

счет государственного финансирования, продолжить работы по канцерогенной тематике и в направлении обобщений, разработки элементов методологии проектирования и доводки КС, элементов ее теории и расчета. Материально-техническая база лаборатории достаточно эффективно используется в учебном процессе по специальности «Двигатели внутреннего сгорания», по которой кафедра «Теплотехника и тепловые двигатели» является выпускающей.

По научному направлению самарской школы «горельщиков» защищено 3 докторских и 22 кандидатских диссертации, опубликовано более 450 статей и докладов на НТК, получено более 120 авторских свидетельств на изобретения, в настоящее время готовится к изданию 3 монографии. При кафедре «Теплотехника и тепловые двигатели» и НИЛ-49 работает постоянно действующий научный семинар, на котором обсуждаются работы как своих сотрудников, так и работников предприятий аэрокосмического комплекса и родственных вузов.

УДК 621.43-224.3

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГТД, ПРОБЛЕМЫ И НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

Лукачев В.П., 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.

*Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара,
Машиностроительное конструкторское бюро "Гранит", г. Москва*

Традиционный подход к проектированию камер сгорания (КС) малоразмерных ГТД, заключающийся, по существу, в распространении на них опыта создания КС больших двигателей, был подвергнут серьезной критике со стороны NASA [1]. Различия в конструкции, размерах и условиях работы КС больших и малых ГТД являются причиной того, что подобный подход часто приводит к ошибкам при проектировании, ухудшает показатели силовой установки, требует большого объема доводочных работ. Чтобы установить причины такого рода ошибок, следует выяснить и изучить особенности организации рабочего процесса КС малоразмерных ГТД (МГТД), накладывающие наиболее существенный отпечаток на их облик и показатели качества работы. Задача усложняется тем, что процессы в КС МГТД изучены еще

недостаточно, отсутствует обобщение экспериментальных результатов, что затрудняет оптимизацию параметров при разработке КС.

Самарский государственный аэрокосмический университет в течение более десяти лет принимал участие в экспериментальной доводке ряда отечественных малоразмерных КС. Полученные эмпирические зависимости, некоторые попытки их обобщения, сформулированные на этой основе выводы, могут представлять интерес для специалистов, определяющих пути совершенствования КС этого класса.

1. ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МАЛОРАЗМЕРНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ

В литературе, где рассматривается вопрос моделирования ГТД и их узлов в сторону уменьшения размеров представлены две основные точки зрения. Общепринятым является упрощенный подход, когда, начиная с некоторой величины тяги или мощности, ГТД называют малоразмерным. При этом отмечается ряд особенностей в облике двигателей, например, последняя ступень компрессора центробежного типа и сопряженная с ней КС противоточной схемы. Однако указание на эти особенности не позволяет полностью выяснить специфику организации рабочего процесса в узлах МГТД, поскольку тот же центробежный компрессор и противоточная КС могут быть использованы в двигателях и средней размерности.

Другой подход известен из теории лопаточных машин, где четко установлено, что уменьшение их абсолютных размеров отражается на уровне коэффициента полезного действия (КПД) из-за роста относительных величин неоднородностей потоков в межлопаточных каналах и потерь через зазоры. По сути, тот же принцип роста влияния относительной величины какого-либо фактора заложен в пояснении понятия малой размерности ГТД, предложенном в работе [3].

Рассматривая величину удельного веса ГТД

$$\gamma_{\text{дв}} = G_{\text{дв}}/N, \quad (1)$$

где вес двигателя ($G_{\text{дв}}$) – пропорционален объему (упрощенно кубу его диаметра D^3), а мощность ГТД (N) – пропорциональна расходу воздуха (упрощенно площади проходного сечения или D^2), делается вывод о линейности теоретической зависимости $\gamma_{\text{дв}} = f(D)$.

Обобщая некоторую статистику, автор отмечает, что при уменьшении размеров эта зависимость подтверждается лишь в небольшом диапазоне, а затем (рис. 1) действительная зависимость существенно изменяет свой характер. Анализируя данное обстоятельство, автор указывает, что при моделировании ГТД в сторону уменьшения размеров далеко не все узлы удается пропорционально масштабировать. Такие из них, как приборы, агрегаты, подшипники, начиная с каких-то мощностей двигателей, перестают уменьшать свои размеры, что приводит к росту их относительного веса. Видимо, по этой причине конструкторы МГТД, как правило, отказываются от воспламенительных устройств и предпочитают запуск КС непосредственно от свечи, что ухудшает их пусковые характеристики. Кроме того, наблюдается заметное, вполне объяснимое отставание МГТД по параметрам термодинамического цикла — π_k и T_g^* , что также усложняет организацию рабочего процесса в КС.

С точки зрения газодинамики течения в основных узлах двигателя, принципиальной особенностью при уменьшении их размеров является рост относительной толщины пограничного слоя, которая в конечном итоге может привести к перестройке характера течения, т.е. и здесь просматривается тенденция показанная на рис. 1. Принимая это явление за принцип, можно сформулировать предположение, что при переходе от обычной к малой размерности каналов и струй КС должен меняться характер течения процессов, следовательно, величина и набор критериев, которые характеризуют эти процессы. Если такого изменения не происходит, то следует говорить только об изменении размеров, но не размерности.

Таким образом, пока остается только один принцип, который может быть заложен в формирование критерия размерности КС, если, конечно, таковой объективно возможен. Будем предполагать, что всегда существует граница, при переходе через которую при моделировании КС в сторону уменьшения ее размеров нарушаются известные взаимосвязи основных пока-

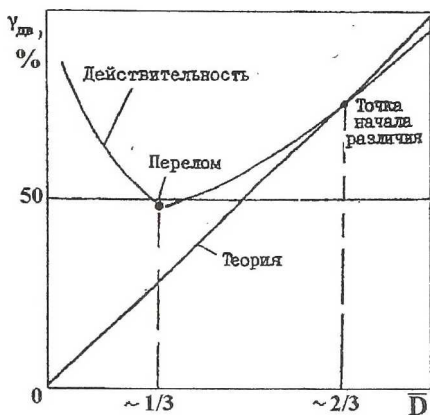


Рис. 1. Влияние размеров ГТД на его удельный вес

зателей ее рабочего процесса. Из анализа статистических данных параметров (рис. 2) и характерных размеров (рис. 3) выполненных КС в широком диапазоне типоразмеров. Видно, что при переходе к малым размерам КС все более отчетливо проявляется определенная особенность: рост коэффициента форсирования K_v при постоянном времени пребывания $\tau_{пр}$.

С учетом взаимосвязи K_v и $\tau_{пр}$

$$K_v = \frac{1}{\tau_{пр} \cdot R \cdot (T_k^*)^2 \cdot (P_k^*)^{0.25}} \quad (2)$$

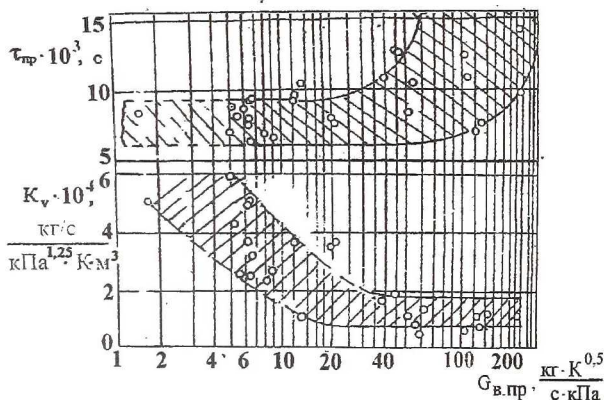


Рис. 2. Зависимость коэффициента форсирования камеры сгорания (K_v) и времени пребывания от $G_{в.пр}$

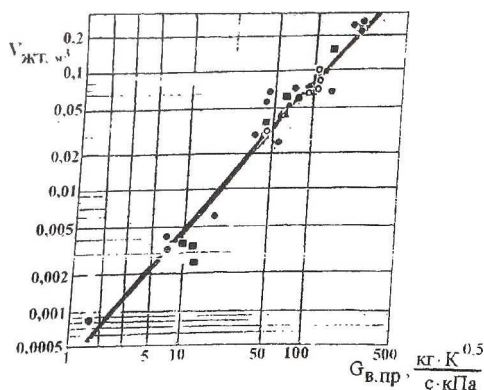


Рис. 3. Зависимость объема жаровой трубы КС от размеров ГТД

Этот факт приводит к выводу, что, начиная с некоторых размеров КС, при их дальнейшем уменьшении нарушается пропорциональность во взаимосвязи параметра цикла ГТД – π_k и оптимальных условий организации рабочего процесса в КС – $\tau_{пр}$.

