

В данном случае, очевидно, α_{opt} соответствует умеренно бедной смеси. Наконец, при увеличении α возрастает погрешность измерения τ_{NOx} . С улучшением качества смешения и обогащением состава смеси усиливается зависимость τ_{NOx} от времени пребывания, что свидетельствует о доминирующей роли образования NO по термическому механизму. Примечательно, что при умеренных значениях потерь полного давления в смесителе ($\xi < -1,0$) и разумных значениях L_c и d ($L_c/d \approx 100$, $L_c/H \approx 10$) могут быть достигнуты весьма низкие уровни выбросов окислов азота, приближающиеся к минимально возможному уровню, прогнозируемому теорией Зельдовича. Разработанная математическая модель успешно применялась при проектировании малотоксичных горелочных устройств для камер сгорания ряда ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. – М.: Наука, 1986. – 280 с.
2. Теория турбулентных струй. /Под. ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1984. – 720 с.
3. Секундов А.Н. Применение дифференциального уравнения для турбулентной вязкости к анализу плоских неавтономных течений. – Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, №5. – с. 119...127.
4. Beguier C., De Keyser I., Launder B.E. Ratio of scalar and velocity dissipation time scales in shear flow turbulence. – Phys. Fluids, 1978, v. 21, №3. – p. 307...310.
5. Тухбатуллин Ф.Г., Кашапов Р.С. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок. – М.: Недра, 1997. – 160с.
6. Хинце И.О. Турбулентность. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 680 с.

УДК 562. 23. 045

ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕОРИИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД, ГТУ

Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

1. АНАЛИЗ И СВЕРТКА ТРЕБОВАНИЙ К ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Как известно, к организации рабочего процесса камер сгорания ГТД предъявляется более двух десятков параметрических требований, многие из которых наилучшим образом удовлетворяются при существенно различной организации рабочего процесса. Например:

- для уменьшения выбросов NO_x необходимо снижать время пребывания в зоне горения, а для снижения выбросов CO и C_mH_n необходимо его увеличивать;

с точки зрения снижения удельного расхода топлива ГТД необходимо увеличение η_r и $\sigma_{\text{кв}}$. Но для увеличения η_r требуется турбулизация в зоне подготовительных процессов и в зоне горения, т.е. увеличение затрат механической энергии потока воздуха (уменьшение $\sigma_{\text{кв}}$);

- из-за сокращения добычи высококачественной нефти ставится задача перехода на низкосортные керосины (с большим содержанием ароматики) и даже на дизельное топливо, но при этом явно увеличивается выброс несгоревших углеводородов, в том числе и канцерогенных, увеличивается вероятность отложения нагара и кокса, следовательно, снижается ресурс камер сгорания (КС);

- для расширения запасов надежной работы двигателя на режимах приемистости и сброса газа желательно снижать предел по α_{min} , но это ведет к ухудшению теплового состояния жаровой трубы и индекса эмиссии NO_x ;

- для увеличения потребной высоты запуска КС в полете требуется выбирать меньшую величину параметра форсирования

$$K_v = \frac{G_b}{P_k^{1,25} \cdot T_k^* \cdot V_{\text{жт}}},$$

т.е. увеличивать объем жаровой трубы $V_{\text{жт}}$, а это вступает в противоречие с заданными габаритами и весом КС, увеличивает время пребывания $t_{\text{пр}}$ в зоне горения, что приводит к росту выбросов NO_x .

Примеры можно продолжать, но и уже перечисленных, видимо, достаточно для того, чтобы сделать вывод, что ужесточать требования одновременно по всем показателям работы КС – невозможно, а поиск их оптимального сочетания – это поиск компромисса между уровнями этих требований. Поиском такого компромиссного решения и является процесс доводки КС. Очевидно, что оптимизировать организацию рабочего процесса сразу по 20 и более показателям затруднительно, поэтому их количество необходимо каким-либо способом уменьшить.

Предполагается, что все указанные требования можно перегруппировать в три других блока:

1. Требования, направленные на обеспечение ЭФФЕКТИВНОСТИ работы КС.
2. То же, но для обеспечения НАДЕЖНОСТИ (в широком смысле этого понятия).
3. То же, но для ЭКОЛОГИЧНОСТИ.

В перспективе можно надеяться, что ранжирование требований в каждом блоке по значимости или иному признаку позволит выполнить их свертку в некоторый обобщенный показатель: в блоке 1 – $P_{эф}$, в блоке 2 – $P_{нд}$, в блоке 3 – $P_{эк}$. В таком варианте поиск компромиссного решения и само понятие компромисса становится гораздо более определенным. Пока такая свертка показателей работы КС отсутствует, можно ее заменить простым группированием требований в указанные блоки и выделением в каждом из них приоритетного требования.

Уменьшение количества контролируемых показателей не означает исключения их противоречивости. Следовательно, процесс доводки КС по-прежнему остается процессом поиска компромиссного решения. Видимо, его можно сократить и удешевить, если при выполнении этой работы пользоваться определенными правилами. В совокупности они представляют собой МЕТОДОЛОГИЮ проектирования этого узла.

2. СОДЕРЖАНИЕ И НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ КАМЕР СГОРАНИЯ

Методология должна давать ответы на вопросы о закономерностях, приемах и «инструментарии», которые следует применить (и о последовательности их применения) на том или ином этапе создания КС, начиная от формирования ТЗ и кончая заключительным испытанием доведенной до требований ТЗ камеры в составе двигателя.

Обзор той части литературы, касающейся проблем разработки КС ГТД, которые наиболее полно отражают уровень знаний по этому вопросу на некоторый момент времени [1...7], показывает, что основные монографии посвящены проблеме организации горения жидкого или газообразного топлива в потоке рабочего тела ГТД. То есть в них можно найти ответы на вопросы, связанные с закономерностями тех физических явлений, которые обязатель-

но имеют место в процессе работы КС. Те методики расчетов, которыми в ряде книг сопровождается анализ организации рабочего процесса, не обладают признаками методологии, поскольку носят частный, а не системный характер.

При таком положении дел специалисты в области исследований и разработки КС время от времени предпринимают попытки дать общее представление о принципах проектирования этого узла ГТД (например [8, 9]). Некоторые работы имеют в названии слово «методология», но пока не могут в полной мере претендовать на исчерпывающее ее изложение. Скорее всего, их можно считать попытками найти подходы к решению проблемы. Причем во всех предлагаемых подходах пока слабо прослеживается связь с двигателем, для которого проектируется КС.

Между тем в практике ОКБ существенная часть времени и средств, которые поглощает разработка КС, затрачивается именно на вопросы согласования работы КС с другими узлами ГТД. Следовательно, методология проектирования и доводки камеры должна включать в себя кроме способов решения специфических задач данного узла (организация зоны горения, стабилизация пламени, выравнивание поля температур на выходе и др.) некоторые приемы общие для всех узлов ГТД и связанные с их **СОВМЕСТНОЙ РАБОТОЙ**.

