



НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА

Александр Юрьевич Васильев, к.т.н. ФГУП "ГНЦ ЦИАМ им. П.И. Баранова"

В работе раскрываются некоторые проблемы разработки малоэмиссионных камер сгорания (МКС) для перспективных двигателей гражданской авиации. На основе теоретических выкладок определены пути снижения эмиссии оксидов азота. Сделаны предположения об особенностях метода малоэмиссионного сжигания жидких топлив. Разработана и испытана модель экспериментальной МКС. Получены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность организации малоэмиссионного горения с выбросами оксидов азота – $EINO_x$ около 1 г/кг.

The paper focuses on some challenges in development of low-emission combustion chambers (LEC) for advanced engines of civil aircraft. Ways of nitric oxide emission reduction were found on the basis of theoretical investigations. Some assumptions about features of method for low-emission combustion of liquid fuels were made. An experimental model of LEC was designed and tested. The obtained test results verified the possibility to provide low-emission combustion with nitric oxide emission ($EINO_x$) of about 1g/kg.

Ключевые слова: малоэмиссионные камеры сгорания, перспективные двигатели гражданской авиации, эмиссия оксидов азота.

Keywords: low-emission combustion chambers, advanced engines of civil aircraft, nitric oxide emission.

Научно-технический задел, сформированный в прошедшие десятилетия при создании камер сгорания (КС) эксплуатируемых авиационных двигателей гражданского назначения, позволяет уверенно говорить об удовлетворении камерами стандартных компоновок большинству основных требований к ним со стороны двигателя. К таким требованиям можно отнести: уверенный розжиг камеры в земных и высотных условиях, достаточно широкие пределы устойчивой работы, ресурс, низкую неравномерность поля температур на выходе и приемлемую полноту сгорания топлива. Большой опыт создания таких КС позволил сформировать некоторые общие методы удовлетворения данным требованиям. Таким образом, КС стандартных компоновок достигли некоторого технического совершенства и значительное улучшение их характеристик затруднительно. За исключением, может быть, повышения ресурса с помощью применения новых композиционных материалов.

Сегодня можно наблюдать очередной виток развития техники и значительного расширения спектра ее применения во всех сферах человеческой деятельности. Это сместило акценты в мировой экономике в сторону защиты окружающей среды, что, в свою очередь, в авиационной промышленности вывело на первый план требования снижения эмиссии вредных веществ от камер сгорания ГТД [1]. Более того, невыполнение этих требований ведет к отказу в сертификации новых двигателей. При этом планируемый уровень технического совершенства КС должен измениться скачкообразно. Например, нормы по эмиссии оксидов азота (один из самых сложных для снижения компонентов), принятые в 2014 году, были ужесточены на 15% по отношению к 2008 году, а уже к 2020 году планируется снижение на 45%, дальнейший целевой уровень - снижение не менее чем на 60%. Можно с уверенностью говорить, что ни от одного основного параметра двигателя не требуется столь резкого роста научного и технического совершенства.

Удовлетворить таким жестким требованиям с помощью существующих КС стандартных компоновок становится невозможно. Более того, предполагаемое повышение термодинамических параметров разрабатываемых двигателей требует большего объема научных исследований, начиная с самых основ теорий горения, смешения, распада и испарения жидких струй и капель топлива, образования загрязняющих компонентов и др. Очевидно, что необходима проработка совершенно новых подходов и в прикладной части исследований. Для наглядности можно привести очевидные рассуждения, иллюстрирующие сложность поставленной задачи по снижению только одного из компонентов вредных выбросов, упомянутых выше NO_x . Возьмем, к примеру, усредненные параметры (на взлетном режиме) некоторых эксплуатируемых двигателей, от-

