

случае частичного внутрифлорсуночного сгорания этот эффект (увеличения длины смешения) усиливается пропорционально коэффициенту $K_{г.ф} \approx \frac{\bar{\xi}}{\xi_{ф}}$.

Поэтому применение частичного внутрифлорсуночного сгорания смеси при определенных условиях может благоприятно сказаться на повышении устойчивости процесса в камере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. – Л.: Недра, 1980 г.
2. Алексеева Т.И., Новикова Л.М. Новые закономерности стабилизации пламени. // Физика горения и взрыва, № 1, 1997.
3. Теория турбулентных струй. Абрамович Г.Н. и др. – 1984.

УДК 621.452.3 : 621.45.022 : 621.43-421/44 : 621.43.068

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ДВУХФАЗНОЙ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Диденко А.А., Рогалев В.В.

*Самарский государственный аэрокосмический университет,
ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара*

1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ

Авиационные ГТД достигли уже предельно высоких параметров и совершенства. Однако, в связи с отсутствием альтернативы для них в авиации и в связи с постепенным расширением их применения в других областях, работы по развитию и совершенствованию авиационных ГТД продолжают, и это несмотря на усложнение и повышение стоимости новых разработок. Помимо традиционных требований к улучшению технико-экономических показателей и характеристик острую озабоченность по-прежнему вызывает загрязнение окружающей среды выхлопными газами двигателей, в которых, как известно, содержится большое число вредных, токсичных и канцерогенных веществ. Наиболее токсичными из числа нормируемых на сегодня веществ являются окислы азота (NO_x). Они оказывают отравляющее действие на живые организмы, являются основным разрушителем озонового слоя и источником кислотных дождей.

В настоящее время в подавляющем числе исследований, направленных на выработку мероприятий по снижению эмиссии NO_x применительно к камерам сгорания (КС) авиационных ГТД, основное внимание уделяется горению бедных, хорошо подготовленных смесей [1, 3]. Как правило, это смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha \geq 1,3 \dots 1,4$ и уровнем остаточной неравномерности по местным составам $S_\alpha = \Delta\alpha/\alpha \leq 10 \dots 15 \%$. Вопросы же горения двухфазной топливо-воздушной смеси (ТВС), после того как были решены проблемы по устранению дымления авиадвигателей и проанализирована возможность внедрения топлив пониженного качества, отодвинулись на второй план. И то, и другое можно, очевидно, объяснить тем, что сжигание именно бедных и хорошо подготовленных смесей планируется в перспективных КС новых концепций. Они должны прийти на смену существующим^{*)} камерам сгорания и обеспечить дальнейшее снижение эмиссии вредных веществ в том числе и NO_x . В частности, по эмиссии NO_x речь идет о её снижении до нормативного уровня в 5 грамм вещества на килограмм топлива (г/кг-топл.) и даже ниже [2, 3]. Кроме того, также считается, что всякое наличие в смеси недоиспарившихся капель, даже самых малых размеров с диаметрами $d_x < 15 \dots 20$ мкм, недопустимо, поскольку это повышает вероятность горения при местных стехиометрических составах вокруг и вблизи капель, или в их следах, что ведет, соответственно, к увеличению выхода NO_x [3].

С точки зрения взаимосвязи эмиссии вредных веществ, в частности NO_x , с механизмами горения и, соответственно, с качеством смесеобразования, из выше отмеченного можно сделать следующие выводы.

С одной стороны, получается, что авторы многих исследований как бы автоматически руководствуются моделью горения, согласно которой вместе с

^{*)} Традиционные КС – это камеры сгорания с крупными пневмомеханическими топливными форсунками, дискретно расположенными кольцевым рядом на входе в жаровую трубу КС. Мелко распыленное форсунками топливо сгорает в камере в одной основной высокоинтенсивной зоне горения. Камеры сгорания новых концепций – это, как правило, двухзонные КС с последовательным или параллельным расположением основной зоны и зоны малого газа, а также камеры с различного рода карбюраторными каналами, с предварительным испарением жидкого топлива и высокоинтенсивным перемешиванием смеси, многомодульные и их всевозможные гибриды [6, 7, 8].

уменьшением размеров капель и повышением равномерности их распределения по объему зоны горения, то есть с повышением степени гомогенности смеси, а также её обеднением, характеристики пламен изменяются плавно. И также плавно и монотонно уменьшается количество NO_x в продуктах сгорания [3, 4], причем, достигая пологого минимума для некоторой предельной по качеству ТВС.

Однако, имеется уже целый ряд экспериментальных и теоретических работ, указывающих как раз на немонотонность протекания характеристик сгорания в зависимости от качества смеси, как например в [5] (рис.1), что дает основания говорить о преимуществах, наоборот, не предельной по свойствам смеси, а смеси с некоторыми рационально оптимальными параметрами и, может быть, с наличием в ней некоторой доли топлива в капельной фазе. На этот счет из рис.1, в частности, видно, что уровень выхода NO_x получается минимальным не для смеси с минимальными d_k , а для смеси с некоторыми промежуточными величинами $d_k = 45 \dots 53$ мкм (для н-гептана).