Существует общепризнанная и достаточно глубоко проработанная теория совместной работы узлов в составе ГТД [10, 11, 12]. С одной стороны она является инструментом, применяемым при проектировании и доводке двигателя в целом, с другой стороны, на примере характеристики компрессора в ней демонстрируется тот эффект, который может дать системный подход к проектированию узла. Основным в этом подходе является четкая связь частного (узла, компрессора) и целого (двигателя). Именно этот принцип положен в основу выбора параметров и формирования облика турбокомпрессора [13] и двигателя как системы [11, 14], а также при согласовании характеристик двигателя и летательного аппарата [15].

Таким образом, для разработки методологии создания КС необходимо выйти из круга чисто камерных проблем и использовать опыт и подходы, накопленные в смежных областях двигателестроения [16, 17].

Структура изучаемого объекта. Анализ, синтез,
оптимизация

Любой технический объект в процессе проектирования можно рассматривать как фрагмент Φ_k более сложного объекта, который в этом случае можно называть системой S [18]. В свою очередь изучаемый объект можно также представить как систему S_k состоящую из определенного набора некоторых фрагментов. Так, ГТД является фрагментом системы узлов, называемой «летательный аппарат» (рис. 1). В свою очередь ГТД также является системой узлов, один из которых – КС. Камера сгорания также может быть представлена системой узлов и расчленена на фрагменты, т.е. эта операция выделения системы и составляющих ее фрагментов в принципе бесконечна в обе стороны и дает в итоге иерархическую структуру изучаемого объекта.

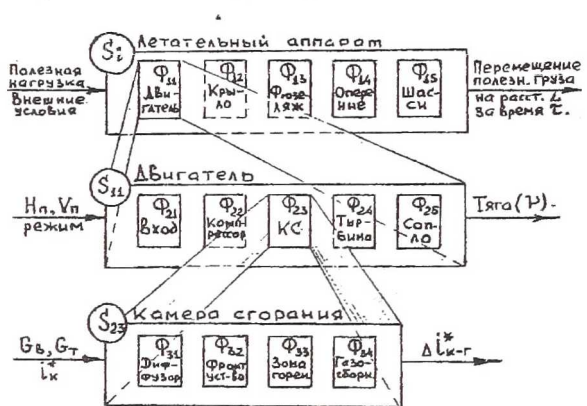


Рис. 1. Структура изучаемого объекта

От каждого элемента структуры изучаемого объекта при анализе его работы в первую очередь необходима ХАРАКТЕРИСТИКА – ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТА РАБОТЫ ОТ РЕЖИМА И ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ.

Поскольку результат работы системы S является результатом совместной работы ее фрагментов Φ_k , то характеристики Φ_k и S взаимосвязаны, т.е. зная характеристики Φ_k и используя уравнения совместной работы фрагментов в данной системе S , можно получить характеристику этой системы. Таковы схематично основные блоки МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ объекта S . Если структура S не выявлена, то S выступает в ранге фрагмента и его математическая модель сводится к модели «черного ящика», когда количественная связь входного и выходного сигналов аппроксимируется некоторой функцией, которая может и не отражать физическую сторону деятельности объекта. Чем

более разветвлена его структура с соответствующим описанием, тем выше уровень его математической модели.

Деление системы S на фрагменты Φ_k , и далее деление каждого из них на новые фрагменты, представляет собой ПРОЦЕСС АНАЛИЗА системы и применяется при разработке ее математической модели. Глубина анализа, т.е. уровень матмодели, зависит от требований к точности расчета характеристики объекта S .

Обратный ПРОЦЕСС является процессом СИНТЕЗА характеристики системы S по характеристикам ее фрагментов и представляет по сути дела процесс проектирования объекта S . В этом случае характеристики фрагментов Φ_k выступают в качестве ПРОЕКТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ (ПП).

Очевидно, что такое решение задачи проектирования объекта S подразумевает наличие банка характеристик его узлов. Такой банк формируется в результате испытаний различных вариантов этих узлов, либо расчетным путем. Для расчета характеристики узла следует иметь банк характеристик его фрагментов и пользоваться ими как проектными переменными ПП_{2,i} второго уровня детализации (ПП_{2,1} и ПП_{2,2}) и т.д.

Расчет характеристики системы S по характеристикам ее фрагментов Φ_i представляет собой:

1. Получение в поле характеристики каждого фрагмента (Φ_i) линии (или области) режимов совместной его работы с другими фрагментами, выделенными на рассматриваемом уровне детализации.
2. Определение при каждом сочетании внешних условий и режимов работы сходственных рабочих точек на полученных в п. 1 линиях (областях).
3. Расчет по параметрам сходственных точек результата действия системы, т.е. точек ее обобщенной характеристики.

Известно, что практически всегда характеристика спроектированного объекта не в полной мере и не сразу удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям. Поэтому за этапом проектирования обычно следует этап ДОВОДКИ, основным содержанием которого является ПРОЦЕСС ОПТИМИЗАЦИИ характеристики объекта S в соответствии с ТЗ.

Процесс оптимизации может выполняться двумя путями:

1. Изменением проектных переменных, т.е. фрагментов системы, можно изменять вид ее характеристики.
2. Регулированием узлов, совместно с которыми работает система S , не изменяя ее характеристику, можно варьировать расположение рабочих режимов в ее поле.

Реальный процесс доводки обычно идет одновременно по обоим путям. Для его ускорения нужна предварительная информация о степени влияния каждой из проектных переменных на вид характеристики S и каждого регулирующего фактора на режимы работы данного объекта. Оценка этого влияния может быть получена в виде коэффициентов влияния методом малых отклонений [19].

Обобщенная характеристика КС [20, 21]

Если подразумевать структуру КС в том виде, как она представлена на рис. 1, то становится очевидным, что ныне существующие характеристики КС – это характеристики ее узлов, представленные в том виде, какой они принимают при их изучении с позиции системы – КС. Характеристики КС как узла двигателя, которую можно было бы применить при анализе совместной ее работы с компрессором и турбиной, пока не существует. Ее создание, отработка технологии ее экспериментального получения и, далее, использования при доводке КС в составе двигателя – является одной из важнейших «частных» задач разработки методологии проектирования и доводки этого узла ГТД. Поскольку понятие «характеристика КС» при ее совместной работе с другими узлами в литературе пока не рассматривалось, в настоящей работе для отличия от существующего набора характеристик, оно именуется – «обобщенная характеристика камеры сгорания» (ОХКС).

Если КС получит свою обобщенную характеристику, то систему уравнений, описывающих совместную работу узлов двигателя можно решить относительно координат этой характеристики, т.е. получить возможность наносить расчетным путем рабочие режимы двигателя в поле ОХКС. Примером высокой информативности такого решения является известная и можно сказать «классическая» характеристика компрессора и линия совместной работы узлов в ее поле (рис. 2).