Основываясь на ранее изложенном принципе увеличения влияния относительных размеров структур и явлений, можно выделить следующие составляющие, которые по технологическим и функциональным причинам имеют пределы минимизации своей величины:

- технологические допуски на размеры всех элементов КС;
- размеры каналов для подачи топлива;
- размеры смесительных элементов – горелок (следовательно, и шаг между ними в окружном направлении);
- зазоры между подвижными элементами;
- диаметр капель топлива;
- толщина газовой завесы около стенок жаровой трубы;
- неравномерность распределения параметров и веществ по сечению жаровой трубы.

С другой стороны, ряд параметров не изменяет своей величины при уменьшении размеров КС:

1. $\tau_{пр} \geq \tau_{хр} + \tau_{исп} + \tau_{см}$.
2. $\alpha_k = \text{const}$ (при условии $T_r^* = \text{const}$).
3. В нерегулируемой КС.

Здесь $\tau_{хр}$ – время, которое затрачивается на химические реакции, $\tau_{исп}$ и $\tau_{см}$ – соответственно, на испарение топлива и смешение его с воздухом.

Кроме объема жаровой трубы $V_{жт}$, который выбирается, исходя из требуемого уровня теплонапряженности, либо параметра K_v , наиболее характерным изменениям при уменьшении размеров КС могут быть подвержены горелочные элементы и струи подвода воздуха через стенки жаровой трубы, (ЖТ).

Учитывая, что горелка создает дежурный очаг пламени (ДОП) в КС, отвечающий за стабилизацию пламени, момент его срыва может быть записан в виде баланса энергии $E_{п}$, потребной для прогрева топливо–воздушной смеси (ТВС) до температуры воспламенения, и располагаемой для этого про-

цесса энергии E_p , которая определяется возможностями ДОП. Запас энергии в ДОП, очевидно, пропорционален объему, что можно записать как

$$E_p = C_1 \cdot (D_{гор})^3, \quad (3)$$

т.к. размеры ДОП однозначно связаны с размерами горелки. Передача энергии E_n в ТВС, омывающую ДОП, происходит с его поверхности, следовательно

$$E_n = C_2 \cdot (D_{гор})^2 \quad (4)$$

Отсюда получается соотношение

$$\bar{E}_n = \frac{E_n}{E_p} = \frac{C_2}{C_1 \cdot D_{гор}}, \quad (5)$$

из которого видно, что минимизация автономного очага горения в КС имеет четкий предел в виде $\bar{E}_n = 1$. Имея это в виду, примем упрощенно, что индивидуальная горелка (вихревая или иного типа) создает цилиндрическую зону горения с размерами $D_{зг} = C_4 \cdot h_{жт}$ ($h_{жт}$ – высота ЖТ) и $l_{зг}$. Тогда

$$(V_{зг})_{цил} = C_5 \cdot l_{зг} \cdot \frac{\pi \cdot (h_{жт})^2}{4} \quad (6)$$

Зная C_5 , можно определить предельную величину $h_{жт}$, до которой можно уменьшать размеры КС без риска дойти до ограничения (5). По сути дела эта величина является границей по размерам горелки – $(D_{гор})_{мин}$. Практиками она уже найдена и определяется величиной 25...30 мм.

Выход за рамки этого предела возможен путем объединения автономных очагов горения с объемом $V_{зг}$, расположенных по кольцу вокруг оси двигателя, в единую кольцевую зону горения (рис. 4). Если считать, что зона горения такой «горелки» имеет форму тора, то ее размер может быть записан в виде

$$(V_{зг})_{тор} = C_6 \cdot 2\pi R \cdot \frac{\pi \cdot (h_{жт})^2}{4}, \quad (7)$$

где R – большой радиус тора, а $h_{жт}$ – его удвоенный малый радиус. На рис. 4 наглядно видно, что такая форма зоны горения ДОП имеет существенные резервы минимизации, но ее применение ставит серию новых задач, связанных с динамикой течения газа, с поиском оптимальных способов подготовки ТВС, с вопросами энерго- массообмена в структуре, напоминающей наибо-

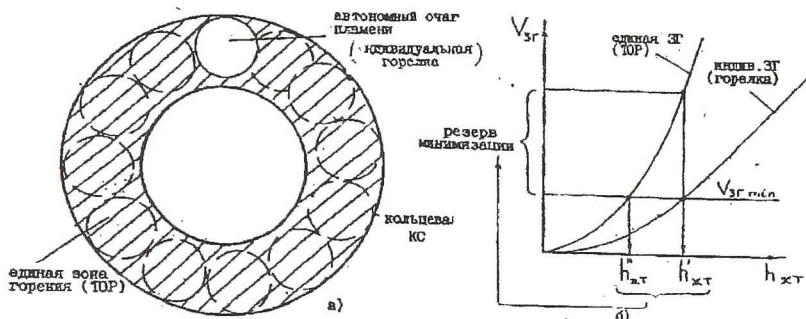


Рис. 4. Иллюстрация, поясняющая необходимость объединения автономных очагов горения при их минимизации в единую кольцевую зону горения

лее сложное и, соответственно, наименее изученное течение в кольцевом вихре.

Относительно размеров струй воздуха, втекающих в ЖТ через боковые стенки, можно предположить, что предел их минимизации диктует глубина проникновения струи в объем ЖТ. Поскольку дальнобойность струи пропорциональна ее диаметру d_0 , а необходимая глубина проникновения и связанная с ней дальнобойность в каждой зоне ЖТ диктуется функциями этой зоны, но все-таки определяется высотой сечения ЖТ — $h_{жт}$, то можно считать, что

$$d_0 = \text{const} \cdot h_{жт} \quad (8)$$

Следовательно, при уменьшении $h_{жт}$ пропорционально должны меняться размеры отверстий ввода воздуха. Если принять коэффициенты расхода струй равными 1, то условие $\bar{G}_{в,i} = \text{const}$ преобразовывается в

$$\frac{\sum F_{0,i}}{F_{бок}} = \text{const} \quad (9)$$

Здесь $F_{бок}$ — суммарная площадь боковой поверхности ЖТ, а $\sum F_{0,i}$ — суммарная площадь всех отверстий, предназначенных для ввода воздуха в i -тую зону ЖТ. Отсюда следует специфическая закономерность изменения количества отверстий n в зависимости от размеров ЖТ. Так для ЖТ, имеющей форму цилиндра (индивидуальные или трубчатые КС), соотношение (9) запишется как

$$\frac{n \cdot \pi d_0^2 / 4}{\pi \cdot h_{жт} \cdot L_{жт}} \quad (10)$$

Имея в виду (8), получим, что количество отверстий на единицу длины $\bar{n} = n/L_{\text{жт}}$ с уменьшением размеров КС возрастает:

$$\bar{n} = \frac{\text{const}}{h_{\text{жт}}} \quad (11)$$

Для кольцевой КС это соотношение выглядит несколько иначе:

$$\bar{n} = \text{const} \cdot R / (h_{\text{жт}})^2, \quad (12)$$

но при пропорциональном изменении размеров R и $h_{\text{жт}}$ сводится к предыдущему.

Таким образом, уменьшение размеров КС, а точнее – высоты ее ЖТ, требует постепенного перехода к перфорации стенок все более мелкими отверстиями с возрастающим их числом n . Естественным пределом здесь будет функциональное ограничение размера d_0 , с одной стороны, из-за возможности их засорения при эксплуатации двигателей в условиях грунтовых аэродромов, а с другой стороны, из-за возможного снижения глубины проникновения струй непропорционально изменению $h_{\text{жт}}$.

Дискретность расположения горелок и отверстий в ЖТ приводит, как известно, к неравномерности в распределении параметров и веществ по сечению ЖТ. Ее относительная величина может быть выражена как

$$\bar{\Delta} = \text{const} \cdot \frac{d^2}{F_{\text{жт}}} \quad (13)$$

Здесь d – линейный размер источника неравномерности (струи воздуха, горелки, топливной форсунки и т.д.). Очевидно, что при достижении струей, горелкой или форсункой их предельно минимальных размеров относительная величина $\bar{\Delta}$ начинает расти при уменьшении $F_{\text{жт}}$. Следует отдельно рассмотреть окружную неравномерность, задаваемую количеством точек Z подачи топлива, при уменьшении размеров КС. Поскольку расход топлива G_T уменьшается пропорционально расходу воздуха (при $\alpha_{\text{кс}} = \text{const}$), то при достижении существующего технологического ограничения на минимальный размер топливной форсунки Z начинает уменьшаться вместе с G_T . С другой стороны, дискретность подвода топлива по окружности кольцевой КС – $2\pi R/Z$ задает относительный размер неравномерности $\bar{\Delta}$ и выступает в качестве величины d в выражении (13). Следовательно,

$$\bar{\Delta}_{\text{окр}} = \text{const} \cdot \frac{(2\pi R)^2}{Z^2 \cdot 2\pi R \cdot h_{\text{жт}}} = \text{const} \cdot \frac{R}{h_{\text{жт}} \cdot Z^2} \quad (14)$$

При пропорциональном уменьшении R и $h_{\text{жт}}$

$$\bar{\Delta}_{\text{окр}} \sim \frac{1}{Z^2}, \quad (15)$$

и эта зависимость может внести самое большое ограничение в возможность создания КС существенно малых размеров.