С другой стороны, более пристальное внимание к смесям для перспективных КС подразумевает как бы уже доказанным полное их преимущество, по крайней мере по эмиссионным характеристикам, над существующими КС.

Здесь, однако, также необходимо отметить, что сравнение КС обычно производится по некоторому списку характеристик, практически по каждой из них в отдельности [6, 7, 8]. Целостного же сравнения – не по совокупной вредности [11], а с точки зрения связи с рабочим процессом не производится из-за отсутствия достаточно обоснованных критериев типа

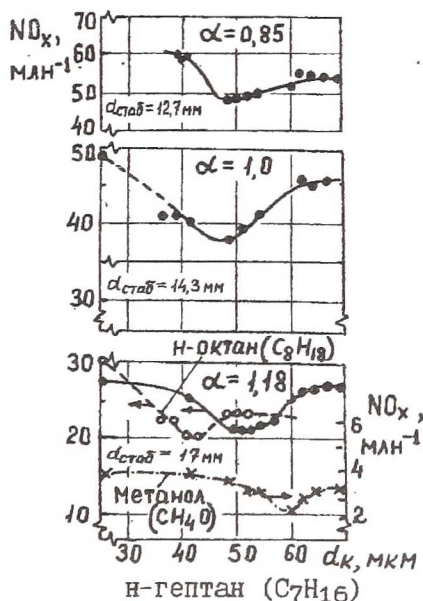


Рис. 1. Зависимость концентрации NO_x от размеров монодисперсных капель и режима их горения при сжигании их за стабилизатором и равномерном распределении в натекающем потоке

сверток и т.п. Кроме того, не совсем ясно, что это за величина уровня эмиссии NO_x в 5 г/кг-топл. [3], к которой должны стремиться разработчики? То ли это удельный выброс NO_x на крейсерском или каком-либо другом режиме или это некоторая средневзвешенная, например, для взлетно-посадочного цикла величина? Не ясно также, какие из КС традиционной схемы можно считать наиболее лучшими, можно ли представить динамику их развития, например, по комплексу эмиссионных характеристик и как они соотносятся в этом отношении с КС новых концепций?

Авторы данной работы с использованием простого критерия типа свертки попытались осуществить целостное сравнение эмиссионных характеристик КС традиционной и перспективных схем. В результате установлено соответствие между уровнем интенсивности в них рабочего процесса. На основе этого определены пределы улучшения эмиссионных характеристик КС традиционных схем. Опираясь как на собственные результаты [9], так и на упоминавшиеся данные работы [5] о неоднозначном протекании характеристик сгорания, анализируется возможность обнаружения дополнительных резервов улучшения характеристик КС традиционных схем, в первую очередь по выбросам NO_x , за счет более тонкого согласования параметров двухфазной ТВС с условиями для её выгорания.

Описывается модельная КС с многоточечной системой регулируемого впрыска жидкого топлива, создаваемая для уточнения некоторых данных из [4, 5, 9] и проверки результатов проведенного анализа по выбросам NO_x и влиянию на них качества двухфазной ТВС.

2. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАДИЦИОННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ КС

Так как появление КС новых концепций обязано стремлению значительно улучшить, в первую очередь, эмиссионные характеристики существующих камер, поэтому КС сопоставляются, прежде всего, именно по эмиссионным характеристикам. Обычно эти характеристики представляются в виде уровней удельных выбросов или индексов эмиссии E_i (в г/кг-топл.) для трех основных нормируемых на сегодня веществ: окислов азота (NO_x), окиси углерода (CO) и несгоревших углеводородов (HC) в табличном или графическом виде в зависимости от относительной тяги $\bar{R} = R/R_0$, выступающей в качестве параметра режима (R_0 – взлетная тяга). Для примера

эmissionsные характеристики показаны на рис.2. В таблицах в отличие от графического представления приводятся, как правило, данные для режимов стандартного взлетно-посадочного цикла (СВПЦ) и иногда также для некоторых крейсерских режимов.

Прежде, чем говорить о сравнении эмиссионных характеристик КС, отметим сначала, как сравниваются в этом отношении двигатели, поскольку из сравнения двигателей можно почерпнуть недостающую информацию для КС.