По определению и по аналогии в качестве координат поля обобщенной характеристики КС следует назначать безразмерные величины, обладающие

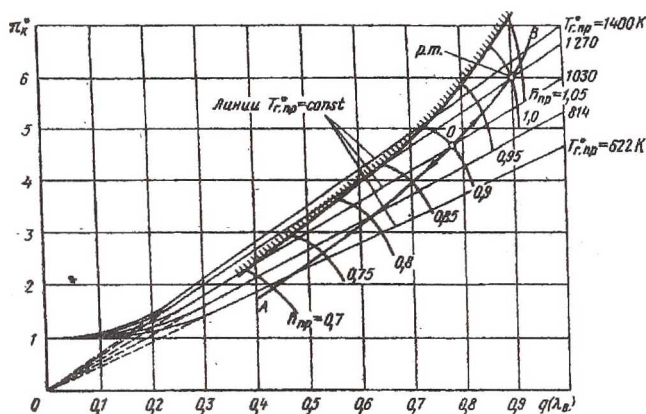


Рис. 2. Линия совместной работы компрессора и турбины (АОВ) на характеристике компрессора

режимов и изолиний показателей $\Pi_{эф}$, $\Pi_{нд}$, $\Pi_{эк}$. Границами поля такой характеристики являются режимы срыва пламени или другие обоснованные ограничения. Геометрия КС при этом считается фиксированной.

Очевидно, что в полном объеме перечисленная информация для конкретной КС может быть получена при ее автономном испытании на специализированном стенде. Причем технология экспериментального получения обобщенной характеристики КС является предметом отдельного и трудоемкого исследования [23].

В СГАУ такая работа была выполнена при испытаниях КС малоразмерного ГТД. На рисунке 3 представлен вид полученной ОХКС (испытания КС и первичная обработка информации выполнены В.Ю.Абрашкиным и Е.А.Луновым). Координата по оси ординат (выходной параметр КС)

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

отличается от рекомендуемой в работе [22], т.к. ее вид был получен на предыдущих этапах работы. Координата

$$E_{твс} = \frac{H_u}{\alpha_{кс} \cdot L_0 \cdot i_r^*},$$

как показано в работе [22], является критерием подобия режима работы КС. Хотя в то время был использован промежуточный вариант координат, анализ формы границ поля ОХКС, режимных линий, распределения величин коэф-

свойствами критериев подобия для режимов работы. Попытка дать строгое решение этой задачи на основе теории подобия изложена в работе [22]. В поле характеристики должны располагаться сетки параметров режимов

В данной серии испытаний на каждом режиме был измерен или рассчитан ряд параметров, позволяющих в том или ином виде оценить степень экономичности, надежности и экологичности работы КС. Так для оценки надежности работы КС совместно с турбиной можно использовать величину неравномерности поля температур T_r^* . Для характеристики режима работы с точки зрения экономичности использовалась величина коэффициента полноты тепловыделения η_r , рассчитанная по тепловому балансу.

Повышенная информативность предлагаемого вида ОХКС очевидна. Анализируя вид изолиний, максимумы и минимумы градиентов нарастания или убывания того или иного параметра, их взаимосвязь и зависимость от параметров режима, можно отыскивать причинно-следственные цепочки, т.е.

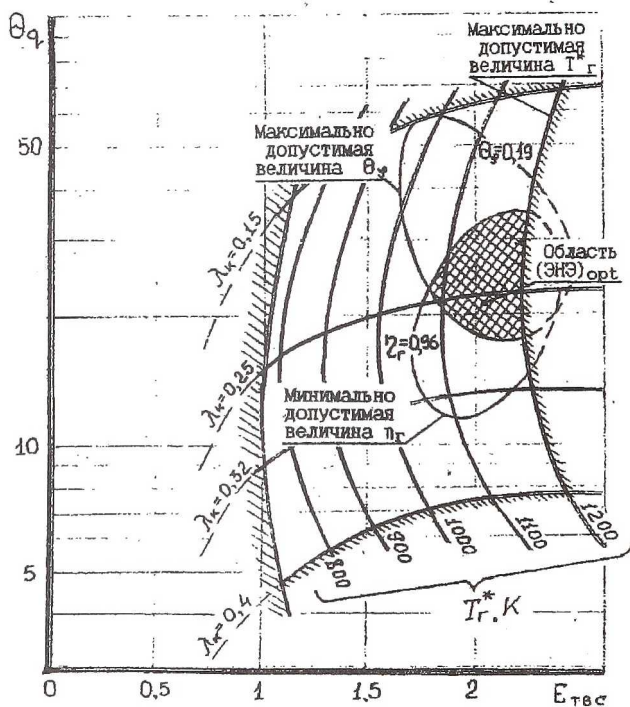


Рис. 4. Обобщенная характеристика КС малоразмерного ГТД. Пример выделения области оптимальных режимов

не более 0,19; η_r — не менее 0,96; T_r^* — не более 1200 К, можно получить область компромиссных решений, где каждый из перечисленных параметров по

новые пути решения сложных задач оптимизации. Такого рода анализ выходит за рамки данной работы, но первый и наиболее очевидный выигрыш от использования ОХКС можно проиллюстрировать примером выделения области оптимальных режимов работы (рис. 4).

Принимая условно допустимые уровни контролируемых параметров: θ_ϕ —

отдельности и все они вместе на любом режиме удовлетворяют требованиям ТЗ. Примечательно, что основные режимы работы исследуемой КС ($\lambda_k = 0,25$ и $T_r^* = 1100 \dots 1200$ К) путем длительной доводки ее как автономного узла, так и совместно с другими узлами двигателя, были расположены именно в этой области.

Предполагается, что ОХКС может служить одним из инструментов при обработке экологических характеристик ГТД и ГТУ. Каждое из вредных веществ, входящих в состав продуктов сгорания, в поле ОХКС дает свой набор линий постоянного уровня. Только их совместный анализ, и только в поле обобщенной характеристики может обеспечить наиболее короткий путь к решению современных проектных задач.

Проектные переменные

Как известно, один из путей оптимизации характеристик ГТД – регулирование его узлов, и в частности, камеры сгорания. Регулирование можно рассматривать как в прямом смысле – создание регулируемой КС, так и в переносном – «регулирование» характеристики КС на стадии ее проектирования. Тогда цель такого регулирования – поиск оптимального проектного решения в поле проектных переменных.

Выше было сказано, что процесс проектирования системы (в данном случае – КС) является процессом синтеза системы и ее характеристики по характеристикам ее фрагментов. Разделение системы на фрагменты, не может быть произвольным по количеству фрагментов и их содержанию. Базой для этой операции является принцип действия системы, т.е. те физические явления, при последовательной реализации которых в данной системе, получается требуемый результат ее работы. Поскольку суть рабочего процесса КС заключается в подготовке условий и реализации горения топливо–воздушной смеси (ТВС), основные признаки следует выделять, исходя из основных понятий теории горения.

В исследованиях, связанных с процессом горения в КС ГТД, принято в первом приближении моделировать этот процесс сжиганием гомогенной ТВС. Известно, что наиболее идеализированной схемой, которая реализует этот процесс, является «адиабатический реактор идеального перемешивания со стационарным течением» [24, 25]. В отечественной литературе он более известен под названием «гомогенного реактора». Из теории этого реактора [26] следует, что если в нем происходит действительно кинетическое горение

гомогенной ТВС, то единственным параметром, с помощью которого можно повлиять на характеристики реактора, является его нагрузка, или теплоснапряженность $Q_{вр}$. Следовательно, характеристику гомогенного реактора можно принять в качестве проектной переменной $ПП_1$, а его расчетную теплоснапряженность за основной изменяемый параметр в процессе проектирования.

