

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА ПО ДЛИНЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ 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.

*Казанский государственный технический университет,  
ОАО Конструкторско-производственное предприятие "Авиамотор",  
г. Казань*

Развитие газотурбинных двигателей (ГТД) на современном этапе определяют требования надёжности, экологии и экономичности их работы, которые, в свою очередь, в значительной степени зависят от совершенства конструкции и организации рабочего процесса в камере сгорания (КС) ГТД.

Рациональность конструкции КС обуславливается тем, насколько в ней правильно организовано устойчивое и высокоэффективное сжигание топлива, при минимальных потерях полного давления, равномерном температурном поле выходящих из камеры продуктов сгорания, при обеспечении высокой надёжности и долговечности работы ГТД.

Усложнение конструкции КС и повышение стоимости экспериментальных исследований вынуждают всё большее внимание уделять моделированию процессов горения и внедрению элементов автоматизированного проектирования КС. В настоящее время имеется ряд работ [1,2,3,4], посвящённых внутрикамерным процессам, но они касаются только отдельных их аспектов и не позволяют установить, в полной мере, связь между входными и выходными параметрами непосредственно с конструктивными элементами КС.

Цель данного исследования заключалась в нахождении оптимальной конструкции жаровой трубы КС, позволившей бы снизить эмиссию окислов азота и улучшить поля температур на выходе из КС, не ухудшая, при этом, надёжности камеры. Работа велась на основе рекомендаций, полученных при помощи ЭВМ на основе физико-математической модели (ФММ) и программы автоматизированной доводки камер сгорания [5].

Согласно исследованиям [5], для того чтобы понизить значение выбросов окислов азота, необходимо обеспечить такой процесс выгорания топлива, при котором распределение температуры по длине жаровой трубы будет иметь область высоких температур малой протяжённости, причём, время пребывания продуктов сгорания в ней должно быть минимальным.

Требуемое распределение температур можно получить путём организации подвода вторичного воздуха в жаровую трубу через пояса охлаждающих отверстий оптимальной суммарной площади. При этом следует учитывать, что чрезмерное обеднение топливовоздушной смеси и охлаждение первичной зоны ведёт к понижению полноты сгорания, а, следовательно, к повышению выброса угарного газа ( $CO$ ) и уровня дымности ( $C_xH_y$ ).

В соответствии с данными исследовательской работы [5], рабочий процесс в камере сгорания двигателя НК-16-18СТ, топливом для которого служит природный газ, обеспечивает достаточно низкий уровень выброса  $NO_x$  при значениях коэффициента избытка воздуха в зоне горения порядка  $\alpha \approx 1,2 \dots 1,4$ . При этом значение полноты сгорания топлива должно находиться в диапазоне порядка  $\eta \approx 0,98 \dots 0,995$ , тогда содержание угарного газа ( $CO$ ) и несгоревших углеводородов ( $C_xH_y$ ) в продуктах сгорания не превысит 40 г/кг топл.

Экспериментальные исследования проводились на ОАО КПП "Авиамотор", с привлечением его материально технической базы при совместной работе специалистов данного предприятия и КГТУ им. А.Н.Туполева.

Объектом исследования стал отсек КС, представляющий собой сегмент реальной кольцевой камеры сгорания двигателя НК-16-18СТ (1/14 часть). Конструкция отсека предусматривает возможность быстрого демонтажа и смены внешнего и внутреннего кожухов жаровой трубы, а также блока фронтных устройств в виде головки с коллекторами подвода топлива к девяти форсункам центробежного типа с завихрителями (пять – во внешнем ряду, четыре – во внутреннем). Во время испытаний топливо подавалось в четыре форсунки внешнего ряда и в три – внутреннего, так как две форсунки были заглушены. В качестве топлива использовался бытовой газ пропан-бутан.

В ходе испытаний исследовались три варианта конструкции жаровой части КС, причём, применение программы автоматизированной доводки камер сгорания [5] позволило значительно сократить временные и материальные затраты, а также уменьшить объём эксперимента, сузив направленный поиск до небольшого количества качественно поставленных опытов.

Первый вариант жаровой части КС, ставший базовым (исходным), полностью соответствовал конструкции серийной камеры сгорания двигателя НК-16-18СТ (см. рис.1). Значения характерных параметров, снятые при испытании данного варианта, стали исходной, отправной, точкой для анализа результатов, полученных в ходе дальнейшей работы (см. рис.4, 5, вариант1).