Таким образом, особенности, проявляющиеся в организации рабочего процесса КС с уменьшением их размеров, можно условно разделить на две группы:

1. Особенности, связанные с изменением параметров цикла и облика двигателя.
2. Особенности, связанные с изменением масштаба относительных величин, характеризующих конструкцию и процессы в КС.

Первая группа накладывает свой отпечаток на схему и конструкцию КС, что в конечном итоге реализуется в особенностях аэродинамической структуры течения, процесса подготовки ТВС и организации процесса запуска КС. Вторая группа влияет на характеристики КС: по полноте сгорания топлива, по стабилизации пламени, по формированию поля температур T_{Γ} на выходе. Ниже приведены некоторые результаты, полученные при изучении этих вопросов в СГАУ.

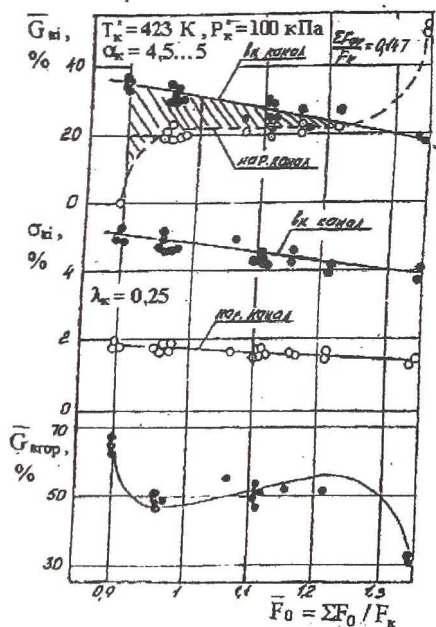
Оптимизацию основных характеристик КС при выбранной и фиксированной величине $V_{\text{жт}}$ обычно выполняют за счет изменения аэродинамической структуры потока (АСТ) в ЖТ и качества подготовки топливо-воздушной смеси (КТВС). Поскольку АСТ и КТВС являются проектными переменными их самостоятельное исследование представляет интерес для уточнения возможного диапазона варьирования и с точки зрения отработки методик и оборудования, применяемых в экспериментах.

2. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА

Изучение структуры течения проводилось при изотермических продувках натуральных КС и их моделей, а также при визуализации течения методом гидроанalogии. Определение диапазона возможного изменения АСТ ограни-

чивалось требованиями доводки конкретных характеристик (пусковой и поля T_r^*) конкретных КС. Обязательной информацией, объективно характеризующей то или иное изменение в АСТ, получаемое за счет изменения конструкции ЖТ, является распределение расходов воздуха между фронтальным устройством, внутренним и наружным кольцевыми каналами и потери полного давления ($\sigma_{кс}$).

В качестве примера на рис. 5 приведено изменение распределения расхода воздуха по обечайкам ЖТ в широком диапазоне изменения относительной площади отверстий $\Sigma \bar{F}_0$ в КС прямоточной схемы с выходом из компрессора направленным в наружный кольцевой канал. В диапазоне $\Sigma \bar{F}_0 = 1,1 \dots 1,2$ наблюдается равенство расходов через наружный и внутренний сме-



6/

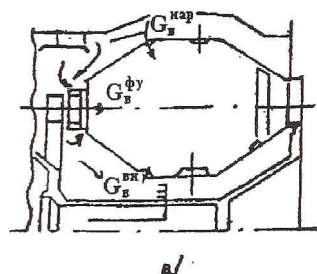


Рис. 5. Схема препарирования прямоточной малоразмерной камеры сгорания, распределение потерь и расходов воздуха по каналам

сители. Вместе с тем, потери полного давления в канале до внутреннего смесителя примерно в 2 раза больше, чем в наружном канале. Данное обстоятельство создает определенные специфические трудности при обеспечении требуемых характеристик КС, в частности, по неравномерности поля температур T_r^* . Поскольку АСТ в той или иной мере оказывает влияние практически на все характеристики КС, варьирование этой проектной переменной является задачей ее оптимизации.

Обобщение полученных экспериментальных данных позволило разработать упрощенную методику гидравлического расчета подобных прямоточ-

ных схем малоразмерных КС, разработать и практически реализовать рекомендации по рациональному распределению расхода воздуха по обечайкам ЖТ [4].

Хотя АСТ всегда имеет очень конкретные формы, связанные с конструкцией исследуемой КС, полученные результаты позволили все-таки выделить и некоторые общие ее признаки и особенности, присущие классу малоразмерных КС:

- заметное влияние масштабного фактора (относительно большие размеры струй и зоны рециркуляции за фронтальным завихрителем);
- специфика ввода воздуха в КС, связанная с тем, что последняя перед камерой ступень компрессора, как правило, центробежная (сложная траектория движения потока во внутренний канал, следовательно, повышенные потери полного давления);
- из-за малой протяженности диффузора на входе в КС, как правило, сохраняется остаточная закрутка потока;

из-за относительно малой его радиальной высоты течение до ЖТ носит явно выраженный струйный характер, для качественной организации которого, как правило, недостаточно места;

- основные режимы работы КС МГТД лежат в области пониженных λ_k , что усложняет организацию обтекания ЖТ и теплосъем с ее стенок.

3. ПОДГОТОВКА ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Высказанное выше предположение об увеличении относительных размеров капель распыленного топлива и существенном влиянии этого фактора на характеристики КС при уменьшении ее размеров полностью подтвердилось в экспериментальных исследованиях. В связи с этим в СГАУ было уделено особое внимание разработке аппаратурно-методического обеспечения для исследований качества распыливания топлива и накоплению с помощью этого оборудования базы данных по параметрам топливной аэрозоли, создаваемой форсунками МГТД.

В КС МГТД используются такие же типы форсунок, что и на больших двигателях, но к ним добавляется еще класс механических форсунок с вращающимися соплами. Краткое, но достаточно полное сопоставление различ-

ных типов форсунок с точки зрения обеспечения требуемых характеристик КС содержится в работах [5, 6].

Сравнительно малые размеры каналов и отверстий форсунок КС МГТД приводят к следующим неблагоприятным последствиям:

увеличивается эрозионный износ и склонность к засорению, что сказывается на надежности и ресурсе;

форсунки проявляют повышенную чувствительность к свойствам топлива (в частности, к его вязкостным характеристикам), особенно на пониженных режимах;

снижение относительной точности изготовления и качества поверхностей при уменьшении линейных размеров, например, в два раза, может привести к увеличению неравномерности в факеле на 10...30%.

Исследования проводились на установке, позволяющей испытывать форсунки и фронтные устройства КС при распыливании натуральных топлив и при различных вариациях топлива и воздуха [7]. Распыливание топлива происходит в рабочей камере установки в атмосферных условиях. Средний диаметр капель (СДК) определялся с использованием бесконтактного (лазерно-оптического) метода малоуглового рассеяния.

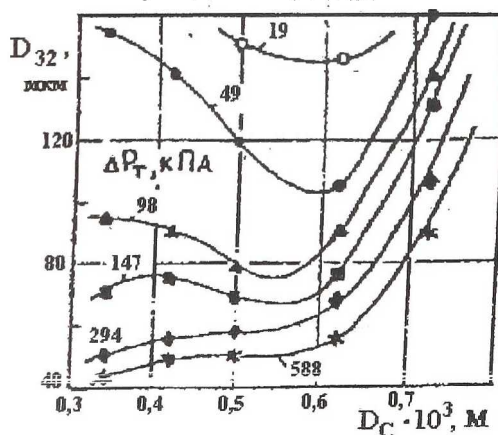


Рис. 6. Влияние изменения диаметра сопла центробежной форсунки на средний диаметр капель

Полученные результаты [8...10] показали, что при уменьшении диаметра сопла d_c ниже 0,5 мм у шнековой центробежной форсунки СДК перестает уменьшаться (рис. 6), а при малых перепадах ΔP_t сильно увеличивается, что связано с ростом влияния сил поверхностного натяжения и вязкости топлива. При определенном сочетании перепадов давления топ-

лива и вспомогательного высоконапорного воздуха наблюдается локальное увеличение СДК (рис. 7). В форсунке с двумя завихрителями СДК уменьшается на $\approx 25\%$ при закрутке воздушных потоков в одну сторону, и примерно на 45% в случае встречной закрутки воздуха (рис. 8).