Отход в реальной КС от гомогенной ТВС означает переход к диффузионному типу горения, а для него определяющим является характер подвода реагентов и степень их готовности в начальном сечении зоны горения (ЗГ) к химическим реакциям. Подвод в эту зону двух реагентов (топлива и воздуха) диктует необходимость введения еще двух проектных переменных. Причем одна из них – фронтное устройство, традиционно выполняется не только как агрегат (или узел) для ввода топлива в ЗГ, но и как «карбюратор», в той или иной степени подготавливающий ТВС к химической реакции. Следовательно, второй и третьей проектными переменными ($ПП_2$ и $ПП_3$) можно считать характеристики фронтного устройства и системы отверстий в стенках ЖТ для ввода воздуха в ЗГ. Основными изменяемыми параметрами в этом случае будут: качество подготовки ТВС (КТВС) и закон подвода воздуха.

После зоны горения, на завершающем участке КС формируется поле параметров рабочего тела в выходном сечении. Таким образом, характеристика газосборника является четвертой проектной переменной – $ПП_4$. Основным изменяемым параметром в процессе проектирования здесь также является закон подвода воздуха.

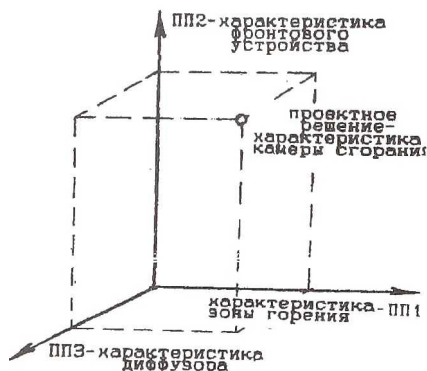


Рис. 5. Пространство проектных переменных

Расчетное значение каждого из перечисленных изменяемых параметров является признаком, выделяющим конструкцию соответствующего узла КС ($\Phi_{3.1} \dots \Phi_{3.4}$, см. рис. 1) в банке данных этих узлов. Очевидно, что $ПП_1$ относится к узлу $\Phi_{3.3}$, $ПП_2$ к узлу $\Phi_{3.2}$, $ПП_3$ к узлу $\Phi_{3.1}$ а $ПП_4$ к узлу $\Phi_{3.4}$. В итоге решение проектной задачи, по крайней мере для ЗГ, можно представить графически в виде рис. 5.

Таково, по мнению авторов, эскизно содержание методологии разработки КС. В процессе совершенствования ее структуры и насыщения новым содержанием попутно будет накапливаться системная информация для формирования недостающего в настоящее время в теории ВРД раздела – «Теория и расчет камер сгорания ГТД(У)». Следует повторить, что основы теории рабочего процесса КС, конечно же, существуют [например, 1...7], но они существуют как бы отдельно от двигателя. В подтверждение достаточно взглянуть в разделы учебников [10, 11, 12 и 14], где рассматривается совместная работа узлов ГТД. В этих разделах все сложности рабочего процесса КС и ее многочисленных характеристик присутствуют в виде всего лишь двух коэффициентов: η_r и $\sigma_{кс}$, да и те при анализе изменения режимов работы двигателя принимаются, как правило, постоянными величинами. Правда во всех исследованиях работы двигателя и его регулирования присутствует фундаментальная величина – T_r^* , но, как это ни удивительно, роль КС в формировании этого параметра нигде не учитывается. Именно поэтому авторы считают, что создание теории КС, встроенной в теорию ВРД, еще предстоит осуществить.

3. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ КС

Суммарные потери энергии и коэффициент полезного действия камеры сгорания

В КС к каждой единице расхода воздуха G_b подводится количество энергии.

$$Q_0 = \frac{G_r \cdot H_u}{G_b} = \frac{H_u}{\alpha \cdot L_0}, \quad (1)$$

где H_u – теплотворная способность топлива, реализуемая в КС. В результате получается приращение энтальпии рабочего тела

$$Q_1 = \frac{(G_r + G_b) \cdot i_r^* - G_b \cdot i_k^*}{G_b} = \frac{(1 + \alpha \cdot L_0) \cdot i_r^*}{\alpha \cdot L_0} - i_k^* \quad (2)$$

Здесь G_b – расход воздуха реально проходящий через КС.

Разница между величинами Q_0 и Q_1 составляет суммарные потери энергии в КС – $\Sigma \Delta Q_i$, т.е.

$$Q_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_0}\right) = Q_1 \quad (3)$$

Очевидно, что выражение в скобках представляет собой КПД КС — $\eta_{\text{КС}}$, который может быть определен двумя способами: либо путем подробного анализа всех видов потерь $\Sigma \Delta Q_i$ (такая попытка предпринята в работе [27]), либо по формуле

$$\eta_{\text{КС}} = \frac{E_{\text{КС}}}{E_{\text{ТВС}}}, \quad (4)$$

где

$$E_{\text{ТВС}} = \frac{Q_0}{i_k^*} \quad \text{и} \quad E_{\text{КС}} = \frac{Q_1}{i_k^*} \quad (5)$$

Выражение (4) может быть представлено в виде номограммы (рис. 6), в поле которой удобно анализировать изменение КПД конкретных КС по режимам их работы. Как уже отмечалось ранее, параметр $E_{\text{ТВС}}$ является критерием подобия при описании процессов в КС, что и дало основание принять его за одну из координат обобщенной характеристики КС (рис. 3). Можно показать, что $E_{\text{ТВС}}$ и $E_{\text{КС}}$ имеют одинаковую структуру и физический смысл.

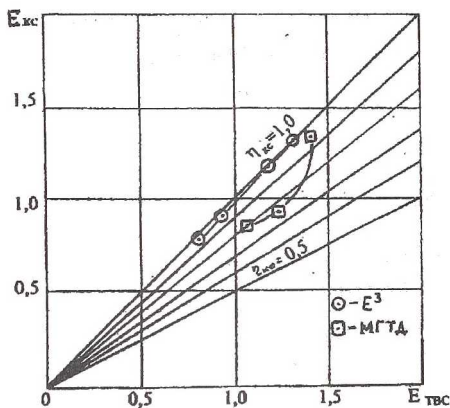


Рис. 6. Номограмма — КПД камеры сгорания

связана с i_r^* — полным запасом энергии рабочего тела на выходе из КС. Параметр $E_{\text{ТВС}}$ имеет ту же структуру и связан с полным запасом энергии, которая содержится в воздухе и топливе на входе в КС. Энтальпия смеси веществ (например, топливо-воздушной смеси)

$$i_{\text{см}}^* = \sum g_n \cdot i_n^*,$$

где g_n — массовая доля n -го вещества, а i_n^* — его энтальпия. Доли расходов воздуха и топлива через КС равны соответственно

$$g_b = \frac{G_b}{G_b + G_T} \quad \text{и} \quad g_T = \frac{G_T}{G_b + G_T},$$

при описании процессов в КС, что и дало основание принять его за одну из координат обобщенной характеристики КС (рис. 3). Можно показать, что $E_{\text{ТВС}}$ и $E_{\text{КС}}$ имеют одинаковую структуру и физический смысл.