вечающих нормам 2008 года (CAEP6): T_4 на уровне 1650К, P_3 - 2 МПа. Анализируя банк данных ИКАО и современные отечественные наработки для перспективных двигателей, можно предположить увеличение T_4 до уровня 1950 - 2100К, P_3 - 4,5 - 5,5 МПа. Из опыта работ известно, что кратность увеличения давления влечет за собой изменение наработки оксидов азота в степени 0,5, следовательно, при переходе от одного поколения двигателя к другому мы получим увеличение эмиссии NO_x в 1,6 раза только из-за роста давления. Дополнительно - изменение температуры даже на 300К, приведет к увеличению выброса NO_x приблизительно в 7 - 10 раз. Перемножив эти значения и учтя ужесточение норм, получим, что при использовании существующей в авиадвигателестроительной отрасли технологии двигателей 4-го поколения необходимо снижение выбросов NO_x в 20 - 25 раз для двигателей, вводимых в эксплуатацию в 2020 - 2030 годах. Поэтому более десяти лет назад во всем мире поднялась волна изучения методов снижения эмиссии вредных веществ от авиационных двигателей, причем количество работ в этой области все еще нарастает. Ниже приведены результаты одной из работ, проводимых в ЦИАМ по направлению снижения эмиссии вредных веществ.

Вообще, для решения задачи снижения эмиссии одного из основных компонентов загрязняющих веществ - оксидов азота - предложено несколько концепций малоэмиссионного сжигания жидких топлив. К таким можно отнести: метод нестехиометрического сжигания топлив [2]; концепцию богато-бедного сжигания (RQL); перспективное направление по сжиганию бедных гомогенизированных топливовоздушных смесей (LPP); непосредственный впрыск топлива (LDI); методы воздействия на пламена водяным паром [3] и электрическими полями; подготовка компонентов сжигания на микро- и макроуровнях; сжигание биотоплив [4] и др.

Наиболее перспективной концепцией для многорежимных камер сгорания авиационных двигателей 2020 - 2030 гг представляется сжигание бедных гомогенизированных топливовоздушных смесей.

Из практики разработки и эксплуатации газотурбинных установок, работающих на газовом топливе с предварительной подготовкой (гомогенизацией) смеси, известно, что одной из основных проблем их камер сгорания являются узкие пределы устойчивой работы ($\alpha = 4 - 5$) и расчетная линия рабочих режимов, проходящая вблизи границы бедного срыва пламени. Для многорежимной камеры сгорания авиационного двигателя запасы устойчивости по α со значением в 4 - 5 единиц не приемлемы. Для уверенной работы КС с интенсивными переходными режимами в различных условиях требуются запасы на уровне 12-15 единиц по α . Достичь таких запасов

возможно, по видимому, лишь сжигая часть топлива в богатой зоне (в дежурном пламени). Для решения данной технической проблемы, при проектировании камеры сгорания с бедным сжиганием смеси могут быть рассмотрены три основных пути решения.

1. Опробованное на предыдущих поколениях двигателей - стадийное сжигание топлива, когда топливо подводится в КС в отдельные полости или ярусы. Каждый из ярусов состоит из горелок одного типа: малоэмиссионных основных или дежурных. Данное решение из-за образования единой крупной зоны богатого пламени за ярусом дежурных горелок не позволяет добиться существенного снижения эмиссии оксидов азота.

2. Объединение пилотных и основных горелок в одном устройстве - аналог зарубежной технологии TAPS. В этой схеме относительно небольшая зона богатого пламени (до 30% по топливу) окружена массивной, единой зоной бедной смеси. За организацию различных зон отвечают различные конструктивные элементы фронтального устройства, поэтому сформированные потоки соприкасаются, но разнесены в пространстве и имеют минимальную степень влияния на аэродинамические характеристики друг друга. По данным зарубежных исследований такая концепция позволяет обеспечить запас по эмиссии NOx к нормам 2014 года от 30 до 60% [5].

