

УДК 621.438

ГОМОГЕННЫЕ ГОРЕЛКИ ДВУХЗОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ

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

ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара

Приведены материалы по обеспечению расходных характеристик горелок двухзонных камер сгорания ГТУ наземного применения. Проанализированы факторы, которые влияют на расходные характеристики горелок, в том числе рассмотрена структура потока рабочего тела в камере закручивания горелки. Показано существенное влияние на расходные характеристики особенностей конструкции и режимов работы горелок в составе двигателя. На горелках с тангенциальным входом воздуха в полость горелки выявлено влияние перепада давления на расходную характеристику.

Горелки основного контура, двухзонные камеры сгорания, расходные характеристики горелок.

В мире установилась тенденция внедрения «сухих» методов снижения NO_x путём применения камер сгорания с организацией низкотемпературного горения бедных предварительно перемешанных топливовоздушных (гомогенных) смесей. Известно, что бедная гомогенная смесь имеет в условиях ГТУ низкую устойчивость относительно срыва пламени и виброгорения. При одинаковом составе смеси по коэффициенту избытка воздуха α и прочих равных условиях диффузионные пламена обеспечивают горение с большей полнотой, чем гомогенные.

Для сохранения требуемой полноты сгорания при работе на бедной гомогенной смеси необходимо увеличить время (t_{np}) её пребывания в зоне горения по сравнению с диффузионной смесью. Однако увеличение t_{np} на практике означает увеличение поверхностей жаровой трубы, которые необходимо охлаждать.

При традиционном конвективно-плёночном охлаждении (применяемом на всех камерах сгорания семейства «НК») не менее 25% воздуха остаётся в пограничном слое, «замораживая» и без того низкотемпературные продукты сгорания гомогенной смеси [1].

Таким образом, для реализации концепции низкотемпературного сжигания топлива необходимо организовать

рабочий процесс, решив следующие проблемы:

- обеспечить нужный состав смеси в горелках и тщательное перемешивание топлива с воздухом без проскока пламени, при допустимом уровне гидравлических потерь;

- поддержать температуру пламени $T_{пл} = 1800...1900$ К в рабочем диапазоне мощностей ГТУ; малому значению температуры будут соответствовать малые выбросы NO_x и большие проблемы по выбросам CO , CH и устойчивости горения; задача поддержания температуры пламени в узком диапазоне решается в основном путём усложнения системы регулирования двигателя;

- для решения проблем снижения выбросов CO и CH необходимо иметь так называемые максимально допустимые «горячие» стенки жаровой трубы; требуется внедрение нетрадиционных систем охлаждения, по которым требуется создание и совершенствование научно обоснованных методик проектирования;

- отработать на малых и переходных режимах эффективную «огневую» поддержку гомогенному пламени путём организации дежурного (как правило, диффузионного) пламени.

Перечень и содержание перечисленных проблем свидетельствуют об их сложности, взаимозависимости и противоречивости. Большую часть из них мож-

но решить только в натуральных (по давлению, расходу и температуре воздуха на входе в камеру) условиях. В то же время для эффективного проведения испытаний в натуральных условиях необходимы аналитические оценки параметров газодинамических, кинетических, тепловых и других процессов.

Из теории горения известно, что существует диффузионное, или гетерогенное, горение и гомогенное, или горение заранее подготовленной топливовоздушной смеси (ТВС). Примером диффузионного горения является горение газообразного топлива, вводимого в горелку отдельно от воздуха (окислителя). Такое горение имеет место в однозонных, одноконтурных камерах сгорания двигателей НК-12СТ и НК-14СТ. Фронт пламени при диффузионном горении образуется на поверхности взаимодействия горючего и окислителя. В зонах поверхности диффузионного горения имеет место коэффициент избытка воздуха, равный единице с небольшим отклонением по толщине фронта пламени, и температура пламени в этих зонах максимальная. При форсировании горелки фронт пламени удлиняется, а при увеличении подачи воздуха в зону горения – укорачивается.

Если время физической стадии процесса горения оказывается меньшим, чем время, необходимое для протекания химических стадий, то такой процесс протекает в кинетической области и горение называют гомогенным. Примером такого процесса является случай введения в зону горения заранее подготовленной ТВС. Процесс гомогенного горения может протекать с переизбытком окислителя при меньших температурах в зоне горения. При этом необходимо учитывать особенности воспламенения и стабилизации процесса гомогенного горения.

