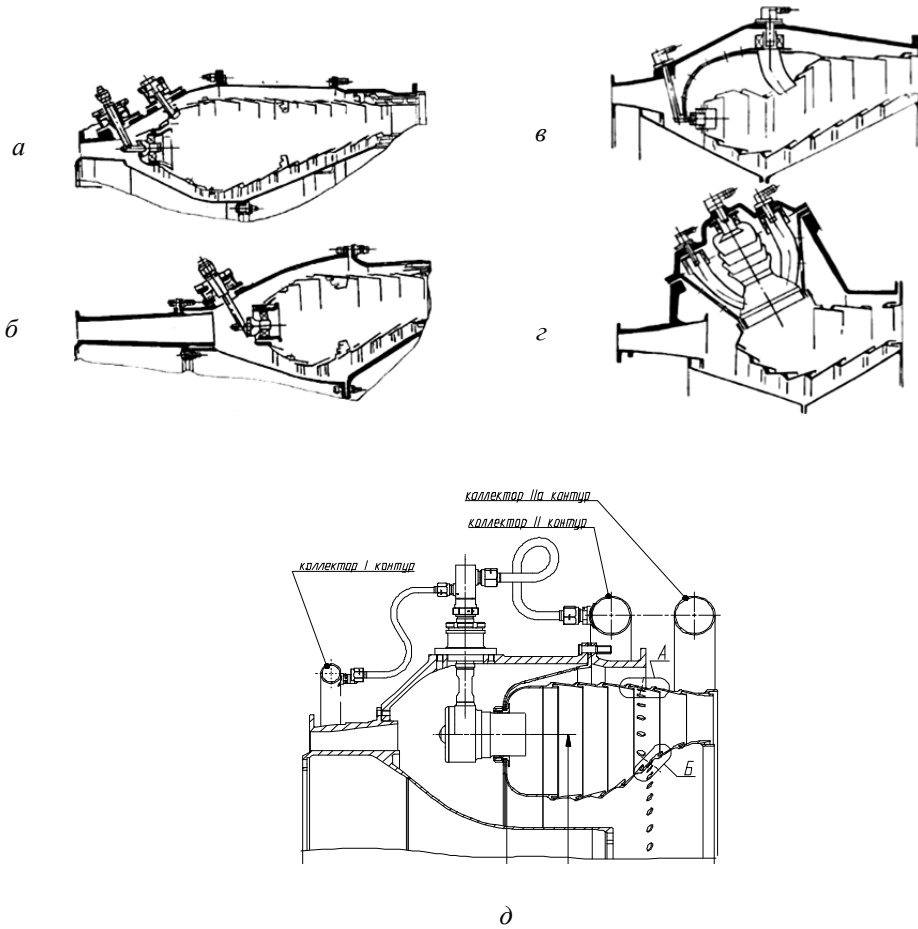


Рис. 7. Эволюция КС ГТУ семейства НК:
 а, б, в, з, д – камеры сгорания соответственно: исходная традиционной схемы,
 короткая традиционной схемы, двухзонная кольцевая,
 двухзонная с выносными жаровыми трубами,
 кольцевая с малоэмиссионными двухконтурными горелками