3. Дальнейшим шагом на пути развития технологии сжигания обедненных гомогенизированных топливовоздушных смесей является попытка разбить единую массивную зону бедной смеси на отдельные, слабо взаимодействующие зоны горения. При этом каждый из таких очагов должен быть окружен потоком относительно холодного газа. В центре же всей этой кольцевой структуры обедненной топливовоздушной смеси остается зона богатого пламени, но ее тепловая мощность может быть снижена до эквивалента 15-20% по расходу топлива. Таким образом, достигается наиболее значительное снижение температуры газа в индивидуальных очагах без существенного ухудшения пределов бедного срыва. Конструктивно создать такие отдельные очаги пламени возможно с помощью малоразмерных смесительных модулей. И здесь на первый план выходит проблема эффективного дробления и смешения жидкого топлива с воздухом в очень ограниченных габаритах и с малыми временами взаимодействия.

Ниже приведены данные об опыте создания подобного модуля, результаты исследования характеристик генерируемого им аэрозоля и экспериментальное подтверждение малоэмиссионного сгорания топлива в трехгорелочном отсеке КС.

Для качественной подготовки топливовоздушной смеси в форсуночном модуле необходимо организовать три воздушных потока, помимо центрального тангенциального завихрителя, отвечающего за раскрытие топливной пелены и лопаточного завихрителя, использующегося для дробления топлива, дополнительно формируется внешний завихритель с тангенциальными прорезями, обеспечивающий перемешивание смеси и препятствующий ее высаживанию на поверхности сопла. Таким образом, модуль имеет 3 канала для подвода воздуха и один топливный канал с распределением топлива по центральному и наружному воздушным каналам. Воздух, закручиваясь в лопаточном завихрителе, сдувает и дробит топливные струи в наружном канале, а топливо, попадающее на срез внутреннего сопла, сдувается с него потоками из лопаточного и тангенциального завихрителей. Внешний тангенциальный завихритель обладает, к тому же, достаточно большим проходным сечением для воздуха, который не позволяет раздробленным каплям топлива оседать на поверхностях внешнего сопла. В центральном канале воздух закручивается в тангенциальных прорезях и сдувает топливо, поданное и распределенное по поверхности поперечного стабилизатора. Дробление топлива из центрального канала происходит при срыве со штыря и на выходе из центрального сопла. Сгенерированная таким образом топливовоздушная смесь должна формироваться в хорошо перемешанный аэрозоль без образования переобогащенных топливом зон и при впрыскивании в КС создавать устойчивый факел с достаточным углом раскрытия.

Для подтверждения заявленного качества дробления топлива и

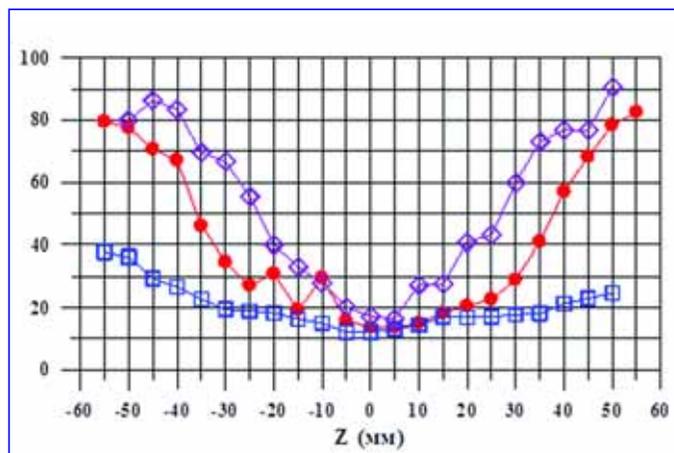


Рис. 1. Средний диаметр (D_{32}) капель топлива по сечению факела в 30 мм от сопла

его смешения с воздухом были проведены автономные испытания форсуночного модуля (рис. 1 и 2).



