

УДК 621.438

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ

©2013 О. В. Гречишников, И. И. Остапец, А. Д. Росляков, Ю. И. Цыбизов

ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

Приведены материалы по обеспечению теплового состояния элементов жаровой трубы двухзонных камер сгорания ГТУ наземного применения. Проанализированы факторы, которые влияют на температуру колец жаровой трубы. Показано существенное влияние на температуру стенок жаровой трубы расходных характеристик и дальности горелок основного контура и показано, что задача обеспечения допустимой в соответствии с ТЗ температуры стенок жаровой трубы в первую очередь сводится к задаче обеспечения оптимальной структуры потока рабочей среды во внутренней полости жаровой трубы.

Системы охлаждения жаровой трубы, двухзонные камеры сгорания, расходные характеристики горелок.

Организация теплозащиты элементов камеры сгорания представляет собой весьма важную задачу, решение которой всё более усложняется с ростом параметров рабочего процесса двигателя [1].

В современных камерах сгорания применяются комбинированные системы охлаждения: часть воздуха вводится внутрь жаровой трубы через щели системы охлаждения тангенциально стенкам для создания защитного слоя, а протекающий по кольцевым каналам воздух охлаждает стенки жаровой трубы снаружи. Воздух, вытекающий из щели со скоростью $c_{щ}$, образует пристенную струю, которая перемешивается с потоком продуктов сгорания в соответствии с закономерностями, характерными для спутных струй (рис. 1). Конвективный поток тепла к стенке со стороны горячих газов определяется температурой T_d^* и скоростью c_δ на границе пристенного пограничного слоя.

При относительных значениях расхода охлаждающего воздуха $\bar{G} = G_{охл}/G_B = 20...25\%$ удаётся практически полностью изолировать стенки жаровой трубы от контакта с горячими газами, т.е. на всей длине охлаждающих секций $T_d^* \approx T_K$ и $c_\delta \approx c_{щ}$.

Подвод тепла к стенкам жаровой трубы в этом случае осуществляется только за счёт излучения пламени ($q_{л.г.}$).

Лучистый поток тепла от газов в камерах сгорания из-за большого содержания сажи сильно превышает (в 7...10 раз) излучение «чистых» продуктов сгорания, которое обусловлено излучением трёхатомных газов CO_2 и H_2O .

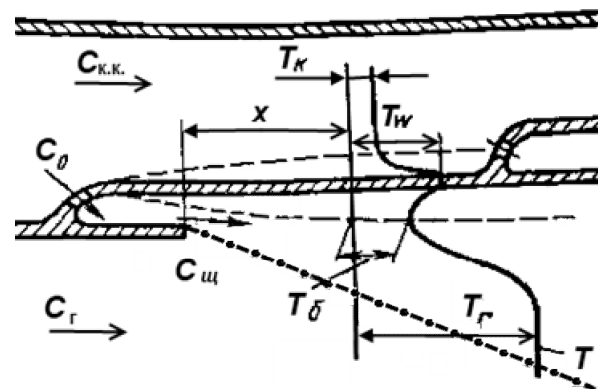


Рис. 1. Структура течения и распределение температур газа вблизи стенки жаровой трубы:
 - - - граница пограничного слоя;
 • - • - граница слоя смешения пристенной струи

Исследования показывают, что величина $q_{л.г.}$ имеет максимум в конце зоны горения, так как здесь температура газа внутри камеры наиболее велика. Значения $q_{л.г.}$ практически не изменяются в рабочем диапазоне изменения коэффициента из-

бытка воздуха α и возрастают с увеличением времени пребывания газа в камере, давления и температуры воздуха на входе, так как при этом увеличивается степень черноты пламени (вследствие увеличения выделения сажи), а с ростом T_k увеличивается ещё и температура газа.

При некоторых достаточно высоких значениях давления $p_k^* \geq 1 \dots 1,5$ МПа степень черноты пламени становится практически равной единице, её дальнейший рост прекращается.

Отвод тепла от стенки определяется по обычным формулам теплообмена.

Увеличение температуры воздуха на входе в камеру сгорания приводит к существенному возрастанию значений температуры стенок жаровой трубы.