Основные принципы решения проблемы снижения выбросов NO_x при горении углеводородных топлив следуют из особенностей механизма их образования, в том числе:

– процесс образования NO_x протекает со значительной скоростью, когда температура пламени превышает 1850 К: при таких температурах реализуется кинетический механизм окисления азота;

– кроме кинетики окисления азота, выбросы NO_x определяются ещё двумя основными факторами: процессами смешения и влияния процессов смешения на условия протекания химических реакций; первый фактор влияет через изменение относительного объёма стехиометрических областей в пламени, которые при этом размываются; уменьшаются температура пламени и скорость химических реакций; в зоне горения поверхность среды (с составом, близким к стехиометрическому составу) сильно искривлена и случайным образом пульсирует в пространстве;

– выбросы NO_x прямо пропорциональны времени пребывания ТВС в области высоких температур; при обеднении гомогенной смеси до $\alpha > 1,8$ и, соответственно, снижения $T_{пл} < 1800$ К время пребывания $\tau_{пр}$ не оказывает существенного влияния на образование NO_x ;

– увеличение неравномерности ТВС при $\alpha > 1,3$ приводит к росту интенсивности образования NO_x , а при $0,7 \leq \alpha \leq 1,2$ – к падению;

– концентрация NO_x в продуктах сгорания газа зависит от уровня и распределения максимальных температур в горелках и концентрации свободного кислорода в зоне этих температур; с уменьшением размеров горелок и их производительности уменьшается выброс NO_x вследствие уменьшения максимальных температур в ядре факела из-за более частого чередования горячих и холодных зон;

– подача предварительно перемешанной ТВС в зону горения может в 10 раз уменьшить выброс NO_x по сравнению с отдельной подачей.

Методы снижения выброса монооксида углерода (СО) при горении углеводородных топлив основаны на некоторых

физико-химических особенностях его образования:

– обеспечение состава смеси в зоне горения ближе к $\alpha = 1,1 \dots 1,3$; если состав смеси в зоне горения отличается от вышеизложенного, то необходимо организовать диффузионное горение;

– увеличение объёма зоны горения и времени пребывания в ней;

– уменьшение расхода воздуха на плёночное охлаждение, чтобы не «замораживать» продукты горения у стенок жаровой трубы.

Как следует из вышеизложенного, мероприятия по снижению NO_x и CO концентрирующие, т.е. необходимо выбирать оптимальное их соотношение.

Разрешить некоторые противоречия можно, разделив объём камеры сгорания на две зоны, в которых можно обеспечить оптимальные условия для протекания тех или иных процессов. Однако при создании газотурбинных установок для наземного применения в рамках конверсии на базе авиационных двигателей возникают труднопреодолимые проблемы при разрешении противоречий.

Анализ представленных конструктивных решений модернизации сборочных единиц проточного тракта конвертированных ГТД показывает, что обычно разработчики стараются максимально использовать узлы и детали этого тракта базового авиадвигателя [2]. В то же время камеры сгорания, системы управления и подачи топлива всех конвертированных ГТД имеют ряд принципиальных отличий от базовых узлов и систем, и поэтому требуют проведения значительного объёма доработок для следующих вариантов:

- в ГТД в системе ГТУ для ГПА используется в качестве топлива природный газ;

- в ГТД в системе ГТУ для электростанций в качестве основного топлива обычно используется природный газ, а в качестве резервного – жидкое топливо (чаще всего дизельное топливо);

- системы управления и подачи топлива при любом из вариантов применяемых топлив отличаются программами управления, номенклатурой регулируемых параметров, перечнем критических и аварийных ситуаций, требующих реагирования системой автоматического управления.

Большинство отечественных и зарубежных авиадвигателей третьего и четвертого поколений (и выполненных на их базе конвертированных ГТД) имеют кольцевые или трубчато-кольцевые камеры сгорания, в том числе двигатель НК-12МВ, на базе которого создавался двигатель НК-12СТ и, в дальнейшем, двигатель НК-14СТ, и двигатель НК-32, на базе которого созданы двигатели НК-36СТ и НК-37.

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.

Для минимизации объёма переделок камеру сгорания можно разместить под углом или применить выносную камеру, но при этом сильно изменяется силовая схема двигателя и появляются дополнительные гидравлические потери на 2...3 % на соответствующем участке проточного тракта. Кроме того, такая схема меньше подходит для создания высокотемпературной ГТУ из-за увеличения сложности формирования требуемой эпюры температуры газа перед турбиной.