Двигатели, как известно, сравниваются по суммарному удельному выбросу каждого из веществ для совокупности режимов СВПЦ. Их представляют либо параметром эмиссии по стандарту ICAO – Π_j в граммах вещества на килоньютон взлетной тяги (г/кН_0) [4, 8, 13], либо параметром эмиссии по стандарту института охраны окружающей среды EPA (США) – EPAP_j в килограммах в час на 1000 кгс тяги ($(\text{кг/ч})/1000 \text{ кгс}$) [8]:

$$\Pi_j = \frac{1}{R_0} \cdot \sum_{i=1}^n (EI_{ij} \cdot G_{\tau_i}) = \frac{1}{R_0} \cdot \sum_{i=1}^n (EI_{ij} \cdot C_{R_i} R_i \tau_i), \quad (1)$$

$$\text{EPAP}_j = \frac{\sum_{i=1}^n (EI_{ij} \cdot C_{R_i} R_i \tau_i)}{\sum_{i=1}^n (R_i \tau_i)}, \quad (2)$$

где, соответственно, C_{R_i} , R_i и τ_i – удельный расход топлива, тяга и время работы на i -ом режиме по СВПЦ. Здесь же заметим, что из (1) и (2) нетрудно получить следующее полезное соотношение между величинами Π_j и EPAP_j :

$$\text{EPAP}_j, \frac{\text{кг/ч}}{1000 \text{ кгс}} = 0,11 \cdot \Pi_j, \frac{\text{г}}{\text{кН}_0}, \quad (3)$$

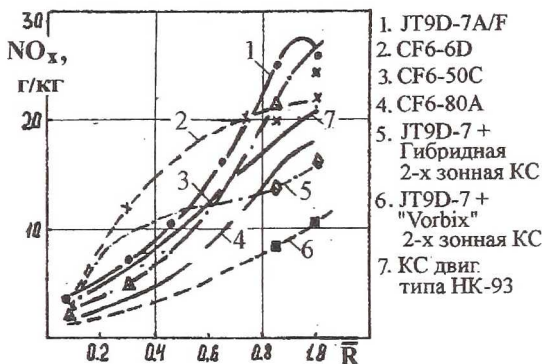


Рис. 2. Эмиссионные характеристики двигателей

которое удобно для пересчета опубликованных данных. Например, согласно (3), для двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) типа JT9D-7A/F со взлетной тягой $R_0 = 205,3$ кН и опубликованной величиной параметра эмиссии ICAO $\Pi_{NO_x} = 69,3$ г/кН можно получить, что данная величина Π_{NO_x} соответствует $EPA_{NO_x} = 7,64$ (кг/ч)/1000 кгс. Попутно нетрудно также установить, что очень строгий, как принято считать, стандарт EPA на эмиссию NO_x в 3 (кг/ч)/1000 кгс [8] соответствует величине $\Pi_{NO_x} = 27,2$ г/кН.

При сравнении эмиссионных характеристик двигателей данные по ним в виде параметров Π_j выносят, обычно, на график точками в зависимости от соответствующей для каждого из двигателей величины суммарной степени повышения давления в компрессоре $\pi_{к_0}^*$, которая берется для взлетного режима. Использовать эти данные для сравнения эмиссионных характеристик собственно КС некорректно и не совсем удобно, так как это, во-первых, двигательные характеристики, а, во-вторых, двигательные данные располагаются на графике с большим разбросом по $\pi_{к_0}^*$ и по параметрам эмиссии Π_j . В результате очень трудно разобраться в причинах расположения некоторых из интересующих точек – то ли в их расположении больше сказалась технология организации рабочего процесса в КС той или иной фирмы, то ли в большей степени повлияли двигательные параметры, например C_R или давление и температура воздуха на входе в КС.

Однако, данные по эмиссионным характеристикам двигателей в совокупности с дроссельной их характеристикой по удельному расходу топлива $C_R = f(R)$ для сравнения КС все-таки полезны и могут быть использованы, например, в случае, если у какой-то из сравниваемых КС её эмиссионная характеристика $EI_{ij} = f(R_i)$ неизвестна или по ней имеется неполная информация. В таком случае можно действовать последовательными приближениями. Задаваясь, например, недостающими данными по удельным выбросам EI_{ij} для соответствующих режимов, вычислить по формуле (1) или (2) параметры эмиссии и повторять это вновь и вновь с соответствующими поправками до тех пор, пока не будет получено достаточное совпадение с опубликованными данными по параметрам эмиссии. Такое доопределение данных авторами работы с успехом было апробировано, и ранее, на рис.2, были представлены уже увязанные таким способом эмиссионные характеристики ряда сравни-

ваемых двигателей и КС. Более того, в процессе такого доопределения характеристик удалось также добиться и совпадения уровней эмиссии для ряда крейсерских режимов, данные по которым были взяты из литературы [4, 6, 7, 8]. В конечном итоге, на основе литературных сведений непосредственно по КС и путем выше описанного доопределения удалось скомпоновать достаточно широкий массив данных по эмиссионным характеристикам КС.

Наличие достаточно полно представленных эмиссионных характеристик КС хотя и дает широкую информацию для анализа, однако их сравнение может получаться неоднозначным, так как на одних режимах некоторая из КС может проигрывать по удельным выбросам остальным КС, но выигрывать на других режимах (см. рис.2). То есть, необходима, что вполне очевидно, некоторая целостная оценка эмиссионных характеристик как по каждому из контролируемых веществ, так, по-видимому, и для их совокупности.