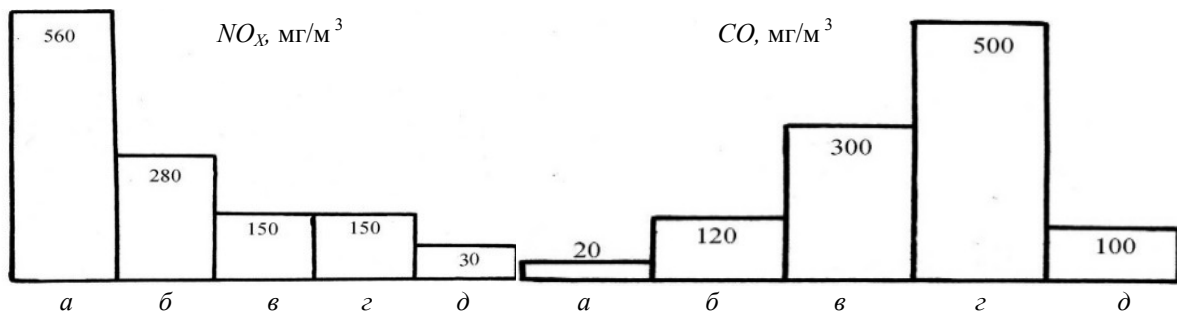


Рис. 8. Изменение эмиссии NO_x и CO в ГТУ семейства НК:
 а, б, в, з, д – камеры сгорания соответственно: исходная традиционной схемы,
 короткая традиционной схемы, двухзонная кольцевая,
 двухзонная с выносными жаровыми трубами,
 кольцевая с малоэмиссионными двухконтурными горелками

Апробирована возможность снижения выброса $\text{NO}_x < 30 \text{ мг/м}^3$ и $\text{CO} < 300 \text{ мг/м}^3$ в конвертированных ГТД с высокими параметрами термодинамического цикла ($\pi_k = 25, T_k > 800 \text{ К}$) при использовании компактных кольцевых камер сгорания традиционной схемы с унифицированными двухконтурными горелками.

Снижение выброса NO_x до $20\text{-}30 \text{ мг/м}^3$ достигнуто за счёт конструктивных мероприятий, обеспечивших высокую эффективность перемешивания «бедной» смеси при оптимальном взаимодействии дежурной и основной зоны, внедрения каскадного подключения горелок, автоматизированной подачи топлива по контурам (АСУ КС) с помощью трёх стационарных дозаторов управления (ДУС) и «толстого» (около 600 мкм) теплозащитного покрытия стенок (ТЗП).

Устойчивое горение предварительно подготовленной «бедной» хорошо перемешанной смеси обуславливает:

- высокую равномерность температурного и скоростного поля на выходе из КС;
- отсутствие резонансных частот на турбине высокого давления;
- повышение эффективного КПД двигателя за счёт однородности потока, срабатываемого на лопатках турбины.

Конструктивный облик МКС

Одним из первых мероприятий к обеспечению экологической безопасности явилось внедрение многофорсуночной (многоочаговой) КС авиационного ГТД [10]. Принципиальные особенности многофорсуночной (многогорелочной) КС:

- большое число горелок (более 100) малого диаметра;
- двухъярусное расположение горелок;
- двухконтурная подача топлива в форсунки по специальной программе;
- длина многоочаговой КС сокращается в $1,5\text{...}2$ раза по сравнению с традиционной кольцевой.

Большое число форсунок малого диаметра или горелок в случае ГТУ способствует полному выгоранию топлива и формированию требуемого температурного поля на выходе при малой длине КС. Модульность горелок предопределяет преимущество конструкций фронтальных устройств и протекающих в них процессов для КС различной размерности.

Из результатов отработки рабочего процесса сжигания топлива и анализа конструкций, реализующих различные концепции «бедного» горения, следует, что конструктивный облик определяет горелочное устройство, позволившее уменьшить время пребывания до $6\text{...}7 \text{ мкс}$ [3;4]. Разработанная в настоящее время унифицированная двухконтурная горелка (рис. 9), изготавливаемая по новой аддитивной технологии, является основным элементом как кольцевых, так и трубчато-кольцевых МКС (вариант конструкции выносной жаровой трубы ГТУ LGT-010 представлен на рис. 10) [8;9;11].

Работа по созданию малоэмиссионной системы горения на базе унифицированной двухконтурной горелки включает:

- разработку многоконтурной КС [10];
- разработку программы регулирования подачи топлива по контурам системы АСУ КС в зависимости от режимов работы двигателя и атмосферных условий;
- разработку эффективной и экономичной системы охлаждения;
- внедрение «толстых» (около 600 мкм) ТЗП.