На основе теории центробежной форсунки и ее уточнения для вязкой жидкости (Л.А. Клячко), а также накопленных данных по расходным характеристикам и СДК была разработана расчетная модель и соответствующая вычислительная программа. Общий перепад давления на форсунке Δp_T распределяется по элементам ее проточной части последовательными приближениями, что связано с необходимостью учета гидравлических потерь в зависимости от режима течения. В конце рассчитываются толщина пленки жидкости на выходе из сопла $t_{пл}$, скорость ее истечения W_c , а также критерии Рейнольдса (Re), Вебера (We), затем коэффициент расхода μ_f и начальные СДК $(D_{3,2})_0$ с погрешностями порядка, соответственно, 4% и 6,3% ($d_c = 0,34 \dots 0,72$ мм, $\Delta p_T = 20 \dots 600$ кПа, $t_{пл} = 50 \dots 130$ мкм, $W_c = 5 \dots 30$ м/с, $We = 0,1 \dots 3$).

В расчет начальных СДК вносится, при необходимости, поправка на пневмораспыл.

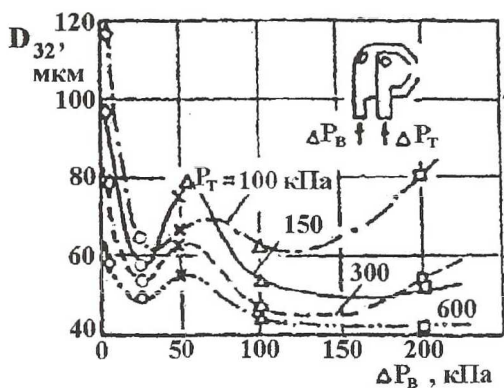


Рис. 7. Влияние подвода вспомогательного воздуха к корню топливного факела на СДК



Рис. 8. Влияние направления закрутки воздуха в завихрителях на СДК

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КС

Среди характеристик КС МГТД, которые экспериментально исследовались в СГАУ, особенное внимание было уделено пусковой и полю T_r^* . Эти две характеристики носят явно выраженный отпечаток специфики малоразмерных КС: их запуск, как правило, производится без воспламенителя, непосредственно от свечи, а поле T_r^* имеет повышенную неравномерность из-за увеличения относительных размеров неравномерностей распределения параметров и веществ по сечению ЖТ. Хотя характеристика по срыву пламени менее актуальна по условиям эксплуатации малоразмерных изделий, но при ее подробном изучении было установлено, что одна из особенностей КС МГТД: повышенный относительный размер капель топлива имеет, видимо, на нее доминирующее влияние. Характеристика по полноте сгорания топлива изучалась в связи с получением многопараметрической (обобщенной) характеристики КС МГТД.

5. ПУСКОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

При отработке пусковых характеристик конкретных типов КС [11, 12] был выполнен большой объем экспериментальных работ на высотном-климатическом стенде, где давление и температура на входе в КС могли понижаться до $p_k^* = 35$ кПа и $T_k^* = 223$ К. Фиксировались «бедная» граница (α_k^{\max}) воспламенения ТВС (при $G_{T \min}$) и предельное значение скорости потока воздуха на входе в КС ($\lambda_k^{\text{пред}}$). В результате получались зависимости (рис. 9 и 10), по которым можно было судить о сокращении области надежного запуска КС в поле высотном-скоростной характеристики МГТД.

Уменьшение $\lambda_k^{\text{пред}}$ и α_k^{\max} при снижении p_k^* и T_k^* связано со снижением качества распыливания топлива из-за увеличения его вязкости, перераспределением расхода топлива по объему первичной зоны из-за изменения геометрии факела топливной форсунки и снижения интенсивности его испарения. В целом все это приводило к ухудшению качества подготовки ТВС. В связи с этим, для улучшения пусковой характеристики использовались такие средства как :

- подвод воздуха (или азота) к корню топливного факела (рис. 11), при этом оптимизировалось соотношение перепадов давления в газовом и жидкостном каналах;

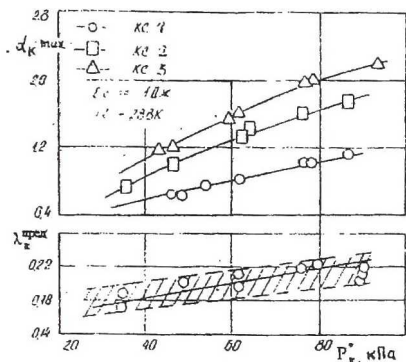


Рис. 9. Зависимость $\alpha_{к, \max}$ и $\lambda_{к, \text{пред}}$ от давления в КС

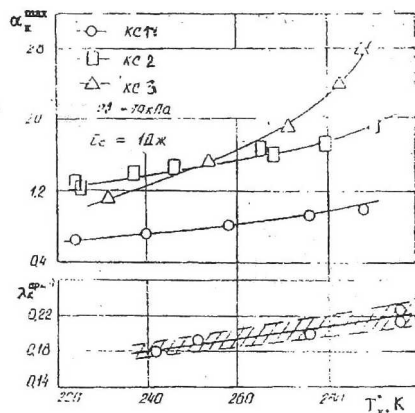


Рис. 10. Зависимость $\alpha_{к, \max}$ и $\lambda_{к, \text{пред}}$ от температуры в КС

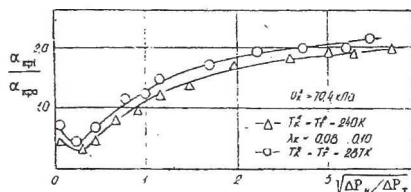


Рис. 11. Влияние подвода воздуха к корню топливного факела на воспламенение ТВС

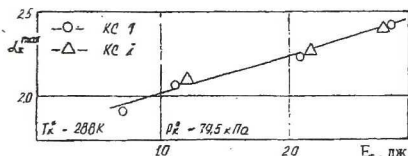


Рис. 13. Влияние энергии системы зажигания на $\alpha_{к, \max}$

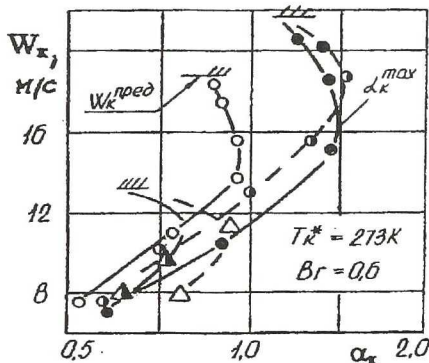


Рис. 12. Изменение границы воспламенения двухфазной ТВС в моделе КС

изменение положения свечи $\bar{L}_{св} = L_{св}/D_{кс}$ относительно зоны обратных токов (ЗОТ) за фронтным завихрителем воздуха (рис. 12);

- изменение энергии, затрачиваемой на свече $E_{св}$ (рис. 13).

При изучении отдельных процессов, составляющих в сумме явление воспламенения ТВС в первичной зоне КС варьировались параметры АСТ в этой зоне (рис. 14, 15) и режимы работы КС по α_k (рис. 16, 17), а также пара-

метры топливного факела, т.е. условия воспламенения двухфазной смеси (рис. 18, 19, 20).

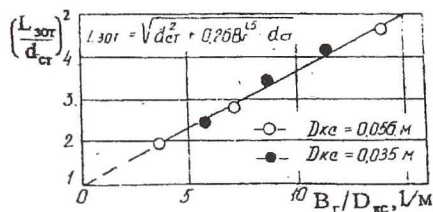


Рис. 14. Зависимость длины ЗОТ от конструктивных параметров КС

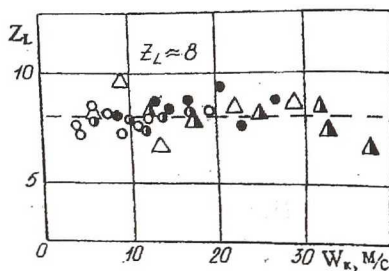


Рис. 15. Зависимость безразмерного времени пребывания от скорости

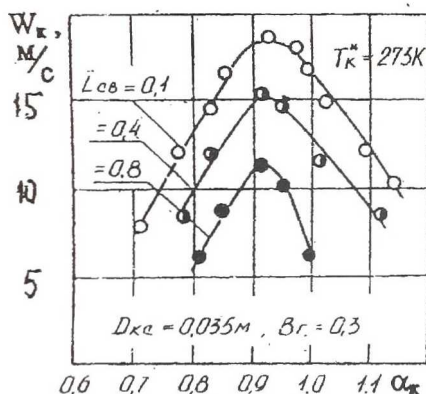


Рис. 16. Границы воспламенения однородной ТВС за стабилизатором

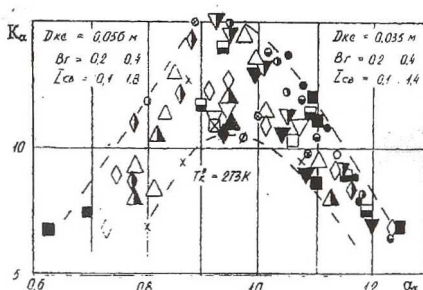


Рис. 17. Зависимость параметра K_α от состава смеси

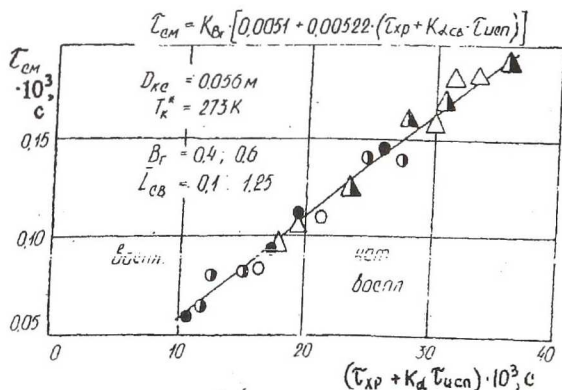


Рис. 18. Обобщение экспериментальных данных на границе воспламенения двухфазной ТВС в моделях КС