Величина $E_{\text{КС}}$, исходя из (2),

$$E_{\text{КС}} = \frac{(1 + \alpha \cdot L_0) \cdot i_r^*}{\alpha \cdot L_0 \cdot i_k^*} - 1 \quad (6)$$

следовательно

$$i_{\text{см}}^* = \frac{G_{\text{т}} \cdot H_{\text{у}} + G_{\text{в}} \cdot i_{\text{к}}^*}{G_{\text{в}} + G_{\text{т}}} = \frac{H_{\text{у}} + \alpha \cdot L_0 \cdot i_{\text{к}}^*}{1 + \alpha \cdot L_0}$$

Отсюда

$$\frac{H_{\text{у}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot i_{\text{к}}^*} = \frac{(1 + \alpha \cdot L_0) \cdot i_{\text{см}}^*}{\alpha \cdot L_0 \cdot i_{\text{к}}^*} - 1 = E_{\text{твс}} \quad (7)$$

Таким образом, $E_{\text{кс}}$ и $E_{\text{твс}}$ являются одним и тем же критерием подобия, расчет которого проводится по параметрам на входе в КС – $E_{\text{твс}}$ и по параметрам в выходном сечении – $E_{\text{кс}}$, а выражение (4) – критериальным уравнением.

Напряженность рабочего процесса

В отечественной литературе наиболее часто применяются следующие показатели напряженности рабочего процесса в КС:

- время пребывания $\tau_{\text{п}} = \frac{V_{\text{жт}}}{G_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{к}}^*}, \text{ с};$

- теплонапряженность $Q_{\text{вр}} = \frac{G_{\text{т}} \cdot H_{\text{у}} \cdot \eta_{\text{кс}}}{V_{\text{жт}} \cdot P_{\text{к}}^*}, \frac{1}{\text{с}};$

параметр форсирования $K_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{V_{\text{жт}} \cdot T_{\text{к}}^* \cdot P_{\text{к}}^{*1,25}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{Па}^{1,25}}$

Все величины с разных точек зрения характеризуют степень форсирования процесса в КС. Для полноты описания напряженности и для возможности сравнения разных КС по некоторому абсолютному параметру представляется полезным ввести в дополнение к перечисленным еще один показатель – МОЩНОСТЬ камеры сгорания:

$$N_{\text{кс}} = G_{\text{т}} \cdot H_{\text{у}} \cdot \eta_{\text{кс}} = Q_{\text{вр}} \cdot V_{\text{жт}} \cdot P_{\text{к}}^*, \text{ Вт}$$

При фиксации объема $V_{\text{жт}}$ все показатели связаны друг с другом и могут быть выражены через параметры режима.

Так из формулы для $\tau_{\text{п}}$ следует, что

$$V_{\text{жт}} \cdot P_{\text{к}}^* = \tau_{\text{п}} \cdot G_{\text{в}} \cdot R \cdot T_{\text{к}}^* = \tau_{\text{п}} \cdot G_{\text{в}} \cdot \frac{k-1}{k} \cdot C_{\text{р}} \cdot T_{\text{к}}^*$$

Подставляя это произведение в формулу для Q_{vp} , и используя понятие безразмерных уровней энергии (5), можно получить

$$Q_{vp} = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{E_{твс} \cdot \eta_{кс}}{\tau_{п}},$$

т.е. при $k = 1,4$

$$Q_{vp} = 3,5 \cdot \frac{E_{твс} \cdot \eta_{кс}}{\tau_{п}} = 3,5 \cdot \frac{E_{кс}}{\tau_{п}} \quad (8)$$

Это выражение хорошо поясняет физический смысл и размерность Q_{vp} . Характерно, что выражения для K_v и $\tau_{п}$ формально связывают их только с параметрами воздуха на выходе из компрессора, а Q_{vp} в явном виде учитывает энергетический уровень рабочего тела на выходе из КС – $E_{кс}$. Если переписать выражение (8) относительно $\tau_{п}$ и подставить его в K_v , то можно в явном виде получить связь K_v с Q_{vp} :

$$K_v = \frac{Q_{vp}}{3,5 \cdot E_{кс} \cdot T_{к}^* \cdot P_{к}^{0,25}}$$

Обобщенно все полученные формулы можно записать в виде

$$K_v, Q_{vp}, \tau_{п}, N_{кс} = f(\text{режим}, V_{жт}),$$

что дает право использовать любой из этих параметров в качестве второй координаты поля обобщенной характеристики КС.

Качество и КПД процесса подготовки топливо-воздушной смеси

Идеальной смесью, которая используется в реакторе полного смешения, является гомогенная, поэтому ее характеристики можно считать предельными для формирования количественного показателя качества подготовки ТВС – КТВС. Очевидно, что реализация того или иного уровня КТВС будет выполняться созданием новых конструкций фронтных устройств, либо за счет затрат в них дополнительной энергии на подготовку ТВС. Для оценки степени совершенства новых конструкций необходимо иметь кроме КТВС еще и величину их КПД – $\eta_{фу}$.

В настоящее время при употреблении понятия «качество ТВС», как правило, имеют в виду единственную количественную характеристику – мелкость топливной аэрозоли, хотя в это же понятие следует включать соот-

ношение топлива и воздуха (α), температуру смеси, соотношение жидкой и паровой фазы, равномерность распределения перечисленных свойств в зоне горения или по локальному объему около свечи, либо по объему дежурного очага пламени.

Для определенности количественной оценки понятия «качество ТВС» предлагается использовать известное из теории горения понятие энергии активации. Будем считать, что реакционно-способное состояние ТВС соответствует энергетическому уровню α (рис. 7), при котором происходит ее самовоспламенение. Тогда

энергия, выделявшаяся в химической реакции

$$E_{\text{хр}} = E_{\alpha} - E_{\text{пс}},$$

где $E_{\text{пс}}$ – энергетический уровень продуктов сгорания при температуре исходных веществ ($T = T_0$). Тепловой эффект реакции

$$Q_{\text{хр}} = E_{\text{твс}} - E_{\text{пс}}$$

Здесь $E_{\text{твс}}$ – энергетический уровень ТВС, который она имеет в конце процесса ее подготовки (участок 1). Величина ΔE , которую можно назвать ЭНЕРГИЕЙ АКТИВАЦИИ ТВС, это предварительные затраты энергии, необходимые для перевода топлива и воздуха в состояние, которое они приобретают в конце участка подготовки ТВС. Величина ΔE может изменяться в пределах от 0 до ΔE_{α} , соответствующей той энергии, которую необходимо добавить к исходным веществам для перевода их в гомогенную смесь в состоянии самовоспламенения. Если $E_{\text{твс}}$ не равна E_{α} , то подготовка смеси затягивается на время τ_2 , выходит в объем предназначенный для зоны горения и снижает тем самым показатели ее работы.