Для этих целей авторы данной работы предлагают в качестве критериев величины типа сверток, полученных осреднением эмиссионных характеристик по режимам СВПП. Для NO_x – это величина среднего удельного выброса $\overline{\text{EI}}_{\text{NO}_x}$, полученная усреднением $(\text{EI}_{\text{NO}_x})_i$ по времени работы на каждом из режимов цикла:

$$\overline{\text{EI}}_{\text{NO}_x} \cdot \frac{\Gamma}{\text{кг}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{EI}_{\text{NO}_x})_i \cdot \tau_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i} = \frac{\sum (\text{EI}_{\text{NO}_x})_i \cdot \bar{\tau}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i} = \frac{\sum (\text{EI}_{\text{NO}_x})_i \cdot \bar{\tau}_i}{0,4827} \quad (3)$$

А для эмиссий СО и НС, поскольку они могут быть связаны известной формулой с полнотой сгорания η_r [4, 13] и чтобы одновременно избежать неудобств оперирования величинами, близкими к единице, предлагается средняя величина недожега $\overline{\Delta\eta}_r^*$ - величина, усредненная, в отличие от $\overline{\text{EI}}_{\text{NO}_x}$, не по времени, а по расходу топлива G_{τ_i} :

$$\overline{\Delta\eta}_r^*, \% = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \eta_r)_i \cdot G_{\tau_i}}{\sum_{i=1}^n G_{\tau_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n \{0,0232(\text{EI}_{\text{CO}})_i + 0,1(\text{EI}_{\text{HC}})_i\} \cdot C_{R_0} \bar{C}_{R_i} \bar{R}_i \bar{\tau}_i}{C_{R_0} \sum_{i=1}^n \bar{C}_{R_i} \bar{R}_i \bar{\tau}_i} = \frac{0,0232 \cdot \Pi_{\text{CO}} + 0,1 \cdot \Pi_{\text{HC}}}{C_{R_0} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{C}_{R_i} \bar{R}_i \bar{\tau}_i}, \quad (4)$$

где в (3) и (4): \bar{C}_{R_i} , \bar{R}_i и $\bar{\tau}_i$ - это относительные, соответственно, удельный

расход топлива, тяга и время в долях часа; верхний индекс “*” у величины $\overline{\Delta\eta}_r^*$ указывает на осреднение недожега по расходу топлива.

Если следовать обычному приему и рассматривать данные КС по $\overline{\Delta\eta}_r^*$ и \overline{EI}_{NO_x} обособленно друг от друга, то придется связывать их величины через какой-то параметр, идентифицирующий напряженность режима работы КС (обычно это некоторый, так называемый, параметр форсирования), но тогда опять будет затруднена целостная оценка КС. Сейчас же пока важнее ответить на вопрос, как с использованием предложенных «сверток» располагаются традиционные КС друг относительно друга в порядке улучшения их эмиссионных характеристик, какая из них получается наилучшей и как соотносятся по своим характеристикам традиционные КС и КС новых концепций? Поэтому решено было данные по усредненному недожегу $\overline{\Delta\eta}_r^*$ и удельному выбросу \overline{EI}_{NO_x} вынести в поле самих же этих параметров, как это показано на рис.3, подписывая около точек обозначения фирменных марок КС и двигателей.

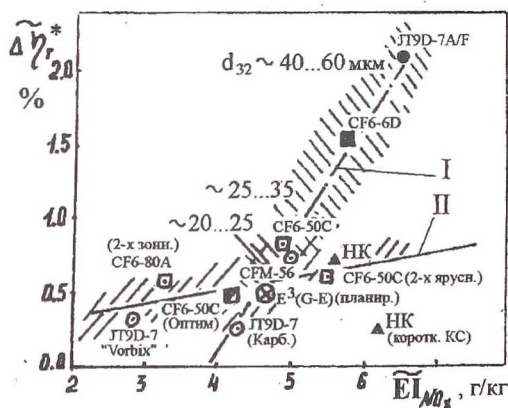


Рис. 3. Изменение усредненного недожега и удельного выброса NO_x для камер сгорания традиционной схемы (I) и новой – двухзонных, многорелочных и т.п. (II)

Первое, что сразу заметно и производит впечатление на рис.3, это четко обозначившиеся тенденции расположения точек для обоих классов КС, а во-вторых, небольшой разброс этих точек относительно обобщающих для них зависимостей.

Такое расположение данных на рис. 3 дает ответ на многие из вышепрозвучавших вопросы. А именно: чем ближе точка, принадлежащая той или иной КС, располагается к началу координат, тем лучшей, необходимо понимать, является КС по комплексу эмиссионных характеристик и полноте сгорания.

Следовательно, лучшей из представленного списка традиционных КС можно считать КС двигателя CFM.56 с уровнем эмиссии окислов азота по среднему удельному выбросу $\overline{EI}_{NO_x} = 5$ г/кг и величиной осредненного недожега $\overline{\Delta\eta_r}^* = 0,738$ %. (Заметим, что КС CFM.56 рассматривалась как «эталонная» КС традиционной схемы и её характеристики по C_R , NO_x , CO , HC и η_r тщательно были проанализированы и увязаны по методике из работы [13].)