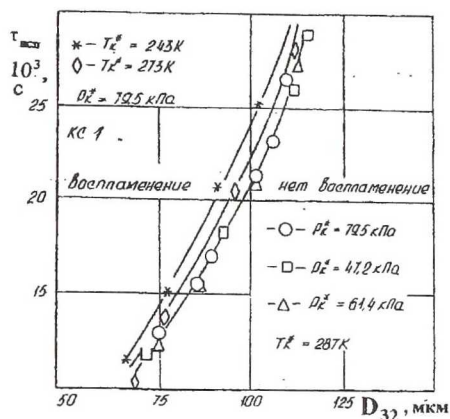


Рис. 19. Зависимость времени испарения от D_{32}

Накопленные экспериментальные данные позволили ввести некоторые обобщающие зависимости:

для размеров ЗОТ

$$L_{\text{зог}} = \sqrt{D^2_{\text{зог}} + C_7 \cdot V_r^{1.5} \cdot D_{\text{ст}}}, \quad (16)$$

где $V_r = D^2_{\text{ст}}/D^2_{\text{к}}$;

- для времени пребывания реагентов в ЗОТ

$$Z_L = \frac{\tau_{\text{пр}} \cdot W_{\text{к}}}{L_{\text{зог}}}; \quad (17)$$

- для границы воспламенения двухфазной смеси

$$\tau_{\text{см}} = K_{\text{в.г}} \cdot [C_8 + C_9 \cdot (\tau_{\text{кр}} + K_{\alpha, \text{св}} \cdot \tau_{\text{исп}})], \quad (18)$$

где $K_{\text{в.г}} = (1 - V_r)$ – коэффициент, учитывающий особенности конструкции, $K_{\alpha, \text{св}} = f(L_{\text{св}}, \alpha_{\text{к}})$;

- для качества топливной аэрозоли на границе воспламенения

$$D_{3.2} = (C_{10} - C_{11} \cdot \lambda_{\text{к}}), \quad (19)$$

где $C_7 \dots C_{11}$ – константы для данного типа малоразмерных КС.

Общим итогом выполненных экспериментальных работ была разработка физической и математической модели процесса воспламенения [12...14].

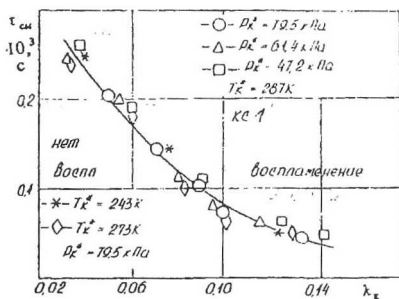


Рис. 20. Влияние параметров потока воздуха на $\tau_{\text{см}}$

Показано, что для обеспечения воспламенения необходимо создать условия для возникновения начального очага (d_q) около свечи, переброса пламени в ЗОТ и воспламенения смеси в ЗОТ. Эти условия описаны следующими выражениями:

- условие возникновения начального очага (баланс тепла в пространстве у свечи)

$$\tau_{см} \sim (\tau_{xp} + K_1 \cdot \tau_{исп}), \quad (20)$$

где время смешения ($\tau_{см}$) характеризует теплоотвод от начального очага, а время химической реакции (τ_{xp}) и время испарения ($\tau_{исп}$) – тепловыделение;

- условие переброса пламени в ЗОТ

$$\frac{W_{св}}{U_n} \leq \frac{L_{зот} \cdot (1 - \bar{L}_{св})}{R_{кк} \cdot (1 - \sqrt{B_r})}, \quad (21)$$

определяется нормальной скоростью распространения пламени (U_n), скоростью потока у свечи ($W_{св}$), размерами ЗОТ ($L_{зот}$), координатой источника воспламенения ($\bar{L}_{св}$) и размерами модели ($R_{кк}$, B_r);

- условия воспламенения смеси в ЗОТ

$$\frac{\tau_{пр}}{\tau_r} \gg \frac{D_{зот} \cdot U_n^2}{W_{зот} \cdot a} = Mi^{восп}, \quad (22)$$

где τ_r – время горения; $Mi^{восп}$ – критерий Михельсона на границе воспламенения; a – коэффициент температуропроводности.

После преобразований было получено выражение

$$\frac{d_q}{\sqrt{a} \cdot \tau_{пр}} \approx K_3 \cdot \tau_{xp} + K_1 \cdot \tau_{исп} \cdot f\left(\frac{L_{св}}{L_{зот}}, B_r\right), \quad (23)$$

для анализа процесса воспламенения ТВС.

Используя разработанную модель воспламенения и экспериментальные зависимости для $L_{зот}$ и $\tau_{пр}$, полученные предельные значения границ воспламенения (по скорости $W_{к\text{пред}}$) были обобщены следующей зависимостью (рис.21):

$$\left(A \cdot \sqrt{G/\tau_{пр}}\right)^{прод} = K_2 - 3,75 \frac{L_{св}}{L_{зот}} \quad (24)$$

Параметр $\left(A \cdot \sqrt{G/\tau_{пр}}\right)^{прод}$ представляет собой обобщенный комплекс, характеризующий предельные возможности КС по воспламенению однородной ТВС. Он включает в себя аэродинамические и кинетические параметры системы.

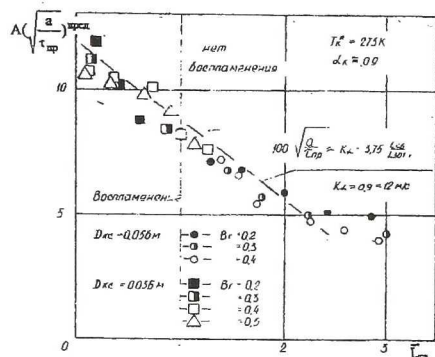


Рис. 21. Обобщение экспериментальных данных по воспламенению однородной ТВС

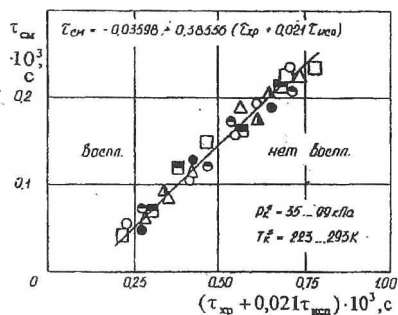


Рис. 22. Обобщение экспериментальных данных по воспламенению ТВС в камере сгорания

Как видно из рисунка 22 (здесь приведены результаты испытаний трех типов КС), разработанная математическая модель позволяет обобщать экспериментальные данные и может быть использована для оценки «бедной» границы воспламенения ТВС при проектировании геометрически подобных КС.

6. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА В ВЫХОДНОМ СЕЧЕНИИ КС

Форма радиальной эпюры T_r^* в КС любых размеров задается в технических условиях на проектирование данного узла. Окружную неравномерность θ_ϕ этого поля желательно свести к минимуму. Если для КС средней и большой размерности $\theta_\phi \approx 6...10\%$, то для КС МГТД лучших современных образцов минимальное значение θ_ϕ составляет $15...20\%$. Если представить изменение окружной неравномерности температуры на выходе из КС в виде изолиний, расположенных в поле обобщенной характеристики (рис.23) [15], координаты которого

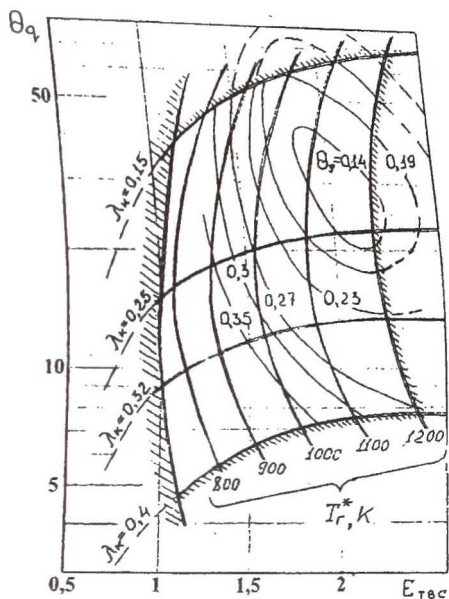


Рис. 23. Обобщенная характеристика КС малоразмерного ГТД с изолиниями окружной неравномерности поля температур T_r^*

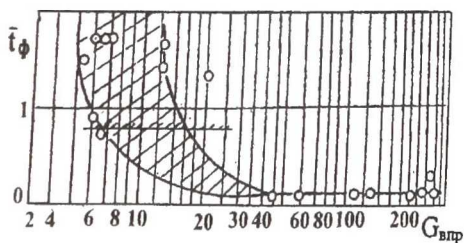


Рис. 24 а) Влияние размерности ГТД на относительный окружной шаг между форсунками

зоны (из-за большой величины \bar{t}_ϕ) в результате форсировки зоны горения и низкого уровня в ней η_r приводит к увеличению неравномерности параметров в зоне догорания. Этот процесс на режимах с низкой величиной η_r может происходить даже на струях воздуха в газосборнике.