Рис. 2 Фотографии аэрозоля в поперечном лазерном луче и степень неравномерности

Качественное описание сгенерированного топливовоздушного факела таково: полученный аэрозоль можно рассматривать как комбинацию из двух зон: первичной (стабилизационной) и вторичной (основной) зоны, отличающихся как по интенсивности течения, так и по диаметрам капель топлива. В первичной зоне формируется зона обратного течения (ЗОТ), которая служит для стабилизации пламени. В такой зоне находятся самые мелкие частицы, циркулирующие в пределах границ ЗОТ. Питание топливом происходит как из вторичной зоны путем затягивания капель, так и из центрального топливовоздушного сопла. Во вторичной зоне формируется плотный поток, засеянный более крупными по диаметру частицами топлива, размер которых с увеличением радиуса возрастает. Также, анализируя полученные фотографии распыла, следует отметить наличие на границе факела местных пульсаций концентрации топлива. Механизм их образования заключается в дополнительном подмешивании внешнего воздуха из окружающей среды. Такие пульсации имеют некоторую периодичность, зависящую от скорости воздуха и массы топлива.

Количественные характеристики следующие: угол факела порядка 95° ; при перепаде давления воздуха на форсуночном модуле, близком к режиму малого газа (МГ), средний зауретовский диаметр капель по всему сечению снижается до 20 мкм (по сравнению с 50 мкм на режиме запуска, см. рис. 1 - $\Delta P_v = 3$ кПа); увеличение расхода топлива на режиме "МГ" в 4 раза (на графике не приведено) не повышает средний диаметр капель; характеристика аэрозоля в каждой точке приближается к моносферной; в поперечном сечении факела видно (рис. 2 - фото в центре) равномерное заполнение топливом и на краях и в центре; окружная неравномерность распределения частиц топлива в потоке составляет менее 10%.

Таким образом, форсуночный модуль позволяет добиться высокого качества дробления топлива и его смешения с воздухом, а получаемая смесь по своим параметрам максимально приближена к гомогенной смеси.

Неоднократно доказано, что при сжигании гомогенной смеси возможно получить наименьшие выбросы NOx. Обычно процесс подготовки такой смеси требует значительных затрат энергии и занимает объем, сопоставимый с объемом самой камеры сгорания. В данной работе сделана попытка сократить габариты устройства подготовки смеси в десятки раз (до размеров 25x50 мм) и не исполь-

зовать дополнительной энергии - только имеющийся перепад давления воздуха на жаровой трубе КС. Для исследования особенностей сжигания топлива за таким модулем необходимо спроектировать соответствующую ему модельную малоэмиссионную камеру сгорания.

Также при разработке модельной камеры представляется необходимым размещать форсуночные модули во фронтальном устройстве на достаточном расстоянии друг от друга. Увеличение расстояния должно обеспечить возможность "индивидуального" горения факелов. Это необходимо для снижения взаимного влияния подогрева относительно холодных периферийных зон факелов от высокотемпературных ядер соседних пламен.

Кроме этого, как уже говорилось выше, должен быть применен принцип сжигания бедной топливоздушной смеси.

Подтвердить или опровергнуть возможность создания такой модельной малоэмиссионной камеры сгорания с предложенными форсуночными модулями можно циклом испытаний в трехгорелочном отсеке КС при повышенных давлениях и температурах воздуха на входе.

Такие испытания проведены в отсеке камеры сгорания на авиационном керосине ТС-1 с измерением выбросов вредных веществ при температуре газа (Тг) до 1700 К.

Экспериментальный объект исходной модификации представляет собой модель прямоугольной камеры сгорания с трехмодульным фронтальным устройством.

На рис. 3 представлены фотографии отсека КС, установленного на экспериментальном стенде ЦИАМ.



Рис. 3. Внешний вид экспериментального отсека, установленного на стенде ЦИАМ.

Режим работы отсека устанавливался по следующим параметрам:

- P_3 - давление воздуха на входе в экспериментальный отсек, кПа;
- T_3 - температура воздуха на входе в экспериментальный отсек, К;
- T_4 - температура воздуха на выходе из камеры сгорания, К;
- $\Delta P_{жт}$ - перепад давления на фронтальном устройстве отсека, кПа;
- $G_в$ - расход воздуха, поступающего через теплообменник в отсек, г/с;
- $G_т$ - расход топлива (керосина ТС-1) через форсунки отсека, г/с.