Для КС новых концепций обобщающая зависимость на рис.3 проходит существенно положе по параметру недожега - $\overline{\Delta\eta_r}^* = 0,2...0,75$ % и охватывает более широкий диапазон по параметру эмиссии - $\overline{EI}_{NO_x} = 2,8...7,6$ г/кг-топл. Причем, КС CFM.56 по своим эмиссионным данным не уступает практически половине из числа КС новых схем и незначительно проигрывает им по полноте сгорания. Отсюда можно заключить, что КС новых схем гораздо лучше справляются с задачей минимизации недожега топлива, чем с задачей уменьшения эмиссии NO_x .

Кроме того, из рис.3 видно, что обобщающая линия для традиционных КС пересекается с обобщающей линией для КС новых концепций в районе $\overline{\Delta\eta_r}^* \sim 0,5$ % и $\overline{EI}_{NO_x} \sim 4,6$ г/кг-топл. Следовательно, эти величины можно рассматривать в качестве, например, желаемой цели для эмиссионных параметров ожидаемых новых модификаций КС традиционных схем. Причем они не намного являются более жестким требованием по сравнению с достигнутыми значениями у КС CFM.56. Следовательно вот что можно понимать под требованием в 5 г/кг-топл. к эмиссии NO_x и вот что может быть в качестве ориентира для новых КС традиционной схемы. Остается лишь соотнести эти требования с необходимой интенсификацией рабочего процесса.

Применительно к теме и задачам рассматриваемой проблемы в качестве фактора, определяющего степень интенсификации рабочего процесса, удобно избрать уровень мелкости распыливания топлива, определяемый по величине среднезаулеровского диаметра капель (СЗДК) d_{32} .

На рис.3 рядом с точками для традиционных КС указаны величины СЗДК, взятые из открытых литературных источников с некоторыми лишь особенностями. В частности, для гражданского ТРДД JT9D-7A/F величины СЗДК заимствованы из данных для военного ТРДДФ F100, а для ТРДД CF6-50 и CFM.56 они взяты из данных для ТРДДФ F101, имеющие, соответственно, очень близкие по конструкции КС и системы смесеобразования в них.

Интересно отметить, что своей нижней частью обобщающая линия для традиционных КС упирается в точку для так называемой «гибридной» КС JT9D-7 (карб.), принадлежащей к КС новых концепций и имеющей, в частности, типичную зону малого газа и карбюраторный впрыск в основной зоне. Следовательно, условно можно считать, что эта новая по концепции КС обладает как бы наивысшим качеством смесеобразования для существующих КС традиционной схемы, и в соответствие с этим приписать ей величины $d_{32} \sim 10 \dots 15$ мкм (это не расходится с имеющимися представлениями [7]). А поскольку точке, принадлежащей КС CFM.56, соответствует $d_{32} \sim 20 \dots 25$ мкм, то новая «эталонная» КС традиционной схемы должна иметь d_{32} порядка $15 \dots 20$ мкм.

Таким образом, новым «эталонном» для КС традиционной схемы могут выступать уровни осредненного недожога и эмиссионного параметра, равные, соответственно, $\overline{\Delta\eta}_f^* \sim 0,5 \%$ и $\overline{EI}_{NO_x} \sim 4,6$ г/кг-топл., а по мелкости распыливания топлива – величины СЗДК порядка $15 \dots 20$ мкм.

3. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ЭМИССИИ NO_x ОТ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА

Ранее, одним из авторов данной работы при анализе взаимосвязи характеристик малоразмерных КС с качеством распыливания топлива [7], было получено, что средние диаметры капель, определяемые при измерениях в атмосферных условиях, уменьшаются примерно в 2,5 раза в условиях натурной КС. Следовательно, если в первом приближении придерживаться этого соотношения, то система впрыска новой «эталонной» КС традиционной схемы при испытаниях в атмосферных условиях должна показывать $d_{32} \approx 35 \dots 50$ мкм. Но это, как раз, те самые величины d_{32} , при которых в экспериментах у Сарва, Низами, Чернянски [5] получались минимальные EI_{NO_x} (рис.1), причем при сжигании топлив также в атмосферных условиях.

С учетом только что отмеченного и фактов обнаруженного в [5] «аномального» поведения зависимостей образования NO_x от мелкости капель распыленного топлива (рис.1) можно принципиально по-иному взглянуть на расположение точек на рис.3. А именно.