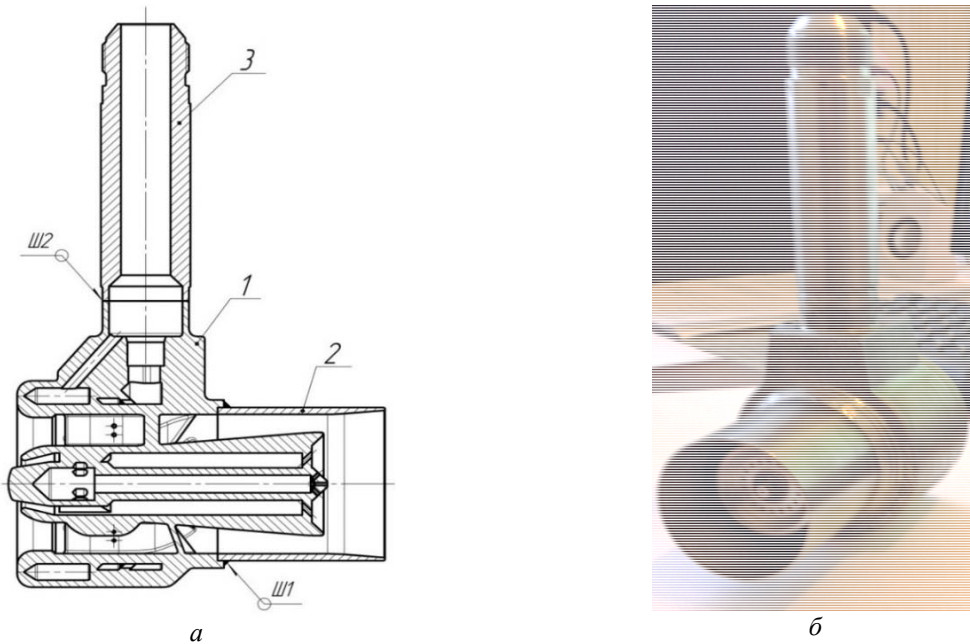


Рис. 9. Двухконтурная горелка малоэмиссионной камеры сгорания:
а – продольный разрез; б – общий вид

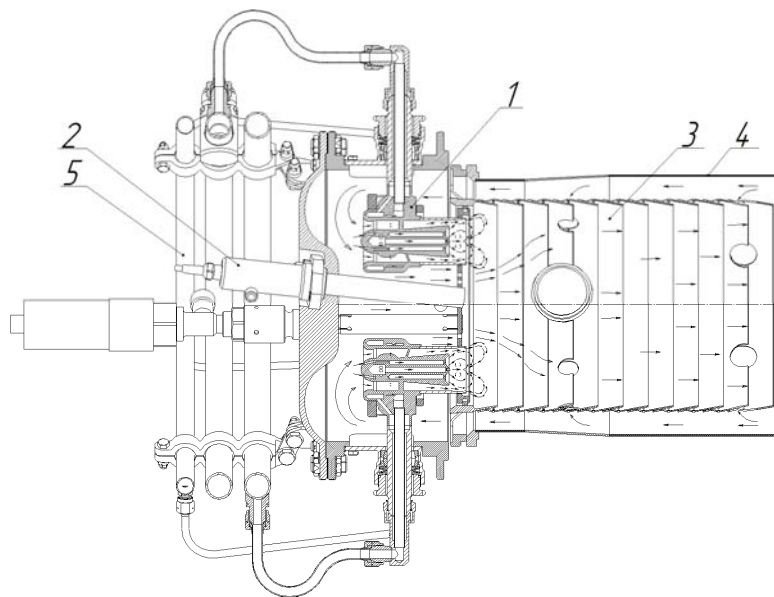


Рис. 10. Малоэмиссионная камера сгорания
в конструктивном исполнении с выносной жаровой трубой:
1 – малоэмиссионная двухконтурная горелка; 2 – воспламенитель; 3 – жаровая труба;
4 – кожух; 5 – три коллектора подачи топлива, обеспечивающих каскадное подключение горелок

Обобщая приведённый опыт работы, необходимо отметить, что создание работоспособной конструкции МКС связано с решением следующих вопросов:

– отработка малоэмиссионной системы «ультрабедного» горения, включающая внедрение мероприятий по системе «тонкого» регулирования топливоподачи в зависимости от температуры окружающей среды и режима работы, регулирование входного

насосного агрегата, перепуск воздуха из камеры сгорания, каскадное подключение горелок с целью устранения противоречивой связи выброса NO_x и CO и т.д.;

– обеспечение высокой степени перемешивания при минимальном гидравлическом сопротивлении;

– отсутствие проскока пламени и пульсаций давления, обеспечение устойчивости горения во всех условиях эксплуатации;

– наличие надёжной и экономичной системы охлаждения, внедрение теплозащитных покрытий и новых материалов.