Пять пробоотборников (пятиточечные гребенки) располагались навстречу потоку газа в заданном сечении от среза форсунок. Пробоотборники, охлаждаемые водой или воздухом, использовались для определения концентрации NO_x , CO , HC , а также O_2 , CO_2 в продуктах сгорания. Определение состава продуктов сгорания проводилось на газоанализаторе фирмы Emerson. Система измерений соответствует стандартам ИКАО.

Определение концентрации вредных веществ в продуктах сгорания проводилось на режимах, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
T_3, K	551	502	580	661
P_3, MPa	0,39	0,48	0,48	0,39
$\Delta P_{жт}, \%$	2,4	3,9	4,15	8,1
$G_{т}, г/с$	2,18	3,73	3,65	4,35
$G_{в}, г/с$	122,5	212	211	217
α	3,82	3,87	3,94	3,43

Результаты измерения, представленные в таблице 2.

Таблица 2

	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
молярные концентрации, %				
H_2O	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
CO	0,188	0,014	0,00538	0,00206
CO_2	2,64	5,04	5,11	4,65
NO_x	0,000459	0,00193	0,00277	0,0021
$CmHn$	0,539	0,0181	0,00302	0,02135
O_2	16,53	20,33	13,46	13,88
Индексы эмиссии				
$\eta, \%$	75,11	99,39	99,87	99,36
$El_{CO}, г/кг$	112,96	5,6	2,12	0,89
$El_{NO_x}, г/кг$	0,45	1,26	1,8	1,49
$El_{CmHn}, г/кг$	185,49	4,12	0,68	5,28

В результате проведенных измерений концентрации вредных веществ на экспериментальном объекте исходной модификации можно сделать следующие выводы.

Режимы испытаний (таблица 1) в значительной степени отличались расходами воздуха через камеру сгорания (для режима № 1 $G_{воз} = 122$ г/с, для режима № 2, 3 и 4 - $G_{воз} = 215$ г/с) и перепадом давления на жаровой трубе (для режима № 1 $\Delta P_{фг} = 2,4\%$, для режима № 2, 3 - $\Delta P_{фг} = 4\%$).

Так как в отсеке использовались пневматические модули, то на качество смесеобразования за фронтальным устройством будет влиять, в основном, перепад давления $\Delta P_{фг}$ на фронтальном устройстве жаровой трубы (ЖТ), непосредственно влияющий на интенсивность закрученного течения, формируемого воздушными завихрителями.

Из анализа режимов работы модельного отсека следует, что на режиме № 1 качество смесеобразования могло быть недостаточным вследствие низких уровней перепадов $\Delta P_{фг}$.

Данные предположения подтверждаются результатами химического анализа продуктов сгорания, которые показали, что при низком значении полноты сгорания ($\eta \approx 75\%$) на режиме № 1 выявлены значительные концентрации несгоревших углеводородов ($El_{CmHn} = 185,49$ г/кг т) и оксидов углерода ($El_{CO} = 112,96$ г/кг т).

На режимах № 2, 3 в условиях увеличенного расхода топлива через форсунку и перепада давления на жаровой трубе ($\Delta P_{фг} = 3,4...4\%$) форсуночный модуль вышел на расчетный режим работы, что привело к повышению качества смесеобразования, и, как следствие, достигнуто значение полноты сгорания η более 99 %, а, соответственно, резкое снижение индексов эмиссии $El_{CO} = 5,6$ г/кг т и $El_{CmHn} = 4,12$ г/кг т. При этом примененная в данном варианте концепция сжигания с гомогенизацией смеси обеспечила незначительное увеличение индексов эмиссии оксидов азота (режим № 1 - $El_{NO_x} = 0,45$ г/кг т, режим № 2 - $El_{NO_x} = 1,26$ г/кг т, режим № 3 - $El_{NO_x} = 1,8$ г/кг т) при переходе на более напряженный режим работы № 2 и 3. Увеличение входной температуры на 80° и расхода топлива в камеру сгорания на режиме 4 также не повлек-

ло за собой увеличения индекса $EI_{NOx} = 1,49$. Это обуславливает необходимость проведения исследований на более теплонапряженных режимах.

