



УДК 621.438

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.34](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.34)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

М. Н. Лежнина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет», Россия,
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3
email: Mari.lezhnina.13@mail.ru

Аннотация. Актуальность темы исследования обусловлена тем, что камера сгорания газотурбинной установки определяет её экономичность, мощность, ресурс и экологические показатели. Постановка проблемы заключается в необходимости одновременно обеспечивать устойчивое горение в широком диапазоне режимов, высокую температуру газа перед турбиной, равномерное температурное поле на выходе и минимальные выбросы токсичных компонентов. Цель исследования — анализ конструкции, принципа работы и ключевых характеристик камеры сгорания газотурбинной установки. Методы исследования включают термодинамический анализ, гидрогазодинамическое компьютерное моделирование процессов смешения и турбулентного горения, кинетическое моделирование химических реакций, а также экспериментальную верификацию на огневых стендах с применением лазерной диагностики и газоанализаторов. Результаты показали, что конструкция камеры выполняется по кольцевой или трубчато-кольцевой схеме с жаровой трубой, фронтальным устройством и системой охлаждения, а процесс работы делится на зоны горения, смешения и выходной участок. Ключевые выводы: камера сгорания является критически важным узлом газотурбинной установки; современное проектирование базируется на численном моделировании и экспериментах; главный тренд развития — создание камер с ультранизкими выбросами оксидов азота и монооксида углерода при одновременном повышении температуры газа перед турбиной.

Ключевые слова: газотурбинная установка, камера сгорания, горение, фронтальное устройство, жаровая труба, смешение, коэффициент избытка воздуха, вредные выбросы

UDC 621.438

INVESTIGATION OF GORENJE AND MIXING PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE PLANT

M. N. Lezhnina

Russia, 424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volga State Technological University".
email: Mari.lezhnina.13@mail.ru

Abstract. Relevance of the research topic is due to the fact that the combustor of a gas turbine unit determines its efficiency, power, service life, and environmental performance. Problem statement lies in the need to simultaneously ensure stable combustion over a wide range of operating conditions, a high gas temperature before the turbine, a uniform outlet temperature field, and minimal emissions of toxic components. Objective of the study is to analyze the design, operating principle, and key characteristics of a gas turbine combustor. Research methods include thermodynamic analysis, computational fluid dynamics modeling of mixing and turbulent combustion, kinetic modeling of chemical reactions, as well as experimental validation on firing rigs using laser diagnostics and gas analyzers. Results showed that the combustor design follows an annular or can-annular arrangement with a flame tube, a swirler-stabilized front end, and a cooling



system, while the operation is divided into combustion, dilution, and outlet zones. Key conclusions: the combustor is a critically important component of a gas turbine unit; modern design is based on numerical simulation and experiments; the main development trend is to create combustors with ultra-low emissions of nitrogen oxides and carbon monoxide while increasing the turbine inlet gas temperature.

Keywords: gas turbine installation, combustion chamber, combustion, front-end device, heat pipe, mixing, excess air ratio, harmful emissions.

Введение

Камера сгорания является одним из наиболее ответственных и теплонапряженных узлов современной ГТУ. Ее работа напрямую определяет КПД, мощность, надежность и экологичность всей установки, так как именно тут происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию рабочего тела (газа), которая затем расширяется в турбине, совершая механическую работу. Основная задача КС – эффективно и стабильно сжигать топливо в широком диапазоне режимов работы (от пуска до номинальной нагрузки), нагревая поток воздуха от компрессора до температуры, превышающей пределы жаропрочности материалов лопаток турбины, при этом обеспечивая равномерное поле температур на выходе и минимальное образование токсичных веществ (NO_x , CO, сажи).

Целью работы является анализ конструкции, принципа работы и ключевых характеристик камеры сгорания ГТУ. В статье последовательно рассмотрены:

1. Назначение и основные требования к КС.
2. Конструктивное устройство типовой камеры сгорания.
3. Физико-химические процессы, протекающие в КС.
4. Методология исследования и анализа работы КС.
5. Анализ результатов и современных тенденций в разработке камер сгорания.