Повышение значений p_k^* оказывает неоднозначное влияние на температуру стенок жаровой трубы: при $p_k^* < 1 \dots 1,5$ МПа с увеличением давления температура стенки увеличивается, а при $p_k^* > 1 \dots 1,5$ МПа - уменьшается.

Уменьшение времени пребывания газа в камере (уменьшение объёма жаровой трубы или увеличение объёмного расхода воздуха) приводит к уменьшению температуры стенок [1]. Заметное снижение температуры стенки может быть достигнуто при уменьшении продольных размеров секций системы охлаждения (при $\bar{G}_{охл} = \text{const}$). В этом случае происходит интенсивное перетекание тепла от более нагретых участков к менее нагретым путём теплопроводности материала стенки, а также несколько возрастают значения коэффициента теплоотдачи. Большое значение для повышения надёжности камер сгорания имеет также такая организация рабочего процесса, при которой бы обеспечивалось снижение лучистых потоков тепла.

При высоких значениях T_k^* и p_k^* возникают значительные трудности с обеспечением теплозащиты фронтального устройства и головной части жаровой трубы. Связано это в основном с тем, что здесь возможно попадание топлива в пристенные слои и его воспламенение.

При работе камер сгорания ГТД чаще всего происходят такие повреждения как коробление и растрескивание жаровых труб [2]. Если подобные дефекты возникают после относительно недолгой работы камер сгорания, то их причиной являются ошибки при проектировании и изготовлении жаровых труб. Иногда местные перегревы стенок могут быть следствием нарушений в распыливании топлива, вызванных неисправностью топливных форсунок, образованием кокса на форсунке и неточной установкой форсунки в жаровой трубе. Местные перегревы стенок могут также происходить из-за наличия воспламенительного устройства или крепёжных стоек и других деталей в кольцевом канале, срывное обтекание которых воздухом ухудшает конвективное охлаждение жаровой трубы в следах за этими препятствиями. Однако, даже если нет всех указанных недостатков, после длительной работы камеры сгорания так или иначе проявляются коробление и трещины жаровой трубы. Обычно при этом трещины образуются на кромках воздухоподводящих отверстий и «козырьков» для направления охлаждающего воздуха, а также в тех местах жаровой трубы, где могут возникнуть большие остаточные напряжения при её изготовлении.

Жаровая труба имеет сложную конструкцию, поэтому расчёт термических напряжений и её ресурса представляет проблему. В общем, однако, известно, что коробление жаровых труб вызывается их длительной эксплуатацией при высокой температуре стенок и больших градиентах температур по стенке. Трещины, как правило, образуются из-за малоциклового усталости материала стенки, обусловленной нестационарностью распределения температуры стенки жаровой трубы. Таким образом, для обеспечения относительно большого ресурса жаровой трубы необходимо выдерживать значения температуры и её градиентов по стенке в некоторых установленных пределах.

Как и для других типов тепловых машин, термический КПД газотурбинных двигателей увеличивается с ростом степени повышения давления. Степень повышения давления воздуха в компрессоре заметно повысилась за последние годы и, по-видимому, будет увеличиваться в дальнейшем. С ростом давления в камере увеличиваются лучистые потоки тепла от газов в полости жаровой трубы к её стенкам. Вследствие увеличения степени повышения давления растёт и температура воздуха на входе в камеру сгорания, что приводит к уменьшению хладоресурса воздуха в кольцевых каналах, охлаждающего жаровую трубу посредством конвекции. Таким образом, с повышением давления за компрессором проблема охлаждения стенок камеры сгорания усложняется и в современных ГТД для охлаждения стенок жаровой трубы используется более чем одна треть общего расхода воздуха через камеру. К сожалению, увеличение доли воздуха, вводимого вдоль внутренней стенки жаровой трубы, в сочетании с неизбежным уменьшением доли воздуха, подаваемого в зону разбавления, ухудшает равномерность температуры газа на выходе из камеры сгорания. Более того, охлаждающий воздух вызывает «замораживание» (значительное замедление и прекращение) промежуточных химических реакций при горении вблизи стенки, что приводит к понижению полноты сгорания (особенно на режимах малого газа) и, следовательно, к увеличению выбросов окиси углерода и несгоревших углеводородов. По этим причинам и для повышения КПД двигателя необходимо всемерно повышать эффективность систем охлаждения жаровых труб, сводя этим к минимуму расход охлаждающего воздуха.