Анализ изменения характерных площадей (рис. 24 б), определяющих параметры поля T_r^* , показал, что при минимизации размеров кольцевых КС

$$\Theta_q = \frac{(T_r^* \cdot T_k^*) - 1}{q(\lambda_r)^2}$$

$$\text{и } E_{твс} = \frac{H_u}{\alpha_k \cdot L_0 \cdot i_k^*},$$

то для КС, схема которой представлена на рис. 5, θ_ϕ достигает величины более 35% (рис.23).

Столь существенный уровень θ_ϕ однозначно объясняется особенностью малоразмерных КС: ростом относительных величин источников неравномерностей при уменьшении общих размеров КС. Эта закономерность ясно иллюстрируется увеличением относительного окружного шага между топливными форсунками t_ϕ (рис. 24 а). Малые размеры КС отражаются на величине параметра форсирования K_v (см. рис. 2), тем самым ухудшаются условия достижения высокой полноты тепловыделения η_r . Повышенная начальная неравномерность распределения топлива по сечению первичной

роль внутреннего кольцевого канала (при приближении его к оси двигателя) сходит на нет, в то время как влияние относительной величины наружного кольцевого канала непрерывно растет. Подобное перераспределение ролей усугубляется перераспределением по ним расходов воздуха и гидравлических потерь (см. рис. 5), что является следствием особенностей течения в диффузоре КС за центробежной ступенью компрессора.

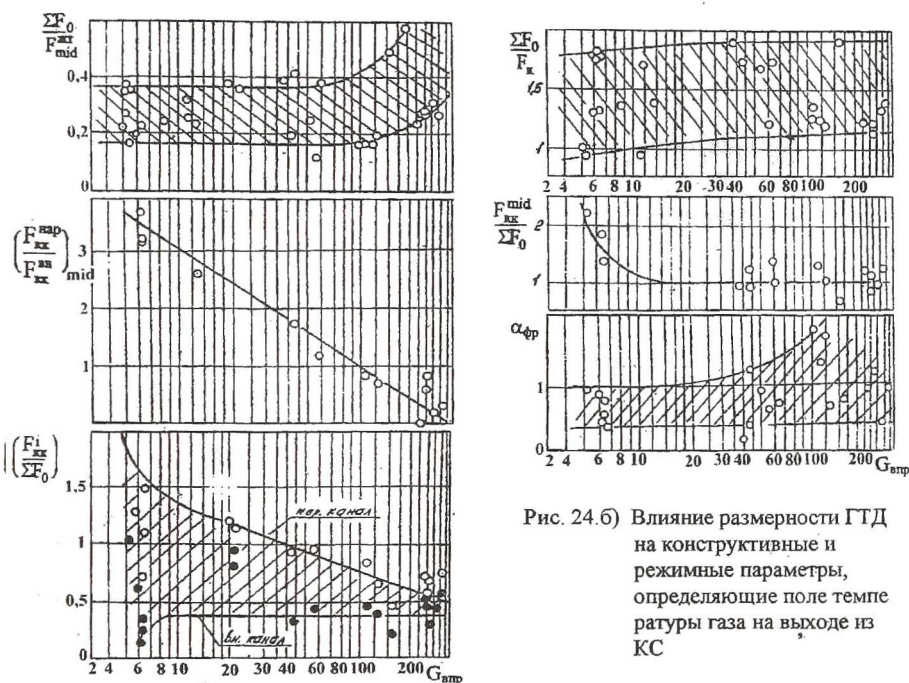


Рис. 24.6) Влияние размерности ГТД на конструктивные и режимные параметры, определяющие поле температуры газа на выходе из КС

Параметры выходного поля температур в значительной степени определяются глубиной проникновения струй вторичного воздуха (\bar{B}_p), которая задается соотношением скоростных напоров в сносящем потоке и струе, а также углом между направлениями втекания струи и сносящего потока:

$$\frac{\rho_r \cdot W_r^2}{\rho_0 \cdot W_0^2} \approx \left(\frac{\sum F_0}{F_{ж}} \right)^2; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{W_0}{W_{кк}} = \frac{F_{кк}}{\sum F_0}$$

Уменьшение размерности двигателя приводит к увеличению соотношения $(F_{кк}^нар / F_{кк}^ан)_{mid} \approx W_{кк}^ан / W_{кк}^нар$ с (1...1,5) до (4...4,5) (рис. 24.6). Следовательно, скорость во внутреннем кольцевом канале для малоразмерной КС в 3,5...4,5 раза выше, чем в наружном. С учетом

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_0}{W_{\text{кк}}} \approx \left(\frac{F_{\text{кк}}^{\text{mid}}}{\sum F_0} \right) = f(G_{\text{в.уп}}),$$

и принимая во внимание, что на поворот потока во внутренний канал расходуется дополнительная энергия, можно сделать вывод, что уменьшение размеров КС приводит к значительному снижению \bar{V}_p во внутреннем кольцевом канале, а наружный канал работает под «избыточным» перепадом давления и, практически, полностью формирует радиальную эюру T_r^* . Можно также предположить, что при больших $\bar{V}_p^{\text{нар}}$ (более 0,7...0,8) струи вторичного воздуха из наружного кольцевого канала вытесняют горячие продукты сгорания на периферию и формируют радиальную эюру T_r^* . Следовательно, основным инструментом для формирования поля T_r^* становятся отверстия наружного смесителя.

Экспериментальная отработка полей T_r^* в кольцевых КС проточной

и противоточной схем показала [16, 17], что изменение давления на входе в КС в диапазоне $p_k^* \approx 100 \dots 700$ кПа практически не оказывает влияния на характеристики поля T_r^* (рис. 25).

При изменении неравномерности распределения топлива по форсункам в диапазоне $K_T \approx 0,1 \dots 4$ уровень максимальной радиальной неравномерности практически не изменяется, окружная же неравномерность остается неизменной лишь в диапазоне K_T менее 0,2...0,32 (рис. 26).

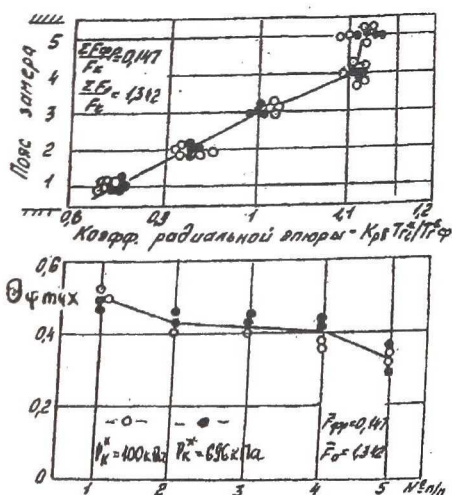


Рис. 25. Влияние давления в КС на параметры выходного поля температур T_r^*

Установлено существенное влияние на поле T_r^* обтекания ЖТ особенностей потока на выходе из компрессора. Так, наличие остаточной закрутки на выходе из компрессора и использование общепринятых рекомендаций («шахматное» расположение отверстий смесителя относительно отверстий

первого ряда) при проектировании КС МГТД приводит к повышенной неравномерности поля T_r^* (рис. 27). Смещения первого ряда отверстий в окружном направлении относительно отверстий смесителя на наружной обечайке приводит к изменению Θ_{\max} . Для снижения ее уровня (для парирования остаточной закрутки) отверстия целесообразно располагать в «коридорном» порядке.