Материалы и методы

Исследование работы камеры сгорания основано на комплексном подходе, включающем:

1. Термодинамический анализ: расчет энергетического баланса, определение расхода топлива и теоретической температуры горения T_T :

$$T_T = T_0 + \frac{\eta * Q_H}{c_p * (1 + \alpha * L_0)} \quad (1)$$

Данная формула позволяет оценить максимальную температуру, достижимую в зоне горения при данном коэффициенте избытка воздуха α , что важно для выбора материалов и организации охлаждения.

2. Гидрогазодинамическое моделирование (CFD): компьютерное моделирование потоков воздуха и топлива, процессов смешения и турбулентного горения для оптимизации конструкции и прогнозирования полей температур и концентраций.

3. Кинетическое моделирование химических реакций: анализ образования и разрушения загрязняющих веществ (в первую очередь, оксидов азота NO_x) в зависимости от температуры и времени пребывания в зоне горения.

4. Экспериментальные исследования: испытания на огневых стендах с использованием методов лазерной диагностики (LDA, PIV), термопар и газоанализаторов для верификации расчетных моделей и измерения реальных параметров (температура, давление, состав газов).

Анализ показывает, что современная камера сгорания ГТУ представляет собой сложную техническую систему. Ее конструкция, как правило, выполнена в виде кольцевого или трубчато-кольцевого корпуса, внутри которого расположены одна или несколько жаропрочных жаровых труб (флекс).

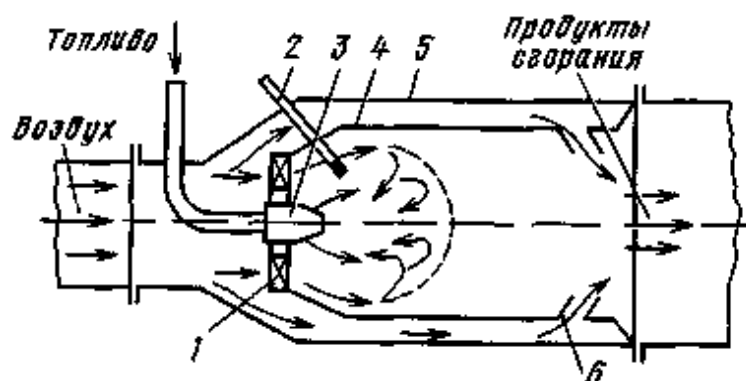


Рис. 1 Схема камеры сгорания ГТУ: 1 – воздухонаправляющее устройство, 2 – запальник, 3 – форсунка, 4 – пламенная (жаровая) труба, 5 – корпус, 6 – смеситель.

Fig. 1. Diagram of a gas turbine combustion chamber: 1 – air guide device, 2 – igniter, 3 – nozzle, 4 – flame (heat) pipe, 5 – housing, 6 – mixer.

- Корпус воспринимает давление и служит несущей конструкцией.
- Фронтное устройство (горелка) обеспечивает подготовку топливно-воздушной смеси, ее стабилизацию и воспламенение. Ключевым элементом является завихритель, создающий зону обратных токов, которая постоянно поджигает свежую смесь, обеспечивая устойчивость пламени.

• Жаровая труба отделяет зону высокотемпературного горения от корпуса. Для ее охлаждения используется часть воздуха от компрессора, который подается через специальные отверстия, формируя защитную пленку на внутренних стенках.

Процесс работы КС можно разделить на три зоны:

1. Зона горения: в эту зону через горелочное устройство подается небольшое количество воздуха (20-40%). Ключевым параметром является коэффициент избытка воздуха α , который показывает отношение действительного количества воздуха, поступившего в зону горения (L_d), к теоретически необходимому для полного сгорания топлива (L_T).

$$\alpha = \frac{L_d}{L_T} \quad (2)$$

Здесь α поддерживается в пределах 0,9-1,1 (близким к единице), благодаря этому происходит основное выделение тепла, откуда следует повышение температуры до 1800-2000°C.