Если в резолюции первого научно-технического семинара по проблемам малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок (14-15 декабря 2004 г.), организованном Всероссийским теплотехническим институтом совместно с Центральным институтом авиационного моторостроения, было отмечено, что отечественные предприятия далеки от зарубежных достижений по экологическим характеристикам, то сегодня успешно эксплуатируются российские ГТУ на уровне мировых стандартов. Однако, как отмечено С.М. Фроловым в [1], «состояние фундаментальных знаний в физике горения и взрыва, как и во многих других дисциплинах, весьма далеко от идеала, и для продвижения вперёд необходимы дальнейшие кропотливые и планомерные научные исследования».

Заключение

Обобщение опыта разработки и эксплуатации многофорсуночных (многогорелочных) МКС авиационных и конвертируемых двигателей семейства НК можно рассматривать как информационный базис дальнейшей стратегии развития новых технологий малоэмиссионного горения

Библиографический список

1. Фролов С.М. Наука о горении и проблемы современной энергетики // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 6. С. 129-133.

2. Арутюнов В.С., Шмелев В.М., Рахметов А.Н., Шаповалова О.В., Захаров А.А., Рощин А.А. Новые подходы к созданию низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 6 (128), ч. 2. С. 105-120.

3. Лавров В.Н., Постников А.М., Цыбизов Ю.И., Мальчиков Г.Д., Гребнев В.В., Морозов А.В. Разработка системы низкоэмиссионного горения топлива в газотурбинных установках // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2007. № 2 (13). С. 118-127.

4. Лавров В.Н., Постников А.М., Церерин Н.В., Цыбизов Ю.И., Беляев В.В. Опыт создания и направления дальнейшего совершенствования малотоксичных камер сгорания ГТД и ГТУ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2002. № 2 (2). С. 65-70.

5. Постников А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. Самара: Самарский научный центр РАН, 2002. 286 с.

6. Матвеев С.Г., Лукачев С.В., Орлов М.Ю., Чечет И.В., Красовская Ю.В. Расчёт образования CO и NO_x в камерах сгорания ГТД: электрон. учеб. пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012. 41 с.

7. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Казань: Казанский государственный технический университет, 2006. 220 с.

8. Бантиков Д.Ю., Елисеев Ю.С., Лавров В.Н., Пчеляков А.А., Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И. Результаты опытной эксплуатации малоэмиссионной системы горения в

составе двигателя НК-37 // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3 (41), ч. 2. С. 9-14. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-2(41)-9-14

9. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Резник В.Е., Цыбизов Ю.И. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. Самара: Самарский научный центр РАН, 2004. 266 с.

10. Бирюк В.В., Горшкалев А.А., Лукачев С.В., Цыбизов Ю.И. Многофорсуночная камера сгорания – основа технологии обеспечения экологической безопасности авиационных газотурбинных двигателей // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2016. № 1 (17). С. 89-99. DOI: 10.23877/MS.TS.25.009

11. Елисеев Ю.С., Федорченко Д.Г., Голанов С.П., Цыбизов Ю.И., Тюлькин Д.Д., Воротынцев И.Е., Ивченко А.В. Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 174-183. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183

TECHNOLOGY OF LOW-EMISSION FUEL COMBUSTION AND CONCEPTUAL STRUCTURE OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAS-TURBINE POWER PLANT

© 2020

Yu. I. Tsybizov Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
2422490@mail.ru