Более детальные исследования этого варианта позволили получить данные, обобщенные на рис. 4 под названием "Модификация 1". Даже первые результаты измерения концентрации оксидов азота и вычисленные на ее основе значения индексов эмиссии (таблица 2) указывают на чрезвычайно низкий уровень выхода оксидов азота в экспериментальной камере. Заметим, что на всех рассматриваемых режимах (исключая режим 1) коэффициент полноты сгорания топлива превышает величину 99,3%.

Полученный результат может объясняться формированием в испытанной горелке равномерной смеси мелких капель топлива с воздухом, приближающей процесс выгорания этой смеси к горению бедной однородной топливовоздушной смеси. Обнаружено очень слабое влияние температуры воздуха на выход оксидов азота, относительно малая доля диоксида азота (NO_2) в измеряемой анализаторами смеси $NO+NO_2$ при значительном времени пребывания газов в камере на рассматриваемых режимах ($\tau > 25$ мс).

В связи с первыми обнадеживающими результатами было решено продолжить исследования, внедрив в конструкцию некоторые доработки: изменена форма сопла форсуночного модуля и незначительно модифицирована система впрыска топлива для улучшения стабилизации пламени и повышения полноты сгорания на низких режимах работы КС. На одну треть уменьшен объем жаровой трубы, значительно увеличена жесткость ее конструкции и доработана система охлаждения.

Полученные на данном этапе работы результаты приведены в таблице 3. Результаты (таблица 4) подтвердили ранее выведенные зависимости о существенном снижении эмиссии оксидов азота в рассматриваемой экспериментальной КС.

Так, на основных режимах 1, 2 и 3 получена высокая полнота сгорания топлива. Результаты измерений эмиссионных характеристик NOx в предложенной новой "модификации 2", на режиме $P_3 = 0,53$ МПа, при варьировании "альфа" смеси показаны на рис. 4.

Таблица 3

	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5
T_3, K	683	682	685	682	683
P_3, MPa	0,52	0,53	0,53	0,52	0,52
$\Delta P_{жт}, \%$	2,6	2,8	2,7	2,6	2,5
$G_{т}, г/с$	4,09	4,52	4,31	3,75	3,59
$G_{в}, г/с$	211	205	207	214	217
α	3,51	3,09	3,28	3,89	4,11

Таблица 4

Режим	CO_2	CO	$ChNm$	Nox	NO	Alx	Полн	ECO	EHC	$EINOx$
	%	ppm	ppm	ppm	ppm					
1	4,32	293,1	36,1	8,02	7,2	3,17	99,57	13,60	0,96	0,61
2	4,9	120	16,28	14,48	13,84	2,80	99,84	4,93	0,38	0,98
3	4,61	169,7	20,42	9,3	8,34	2,98	99,77	7,40	0,51	0,67
4	3,87	579	98,7	3,15	2,47	3,52	98,96	29,71	2,90	0,27
5	3,52	1070	230,7	1,72	1,05	3,80	97,75	59,27	7,32	0,16

Получено еще более значимое снижение индекса эмиссии NOx , не превышающее на всех исследуемых режимах единицы. Полученный уровень эмиссии исследован в достаточно узком диапазоне параметров.

Перейдем к анализу содержательной части результатов испытаний. Прежде всего отметим, что характерный уровень эмиссии NOx для лучших в этом отношении традиционных (диффузионных) камер сгорания для реализованных в испытаниях режимов с $T_k \sim 680-690K$ соответствует значению индекса эмиссии оксидов азота $EINOx \sim 10$ г/кг. топлива. Сравнение этой величины с данными испытаний показывает, что достигнутый уровень эмиссии оксидов азота в испытаниях рассматриваемого отсека прототипа камеры сгорания существенно ниже уровня эмиссии традиционных камер