Требуемый ресурс жаровой трубы достигается рациональной конструкцией, обеспечивающей свободное тепловое расширение ее элементов, и эффективным охлаждением стенок до заданного температурного уровня [3].

Следует иметь в виду, что чрезмерно интенсивное охлаждение стенок жаровой

трубы (до температуры ниже 500 °С) приводит к возможности отложения кокса в этих зонах при работе на жидком топливе.

Наибольшее распространение в настоящее время получило заградительное охлаждение в силу простоты и достаточной эффективности. Конвективный тепловой поток с внутренней стороны пламенной трубы может быть направлен как от стенки пламенной трубы, так и к ней в зависимости от температуры среды в пограничном слое. Рациональной может быть признана конструкция, в которой температура пограничного слоя меньше температуры стенки. В этом случае становится возможным конвективный отвод тепла от стенки жаровой трубы.

Однако такую конструкцию камеры сгорания разработать чрезвычайно сложно, особенно если камера сгорания создаётся в рамках конверсии с ограничениями по габаритам.

Доминирующим принципом отечественных и зарубежных разработчиков при создании камер сгорания конвертированных ГТД является стремление обеспечить неизменность габаритов камеры сгорания. Это позволяет сохранить такие технологически сложные узлы как наружный и внутренний корпуса камеры, а следовательно и силовую схему двигателя [4].

Двухзонные камеры сгорания применяют в настоящее время большинство разработчиков. Следует учитывать, что двухзонные камеры сгорания с последовательными зонами, с которых начиналось внедрение камер такого типа, также отличаются увеличенной длиной, что усложняет процесс конвертации. Поэтому применение такой схемы камеры сгорания в "чистом виде" возможно лишь при переделке авиадвигателей второго и третьего поколений. Камеры сгорания с последовательными зонами применены в энергетических ГТУ.

Разработанная камера сгорания (рис. 2) имеет двухзонную схему и включает в себя:

- жаровую трубу;

- капот;
- горелки I (дежурного) контура;
- горелки II (основного) контура.

Горелки II контура имеют следующие особенности:

- осевые завихрители установлены на выходе из сопел;
- отверстия подачи газа выполнены в стенках коллекторов горелок, которые выполнены в виде наружного кольца и внутренней полой втулки, а также в виде четырех радиальных пустотелых пере-

чек в серийном производстве и в виде лопаток в опытном варианте.

Жаровая труба состоит из наружного и внутреннего кожухов, которые собираются из отдельных колец, изготовленных из листовой жаростойкой стали и сваренных последовательно друг с другом точечной сваркой так, что между задними и передними концами последующих колец образуются кольцевые щели. Воздух в щели поступает через отверстия в зиге.