2. Зона смешения: через специальные отверстия в жаровой трубе в основной поток продуктов сгорания подается оставшаяся часть (60-80%) воздуха от компрессора. Этот воздух, называемый охлаждающим, смешивается с раскаленными газами, понижая их температуру до уровня, допустимого для материалов турбины (1350–1650 °C).

3. Выходной участок: обеспечивает формирование равномерного поля температур перед сопловым аппаратом турбины для предотвращения локальных перегревов и термических напряжений.

Основные проблемы, решаемые при проектировании КС:

- Снижение выбросов NO_x : достигается организацией процесса горения по принципу "бедной" топливно-воздушной смеси (Lean Burn), когда большое количество воздуха предотвращает локальный перегрев и подавляет образование термических NO_x .

- Обеспечение устойчивости горения: предотвращение срыва пламени и пульсаций давления, которые могут привести к разрушению конструкции.

- Охлаждение элементов: применение комбинированных методов (пленочное, имплантационное, конвективное) для защиты жаровой трубы и фронтного устройства.



Результаты

1. Камера сгорания ГТУ – это критически важный узел, определяющий эффективность, надежность и экологичность всей установки.
2. Конструкция КС эволюционировала в сторону кольцевых и трубчато-кольцевых схем с интенсивными системами охлаждения и сложными горелочными устройствами.
3. Современные методологии проектирования, основанные на CFD-моделировании и комплексных экспериментах, позволяют оптимизировать процессы смешения и горения.
4. Главным трендом в развитии КС является создание экологически чистых конструкций с ультранизкими выбросами NO_x и CO при одновременном повышении температуры газов перед турбиной для роста КПД ГТУ.

Обсуждения

Проведённый анализ подтверждает, что камера сгорания газотурбинной установки является критическим узлом, где сталкиваются противоречивые требования: высокая температура газа ($1800\text{--}2200\text{ }^\circ\text{C}$) для эффективности, устойчивость пламени и минимальные выбросы оксидов азота. Именно при нагреве выше $1800\text{ }^\circ\text{C}$ резко возрастает образование термических NO_x . Переход на «бедные» смеси (коэффициент избытка воздуха $\alpha > 1$) снижает выбросы, но увеличивает риск срыва пламени и появления монооксида углерода — это главный компромисс, определяющий современное проектирование. Используемая в статье методология (газодинамическое моделирование в сочетании с огневыми экспериментами и лазерной диагностикой) является адекватной, однако точность CFD-расчётов сильно зависит от выбора модели турбулентности; без верификации погрешность по температуре и концентрации вредных веществ может достигать $15\text{--}20\%$.

Заключение

Эффективность камеры сгорания определяется балансом температуры, устойчивости горения и экологических показателей. Дальнейшее развитие ГТУ должно идти по пути гибридных систем с адаптивным управлением, что позволит одновременно повысить КПД и снизить вредные выбросы. Камера сгорания остаётся активной областью исследований, где синтез фундаментальной теплофизики, численного моделирования и эксперимента ведёт к созданию более эффективных и экологичных энергетических установок.

Литература

1. Дж. Х. Кох, Г. Уилрайт. Газотурбинные двигатели. – М.: Машиностроение, 2010. – 456 с.
2. Обухов Ю.А., Филин В.П., Чунихин А.А. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 320 с.
3. Petro-Canada Lubricants. (n.d.). Hot Topics: Turbines. https://petrocanadalubricants.com/en-tm/knowledge-centre/article/art_1-hot-topics-turbines
4. Лефевр А., Болл Д. Физика процессов в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 2015. – 566 с.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
6. Справочник по газотурбинным установкам/ Под ред. В.И. Базарова. – М.: Машиностроение, 2012. – 608 с.
7. Oil & Gas Journal. (2023, July). Gas Turbine Power Plant. <https://www.oilgasz.com/2023/07/gas-turbine-power-plant.html>