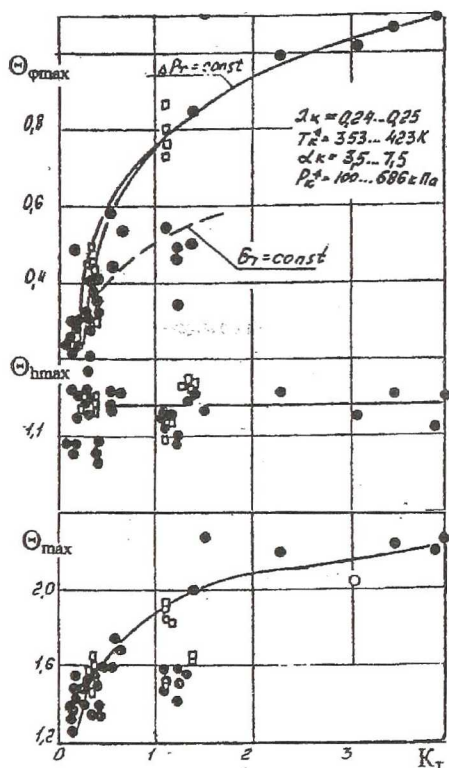


Рис. 26. Влияние начальной неравномерности распределения топлива по форсункам на параметры выходного поля температур

При изменении характерных площадей наибольшее влияние на Θ_{\max} оказывают размеры проходных сечений во фронтном устройстве и наружном смесителе, при этом радиальная неравномерность $\Theta_{h\max}$ достаточно стабильна в широком диапазоне $\Sigma F_0/F_k \approx 0,9...1,5$ в отличие от традиционных

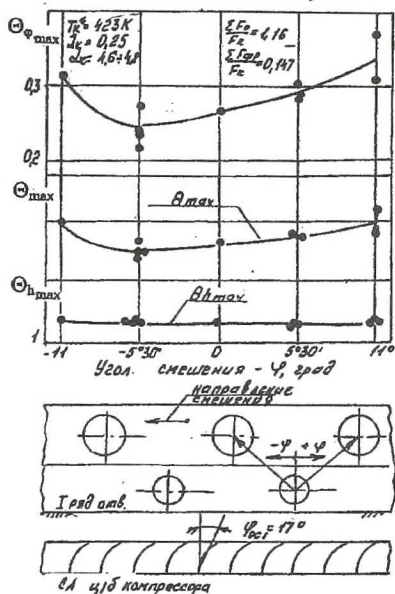


Рис. 27. Влияние смещения отверстий наружного смесителя относительно первого ряда отверстий жаровой трубы на параметры выходного поля температур

схем КС (рис. 28). Причем с уменьшением размерности КС величина максимальной радиальной неравномерности поля T_r^* снижается (рис. 29).

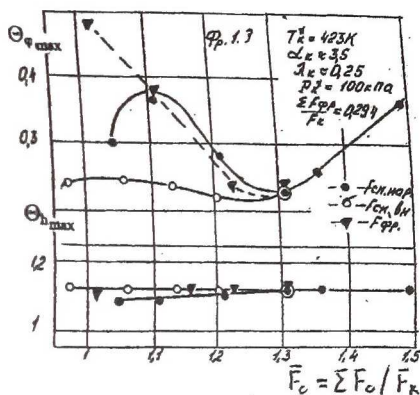


Рис. 28. Влияние раскрытия жаровой трубы прямооточной КС мало-размерного ГТД на параметры выходного поля температур

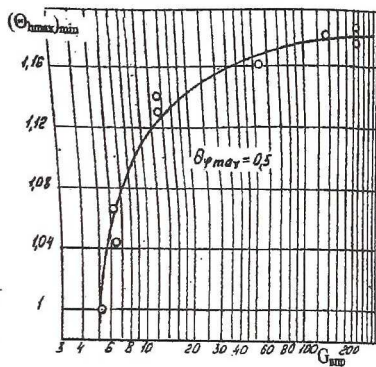


Рис. 29. Влияние размерности ГТД на уровень максимальной радиальной неравномерности выходного поля температур

7. СРЫВ ПЛАМЕНИ

Все изложенные выше результаты подтверждают основную особенность КС МГТД – существенное влияние на характеристики камеры относительных величин неоднородностей в потоке рабочего тела. В том числе и размеров капель распыленного топлива. С учетом этого, естественно было предположить, что качество распыливания должно оказывать заметное влияние на «бедную» границу срыва пламени, поскольку для этих режимов работы КС характерны малые перепады давления на топливных форсунках, следовательно, и достаточно грубый распыл. Исследование, выполненное на данную тему, полностью подтвердило это предположение [18].

Для описания связи характеристики «бедного» срыва пламени с размерами капель в качестве прототипа была выбрана модель Лефевра [19], что определялось ее простотой и ясностью взаимосвязи с величиной СДК, а также тем, что она уже успешно применялась для анализа характеристик «бедного» срыва пламени КС ряда реально существующих ГТД различной размерности.

Выбранная модель перед использованием была переработана: химическим реактором моделировалась только зона рециркуляции (ЗЦ), поскольку

перед срывом остаточное пламя занимает часть первичной зоны (ПЗ). Математическое описание преобразовывалось для уяснения содержания ключевых констант (типа A''_*), по которым рекомендуется осуществлять накопление статистики. В результате основное выражение для описания срыва пламени приобрело следующий вид:

$$\alpha_{к.ср} = \frac{1}{A''_* \cdot f_{гз}^2} \times \frac{1}{\left\{ \frac{G_B}{(P_k^*)^n \cdot T_k^* \cdot V_{гз}} \right\}} \times \frac{\text{EXP}(T_k \cdot 300)}{(T_k^*)^2} \times \frac{\lambda_{эфф} (Hu/L_0)}{D_{32}^2}, \quad (25)$$

где D_{32} – средний диаметр капель по Заутеру,

$$A''_* = C \cdot \frac{R_{см} \cdot Hu}{L_0} \times \frac{V_{гз}^{0.85}}{X_{г.гз}} \times \frac{(\tau_{пр}/\rho)_{гз}}{(\tau_{пр}/\rho)_{пз}} \quad (26)$$

Выражение (26) устанавливает пропорции между характерными зонами, которые существенно изменяются при уменьшении размеров КС. Капли выполняют роль источников парообразного топлива, причем, в ЗЦ объемом $V_{гз}$ попадает некоторая доля $X_{г.гз}$ от всего топлива, испаренного в ПЗ. Так как не все капли за время пребывания в ПЗ успевают испариться, то из-за остатков в них топлива обеднение смеси наступает раньше.

Математическая модель для расчета величин, входящих в (25), включает дополнительно уравнения:

- для параметра нагрузки реактора (ЗЦ) на предсрывном режиме;
для расчета массы топлива, испаренного в ПЗ;
материального баланса веществ в реакции топливо \Rightarrow продукты сгорания;
- бимолекулярной химической реакции в форме Аррениуса;
- подогрева ЗЦ от сгорания топлива.

На основе выражения (25) и перечисленных уравнений практически реализованы алгоритм и вычислительная программа для анализа срывных характеристик.

С использованием разработанной математической модели были проведены исследования срывных характеристик более 30-ти КС различной конструкции. Полученные результаты в совокупности с экспериментальными дан-

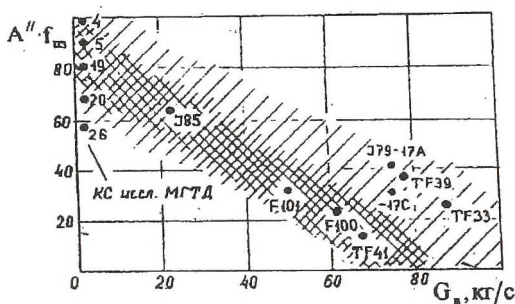


Рис. 30. Тенденция изменения корреляционной константы "А" для ГТД малой, средней и большой размерности

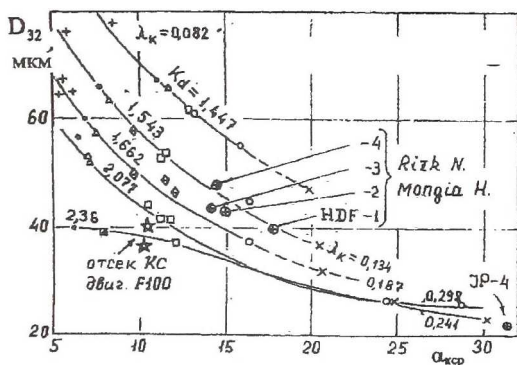


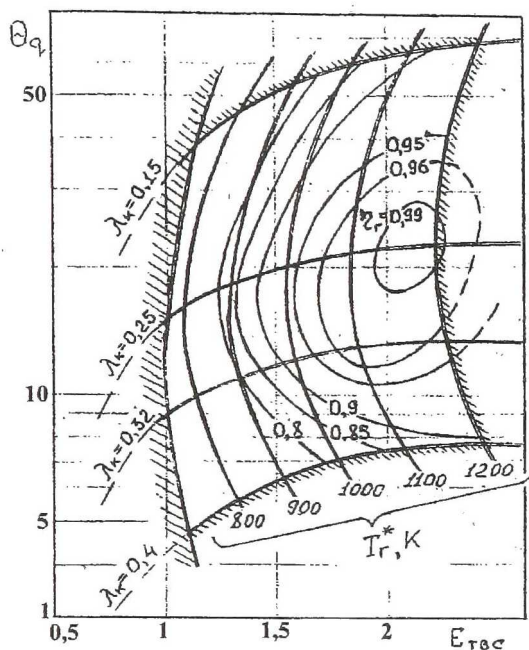
Рис. 31. Влияние мелкости распыливания топлива (D_{32}) на характеристику «бедного» срыва пламени ($\alpha_{к,ср}$)