Вторая конструктивная схема представлена на рис. 2. Здесь было осуществлено перераспределение расходов вторичного воздуха через пояса охлаждения в жаровой трубе. Этого удалось достичь путём ликвидации карманов подвода вторичного воздуха в зоне смешения (см. рис.1) и перераспределением адекватной им суммарной площади по двум поясам охлаждающих отверстий в промежуточ-

ной зоне и в зоне смешения. Блок фронтальных устройств был взят с исходного варианта конструкции неизменённым. Результаты полученных измерений представлены на рис.4, 5 (вариант 2).

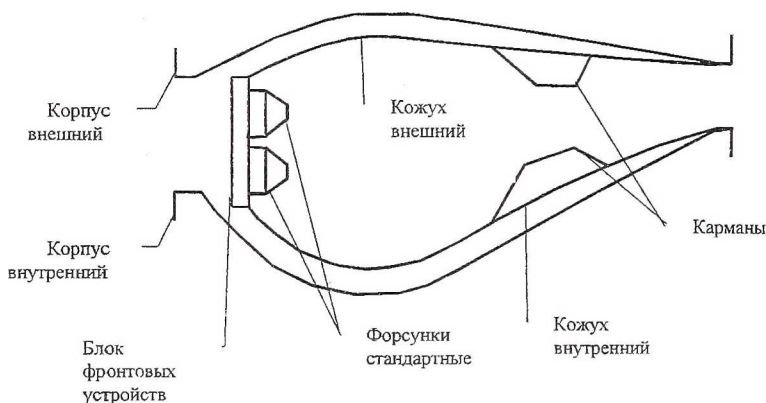


Рис.1 Вариант 1 (базовый) – стандартная КС двигателя НК-16-18СТ.

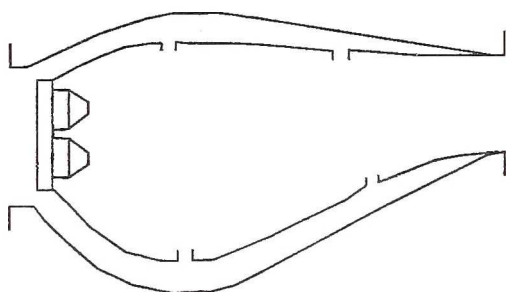


Рис.2. КС с модифицированной жаровой трубой.

В третьей конструктивной схеме, к изменениям в жаровой части (кожуха жаровой трубы) были добавлены изменения в блоке фронтальных устройств, а именно, вместо стандартных форсунок с завихрителями, применяемых в камере сгорания двигателя НК-16-18СТ второй серии, были установлены модифицированные форсунки с дополнительным элементом – карбюраторной трубкой, а в каналы подачи топливного газа форсунок были вставлены шнековые завихрители (см. рис. 3). Результаты полученных измерений представлены на рис.4, 5 (вариант 3).

Предполагалось, что постановка данного элемента позволит повысить качество приготовления топливоздушной смеси, сделать её более однородной. Ранее проводимые эксперименты с форсунками такого типа показали, что в результате присутствия карбюраторной трубки, гомогенная однородная топливоздушная смесь сгорает практически мгновенно и в полном объёме, позволяя значительно сократить протяжённость области высоких температур, тем самым исключая длительное догорание и локальные (очаговые) зоны повышенной

температуры, которые являются источниками образования  $NO_x$ , не снижая, при этом, полноты сгорания топлива - воздушной смеси.