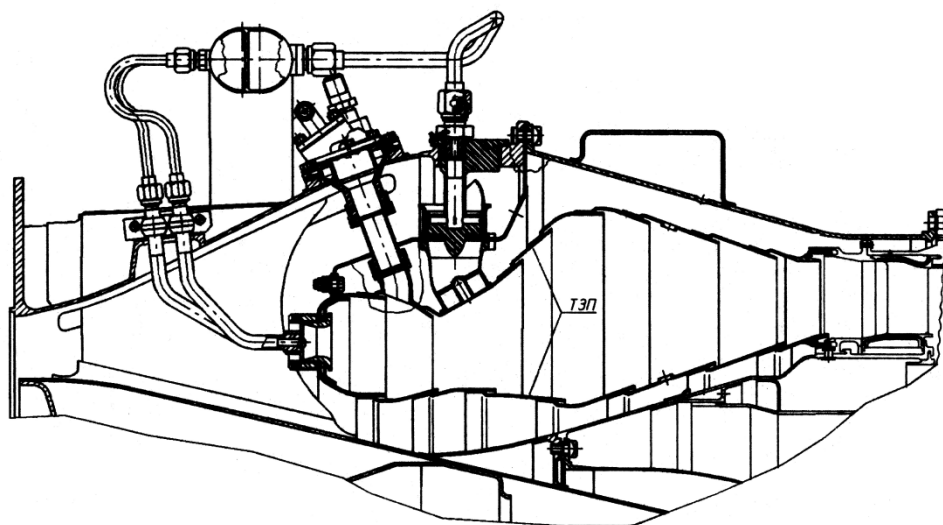


Рис. 2. Двухзонная камера сгорания

Переднее кольцо наружного кожуха имеет отбортовку, образующую фланец для крепления наружного кожуха к капоту. Во фланце выполнены сорок восемь отверстий для подвода воздуха под капот и сорок восемь отверстий, в которые вставлены и приварены болты для крепления наружного и внутреннего кожухов и капота между собой.

В третьем кольце выполнены тридцать шесть отверстий, в которые устанавливаются сопла горелок II контура.

Для интенсификации перемешивания газозооной смеси, выходящей из горелок II контура, профиль наружного и внутреннего кожухов жаровой трубы в месте расположения этих горелок выполнен с "пережатием".

В конструкцию внутреннего кожуха входит плита, выполненная из листовой жаростойкой стали. В передней части плиты выполнены двадцать четыре отверстия, в которых с помощью завихрителей I контура закрепляются корпуса горелок I (дежурного) контура. В промежутках между этими отверстиями расположено по восемь отверстий, через которые подается воздух в зазор между плитой и дефлектором. Для обеспечения постоянного размера щели, через которую воздух выходит из-под дефлектора, к дефлектору приварены точечной сваркой дистанционные овальные пластины.

Горелки диффузионного типа, которые установлены во фронтальном устройстве, обеспечивают подачу природного газа в первую (дежурную) зону. Коэффици-

циент избытка воздуха в первой зоне близкий к стехиометрическому значению. При этом обеспечивается надёжное воспламенение топливно-воздушной смеси и поддержание высокой температуры газа на входе в основную, так называемую вторую зону, в которой сгорает до 85 % топлива с температурой газов в диапазоне 1800...1900 К. Такая температура является оптимальной с точки зрения обеспечения компромисса в части минимизации образования оксидов азота NO_x и углерода CO .

Во второй зоне с креплением на капоте расположены гомогенные горелки II контура (примерно под углом 90 градусов к оси двигателя). Конструкция горелок, как и всей двухзонной камеры сгорания в целом, прошла некоторый этап опытно-конструкторской доводки на автономных стендах и в составе двигателя. По результатам доводки было предложено внедрить вариант конструкции горелки с расположением завихрителя на срезе сопла. Схема такой горелки приведена на рис. 3.

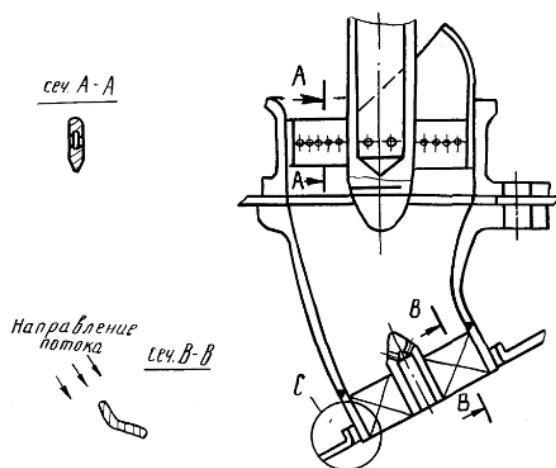


Рис. 3. Схема горелки с лопаточным завихрителем на срезе сопла

Лопатки завихрителя при этом профилированные, количество лопаток – 10 штук. Подача топлива до лопаток – отдельным коллектором. При правильном выполнении такой конструкции можно обеспечить более качественное смешение

топлива с воздухом и создать устойчивую зону обратных токов за срезом горелки без теплового воздействия на противоположную стенку.

Для предварительной оценки температуры элементов стенки жаровой трубы использовались экспериментальные зависимости [5], которые были применены для оценки теплового состояния колец жаровой трубы.

Выполнен расчёт температуры стенки на номинальном режиме работы двигателя.

