

## ВЛИЯНИЕ ВИХРЕВЫХ ГОРЕЛОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2007 А. М. Цыганов

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье представлены результаты экспериментальных исследований характеристик вихревых горелок простой и сложной схем. Показано влияние вихревых горелок на характеристики камер сгорания газотурбинных двигателей, такие, как срыв пламени, выгорание топлива и гидравлические потери.

Вихревыми горелками оснащено большинство современных камер сгорания газотурбинных авиационных двигателей и газотурбинных установок наземного применения. Трехмерный закрученный поток имеет больший набор возможностей в сравнении с двухмерным течением за плохообтекаемым телом по оптимальной организации процессов подготовки и выгорания топливовоздушной смеси в условиях ограничений, накладываемых техническим заданием на проектирование каждой конкретной камеры сгорания газотурбинного двигателя [1]. Многообразие конструктивного исполнения вихревых горелок констатирует тот факт, что процесс теоретического и экспериментального исследования вихревых горелок далек от стадии завершения. Унификация схем вихревых горелок

предполагает поиск типовых элементов, входящих в них, и обоснование вклада этих элементов в получение конечного результата. При этом необходимо держать в поле зрения все характеристики камеры сгорания, которые нужно получить по результатам ее проектирования, то есть использовать системный подход.

На рис. 1 представлена экспериментальная модель универсальной вихревой горелки. Набор завихрителей воздуха 1 с углом установки лопаток от 0 до 60 градусов с шагом 15 градусов позволяет зафиксировать переход от течения за плохообтекаемым телом к закрученному потоку и более подробно исследовать вихревые горелки с завихрителем, имеющим угол установки лопаток 45 градусов, близкий к оптимальному. Диаметр

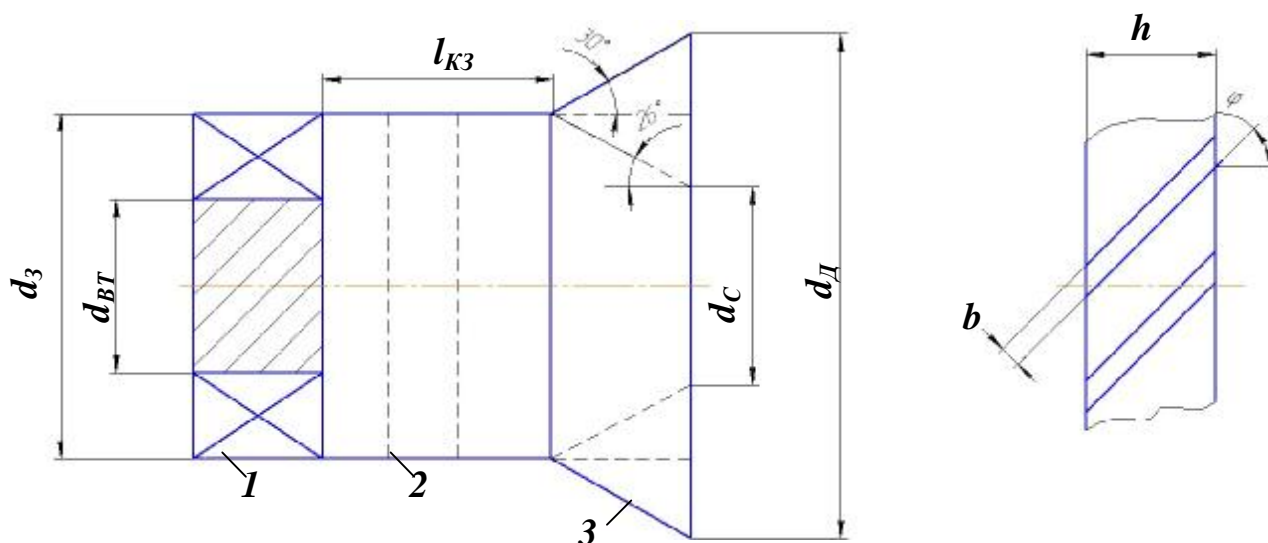


Рис. 1. Экспериментальная модель универсальной вихревой горелки:  
1 – завихритель воздуха, 2 – камера закручивания, 3 – выходной насадок,  
 $d_3 = 36$  мм,  $d_{BT} = 20$  мм,  $d_C = 20$  мм,  $d_D = 80$  мм,  $b = 2$  мм,  $h = 13$  мм