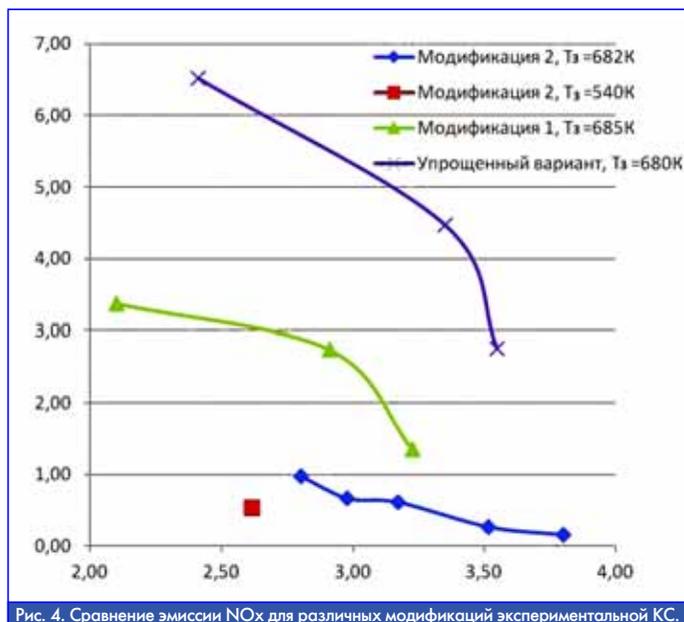


Рис. 4. Сравнение эмиссии NOx для различных модификаций экспериментальной КС.

сгорания. Этот результат все более убедительно показывает, что в этом объекте удалось реализовать режим горения, близкий к процессу горения "бедной" равномерной двухфазной топливовоздушной смеси (что уже было показано в "холодных" испытаниях - максимальная окружная неравномерность менее 10%).

Подтверждает это утверждение, в частности, и зависимость выхода оксидов азота от коэффициента избытка воздуха. Она количественно согласуется с аналогичными зависимостями для т.н. гомогенных камер, работающих на газообразном топливе.

Была сделана попытка изменить конструкцию устройства, чтобы проверить выведенные выше утверждения о физических особенностях формирования смеси форсуночным модулем для малоэмиссионного сжигания топлива. Было удалено всего два (из 6 суммарных) отверстия подвода топлива в центральный канал на каждом из фронтальных модулей. Результаты горячих испытаний "упрощенного варианта" на режимах, аналогичных таблице 3, приведены на рис. 4. Измерения показали катастрофическое повышение эмиссии оксидов азота, на исследованных режимах они стали составлять - $EINOx = 3 - 6$ г/кг (рис. 4, "упрощенный вариант").

Таким образом, сформулированные утверждения верны: разработанный форсуночный модуль позволяет сформировать смесь жидкого топлива с воздухом со свойствами, близкими к гомогенной смеси, а предложенный и конструктивно проработанный принцип сжигания бедной топливовоздушной смеси позволяет получить прототип малоэмиссионной камеры сгорания с низким выбросом оксидов азота NOx . Достигнутый в работе уровень выбросов вредных веществ позволит обеспечить самые жесткие нормы Российских правил и требований ИКАО и значительно снизить аэропортовые сборы при полетах отечественной авиации за рубеж.

Автор благодарен своим коллегам С.А. Волкову, В.М. Захарову, О.Г. Челябину, В.И. Ягодкину и другим сотрудникам отдела камер сгорания ЦИАМ за помощь в проведении различных этапов работы.

Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ и гранта РФФИ № 15-08-06293.

Литература

1. Международная организация гражданской авиации, рабочий документ № A39-WP/55 EX/32 17/06/16
2. Клименко А.В. "Тепловые и атомные электростанции", изд.3
3. П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, Л.Е. Егорова "Контролируемый химический недожог - эффективный метод снижения выбросов оксидов азота"
4. Гайворонский А.И. "Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях".
5. Банк данных ИКАО.

Связь с автором: vasiliev@ciam.ru