В настоящее время большинство разработчиков применяют двухзонные камеры сгорания. Следует учитывать, что двухзонные камеры сгорания с последовательными зонами, с которых начиналось внедрение камер такого типа, также отличаются увеличенной длиной, что усложняет процесс конвертации.

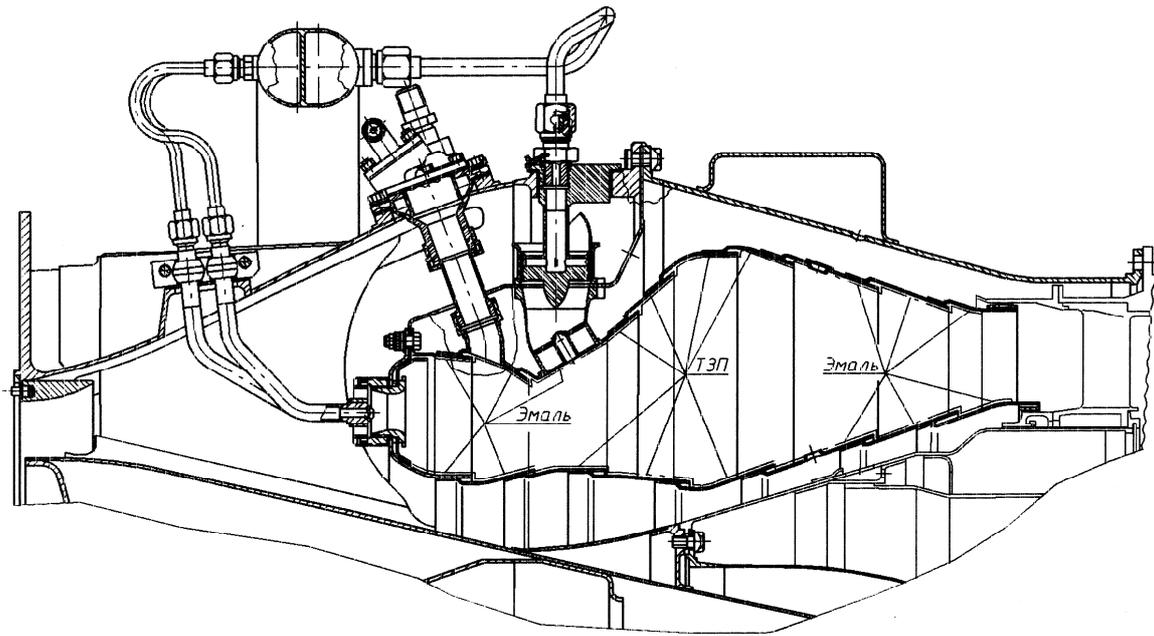


Рис. 1. Схема двухзонной камеры сгорания двигателя НК-14СТ

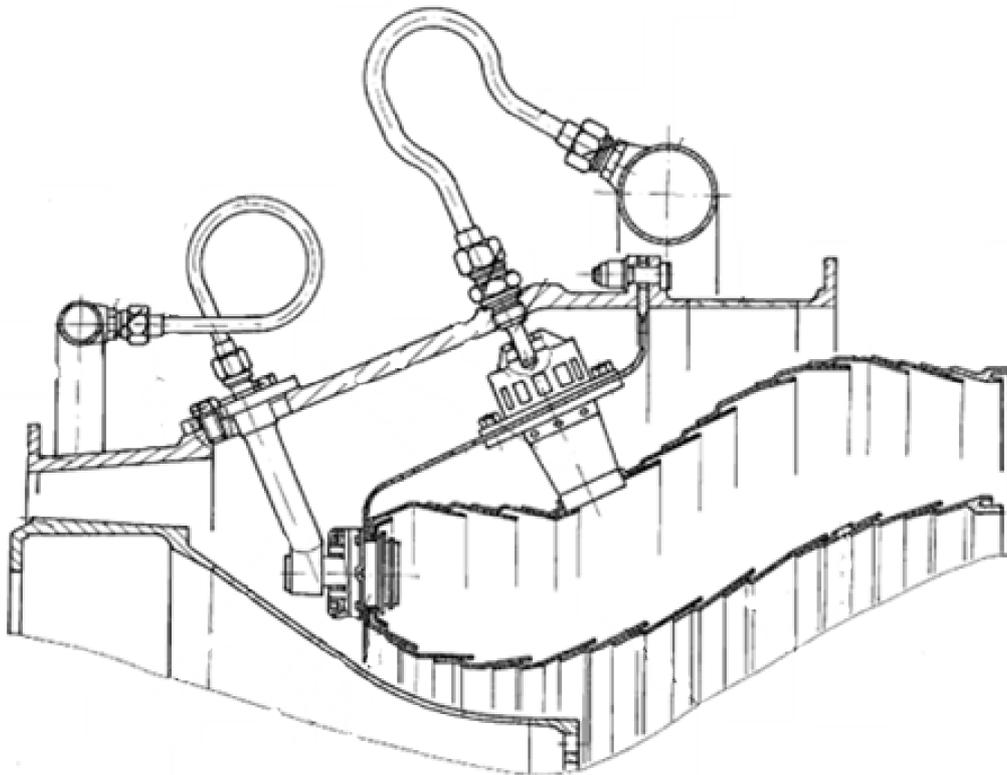


Рис. 2. Схема двухзонной камеры сгорания двигателя НК-36СТ

Двухзонные камеры сгорания спроектированы без изменения силовых элементов базовых двигателей [1]. На рис. 1 и 2 приведены схемы двухзонных камер сгорания двигателей НК-14СТ-10 и НК-36СТ. У разработанных конструкций камер сгорания гомогенные горелки основного контура расположены под углом к оси двигателя. На рис. 3 приведена схема горелки основного контура. На рис. 4 приведены эпюры скоростных напоров на выходе из горелок с разной степенью крутки.

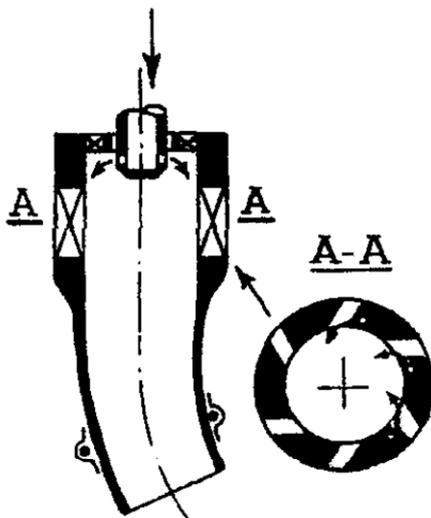


Рис. 3. Схема горелки основного контура

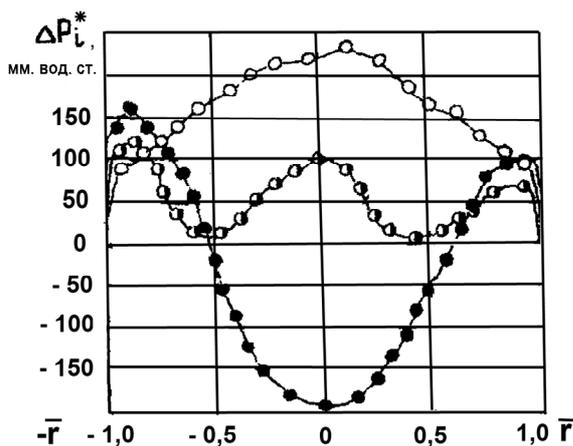


Рис. 4. Эпюры скоростных напоров на выходе из горелок с разной степенью крутки:

- - слабо закрученная струя;
- ◐ - умеренно закрученная струя;
- - сильно закрученная струя

Характер течения изменялся путём увеличения или уменьшения параметра крутки потока изменением площадей тангенциальных пазов и каналов подвода воздуха на входе в горелку вдоль оси. При увеличении степени крутки образуются зоны обратных токов. Возвратные течения снижают пропускную способность горелок и тем самым меняют состав топливно-воздушной смеси.

Выполнены расчётные и экспериментальные оценки уменьшения пропускной способности при образовании зоны обратных токов.

Закрученные струи характеризуются тремя составляющими скорости: радиальной C_r , аксиальной C_z и тангенциальной C_θ . По характеру распределения аксиальной скорости закрученные струи классифицируются следующим образом [3]. Слабо закрученная струя – в любом сечении аксиальная составляющая скорости имеет на оси максимальное значение. Умеренно закрученная струя характеризуется «провалом» аксиальной составляющей по направлению к оси струи. Обратного течения по оси нет, профиль имеет M-образную форму. Сильно закрученные струи характеризуются наличием зоны обратных токов. Существуют сомкнутые и разомкнутые сильно закрученные струи.