втулки завихрителя определяется конструктивными особенностями топливной форсунки, связан с профилем лопатки завихрителя воздуха. Он влияет на поперечный размер начала зоны отрыва потока, пропускную способность горелки по воздуху (в конечном счете, на пропускную способность фронтального устройства камеры сгорания). Камера закручивания 2 относительной длины 0,5...1,0 калибр частично обеспечивает формирование закрученного потока с требуемым до полного выгорания временем пребывания топлива в зоне горения. Здесь и далее за характерный размер вихревой горелки принимается наружный диаметр завихрителя воздуха. Применительно к камерам сгорания ГТД, включая микро ГТД [2], целесообразно исследовать вихревые горелки с характерным размером 10...100 мм. Выходной насадок 3 диффузорной, цилиндрической или конфузорной формы совместно с завихрителем 1 и камерой закручивания 2 формирует структуру течения закрученного потока, включая размеры зоны рециркуляции и интенсивность обмена массой и энергией между прямым и обратным током в вихревой горелке. Насадок 3 диффузорной формы наиболее распространен в камерах сгорания двигателей первых поколений. Он характерен для камер сгорания трубчатой схемы, так как обеспечивает плавный переход потока от горелки в объем жаровой трубы, защищая ее стенки от перегрева относительно холодным периферийным слоем закрученного потока. Недостатком насадка такой формы является низкое значение градиента скорости в радиальном направлении на всей длине зоны рециркуляции потока. Насадок 3 конфузорной формы характерен для многогорелочных (более 100 штук) камер сгорания ГТД конструкции Н. Д. Кузнецова. В этом случае градиент поперечной скорости максимален, что обеспечивает полное выгорание топлива на минимальной длине. К недостаткам насадка данного типа можно отнести возможное неудовлетворительное тепловое состояние вихревых горелок при их совместной работе в составе многогорелочной камеры сгорания. В пространстве между соседними конфузорными насадками могут формироваться допол-

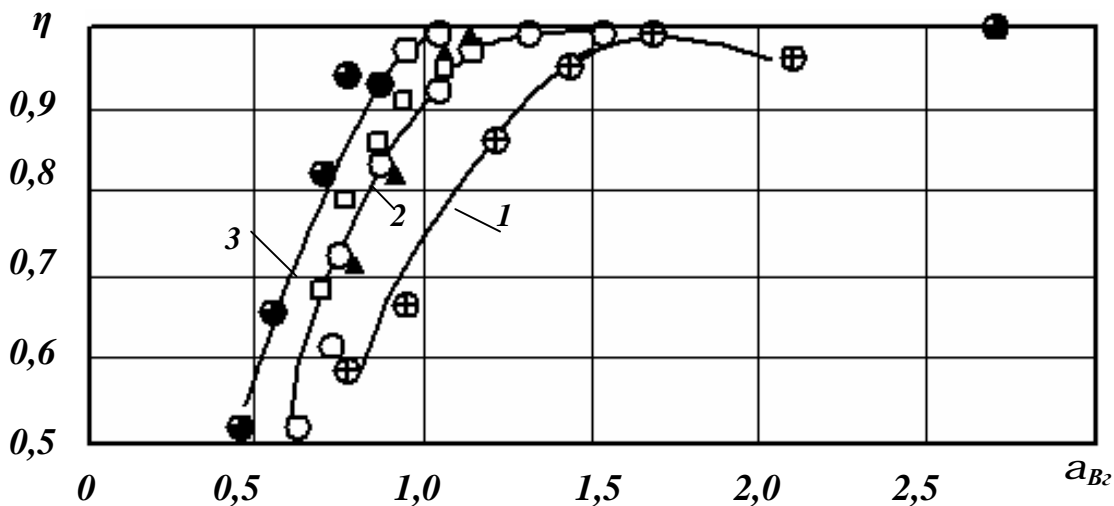
нительные зоны возвратных течений, и если в них попадает топливо, то возможно и возникновение дополнительного очага горения. Насадок 3 цилиндрической формы занимает промежуточное положение как геометрически, так и с точки зрения организации рабочего процесса. Вихревая горелка с насадком такой формы реализована частично в камере сгорания газотурбинной установки наземного применения АЛ-31 СТ. Пропускная способность вихревых горелок оценивалась при помощи коэффициента расхода, представляющего собой отношение фактического расхода воздуха к расходу теоретическому через площадь, определяемую только диаметром завихрителя, без учета площади втулки и суммарной толщины лопаток завихрителя. Результаты продувок экспериментальной модели универсальной горелки, представленной на рис. 1, показали, что при изменении угла установки лопаток завихрителя от 15 до 60 градусов значения коэффициентов расхода горелки с насадками в виде цилиндра и диффузора не зависят от формы насадка и изменяются от 0,80 до 0,30. Присоединение конфузорного насадка изменяет эти значения соответственно от 0,34 до 0,18, то есть практически в два раза снижает пропускную способность вихревой горелки.