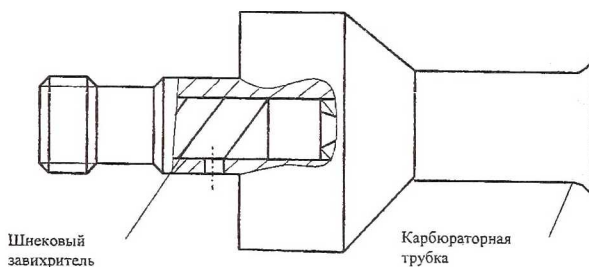


Рис.3 Схема модифицированной форсунки

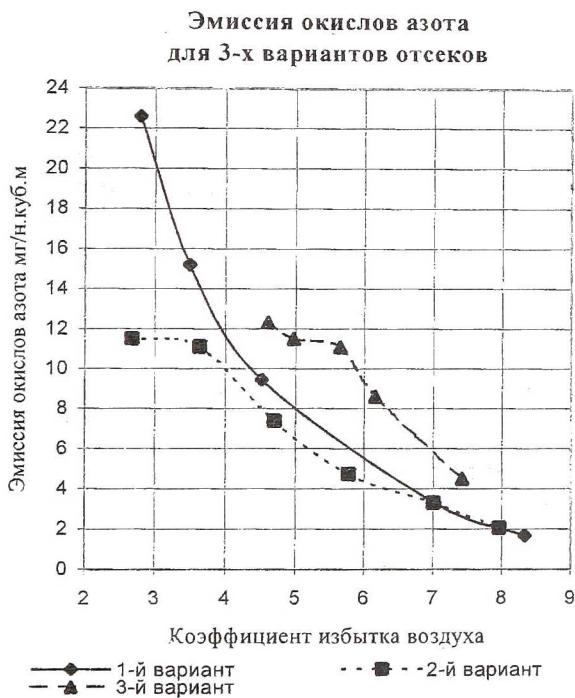


Рис. 4. Эмиссия окислов азота в зависимости от коэффициента расхода воздуха

Анализируя полученные результаты, отметим, что прогнозируемое уменьшение выбросов окислов азота, при перераспределении вторичного воздуха, в ходе эксперимента подтвердилось полностью. Из графиков на рисунке 4 видно, что эмиссия окислов азота исследуемых вариантов отсеков 2 и 3 понизилась по сравнению с исходным (вариант 1) практически в 2 раза, причём, в варианте отсека 2 это произошло при неизменных, по отношению к исходному варианту, значениях коэффициентах расхода воздуха и температуры на выходе из КС.

Испытания отсека варианта 3 показали, что постановка форсунок с карбюраторными трубками (см. рис.3), ведёт к значительному смещению фронта пламени в сторону промежуточной зоны жаровой трубы, что отрицательно сказывается на радиальной эпюре температур на выходе из КС. Предположительно, такой процесс сгорания топливовоздушной смеси может объясняться тем, что в карбюраторной трубке происходит преобразование радиальной и окружной составляющих скорости движения смеси в осевую, что приводит к увеличению пробивной способности струи и смещению зоны рециркуляции.

Из графика на рис. 5 видно, что, несмотря на перераспределение некоторого количества воздуха из зоны смешения в промежуточную зону, радиальная эпюра температур не ухудшилась.

График радиальной эпюры температур

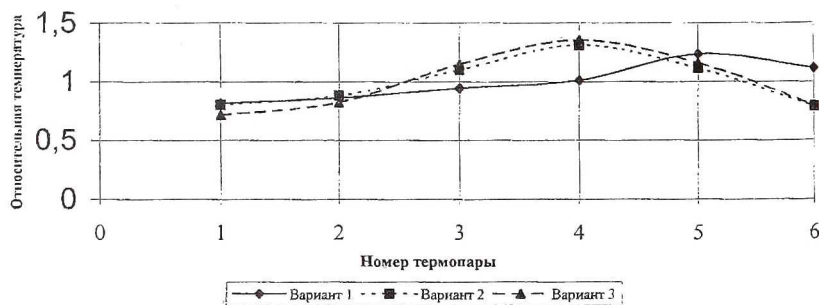


Рис. 5. График радиальной эпюры температур, снятый на режиме максимальных значений температуры на выходе из КС

В настоящее время планируются дальнейшие работы по оптимизации полей температур на выходе из КС, которые станут продолжением данного исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А.И., Горбунов Г.М. и др. Рабочий процесс и расчёт камеры сгорания газотурбинных двигателей. -М.: Оборонгиз., 1959, -285 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания газотурбинных двигателей / Пер. с англ. -М.: Мир, 1986, -566 с.
3. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени / Пер. с англ.; Под ред. Чигир Н.А. -М.: Машиностроение, 1981, -407 с.
4. Янковский В.М., Шалаев Г.М., Сыченков В.А.. Основы автоматизированного проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей / Учеб. пособие. -Казань.: КАИ, 1989, -80 с.
5. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей -М.: Машиностроение, 1979, -181 с.
6. Христич В.А., Тумановский А.С. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды -Киев.: Техника, 1983, -144 с.