Начиная с точек для ТРДД JT9D-7A/F и CF6-6D и далее через точки CF6-50C и CFM.56, улучшается качество распыливания топлива и смесеоб-

разования в традиционных КС. Далее, для экспериментальных КС новых схем – «Vorbiх» на JT9D-7 и двухзонной на CF6-80А получается, может быть, некоторое оптимальное по эмиссии окислов азота значение качества распыливания топлива, $d_{32} \approx 35 \dots 45$ мкм. При этом уровень эмиссии NO_x оказывается наименьшим и соответствующим минимально достигнутому в реально существующих конструкциях КС уровню $\overline{\text{EI}}_{\text{NO}_x} \sim 2,8 \dots 3,2$ г/кг-топл. А далее, двигаясь по графику на рис.3 по нижней группе точек в направлении опытной карбюраторной КС JT9D-7, новой двухъярусной КС CF6-50С и далее к точке КС НК-93, можно предположить, что качество распыливания топлива продолжает повышаться, так как проходим через точку карбюраторной КС на JT9D-7, а уровень эмиссии NO_x , как следует из рис.3, увеличивается. Последнее согласуется также и с данными на рис.1.

Таким образом, в особенном расположении точек на рис.3 предлагается увидеть своеобразное отражение данных рис.1 из работы [5]. Тем самым, следовательно, ставится вопрос о возможном существовании *оптимальной* по дисперсным характеристикам двухфазной ТВС для новых модификаций КС традиционной схемы, причем не предельно гомогенной и равномерной. Это гипотеза. Она, безусловно, требует тщательного анализа имеющихся уже данных и экспериментальной перепроверки некоторых из результатов. Но если только подтвердится возможность снижения эмиссии NO_x хотя бы на 10...20 % для смеси с оптимальными размерами капель, как это следует из данных [5] и рис.1, то по сравнению с возможностями от внедрения других мероприятий эти проценты будут весьма ощутим улучшением. Так, например, впрыск воды как наиболее реальное для внедрения мероприятие позволяет, согласно [4], снизить эмиссию NO_x всего лишь на 25 % (по расчетам - максимум на 50%). Возможные улучшения от оптимизации качества распыливания можно сравнить также с тем, что дает перераспределение воздуха по длине жаровой трубы и некоторое обеднение первичной зоны КС, чем собственно и отличаются все последние модификации КС известных двигателей. Эти мероприятия позволяют снизить эмиссию NO_x на 5...35 % [10]. Наконец, по сравнению с темпами в 12...18 % [10] регулярного через 7-10 лет ужесточения эмиссионных норм ICAO указанные выше 10...20 % снижения эмиссии NO_x также выглядят вполне внушительными.

4. МОДЕЛЬНАЯ КС С МНОГОТОЧЕЧНЫМ РЕГУЛИРУЕМЫМ ВПРЫСКОМ ТОПЛИВА

Однако, необходимым условием для внедрения в практику идеи о снижении эмиссии NO_x за счет дополнительно более тонкой оптимизации распыла (идея оптимальной форсунки) и более тщательного его согласования со всеми внутрикамерными процессами является получение более обширных и достоверных данных по влиянию параметров двухфазной смеси на эмиссионные и экономические характеристики КС и двигателей. Самое главное при этом, - требуется проверить, будет ли обнаруживаться ощутимое снижение эмиссии NO_x при сжигании не монодисперсных капель, как в [5] и на рис.1, а полидисперсной смеси, создаваемой типичными по конструкции форсунками ГТД. Также необходимо на более обширном экспериментальном материале доказать, что оптимальной является не квазигомогенная с равномерными свойствами смесь, а смесь с определенным количеством оптимальных по размеру капель, например с величиной СДКЗ порядка $d_{32} \sim 15 \dots 20$ мкм, как было показано выше.

Для подготовки и проведения необходимых экспериментов требуется иметь модельную КС с многоточечным впрыском топлива, позволяющую независимым образом регулировать мелкость распыла (d_{32}), изменять локальную неравномерность смеси по составу ($S_\alpha = \Delta\alpha/\alpha$), а также независимо управлять формой спектра распределения капель по размерам. То есть, требуется независимо друг от друга управлять теми параметрами смеси, которые при заданном уровне турбулентности и структуре газоздупного течения предопределяют образование в пламени той или иной совокупности форм горения или, иными словами, которые предопределяют пространственно-геометрические, энергетические и эмиссионные характеристики пламен.

Модельные камеры сгорания с подобными или близкими возможностями и назначением создавалась уже рядом исследователей, однако они не обладали достаточными возможностями по регулированию параметров смеси.

На рис.4 представлена схема и фотографии модельной КС с многоточечным регулируемым впрыском, создаваемой авторами данной работы.

КС рассчитана на проведение испытаний как при атмосферных условиях, так и при давлениях до $0,6 \dots 1,5$ Мпа. Внутренний канал имеет прямо-

угольное 140×140 мм сечение и помещен в круглую трубу. В межстеночное пространство подается вода для охлаждения.

КС по своей длине состоит из нескольких секций – входного участка, участка распылителей, участка зоны горения и участка пламягашения.