В камерах сгорания двигателей последних поколений применяются вихревые горелки более сложных схем, чем те, которые рассмотрены выше. Однако при более внимательном структурном анализе сложных горелок можно найти комбинацию перечисленных простых вариантов. В результате один из вариантов универсальной вихревой горелки сложной схемы для перспективного ГТД можно условно представить как трехконтурную по воздуху: внутренний контур с конфузорным насадком обеспечивает интенсивное перемешивание и гомогенизацию топлива с воздухом; средний контур цилиндрической формы - полное выгорание топлива при минимальном времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной зоне; наружный контур с насадком диффузорной формы обеспечивает плавный переход вихревой горелки в жаровую трубу и максимальное выгорание топлива в пределах зоны цир-

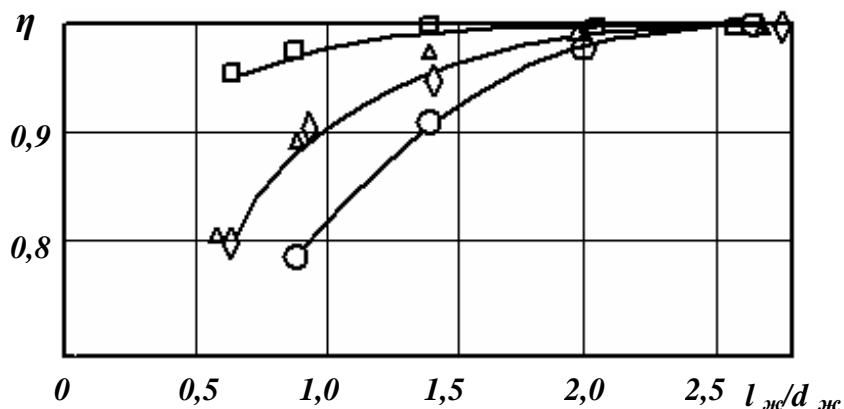
куляции многоконтурной вихревой горелки. В этом случае необходимо обеспечить газодинамическую совместимость трех зон, что способствует плавной передаче горения при изменении режимов работы двигателя от малого газа до взлетного. Частично эта схема реализована в камере сгорания ГТД F-101.

Огневые испытания вихревых горелок проводились при подводе авиационного керосина через штатную топливную форсунку центробежного типа, а также гомогенной, заранее подготовленной пропано-воздушной смеси как при истечении продуктов сгорания в свободное пространство, так и в ограниченное неохлаждаемыми стенками жаровой трубы, выполненными из кварцевого стекла.

Кривые выгорания топлива представлены на рис. 2. Полнота сгорания топлива, приближающаяся к 100 %, достигается при значениях коэффициента избытка воздуха в вихревой горелке  $a_{вг} = 1,2 \dots 1,6$ . В этом случае минимальный выброс несгоревших углеводородов составляет всего 0,1 г/кг топл. При  $a_{вг} < 0,8$  наблюдается повышенное дымление продуктов сгорания, превышающее 20 единиц и повышенный выброс канцерогенного бенз(а)пирена [3]. Оптимальный состав смеси за вихревой горелкой позволяет обеспечить полное выгорание топлива в жаровой трубе с относительной длиной 2,0...3,0 калибра. И здесь угол установки лопаток завихрителя 45 градусов обеспечивает наилучшие



а)



б)

Рис. 2. Выгорание топлива по составу топливозоудушной смеси (а) и длине жаровой трубы (б):  
1, 2 – одноконтурные горелки; 3 – двухконтурные горелки

условия для выгорания топлива на минимальной длине жаровой трубы. Границы так называемого «бедного» и «богатого» срыва пламени большинства одноконтурных по воздуху вихревых горелок незначительно отличаются от концентрационных пределов горения гомогенной топливоздушной смеси (рис. 3). В приближенных расчетах можно принимать  $a_{\text{бедн}} = 1,7 \dots 2,0$ ;  $a_{\text{бог}} = 0,5 \dots 0,7$ . Здесь значение относительных потерь давления торможения берется в диапазоне 3,0...5,0 %, что характерно для фронтных устройств современных камер сгорания. Достаточно сложной задачей является попытка расширения пределов «бедного» бесрывного горения в многоконтурных по воздуху горелках хотя бы до трех единиц, да еще и при высокой полноте сгорания топлива (рис. 2а).

