

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Мингазов Б.Г., Королёв А.Н., Меркушин В.К.,

Стародубцев В.В., Низамутдинов Р.М.

Казанский государственный технический университет, г. Казань,

ОАО КПП "Авиамотор", г. Казань

Создание современных КС невозможно без ясного представления о внутрикамерных процессах. Наиболее сложными в камере сгорания являются процессы смешения, которые определяют её основные характеристики. Несмотря на многочисленные исследования, в настоящее время отсутствуют надежные инженерные методики расчета процессов перемешивания, как для процессов подготовки топливовоздушной смеси, так и для обеспечения требуемого температурного поля продуктов сгорания на выходе из КС. Усложнение конструкции камеры сгорания и повышение стоимости экспериментальных исследований вынуждают всё больше внимания уделять моделированию процессов горения и внедрению элементов автоматизированного проектирования КС на ЭВМ.

Цель проведения данного исследования заключалась в проверке полученных на основе расчета по физико-математической модели камеры сгорания рекомендаций по перераспределению "вторичного" воздуха, подаваемого через отверстия в зоне смешения, которые называются "карманами". Исследования проводились на модельном отсеке камеры сгорания двигателя НК-16-18СТ. Кроме того, в отсеке КС с измененной подачей "вторичного" воздуха, выполненной по рекомендациям, проводились испытания газоздушных горелок с карбюраторными втулками. Проведенные исследования позволили оценить действенность рекомендаций и их влияние на процессы горения, на образование окислов азота NO_x в КС и на формирование температурного поля продуктов сгорания на выходе из камеры.

Предварительный расчет на ЭВМ основных параметров камеры сгорания, проведенный на основе физико-математической модели процесса горения в ней [2], позволил выбрать варианты конструкций отсеков КС для целенаправленного проведения экспериментов.

Первый вариант отсека КС (базовый) по конструкции жаровой трубы и используемым газоздушным горелкам соответствовал серийной камере, установленной на двигателе НК-16-18СТ (рис. 1,а).

Во втором варианте исследуемого отсека было осуществлено перераспределение расхода "вторичного" воздуха по длине КС за счет ликвидации "карманов" в зоне смешения. Затем в наружной и внутренней

обечайках жаровой трубы были выполнены по два пояса отверстий. Суммарная площадь отверстий двух поясов в обечайках равна площади проходного сечения срезаемых с этих обечаек "карманов", причем эта площадь распределена пополам между этими поясами отверстий. Газовоздушные горелки, используемые во втором варианте отсека камеры сгорания, были идентичны горелкам первого варианта (рис.1,б).

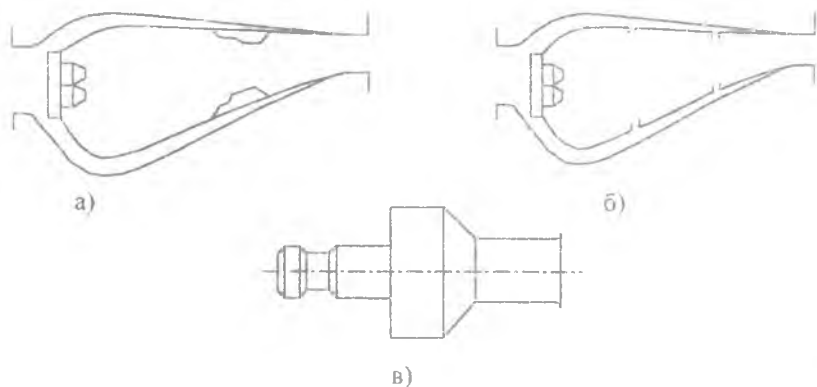


Рис.1. Схемы испытанных вариантов отсеков КС: а - вариант №1 (базовый), б - вариант №2, в - схема модифицированной горелки

Третий вариант отсека КС имел жаровую трубу, аналогичную трубе второго варианта. Отличие этого варианта заключалось в использовании в отсеке газовоздушных горелок с карбюраторными втулками (рис.1,в). Кроме того, внутрь канала подачи топливного газа форсункой были установлены шнековые завихрители.

Согласно исследованиям [1], перераспределение расхода "вторичного" воздуха в зону горения КС снижает температуру продуктов сгорания в жаровой трубе, сокращая область высоких температур, и, тем самым, изменяя условия, при которых образуются "термические" NO_x .