Температуру стенки наиболее часто определяют по формуле

$$\frac{T_w - T_x}{T_\delta - T_x} = \frac{1}{1 + \frac{a_2}{a_1}}$$

где a_1 – коэффициент теплообмена со стороны горячего газа; a_2 – коэффициент теплообмена со стороны кольцевого канала; T_x – температура охлаждающего воздуха; T_δ – температура газа в пограничном слое; T_w – температура стенки жаровой трубы.

Используя известные зависимости [5] для определения a_1 , a_2 , T_δ и параметры двигателя, из термодинамического расчёта двигателя определены температуры колец жаровой трубы. В результате получено, что температура колец жаровой трубы в различных сечениях имеет значения в диапазоне от 600 до 807 °С.

Элементы жаровой трубы изготавливаются из материала ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП-648). В соответствии с техническим заданием (ТЗ) температура стенок жаровой трубы должна быть не более 850 °С, а деталей, работающих на устойчивость, не более 800 °С.

Таким образом, расчётные оценки температуры стенки жаровой трубы двухзонной камеры сгорания двигателя НК-14СТ-10 показывают, что уровень температур близок к предельно допустимым значениям, но соответствует ТЗ.

Гомогенные горелки с лопаточными завихрителями и подачей топлива мелкими отверстиями через полые лопатки

обеспечили следующие экологические характеристики:

– выбросы оксидов азота NO_x на номинальном режиме, приведённые к условному содержанию кислорода в выхлопных газах, равному 15 %, составляли 65...75 мг/нм³, что в 2 раза ниже, чем у штатной однозонной камеры сгорания традиционного типа, и существенно ниже предельного уровня по ГОСТ 28775-90 ($\text{NO}_x < 150$ мг/нм³);

– на выбранном варианте горелок полнота сгорания на основных режимах превышает 99 %.

Состояние материальной части камеры сгорания после опытных испытаний в составе двигателя удовлетворительное.

После доводки в опытном производстве были заказаны и изготовлены на серийном предприятии комплекты камер сгорания. При изготовлении горелок основного контура из-за особенностей технологического процесса в серийном производстве были получены заниженные пропускные способности воздушных каналов горелок и увеличенная дальнобойность струй продуктов сгорания на выходе из горелок.

Анализ причин занижения пропускной способности горелок выявил следующее: с целью упрощения изготовления коллекторы раздачи топливного газа в горелках были выполнены не в виде хорошо обтекаемых полых лопаток с малым коэффициентом сопротивления, а в виде тел с большей площадью поперечного сечения и большим аэродинамическим сопротивлением. В качестве компенсации для уменьшения гидравлического сопротивления воздушного тракта горелок были доработаны завихрители на выходе из горелок.

Камеры сгорания с доработанными горелками основного контура проходили испытания в натурных условиях в составе двигателей в опытной эксплуатации для апробации технологии серийного изготовления.

При возврате двигателей на ремонт при внешнем осмотре жаровой трубы за-

фиксированы тепловые дефекты (рис. 4), в том числе следы перегрева на внутренней секции жаровой трубы против мест расположения горелок основного контура.

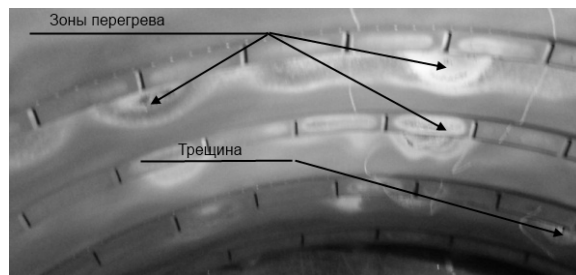


Рис. 4. Следы перегрева внутреннего кожуха напротив горелок основного контура

У двухзонных камер сгорания разработанной конструкции недостатком является расположение гомогенных горелок основного контура под углом к оси двигателя. Поток топливно-воздушной смеси с фронтом пламени направлен не вдоль стенки, а под некоторым углом к поверхности. При этом он разрушает защитный слой охлаждающего воздуха и перегревает стенки жаровой трубы (рис. 4).