Для того, чтобы подвести к топливу и воздуху энергию ΔE и образовать из них смесь, система подготовки ТВС затрачивает энергию E_3 , которая включает в себя суммарно затраты на:

перекачку топлива из бака в КС;

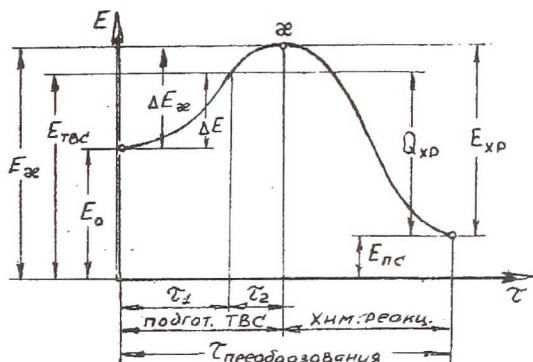


Рис. 7. К понятию «энергия активации ТВС»

- возможный предварительный подогрев топлива;
 - дробление его на капли и испарение;
 - преодоление гидравлического сопротивления воздушных каналов фронтного устройства, участвующих в приготовлении ТВС;
 - смешение паров топлива с воздухом;
 - подогрев паро-воздушной смеси;
- подачу, подогрев и смешение с ТВС дополнительного кислорода (если он применяется в подготовке смеси) и др.

Понятие энергии активации смеси ΔE и суммарных затрат E_s позволяют ранжировать по величине КПД различные системы топливоподачи, средства подготовки ТВС и фронтные устройства. Если принять, что за подготовку смеси «отвечает» фронтное устройство, а остальные системы являются вспомогательными и обеспечивают его работу, то КПД такого устройства

$$\eta_{\text{фy}} = \Delta E / E_s$$

Величина ΔE устраняет неопределенность в понятии «качество ТВС», т.к.

$$K_{\text{ТВС}} = \frac{E_{\text{твс}}}{E_{\text{з}}} = \frac{E_0 + \Delta E}{E_{\text{з}}} \quad (9)$$

Для одной и той же пары компонентов (воздух и топливо одного и того же состава и сорта) величина $E_{\text{з}}$ является функцией только их соотношения, т.е. $E_{\text{з}} = f(\alpha)$. При идеальной подготовке смеси (гомогенная смесь с $T = T_{\text{з}}$)

$$E_{\text{твс}} = E_0 + \Delta E = E_{\text{з}}$$

и $K_{\text{ТВС}} = 1$.

Качество ТВС зависит от КПД фронтного устройства. Действительно, при $\eta_{\text{фy}} = 1$ суммарные энергозатраты $E_{\text{з}}$ на подготовку ТВС расходуются полностью на повышение ее энергетического уровня. Следовательно,

$$E_s = \Delta E \quad \text{и} \quad E_{\text{твс}} = E_0 + \Delta E = E_0 + E_s$$

При $\eta_{\text{фy}} < 1$ $\Delta E = E_s \cdot \eta_{\text{фy}}$. Подставляя в (9), получим

$$K_{\text{твс}} = \frac{E_0 + E_s \cdot \eta_{\text{фy}}}{E_{\text{з}}} = K_{\text{т}} + \frac{E_s}{E_{\text{з}}} \cdot \eta_{\text{фy}}$$

Здесь $K_T = E_0/E_{\text{ж}}$ – условное понятие «качество топлива», в котором величина E_0 суть осредненная по массе энтальпия исходных веществ (керосина i_T^* и воздуха i_K^*).

Все величины, входящие в эту формулу, требуют дальнейшей проработки, как с точки зрения структуры, так и измерений, расчетов. Предполагается, что их физический смысл, изложенный выше, позволяет целенаправленно выполнить эту работу и получить в результате количественные оценки понятий КТВС и КПД фронтального устройства.

Взаимосвязь режимов работы КС и двигателя

Параметрами режима работы КС в составе двигателя являются абсолютный $\Delta T_{\text{КС}}^* = T_{\text{Г}}^* - T_{\text{К}}^*$, либо относительный $\Theta_{\text{КС}}^* = T_{\text{Г}}^*/T_{\text{К}}^*$, подогрев рабочего тела. Результат действия КС – температура в ее выходном сечении $T_{\text{Г}}^*$, является параметром, определяющим режим работы двигателя, но, с другой стороны, через совместную работу узлов в турбокомпрессоре эта же температура задает режим работы и самой КС.

Используя соотношение $T_{\text{К}}^* = T_{\text{Н}}^* + L_{\text{К}}/C_{\text{р.в}}$ и баланс работ на валу турбокомпрессора $L_{\text{К}} = L_{\text{Т}} \cdot v_{\text{в-Г}} \cdot \eta_{\text{мех}}$ можно связать $\Delta T_{\text{КС}}^*$ (или $\Theta_{\text{КС}}^*$) с параметрами двигателя: $T_{\text{Г.пр}}^* = T_{\text{Г}}^* \cdot (288/T_{\text{Н}}^*)$ или $\Theta^* = T_{\text{Г}}^*/T_{\text{Н}}^*$. Для простоты рассуждений использованы уравнения описывающие работу одновального турбокомпрессора и в результате получено

$$\Delta T_{\text{КС}}^* = \frac{T_{\text{Н}}^*}{288} \cdot (T_{\text{Г.пр}}^* \cdot C_{\text{Т}} - 288) \quad (10)$$

либо

$$\Theta_{\text{КС}}^* = \frac{\Theta^*}{1 + \Theta^* \cdot (1 - C_{\text{р}})} \quad (11)$$

где

$$C_{\text{Т}} = 1 - \frac{C_{\text{р.Г}}}{C_{\text{р.в}}} \cdot \eta_{\text{Т}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{Т}}^{\frac{k-1}{k}}} \right) \cdot v_{\text{в-Г}} \cdot \eta_{\text{мех}}$$

– коэффициент, мало изменяющийся в широком диапазоне режимов работы ГТД при критическом ($\lambda_{\text{с}} = 1$) режиме истечения газа из сопла. Он учитывает индивидуальные особенности каждого конкретного турбокомпрессора: отборы мощности ($\eta_{\text{мех}}$) и воздуха ($v_{\text{в-Г}}$), совершенство турбины ($\pi_{\text{Т}}$, $\eta_{\text{Т}}$) и изменение свойств рабочего тела ($C_{\text{р.Г}}/C_{\text{р.в}}$).

В результате получается линейная зависимость $\Delta T_{\text{КС}}^* = f_1(T_{\text{Г,пр}}^*)$ (см. рис. 8а), проходящая через точку с координатами $T_{\text{Г}}^* = T_{\text{Н}}$ (при этом условии $C_{\text{T}} = 1$) и $\Delta T_{\text{КС}}^* = 0$.

Как известно, подогрев рабочего тела в КС определяется величиной $\alpha_{\text{КС}}$ (рис. 8б). При $\eta_{\text{КС}} = 1$ (адиабатическая КС [6]) подогрев при каждом значении $\alpha_{\text{КС}}$ наибольший. Испытания реальных двигателей показывают результат на 50...100 К ниже. Будем считать пунктир статистической зависимостью $\Delta T_{\text{КС}}^* = f_2(\alpha_{\text{КС}})$.