По графикам на рис. 2 хорошо видно, что применение перераспределения "вторичного" воздуха по длине КС во втором варианте отсека позволило снизить эмиссию NO_x на 22%, по сравнению с первым (базовым) вариантом, при его работе на номинальном режиме ($\alpha \approx 4,6$) и почти на 50% - на режиме работы отсека, позволяющем получить на выходе максимальные значения температур (при $\alpha \approx 2,7$).

Однако такое применение подачи воздуха в камере может привести к "переохлаждению" зоны горения и к частичному "замораживанию" химических реакций окисления топлива, что, в свою очередь, приведет к

снижению значения полноты сгорания топлива η . Такое снижение полноты сгорания топлива в КС может привести к увеличению эмиссии CO и CH.

Для определения влияния перераспределения "вторичного" воздуха по длине КС на ее полнотные характеристики были проведены расчёты, позволяющие получить значения коэффициента полноты сгорания топлива η , а также зависящие от него значения эмиссии окиси углерода CO и несгоревших углеводородов CH.

Полнота сгорания топлива определялась теоретическим способом по уравнению теплового баланса, с учётом замеренных значений температуры на выходе из экспериментальных отсеков КС

$$\eta_T = \frac{(1 + \alpha_K L_0)(i_T - i_B)}{Hu} \quad (1)$$

где $i_T = C_p T_T$, $i_B = C_p T_B$ - энтальпия продуктов сгорания и энтальпия воздуха, Hu - низшая теплотворная способность топлива (для смеси газов пропан-бутан, $Hu=46011.9$ кДж/кг), α_K - коэффициент избытка воздуха в КС, L_0 - стехиометрический коэффициент (для смеси газов пропан-бутан $L_0=15.5$).

На рис. 3 представлены графики зависимости коэффициента полноты сгорания топлива, рассчитанного теоретически способом, от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{кс}$ для трех вариантов экспериментальных отсеков. По графику видно, что значения полноты сгорания топлива для исследованных вариантов отсеков отличаются друг от друга.

Неадекватное протекание кривых полнотных характеристик объясняется различиями в организации внутрикамерных процессов в них, что, в свою очередь, обусловлено особенностями конструкций жаровых труб, применяемых в конкретном варианте.

Наличие двух максимумов на кривой первого варианта отсека со-

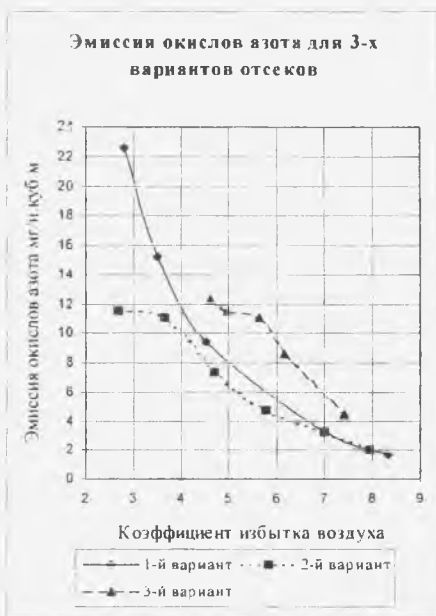


Рис.2 График зависимости эмиссии окислов азота от коэффициента избытка воздуха в камере



Рис.3. Зависимость полноты сгорания топлива от коэффициента избытка воздуха в отсеке камеры сгорания

гласуется с имеющимися данными для камер сгорания двигателей семейства НК [2]. Эти данные были получены при использовании в указанных двигателях газообразного топлива взамен жидкого. Такое протекание полнотной кривой объясняется наличием нескольких зон в КС, где создаются благоприятные условия для горения, что, в свою очередь, приводит к значительному повышению температуры.

Применение второго варианта отсека, конструкция которого позволяет понизить температуру в зоне горения КС, способствует снижению уровня эмиссии NO_x . Однако приводит к падению значения полноты сгорания в КС, менее 0.9, что может повлечь за собой повышение выбросов окиси углерода CO и несгоревших углеводородов CH на выходе из КС. Поэтому на основе рассчитанных значений полноты сгорания была проведена оценка значений эмиссии CO и CH для трёх вариантов исследованных отсеков.

На рис. 4 представлены графики зависимости выбросов $\text{CO}+\text{CH}$ от коэффициента избытка воздуха в камере сгорания.

Из графика видно, что эмиссия окиси углерода и несгоревших углеводородов модифицированных отсеков не сильно отличается от базового варианта, и её характер вполне согласуется с данными ряда исследований, представленных в работах [2,3].