8. ПОЛНОТА ТЕПЛОУДЕЛЕНИЯ

Опыт создания нерегулируемых КС показал, что путем длительной доводки возможно подобрать сочетание конструктивных элементов и параметров рабочего тела, которое обеспечит в определенном диапазоне режимов работы высокий уровень коэффициента η_r . Особенностью малоразмерных КС является то, что этот диапазон существенно уже, чем в КС других размеров. Объясняется это повышенной напряженностью рабочего объема КС, малыми величинами $\tau_{пр}$ (см. рис. 2), относительно большими размерами выгорающих капель топлива, а также повышенной неравномерностью параметров во всех сечениях ЖТ, в том числе и в зоне догорания. В результате (рис. 32)

ными Лефевра позволили получить зависимость, подтверждающую ухудшение срывных характеристик (увеличение A'') при уменьшении размеров КС (рис. 30).

Получены коэффициенты влияния K_d среднего диаметра капель на границу «бедного» срыва пламени (рис. 31). Представленные результаты показывают, что в рамках используемой реакторной модели зоны горения с равномерно распределенными по ней каплями, с повышением напряженности режима работы КС требования к качеству распыливания топлива должны повышаться, поскольку коэффициент влияния K_d заметно увеличивается с 1,45 до 2,36.



уровень $\eta_r = 0,99$ достигается лишь в узкой области режимов, при отклонении от которой η_r заметно снижается. На этом основании можно сделать вывод о том, что нерегулируемые КС малоразмерных ГТД более однорежимны, чем КС других типоразмеров.

Рис. 32. Обобщенная характеристика КС малоразмерного ГТД с изолиниями коэффициента полноты тепловыделения

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, объективно существующие особенности конструкции и режимов работы малоразмерных КС создают определенные трудности в организации рабочего процесса, которые еще более усложняются из-за специфики условий их эксплуатации. Для оптимизации характеристик КС МГТД необходимо удовлетворить ряд традиционно противоречивых конструктивных, режимных и эксплуатационных требований. По существу, задача еще сложнее, поскольку оптимальное сочетание параметров может меняться с изменением режима работы двигателя.

Можно считать, что основными признаками малой размерности КС являются:

изменения в схеме КС, которые диктуются спецификой облика и низкими термодинамическими параметрами двигателя;

принцип роста относительных величин структур, размеров и явлений в организации рабочего процесса и конструкции КС при уменьшении ее размеров.

Следует также отметить, что рост относительных размеров технологических допусков на изготовление деталей ЖТ и вообще КС МГТД (это же можно сказать и о величине относительной погрешности измерений при испытании таких КС) приводит к выводу, что создание КС очень малых размеров требует значительно более высокой культуры их производства и испытаний, чем это допускается при создании КС других размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riddlebaugh S.H., Norgren C.T. Исследование характеристик камеры сгорания малоразмерного двигателя, имеющей различные топливные форсунки. // Новое в зарубежном авиадвигателестроении. – М.: ЦИАМ, 1986. № 10. – С.12...16.
2. Абрашкин В.Ю., Ковылов Ю.Л. Влияние размерности ГТД на выходные характеристики камер сгорания. – В сб.: Тезисы докладов X Всероссийск. межвузовск. науч.–техн. конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». М.: Изд. ГПНТБ, 1996. – С.132.
3. Дадж А. Газотурбинные двигатели малой мощности. – М.: Иностранная литература, 1963 – 420 с.
4. Проект камеры сгорания малоразмерного ГТД с расходом рабочего тела 0,3 кг/с. / Ланский А.М., Абрашкин В.Ю., Семенов А.В., Фетисов В.И., Цыганов А.М., Шамбан М.А. – В сб.: «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе»: Доклады на междунар. научн.–техн. конф. Самара: СГАУ, 1997. – С.191...197.
5. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
6. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
7. Установка для определения характеристик двухфазных потоков. / Книш Ю.А., Ланский А.М., Диденко А.А. и др. – Информационный список о научн.–техн. достижениях № 91-67, Куйбышевский МПЦ НТИ и Ц, 1991. – 4 с.
8. Диденко А.А., Ланский А.М. Исследование распыливания жидкого топлива пневмомеханическими форсунками. – Самара: СГАУ, 1992. – 29 с. – Деп. в ВИНТИ 11.02.93. № 353-В93.
9. Диденко А.А., Ланский А.М. Расчетно-экспериментальное исследование характеристик бедного срыва и запуска КС ГТД с учетом качества распыливания топлива пневмомеханическими форсунками. – В сб.: Тезисы докладов на научн.–техн. семинаре по внутрикамерным процессам в энергетических установках, струйной акустике, диагностике. Казань, КВВКИУ РВ, 1993, – С. 62...63.
10. Диденко А.А. Исследование качества распыливания топлива и его влияния на характеристики камер сгорания малоразмерных ГТД. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Самара: СГАУ, 1996. – 24 с.
11. Диденко А.А., Зубков П.Г. Исследование пусковых характеристик малоразмерной КС – Малоразмерные ГТД: Тезисы докл. и сообщений IV отрасл. науч.–техн. конф., М., ЦИАМ, 14...16 марта 1987 г.
12. Веппе А.Б., Зубков П.Г., Ланский А.М. Влияние параметров воздуха на запуск камер сгорания ГТД – Куйбышев: КуАИ, 1990. – 9 с. – Деп. в ЦНТИ ГА 19.07.90, № 816-ГА90.
13. Веппе А.Б., Зубков П.Г., Ланский А.М. К вопросу моделирования процесса камер сгорания ГТД – Куйбышев: КуАИ, 1990. – 12 с. – Деп. в ЦНТИ ГА 22.11.90, № 822-ГА90.
14. Зубков П.Г. Исследование процесса воспламенения при запуске камер сгорания малоразмерных ГТД. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Самара: СГАУ, 1991. – 16 с.

15. Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л., Цыганов А.М. Элементы методологии проектирования и теории камер сгорания ГТД, ГТУ (в этом выпуске).
16. О формировании полей температуры газа на выходе из прямоточных камер сгорания малоразмерных ГТУ. / Абрашкин В.Ю., Ланский А.М., Христюк О.В., Шамбан М.А., Файнгаллерин Э.Т. – Газотурбинные двигатели и установки. Тез. докл. на Всесоюзн. науч. конф. М.: МГТУ, 1991. – С.146.
17. Исследование рабочего процесса малоразмерной камеры сгорания: Отчет по НИР (заключ.). КуАИ. Рук. Ланский А.М.. Тема 62-87 № ГР 01870025440. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – 114 с.
18. О некоторых закономерностях взаимосвязи характеристик камер сгорания с качеством распыливания топлива и параметрами смеси. / Диденко А.А., Ковылов Ю.Л., Ланский А.М., Шамбан М.А., Цыганов А.М. – В сб.: «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе». Доклады на междунар. научн.–техн. конф. Самара: СГАУ, 1997. – С.106...113.
19. Лефевр А.Х. Влияние свойств топлива на запуск, устойчивое горение и полноту сгорания топлива в камере сгорания газотурбинного двигателя. – Труды Америк. общества инж.–мех. Сер. А. – М.: 1985, №1. – С.18...32.

УДК 621.452.32.068:543.272.75.05

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫГОРАНИЯ БЕНЗ(а)ПИРЕНА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

Лукачев С.В., Матвеев С.Г.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Выброс вредных веществ, содержащихся в отработавших газах ГТД, приводит к значительному локальному загрязнению атмосферы в зоне аэропортов. В настоящее время Международная организация гражданской авиации (ИКАО) нормируют выброс авиационными двигателями 4-х вредных веществ: окиси углерода (СО), несгоревших углеводородов (НС), окислов азота (NO_x) и дыма (SN) [34]. В то же время известно, что продукты сгорания авиационных топлив обладают канцерогенной активностью [31, 37]. Это связано с тем, что (как и в случае сжигания углеводородных топлив в автомобильных двигателях, промышленных топках, котельных и т.д.) среди несгоревших углеводородов в продуктах сгорания содержатся полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), многие из которых обладают канцерогенной и (или) мутагенной активностью. Индикатором присутствия группы канцерогенных ПАУ принято считать бенз(а)пирен (БП) C₂₀H₁₂, который является наиболее активным и стойким канцерогеном. БП – единственное вещество из группы канцерогенных ПАУ, содержание которого в воздухе насе-