КС оборудуется необходимыми средствами измерения и наблюдения, в том числе для проведения внутрикамерных измерений и отбора проб на эмиссию вредных веществ. Пробы отбираются через систему пробоотборников, которые посредством подвижной рамы могут быть введены вплоть до переднего фронта пламени.

Главная роль в предстоящих экспериментах в конструкции КС отводится блоку многоточечного впрыска, состоящему из 36

«игольчатых» струйных пневматических распылителей, расположенных равномерно по сечению с одинаковым шагом в шесть рядов по шесть распылителей в каждом ряду. Количество и расположение распылителей определено требованием к простоте конструкции и необходимостью моделировать различные по параметрам ТВС.

Внешний вид «игольчатого» распылителя представлен на фотографии на рис.5 (а), схема внутреннего устройства - на рис.5 (б), а блок распылителей - на фотографии на рис. 5 (в).

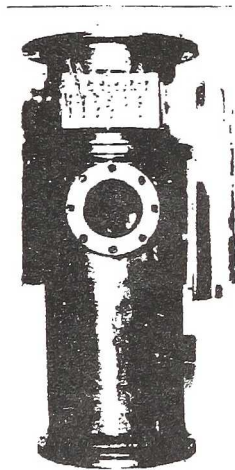
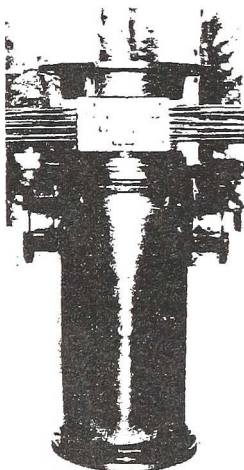
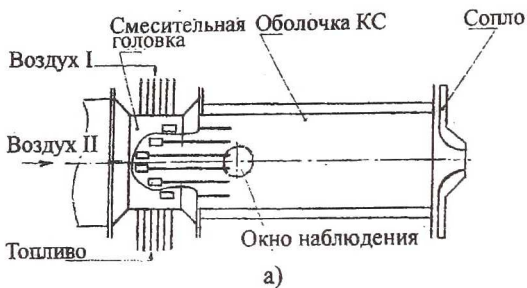
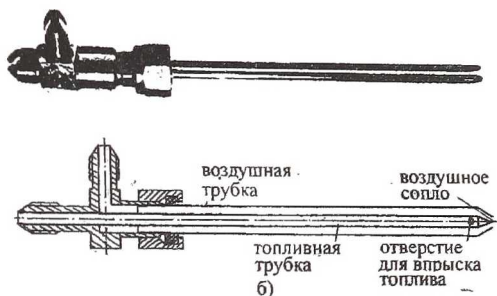


Рис. 4. Схема (а) и фотографии (б,в) модельной камеры сгорания с многофорсуночным впрыском

Топливо в распылителе подается по внутренней трубке-капилляру диаметром порядка 1 мм и может впрыскиваться в воздушный поток через различные по расположению,



диаметру и числу отверстия. Топливная трубка располагается внутри воздушной трубки с образованием узкого кольцевого канала, по которому проходит первичный воздух, непосредственно участвующий в распыливании. Осевое положение топливной трубки регулируется, что дает возможность впрыскивать топливо в различных по скорости воздушный поток.

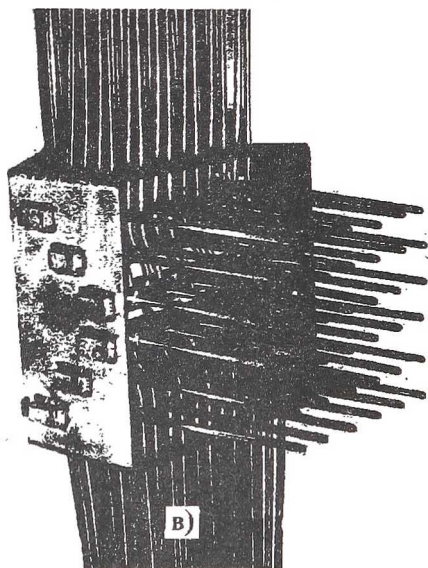


Рис. 5. «Игольчатый» распылитель (а, б) и блок из 36 распылителей (в) с индивидуальной регулировкой

В настоящее время испытан уже ряд базовых распылителей. Эксперименты показали, что комбинируя различными по конструкции топливными и воздушными трубками, можно обеспечить уровень мелкости распыла в широком диапазоне $d_{32} = 20 \dots 100$ мкм независимо от расхода топлива.

Наиболее трудной настройкой задачей будет обеспечение независимого от других параметров мелкости распыла регулирования формой спектра распределения капель по размеру. Для определения d_{32} и функции распределения капель по размеру $f(r)$ применяется лазерно-оптический измеритель мелкости распыла, работающий по методу малоуглового дифракционного рассеяния монохроматического излучения, соответ-

вующие методики и набор вычислительных программ для дешифровки и анализа оптических сигналов (оптических распределений) [9].