Следовательно, перераспределение "вторичного" воздуха по длине КС позволило уменьшить эмиссию окислов азота без значительного изменения величины выбросов CO и CH .

Зависимость эмиссии CO+УНС от коэффициента избытка воздуха.



Рис.4. График зависимости эмиссии CO и СН от общего коэффициента избытка воздуха в отсеке камеры

Однако, перераспределение "вторичного" воздуха по длине КС существенным образом изменило температурное поле на выходе из модифицированных отсеков. На рис. 5 представлены радиальные температурные эпюры, соответствующие номинальному режиму ($\alpha \approx 4,6$) работы КС двигателя НК-16-18СТ.

Анализируя данные температурные эпюры, можно отметить, что при работе КС на номинальном режиме средние значения температур для всех трех вариантов отсеков практически не изменились. Для первого (базового) варианта отсека КС величина средней радиальной температуры имеет значение равное 705 К, для второго варианта отсека она равна 710 К, а для третьего варианта отсека можно отметить небольшое увеличение этой температуры до 744 К.

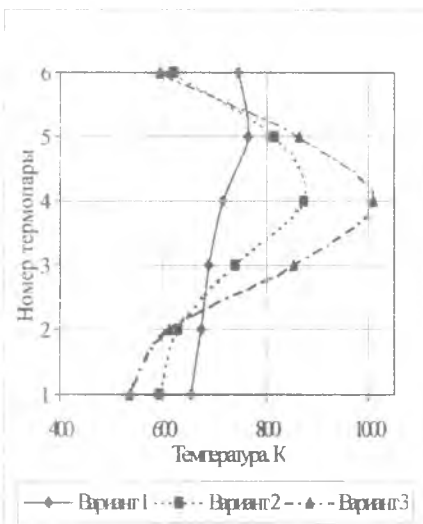


Рис.5. Радиальные температурные эпюры для номинального режима работы двигателя

Учитывая результаты проведенного позже термометрирования стенок камеры сгорания, в целом можно утверждать, что пере-

распределение "вторичного" воздуха по длине КС с точки зрения нагрева внутренней и наружной обечаек жаровой трубы, как и ожидалось, дало положительный эффект. Второй вариант отсека КС обеспечил приемлемую максимальную температуру в ядре потока (≈ 875 К) и низкие температуры у внутренней (≈ 590 К) и наружной (≈ 620 К) обечаек жаровой трубы. Третий вариант отсека камеры на номинальном режиме работы показал более высокие значения температуры продуктов сгорания в ядре потока (≈ 1010 К) и низкие значения температур около внутренней (≈ 530 К) и наружной (≈ 590 К) обечаек жаровой трубы. Это можно объяснить тем, что зона горения формируется в камере сгорания ниже по потоку.

На рис. 6 показаны относительные радиальные температурные эпюры для номинального режима работы КС двигателя. Анализируя эпюры, представленные на этом рисунке, можно отметить, что относительная температура первого (базового) варианта отсека камеры сгорания находится в диапазоне от 0,926 до 1,081. Диапазон, где расположена эпюра второго варианта отсека КС, находится в пределах от 0,834 до 1,1228, а эпюра третьего варианта отсека находится в диапазоне значений от 0,716 до 1,355.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что второй вариант отсека КС обеспечил температурное поле на выходе, которое наиболее отвечает термическим условиям работы внутренней и наружной обечаек жаровой трубы при приемлемых значениях максимальной температуры в ядре потока продуктов сгорания.

Кроме того, для каждого варианта конструкции отсека КС была рассчитана неравномерность температурных полей θ по следующей формуле:

$$\theta = \frac{T_{\text{макс}} - T_{\text{сред}}}{T_{\text{сред}} - T_{\text{вход}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{макс}}$ — максимальная температура продуктов сгорания, замеренная на

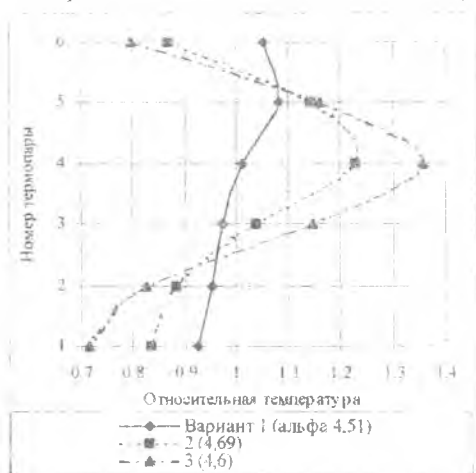


Рис.6. Радиальная эпюра максимальных температур (в относительном виде)

выходе из экспериментального отсека камеры. $T_{\text{сред}}$ – средняя температура продуктов сгорания на выходе из КС, $T_{\text{вход}}$ – температура на входе в отсек.