Представление о степени закрученности струи даёт параметр крутки. Широкое распространение получил параметр крутки, определяемый выражением

$$S = \frac{M}{K \cdot R},$$

где M – момент количества движения струи, постоянный вдоль струи; K – количество движения струи; R – характерный размер, чаще всего радиус выходного сопла.

Значения M и K находят интегрированием с использованием аксиальных и тангенциальных скоростей в каком-либо сечении струи (чаще всего в цилиндрическом выходном сопле) из выражений

$$M = 2\rho \int_0^R r \cdot r^2 \cdot c_z \cdot c_o \, dr;$$

$$K = 2\rho \int_0^R r \cdot c_z^2 \cdot r \, dr,$$

где c_z , c_o - аксиальная и тангенциальная составляющие вектора скорости, ρ - плотность, r - текущий радиус.

Физически более строгое определение закручивающих способностей завихрителей по их геометрическим элементам предложил Г.Н. Абрамович [4]. Предложенная им для расчёта центробежных форсунок безразмерная характеристика имеет вид

$$A = \frac{R \cdot c_z}{R_c \cdot c_o},$$

где R - расстояние от оси камеры закручивания до оси входного канала круглого сечения радиуса r_{ex} или до средней линии ширины канала при прямоугольном сечении; R_c - радиус выходного сопла; c_z и c_o - средние по расходу аксиальная и тангенциальная составляющие вектора скорости.

Как указывалось выше, сильно закрученные струи, к которым относятся струи в вихревых элементах с тангенциальным вводом рабочего тела, характеризуются наличием зоны обратных токов [3].

Качественная картина течения в вихревых элементах в основных чертах сводится к следующему. Рабочее тело, поступая в камеру закручивания по тангенциальным каналам, приходит в интенсивное вращательное движение, занимая в камере закручивания некоторое кольцевое, вообще говоря, переменное по её длине сечение. Двигаясь вдоль камеры закручивания, этот поток поступает в выходное сопло и в дальнейшем истекает в окружающую среду. Эта периферийная область течения получила название свободного или квазипотенциального потока. Наряду с этим, в центральной части вихревого элемента наблюдается явно выраженная область обратного движения газа

(приосевая зона обратных токов). Центральный обратный ток, в общем случае, распространяется до торцевой стенки камеры закручивания и, отражаясь от неё, возвращается вместе с периферийным потоком в выходное сопло. Этот поток можно назвать спутным потоком. Площадь канала, занимаемая центральным обратным током, остается по длине камеры приблизительно постоянной, скорости же заметно уменьшаются, так как часть газов центрального тока в каждом сечении ответвляется, поступая в спутный поток.

Обратное течение газов берёт своё начало за пределами вихревого элемента. Поэтому общий расход истекающей массы больше массы рабочего тела на величину этой присоединённой массы центрального тока. Рециркуляционный (или циркуляционный) поток можно считать замкнутым течением, имеющим материальный обмен с периферийным потоком только из-за наличия общей турбулентности. Радиальные скорости в вихревом элементе невелики и достигают заметной величины только на срезе выходного сопла. Центральный обратный ток называют также вынужденным или вторичным вихрем. В вопросе о возникновении обратных токов определяющее значение, по видимому, следует придать турбулентному обмену моментом количества движения. Только наличием сильного сцепления (турбулентная вязкость) между частицами газа можно объяснить как возникновение, так и поддержание развитого вихревого движения в центральной части потока.

Как показывает эксперимент и расчёт, коэффициент расхода вихревого элемента зависит от π_m - отношение давления p_{ex}^* в резервуаре (давление торможения) к давлению внешней среды p_n (при испытании горелки на установке и при истечении потока в атмосферу) возрастает с увеличением значения π_m . Однако при некотором значении $\pi_m = \pi_{mкр}$ этот рост прекращается. Данный режим называется критическим [3].