Установлена однозначная количественная связь по границе «бедного» срыва пламени между характеристиками вихревой горелки и камеры сгорания. Классический гидравлический расчет камеры сгорания по методике ЦИАМ дает расхождение с результатами эксперимента в 2...3 единицы на уровне 10...30 единиц. Дополнительный анализ полученных результатов гидравлического расчета камеры сгорания позволяет оценить вклад вихревых горелок в выполнение требований технического задания на камеру сгорания: если коэффициент избытка воздуха через вихревую горелку  $a_{\text{вг}} < 0,5$ , то вихревая горелка преобразуется в карбюратор - ус-

тройство для перемешивания топлива с воздухом (аналогия с карбюратором ДВС); при  $a_{\text{вг}} = 1,2 \dots 1,6$  вихревая горелка становится модульной, то есть теоретически в ней может полностью завершиться процесс горения. В этом случае дополнительный подвод вторичного воздуха используется только для охлаждения стенок жаровой трубы, формирования заданной техническим заданием радиальной и окружной эпюры температуры на выходе из камеры сгорания с целью обеспечения надежной и эффективной работы турбины. В камерах сгорания большой длины вихревые горелки - карбюраторы обеспечивают срыв пламени на уровне 50...100 единиц и более без сложных систем регулирования подачи топлива и воздуха. Модульные вихревые горелки сами по себе срывают пламя в камере сгорания при 6...8 единицах, что предполагает внедрение сложных систем регулирования.

Экспериментально установлено, что относительный шаг расположения вихревых горелок (вплоть до полного касания) практически не влияет на границу «бедного» срыва и длину светящегося факела пламени.

Основной тенденцией развития камер сгорания ГТД является увеличение расхода воздуха через фронтное устройство. За 50 лет этот расход увеличился с 5...10 % до 50...70 %, а в ближайшей перспективе может возрасти до 80...90 %. Эта тенденция вступает в противоречие с низким значени-

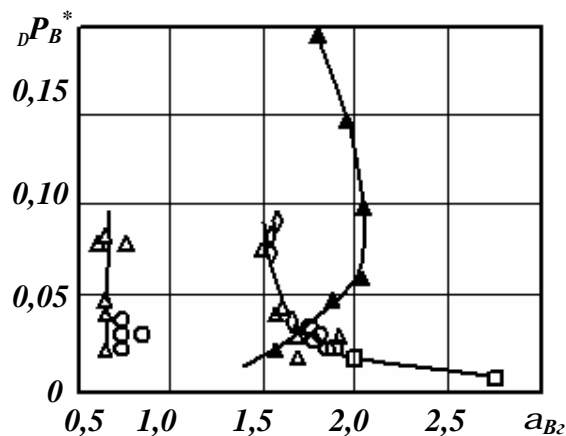


Рис. 3. Границы «бедного» и «богатого» срыва пламени при работе вихревых горелок на жидком и газообразном топливе

ем коэффициента расхода вихревых горелок (в среднем 0,20 для вихревой горелки с завихрителем воздуха в 45 градусов и насадком конфузорной формы). Проблема разрешается путем подвода дополнительного воздуха через отверстия и щели во фронтальной плите вблизи вихревых горелок. Немногочисленные эксперименты показали, что подвод воздуха через отверстия сравнительно небольшого диаметра (2...5 мм), расположенные между горелками, снижают полноту сгорания топлива на 1...2 %, а подвод воздуха в зону горения через крупные отверстия (10...20 мм) приводит в сравнимых условиях к снижению полноты сгорания уже на 2...5 % .

Работа по определению характеристик вихревых горелок и их влиянию на рабочий процесс камер сгорания ГТД различной размерности проводилась в КуАИ-СГАУ коллективом отдела «Горение» с участием автора статьи по договорам на научно-исследовательскую работу с СНТК имени Н.Д.Кузнецова, г. Самара и МКБ «Гранит», г. Москва [3, 4].

#### **Список литературы**

1. Лукачев С. В., Цыганов А.М . Особенности формирования облика камеры сго-

рания ГТД на основе осредненных статистических данных // Вестник СГАУ. - Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. - Вып.5. - Самара, 2004. - С. 223-226.

2. Ланский А. М., Цыганов А. М., Фетисов В. И., Шамбан М. А. Разработка и исследование характеристик опытной камеры сгорания микро ГТД // Вестник СГАУ. - Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. - Вып.1. - Самара, 1998. - С. 240-246.

3. Ивлиев А. В., Постников А. М., Розно В. Г., Савченко В. П., Цыганов А. М. Влияние угла установки лопаток на характеристики вихревых горелок / В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - С. 59-66.

4. Лукачев С. В., Ланский А. М., Абрашкин В. Ю., Диденко А. А., Зубков П. Г., Ковылов Ю. Л., Матвеев С. Г., Цыганов А. М., Шамбан М. А., Яковлев В. А. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности // Вестник СГАУ. - Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. - Вып.1. - Самара, 1998. - С. 11-39.