D. D. Tyulkin Postgraduate Student;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
tyulkin.dmitriy@gmail.com

I. E. Vorotyntsev Postgraduate Student;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
vorotintsev15@yandex.ru

Currently, the priority for improvement of the combustion chambers of aircraft gas turbine engines and ground-based gas turbine plants is associated with a decrease in the concentration of harmful substances in the exhaust gases while ensuring fuel economy and operational efficiency. Pride of place in the design of a gas turbine power plant goes to solving the problem of organizing the combustion process, i.e. the development of a low-emission combustion system that provides high efficiency and environmental safety. Thus, ecology today determines not only the appearance of a combustion chamber, but also that of a gas turbine power plant as a whole. Below, an attempt is made to summarize the results of developing a low-emission combustion system for various types of combustion chambers of convertible gas turbine power plants and to present a unified approach to the problem of designing a conceptual structure of a low-emission combustion chamber.

Gas turbine power plant; low-emission combustion chamber; “lean” air-fuel mixture; low-emission combustion system.

Citation: Tsybizov Yu.I., Tyulkin D.D., Vorotyntsev I.E. Technology of low-emission fuel combustion and conceptual structure of the combustion chamber of a gas-turbine power plant. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 2. P. 107-120. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-2-107-120

References

1. Frolov S.M. Combustion science and problems of contemporary power engineering. *Russian Journal of General Chemistry*. 2009. V. 79, Iss. 11. P. 2556-2561. DOI: 10.1134/S1070363209110437
2. Arutyunov V.S., Shmelev V.M., Rakhmetov A.N., Shapovalova O.V., Zakharov A.A., Roschin A.A. New approaches to development of low-emission combustion chambers for gas turbine engines. *Alternative Energy and Ecology*. 2013. No. 6 (128), part 2. P. 105-120. (In Russ.)
3. Lavrov V.N., Postnikov A.M., Tsibizov Yu.I., Malchikov G.D., Grebnev V.V., Morozov A.V. Developing of low emission fuel burning system in gas turbine engines. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2007. No. 2 (13). P. 118-127. (In Russ.)
4. Lavrov V.N., Postnikov A.M., Tsererin N.V., Tsybizov Yu.I., Belyaev V.V. Experience of design and lines of further improvement of gas turbine engine low-emission combustion chambers. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2002. No. 2 (2). P. 65-70. (In Russ.)
5. Postnikov A.M. *Snizhenie oksidov azota v vykhlopnykh gazakh GTU* [Reducing the content of nitrogen oxides in gas turbine exhaust]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2002. 286 p.
6. Matveev S.G., Lukachev S.V., Orlov M.Yu., Chechet I.V., Krasovskaya Yu.V. *Raschet obrazovaniya CO i NOX v kamerakh sgoraniya GTD: elektron. ucheb. posobie* [Calculation of CO and NOX formation in gas turbine engine combustion chambers. Electronic resource]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2012. 41 p.
7. Mingazov B.G. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley* [Combustion chambers of gas turbine engines]. Kazan: Kazan State Technical University Publ., 2006. 220 p.
8. Bantikov D.Yu., Yeliseev Yu.S., Lavrov V.N., Pchelyakov A.A., Fedorchenko D.G., Tsybizov Yu.I. Results of primary operation of NK-37 engine low emission combustion system. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 3 (41), part 2. P. 9-14. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-2(41)-9-14
9. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Reznik V.E., Tsybizov Yu.I. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinnnye ustanovki nazemnogo primeneniya* [Conversion of aircraft gas turbine engines into ground-application gas turbine units]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2004. 266 p.
10. Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Lukachev S.V., Tsybizov Yu.I. Multi-nozzle combustion chamber of aviation gas turbine engines as basis of environmental safety. Review. *Modern Science: Research, Ideas, Results, Technologies*. 2016. No. 1 (17). P. 89-99. (In Russ.). DOI: 10.23877/MS.TS.25.009
11. Yeliseev Yu.S., Fedorchenko D.G., Golanov S.P., Tsibisov Yu.I., Tyulkin D.D., Vorotyntsev I.E., Ivchenko A.V. Application of additive technology of selective laser melting (SLM) in designing a low emission combustion chamber of a gas turbine plant. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 1. P. 174-183. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183