В вихревом элементе поток, как известно, занимает кольцевое сечение, характеризуемое коэффициентом заполнения φ : отношением площади кольца к площади всего сечения. В сечении входных каналов камеры закручивания у втекающих струек осевая составляющая скорости отсутствует, поэтому коэффициент заполнения φ в этом сечении больше, чем в сопле, то есть радиус внутренней границы потока на торцевой стенке камеры закручивания r_{mT} меньше, чем этот радиус r_m в сопле. Возмущения внешней среды могут проникать в сопло и камеру закручивания через центральную часть вихревого элемента. Таким образом, критическим сечением будет сечение входных каналов. Однако и здесь скорость потока изменяется по радиусу от максимальной на внутренней границе потока до минимальной на стенке камеры закручивания. Изменение скорости потока по радиусу будет известно, если будет известно, как изменяется по радиусу в данном сечении давление и плотность в потоке. Эта зависимость определяется уравнением

$$p = p_m \left[1 + \left(p_m^{k-1/k} - 1 \right) \left(1 - \frac{r_{mr}^2}{r^2} \right) \right]^{k/k-1};$$

$$r = r_m \left[1 + \left(p_m^{k-1/k} - 1 \right) \left(1 - \frac{r_{mr}^2}{r^2} \right) \right]^{1/k-1}.$$

На рис. 5 приведена зависимость пропускной способности $B = G\sqrt{T^*}/p$ от давления воздуха на входе в горелку (соотношение $P^*_{вх}/P_n$).

При испытании горелок основного контура на установках выявлено, что зависимость пропускной способности B от давления воздуха на входе имеет переход с одной линии характеристики на другую (примерно меньшую на 15 %). Это явление можно объяснить тем, что при увеличении режима увеличивается степень крутки потока и изменяется структура зоны обратных токов.

Возвратные течения снижают пропускную способность горелок и тем са-

мым изменяют состав ТВС и, как следствие, ухудшают экологические характеристики, тепловое состояние элементов горелок и жаровой трубы и другие основные характеристики камеры сгорания.

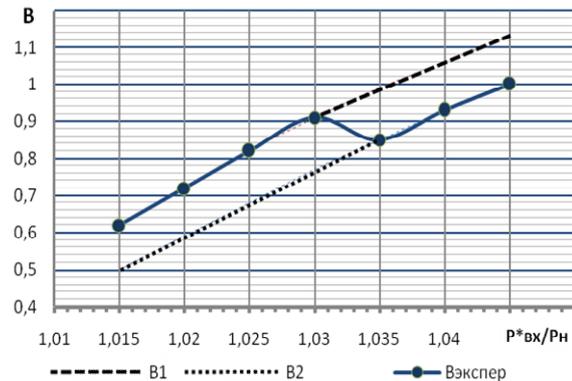


Рис. 5. Зависимость пропускной способности $B = G\sqrt{T^*}/p$ от относительного давления воздуха на входе в горелку (соотношения $P^*_{вх}/P_n$)

Режим перехода расхода воздуха с одной характеристики на другую находится вблизи рабочего режима работы камеры сгорания в составе двигателя. Это явление необходимо устранять изменением зоны обратных токов путём изменения геометрической характеристики горелки.

Библиографический список

1. Постников, А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ [Текст] / А.М. Постников. – Самара: СНЦ РАН, 2002. – 286 с.
2. Борщанский, В.М. Анализ возможных конструкторских решений при создании камер сгорания для обеспечения высоких экологических характеристик конвертированных ГТУ [Текст] / В.М. Борщанский // Двигатель. – 2009. – № 4 (64). – С. 65-71.
3. Карышев, Ю.Д. Газовые вихревые элементы [Текст] / Ю.Д. Карышев. – Самара: СамИИТ, 2001. – 157 с.
4. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1. [Текст] / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1991. – 600 с.

HOMOGENEOUS BURNERS OF TWO-STAGED COMBUSTION CHAMBERS

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

«KUZNETSOV» plc, Samara

The paper presents materials to provide the metering characteristics of two-staged combustion chambers of gas turbines of terrestrial application. The factors that affect the flow characteristics of burners are analyzed, including the working fluid flow pattern in the vortex chamber of the burner. Significant influence of design features and operating modes of the burners in the engine on the flow characteristics is shown. Flow characteristics of the burners with tangential air inlet into the burner cavity are shown to be influenced by the pressure differential.

Burners of the main loop, 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, «Kuznetsov» plc. E-mail: gelo1571@mail.ru. Area of research: gas dynamics, hydraulics, issues of combustion and the environment.

Ostapets Ivan Ivanovich, «Kuznetsov» plc, head of department 3, Serial Design Bureau. Area of research: gas dynamics, hydraulics, issues of combustion and the environment.

Roslyakov Alexey Dmitryevich, «Kuznetsov», chief specialist, doctor of technical science, «Kuznetsov» plc. 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 technical science, head of department 3, «Kuznetsov» plc. Area of research: gas dynamics of supersonic flows in channels and nozzles, combustion and heat transfer issues, ecology.