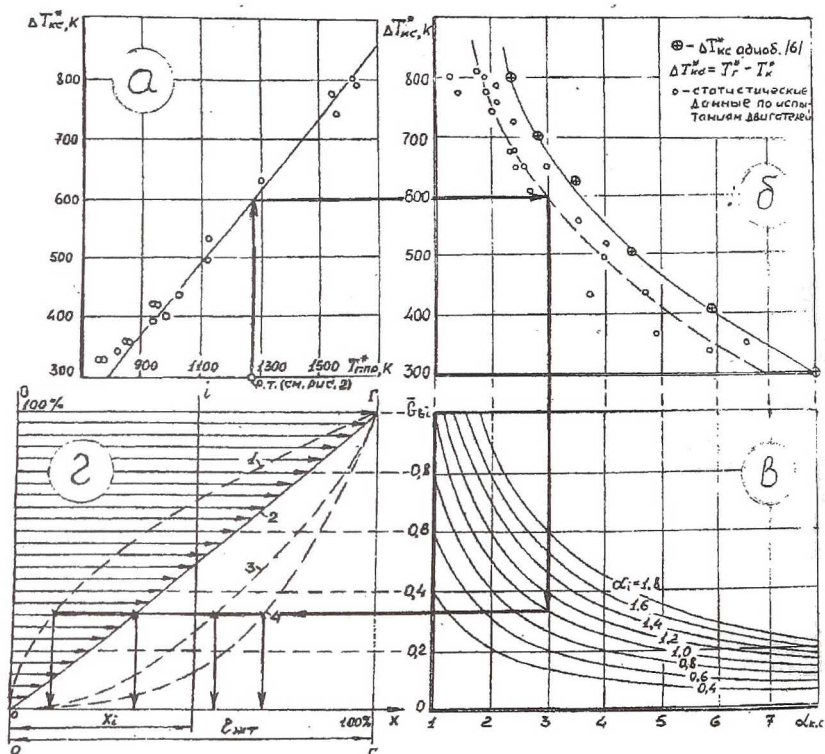


Рис. 8: Влияние режима работы ГТД ($T_{\text{Г,пр}}^*$) на долю расхода воздуха ($\bar{G}_{\text{в}i}$), которая необходима для обеспечения в i -й зоне КС коэффициента α_i . Размеры этой зоны (X_i) вдоль цилиндрической ЖТ при различных законах подвода воздуха в ЖТ:

$$\begin{aligned}
 1 - G_{\text{в}} &\sim (X/l_{\text{ЖТ}})^{0,5}; & 2 - G_{\text{в}} &\sim X/l_{\text{ЖТ}}; \\
 3 - G_{\text{в}} &\sim (X/l_{\text{ЖТ}})^2; & 4 - G_{\text{в}} &\sim (X/l_{\text{ЖТ}})^3
 \end{aligned}$$

Связь осредненной величины α_i в любом i -ом сечении ЖТ с величиной $\alpha_{кс}$ устанавливается на основе выражений

$$\alpha_{кс} = G_{в} \cdot G_{т} \cdot L_0 \quad \text{и} \quad \alpha_i = G_{в,i} \cdot G_{т} \cdot L_0$$

В большинстве ныне существующих КС топливо подводится в одном, начальном сечении ЖТ, следовательно, во всех остальных сечениях $G_{т}$ сохраняется неизменным. При этом условии

$$\bar{G}_{в,i} = \frac{G_{в,i}}{G_{в}} = \frac{\alpha_i}{\alpha_{кс}}$$

Графически это выражение представлено на рис. 8в.

Если в качестве примера принять, что ЖТ – цилиндр с равномерной перфорацией стенки отверстиями, вводящими воздух в каждом сечении ЖТ сразу по всему сечению, то размеры вдоль ЖТ любой характерной зоны, определяются видом функции, задающей закон подвода воздуха (см. рис. 8г).

Взаимосвязь четырех зависимостей, определяющих режим работы КС, проиллюстрирована примером (см. стрелки на рис. 8 а, б, в, г) режима работы двигателя, который на характеристике компрессора (рис. 2) задан пересечением линии $T_{г,пр}^* = 1270 \text{ К}$ и линии совместной работы (АОВ) компрессора и турбины. Если принять этот режим работы за расчетный, то из рис. 8 видно, что на этом режиме $\alpha_{кс} = 3$, а зона активных химических реакций ($\alpha_i = 1$) при линейном законе подвода воздуха располагается в ЖТ на расстоянии $X_i = 0,33 \cdot l_{жт}$ от места впрыска топлива. На этом расстоянии в ЖТ следует ввести 33% от общего расхода воздуха. При дросселировании двигателя до режима малого газа ($\bar{p} = 0,7$; $T_{г,пр}^* \approx 600 \text{ К}$ на рис. 2) $\alpha_{кс}$ изменяется до 7, а зона с $\alpha_i = 1$ сдвигается ближе к топливным форсункам ($X_i \approx 0,15 \cdot l_{жт}$).

Очевидно, что при фиксированной геометрии ЖТ (нерегулируемая КС) перемещение зоны с $\alpha_i = 1$ приведет к изменению величины коэффициента полноты тепловыделения η_r в выходном сечении КС, поскольку его максимум достигается лишь при расчетном положении этой зоны. Выполняя переменными некоторые проходные сечения ЖТ или изменяя показатель степени в зависимости

$$G_{в} = a \cdot (x/l_{жт})^b, \quad (12)$$

конструктор получает способ коррекции характеристики по полноте тепловыделения в процессе проектирования КС.

Граница «бедного» срыва пламени в КС, или срывная характеристика, в значительной степени также определяется законом подвода воздуха в ЖТ и вносит в его выражение некоторое дополнение.

Действительно, в КС всегда существует канал фиксированного проходного сечения, через который в камеру входит доля воздуха, предназначенная быть первой при контакте с топливом. Обычно – это канал горелки. Обозначим эту долю воздуха $\bar{G}_{в.мин}$. По-прежнему будем считать, что зона химических реакций при всех изменениях расхода G_T «выбирает» себе место в ЖТ, где обеспечивается местное $\alpha_i \approx 1$. По мере роста $\alpha_{кс}$ при приближении к границе бедного срыва пламени доля воздуха $\bar{G}_{в.сп} = \text{const}/\alpha_{кс}$ уменьшается по закону, который на рис. 8в прочерчен изолинией $\alpha_i = 1$. Пока $G_{в.сп}$ остается больше, чем $\bar{G}_{в.мин}$, и пламени «удаётся найти» область с $\alpha_i = 1$ оно остается устойчивым. Но по мере приближения к границе бедного срыва $\alpha_{кс}$ растет и наступает момент, когда выполняется условие

$$\bar{G}_{в.сп} = \bar{G}_{в.мин}$$

Пламя достигло минимального канала и ему больше некуда перемещаться. Доля расхода воздуха, поступающая в зону пламени зафиксировалась $\bar{G}_{в.сп} = \text{const}$. Далее процесс развивается по зависимости

$$\alpha_i = \text{const} \cdot \alpha_{кс} ,$$

т.е. по горизонтали на рис. 8в.

Можно предположить, что срыв пламени произойдет при достижении α_i «бедной» границы рабочего диапазона фронтного устройства. На рис. 8в нанесены изолинии α_i в диапазоне, который имеют модульные вихревые горелки [28]. Если в рассмотренном выше примере принять, что фронтное устройство КС выполнено на базе такой горелки и через нее пропускается расход воздуха $\bar{G}_{в.мин} = \bar{G}_{в.сп}/3$, (т.е. $\approx 0,11 \cdot G_b$), то нетрудно подсчитать (значения $\alpha_{кс}$ выходят за границы рисунка), что КС в этом случае можно дросселировать до $\alpha_{кс} = 9$ пока пламя ($\alpha_i = 1$) не достигнет горелок, а затем внутри горелки пламя будет стабилизироваться до «бедной» срывной границы горелки ($\alpha_i \approx 1,8$), т.е. до

$$\alpha_{кс} = \frac{\alpha_{i, \max}}{\text{const}} = \frac{1,8}{0,11} \approx 16,4$$

Изложенные рассуждения применимы лишь к идеализированным схемам, в реальном процессе могут возникнуть дополнительные условия, способные спровоцировать срыв пламени еще до достижения равенства $\alpha_1 = \alpha_{\max}$.