На рис. 7 представлены графики температурной неравномерности в зависимости от общего коэффициента избытка воздуха в камере сгорания для трех вариантов отсеков.

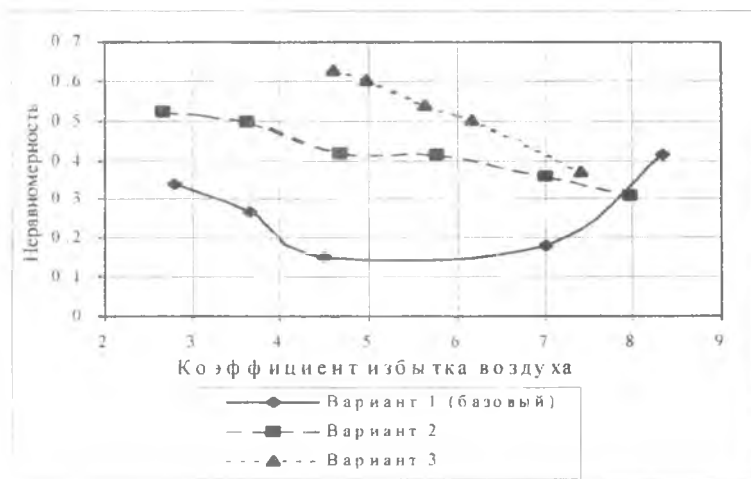


Рис.7. График зависимости неравномерности температуры от общего коэффициента избытка воздуха в отсеке камеры сгорания

По графикам видно, что третий вариант конструкции отсека КС имеет самые высокие значения температурной неравномерности. Величина неравномерности температурного поля, соответствующая номинальному режиму работы, для второго варианта отсека меньше на 35% по сравнению с третьим. Первый вариант отсека имеет самую низкую температурную неравномерность.

Однако несмотря на вышесказанное, неравномерность температурного поля второго варианта отсека КС можно улучшить путем перераспределения расхода "вторичного" воздуха по двум рекомендованным поясам отверстий за счёт изменения их диаметров и конструктивных мероприятий, направленных на увеличение пробивной способности струй воздуха.

Анализируя выполненную работу, можно отметить, что второй вариант конструкции жаровой трубы КС двигателя НК-16-18СТ позволит

улучшить характеристики горения. Применение в двигателе рекомендованной конструкции камеры сгорания сократит эмиссию окислов азота в окружающую среду без значительного увеличения эмиссии окиси углерода и несгоревших углеводородов. Кроме того, такая конструкция камеры даст возможность исключить разрушение кожухов жаровой трубы КС, обусловленное высокой температурой продуктов сгорания.

Таким образом, из проведённого исследования следует, что перераспределение "вторичного" воздуха по длине жаровой трубы камеры сгорания позволяет управлять рабочими процессами в ней и добиваться значительных результатов путём оптимизации внутрикамерных процессов.

Список литературы

1. Экспериментальное исследование и анализ перераспределения вторичного воздуха по длине КС на основе расчёта по физико-математической модели с использованием ЭВМ / Мингазов Б.Г., Королёв А.Н., Меркушин В.К., Стародубцев В.В., Низамутдинов Р.М. // Вест. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 3; Самар. гос. техн. ун-т. Самара. 2000. С.178.
2. Мингазов Б.Г. Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД / Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000. 168 с.
3. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 566 с.

КОНТАКТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СМАЗОЧНОГО СЛОЯ УПОРНЫХ ГРЕБНЕЙ КОСОЗУБЫХ ПЕРЕДАЧ МУЛЬТИПЛИКАТОРОВ МНОГОВАЛЬНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Горшенин К.И.
ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа», г. Казань

Осевые усилия, возникающие при работе колес с косыми зубьями воспринимаются подшипниками или упорными гребнями. Для упорных подшипников скольжения характерны большие габариты и значительные потери на трение, а упорные подшипники качения отличаются ограниченным ресурсом. Поэтому в последние годы широко применяются упорные гребни, воспринимающие эти осевые силы.

Примером использования упорных гребней в компрессоростро-