Схема двухзонной камеры сгорания предполагает повышенные требования к параметрам гомогенных горелок основного контура. Отклонение дальнобойности струи ТВС с фронтом пламени нарушает структуру теплового воздействия на стенки жаровой трубы. Преобладающим становится конвективный поток тепла к стенке со стороны горячих газов, который превышает тепловой топок за счёт излучения пламени ($q_{л.г.}$). В такой ситуации общепринятые зависимости по определению теплового состояния колец жаровой трубы не могут быть применены.

Таким образом, задача обеспечения допустимой в соответствии с ТЗ температуры стенок жаровой трубы в первую очередь сводится к задаче обеспечения оптимальной структуры потока рабочей среды во внутренней полости жаровой трубы, в т.ч. в зоне расположения горелок.

Библиографический список

1. Шляхтенко, С.М. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей [Текст]: учеб. для вузов / В.М. Акимов, В.И. Бакулев; под ред. С.М. Шляхтенко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1987. - 568 с.

Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А Лефевр; пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 566 с.

2. РТМ 108.022.11-83. Установки газотурбинные и парогазовые. Расчёт и

проектирование камер сгорания [Текст] / М.: НПО ЦКТИ, 1984. - 95 с.

3. Борщанский, В.М. Анализ возможных конструкторских решений при создании камер сгорания для обеспечения высоких экологических характеристик конвертированных ГТУ [Текст] // Двигатель. -2009. -№ 4 (64). -С. 65-71.

4. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике [Текст] / [В.С. Авдудевский и др.]; под ред. В.К. Кошкина. - М.: Оборонгиз, 1960. - 390 с.

THERMAL STATE OF COMBUSTOR CAN ELEMENTS

© 2013 O. V. Grechishnikov, I. I. Ostapets, A. D. Roslyakov, Yu. I. Tsybizov

Open Joint Stock Company "KUZNETSOV", Samara

Materials for providing the thermal state of the elements of a two-staged gas turbine combustion chamber for terrestrial applications are presented. The factors that affect the temperature of combustor can rings are analyzed. A significant influence of flow characteristics and range of burners in the main loop on the combustor can wall temperature is shown and it is also shown that the task of ensuring acceptable combustor can wall temperature in accordance with the TOR is reduced, first of all, to the task of providing an optimum structure of the flow of fluid in the inner cavity of the combustor can.

Systems of combustor can cooling, two-staged combustion chamber, burner flow characteristics.

Информация об авторах

Гречишников Олег Валерьевич, инженер, ОАО "Кузнецов". E-mail: gelo1571@mail.ru. Область научных интересов: газовая динамика, гидравлика, вопросы горения и экология.

Остапец Иван Иванович, начальник отдела 3 СКБ, ОАО «Кузнецов». Область научных интересов: газовая динамика, гидравлика, вопросы горения и экология.

Росляков Алексей Дмитриевич, доктор технических наук, главный специалист, ОАО "Кузнецов". E-mail: roslykov_ad@mail.ru. Область научных интересов: вопросы теплопередачи и горения, газовая динамика течений в каналах, экология.

Цыбизов Юрий Ильич, доктор технических наук, начальник отдела 3, ОАО «Кузнецов». Область научных интересов: газовая динамика сверхзвуковых течений в каналах и соплах, вопросы горения и теплопередачи, экология.

Grechishnikov Oleg Valeryevich, engineer, Open Joint Stock Company "Kuznetsov". E-mail: gelo1571@mail.ru. Area of research: gas dynamics, hydraulics, problems of combustion and the environment.

Ostapets Ivan Ivanovich, Open Joint Stock Company "Kuznetsov" Head of Department 3, Special Design Bureau. Area of research: gas dynamics, hydraulics, problems of combustion and the environment.

Roslyakov Alexey Dmitryevich, Doctor of Science (Engineering), Chief Specialist, Open Joint Stock Company "Kuznetsov". E-mail: roslykov_ad@mail.ru. Area of research: problems of heat transfer and combustion, gas dynamics of flows in channels, ecology.

Tsybizov Yuri Ilyich, Doctor of Science (Engineering), Head of Department 3, Open Joint Stock Company "Kuznetsov". Area of research: gas dynamics of supersonic flows in channels and nozzles, combustion and heat transfer issues, ecology.