Одним из таких условий является то, что закон подвода воздуха в реальных КС не имеет вида монотонной функции, как это принято на рис. 8г. Воздух в ЖТ подводится через дискретно расположенные отверстия, следовательно, закон $G_v = f(x)$ – ступенчатый, что не обеспечивает условия «плавной передачи горения» от сечения к сечению ЖТ.

Тем не менее, описанная картина приближения режима работы КС к бедной срывной границе соответствует реальности. Очевидно, что срыв пламени можно «оттянуть» по $\alpha_{\text{КС}}$, если выполнить ЖТ не с фиксированной минимальной долей воздуха, а сделать ее регулируемой

$$\bar{G}_{v, \min} = \text{var}.$$

Таким образом, величина $G_{v, \min}$ является константой C_1 , или переменной $C_2 = f(T_r^*)$, которая должна быть отражена в описании закона подвода воздуха

$$G_v = C_{1(2)} + a \cdot (x \cdot l_{\text{ЖТ}})^b$$

Видимо, выбор сочетания величин $C_{1(2)}$, a , b и будет определять выбор закона подвода воздуха и его численное значение как проектной переменной при разработке КС.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 8 дает дополнительную информацию не только для описания характеристики по полноте сгорания и процесса срыва пламени. На их основе могут быть получены и некоторые другие результаты. Например:

чем выше температура T_r^* на расчетном режиме двигателя, тем большую долю расхода воздуха через КС следует направлять во фронтное устройство и первичную зону. В связи с этим $\alpha_{\text{КС, max}}$ на «бедной» границе срыва пламени уменьшается;

- один из способов снижения выбросов NO_x из КС – сжигание обедненной ТВС, т.е. организация обедненной зоны горения. Это также требует увеличения доли расхода воздуха, направляемой в первичную зону с теми же последствиями для величины $\alpha_{\text{КС, max}}$;

для увеличения диапазона регулирования КС ($\alpha_{\text{кс. min}} - \alpha_{\text{кс. max}}$) величину α_i в зоне горения следует уменьшать.

Поскольку все изложенные причинно-следственные связи не противоречат опытным данным можно предположить, что зависимости, представленные на рис. 8 имеют для КС фундаментальный характер и при их строгом математическом описании образуют некоторый раздел теории работы этого узла в составе двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев В.С., Скубачевский Л.С. Камеры сгорания воздушно-реактивных двигателей. – М.: Гос. изд-во оборонпром, 1958. – 214 с.
2. Рабочий процесс и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей. / А.И. Михайлов, Г.М. Горбунов и др. – М.: Гос. изд-во оборонпром, 1959. – 286 с.
3. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. – М.: Машиностроение, 1964. – 307 с.
4. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый и др. – М.: Машиностроение, 1964. – 527 с.
5. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
6. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД; Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
7. Сударев А.В., Маев В.А. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. – Л.: Недра, 1990. – 274 с.
8. Методология проектирования камер сгорания с высокой степенью подогрева газа /D.W. Bahr// Новости зарубежной науки и техники. Серия: Авиационное двигателестроение, 1986. – № 10. – с. 1...9.
9. Egan W.J., Heilly R.S., Hopkins K.N. Optimization of Gas Turbine combustor stoichiometry for expanded operating regime. AIAA Paper, 1980. – № 1286. – 12 p. / ЭИ «Поршневые и газотурбинные двигатели».
10. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей: ч. 2. – М.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
11. Теория воздушно-реактивных двигателей. Учебник / Под ред. С.М. Шляхтенко. – М.: Машиностроение, 1975. – 568 с.
12. Кулагин В.В. Теория газотурбинных двигателей: Учебник в 2 кн. Кн. 2. Совместная работа узлов. Характеристики и газодинамическая доводка выполненного ГТД. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 304 с.
13. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин: Учебник. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
14. Кулагин В.В. Теория газотурбинных двигателей: Учебник в 2 кн. Кн. 1. Анализ рабочего процесса, выбор параметров и проектирование рабочей части. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 264 с.
15. Югов О.К., Селиванов О.Д. Согласование характеристик самолета и двигателя. – М.: Машиностроение, 1975. – 204 с.

16. Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М. Структура методологии проектирования и доводки камеры сгорания ГТД // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: Тезисы докл. X Всероссийск. межвузовск. научн.-техн. конф. – М.: ГПНТБ, 1996. – с. 130...131.
17. Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М. Методология проектирования камер сгорания ГТД, ГТУ / Процессы горения и охрана окружающей среды: Сб. трудов. / РГАТА: Под ред. Ш.А. Пиралишвили. – Рыбинск. 1997. – Ч. 2. – с. 28...31.
18. Прегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ: Учебное пособие, – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
19. Черкез А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. – М.: Машиностроение, 1975. – 379 с.
20. Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М. Обобщенная характеристика камеры сгорания ГТД // Наука и техника гражданской авиации на современном этапе: Тезисы докладов. – М.: МГТУ ГА, 1994. – с. 162...163.
21. Лукачев С.В., Крашенинников С.В., Ковылов Ю.Л., Цыганов А.М. Понятие обобщенной характеристики камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конференции. – Самара: СГАУ, 1997. – с. 127...128.
22. Крашенинников С.В., Лукачев С.В. Решение задачи об обобщенной характеристике камеры сгорания ГТД методом теории подобия. (В этом сборнике).'
23. Особенности технологии получения обобщенной характеристики камеры сгорания ГТД: Отчет о НИР / СГАУ. Рук. С.В. Лукачев. Тема 31в-Б021-049. Самара, 1996. – 102 с.
24. Longwell J.P., Frost E.E., Weiss M.A. Flame Stability of Bluff-Body Recirculation Zones. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 45, p. 1629, 1953.
25. Longwell J.P., Weiss M.A. Heat Release Rates in Hydrocarbon Combustion. I. Mech. E. / ASME Joint Conference on Combustion, pp. 334...340, 1955.
26. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен / Пер. с англ. // Под ред. В.Е.Дорошенко. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
27. Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е. Учет потерь энергии в рабочем процессе камер сгорания ГТД (в этом сборнике).
28. Цыганов А.М. Исследование характеристик модульных вихревых горелок / Труды 3-й НТК молодых ученых и специалистов. / КуАИ. – Куйбышев. – Рук. деп. в ВИНТИ. – № 2077-85ДЕП. –10 с.

УДК 621.452.32.068 : 643.272.75.05

УЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В РАБОЧЕМ ПРОЦЕССЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Весь, достаточно широкий спектр требований, предъявляемых к камерам сгорания (КС) ГТД, можно свести в три характерные группы (ЭНЭ):