В настоящее время ведется доработка модельной КС и продолжается паспортизация распылителей. Планируется, что каждый из распылителей форсуночного блока будет регулироваться по всем своим характеристикам независимо от остальных распылителей в блоке. Такая возможность позволит создавать как абсолютно равномерные и однородные по сечению смеси, так и моделировать любой закон распределения топлива – от имитации полей типичных форсунок авиационных ГТД до выявления параметров ТВС, оптимальных, например, по эмиссионным и экономическим характеристикам КС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурико Ю.Я., Кузнецов В.Р. Образование окислов азота при турбулентном диффузионном горении в течениях струйного типа. // Труды ЦИАМ № 1086. –М.: ЦИАМ, 1986. –С. 1-7.
2. Маквей, Рассел, Кеннеди. Characterization of Fuel Sprays Using a High-Resolution Patternator. // AIAA Pap. –1986. –pp. 1726-1733.
3. Ekstedt E.E., Fear J.S. Перспективные схемы камер сгорания с низким уровнем выбросов вредных веществ (совместная программа NASA – Дженерал Электрик // Новости зарубежной науки и техники. Сер. Двигатели для авиации и космонавтики. – М.: ЦИАМ. –1983. №12.-С.18-25.
4. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД. –М: Мир, 1986. -566с.
5. Сарв, Низами, Чернянски. Влияние размера капель на образование NO_x в одномерных системах сжигания монодисперсных топливных смесей. // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. А.-1983. №4. – С.75-81.
6. Roberts R, Fiorentino A.J., Diehl L. Результаты выполнения программы снижения эмиссии загрязняющих веществ в трубчато-кольцевых камерах сгорания ГТД. // Новости зарубежной науки и техники. Сер. Двигатели для авиации и космонавтики. – М.: ЦИАМ. –1978. №1.-С.4-11.
7. Roberts R, Peduzzi A., Niedzwiecki R.W. Конструкция камер сгорания с пониженной эмиссией загрязняющих веществ. // (Там же), –С.12-17.
8. Goldberg P, Segalman L, Wagner B. Возможность применения в современных ГТД камеры сгорания с предварительным перемешиванием. // (Там же), –С.18-21.
9. Диденко А.А. Исследование качества распыливания топлива и его влияния на характеристики камер сгорания малоразмерных ГТД. // Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. уни-т (СГАУ), 1996. –267с.
10. Лукачев С.В., Диденко А.А., Роголев В.В. Оптимизация качества распыливания топлива как один из резервов улучшения эмиссионных характеристик КС ГТД. В сб. Доклады на международной науч.-техн. конференции, посвященной 55-летию СГАУ «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе». – Самара.: СГАУ, Часть 2, 1997. –С.205-212.
11. Христич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. –К. : Техника, 1983. –144с.
12. Кузнецов В.Р. Образование окислов азота в камерах сгорания ГТД. // Труды ЦИАМ № 1086. –М.: ЦИАМ, 1986. –С. 8-16.

13. Методика нормирования эмиссии вредных веществ турбореактивными двигателями звуковых самолетов гражданской авиации в зоне аэропорта. / Горбатко А.А., Щербаков В.И., Худяков Е.И., Могилевкина И.Н. // Труды ЦИАМ № 983. - М.: ЦИАМ, 1982. 11с.

УДК 621.452.322.034.313

ВОПРОСЫ ОТРАБОТКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И НАДЕЖНОСТИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Епейкин Л.Ф., Крыжановский А.И., Лавров В.Н.,
Николаев В.Е., Цыбизов Ю.И.

(ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара)

Для промышленных газотурбинных установок остается приоритетной задача обеспечения низких выбросов NO_x без впрыска воды или пара. Для двигателей, создаваемых на базе авиационных ГТД с малогабаритными камерами сгорания (КС), основным направлением является двухзонное сжигание топлива: бедная предварительно перемешанная (гомогенная) топливо-воздушная смесь (ТВС) догорает в потоке продуктов сгорания из дежурной зоны.

Эта схема организации горения использована в КС двигателей НК-36СТ и НК-38СТ.

Для эффективного сжигания топлива и обеспечения минимальных выбросов NO_x и CO необходимо: в дежурной зоне поддерживать коэффициент избытка воздуха $\alpha_{\text{дз}} = 1,6 \dots 1,7$ [1], а в основной зоне - $\alpha_{\text{оз}} \geq 2$ при высокой степени гомогенизации ТВС.

1. ОТРАБОТКА НАДЕЖНОСТИ КС

Одной из проблем создания надежной конструкции малоэмиссионной двухзонной КС является возможность «проскока» пламени или самовоспламенение ТВС в смесительных устройствах, а также попадание топлива в воздушные каналы КС.

Эту проблему пришлось преодолеть при отработке двухзонных КС: кольцевой - двигателя НК-36СТ ($\pi_k = 25$) и двигателя НК-38СТ ($\pi_k = 28$) с выносными жаровыми трубами (ВЖТ).