

УДК 621.452.3:621.43.056

В. Н. КРУЖКОВ, Д. Л. ЛАЗУНОВ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД С ДВУХСТАДИЙНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ГОРЕНИЯ

Рассматриваются результаты экспериментального исследования рабочего процесса модельной камеры сгорания, выполненной в соответствии с концепцией «богатое–гашение–бедное» или RQL. Исследование проводилось в соответствии со стратегией планирования эксперимента. В результате обработки эксперимента были получены математические модели, позволяющие рассчитывать содержание оксидов азота, NO_x , в продуктах сгорания в зависимости от конструктивных параметров и режимных факторов камеры сгорания RQL-типа. На основании анализа математической модели разработаны предложения по выбору оптимальных параметров камеры сгорания. *Камера сгорания; RQL-концепция; оксиды азота; продукты сгорания*

ВВЕДЕНИЕ

Как в России, так и за рубежом установлены нормы по выбросам вредных веществ, в том числе оксидов азота — NO_x , авиационными двигателями и газотурбинными энергетическими установками. Кроме того, эти нормы имеют тенденцию к ужесточению. В связи с этим концентрация оксидов азота в выхлопных газах ГТД является важным фактором, определяющим конкурентоспособность авиадвигателей и наземных газотурбинных энергетических установок.

Одной из перспективных схем камер сгорания, позволяющих достигнуть приемлемых эмиссионных характеристик ГТД, является камера с двухстадийным горением или так называемая камера сгорания RQL-типа (Rich–Quench–Lean или «богатое–гашение–бедное») [1,2].

Принцип организации рабочего процесса такой камеры сгорания основан на сжигании богатой топливовоздушной смеси в первичной зоне, затем быстром смешении продуктов сгорания первичной зоны со вторичным воздухом и далее горении смеси обедненного состава. Такая организация горения позволяет минимизировать время пребывания рабочего тела в области высоких, околостехиометрических температур и соответственно снизить концентрацию оксидов азота в выхлопных газах [3–5].

Для камер сгорания, выполненных по RQL-технологии, характерна высокая надежность и низкая стоимость при производстве и

в эксплуатации. Система «двигатель–камера сгорания» лишена сложных проблем, свойственных двигателям с малоэмиссионными камерами сгорания, работающими в режиме горения предварительно перемешанных «бедных» топливо-воздушных смесей. В частности, отсутствует опасность проскока пламени в зону подготовки смеси и возникновения неустойчивых режимов в области «бедного» срыва [6].

Однако, несмотря на многообещающие перспективы применения камер сгорания RQL-типа, они еще не получили повсеместного применения и являются предметом активного исследования в лабораторных и стендовых условиях. Это связано с тем, что достижение преимуществ такой организации рабочего процесса требует понимания сложных физико-химических особенностей его реализации. Отсутствие надежных методик выбора параметров рабочего процесса осложняет процедуру проектирования и доводки камеры сгорания.

Эксплуатационные характеристики камеры сгорания RQL-типа, в том числе и уровень выбросов оксидов азота, определяются следующими конструктивными факторами и режимными параметрами [3, 7]:

- коэффициент избытка воздуха в первичной зоне, α_1 ;
- коэффициент избытка воздуха во вторичной зоне, α_2 ;
- время пребывания в первичной зоне, τ_1 ;
- время пребывания во вторичной зоне, τ_2 ;

- способ организации горения в первичной зоне (диффузионный или гомогенный);
- способ охлаждения первичной зоны;
- организация смешения в зоне смешения.

Ввиду большого количества влияющих факторов, процесс разработки и доводки камер сгорания ГТД требует большого количества дорогостоящих экспериментальных исследований.

Идеальным подходом было бы наличие математической модели, описывающей выходные параметры камеры сгорания, в частности, выход оксидов азота, в зависимости от конструктивных факторов и режимных параметров. О таких моделях сообщается в литературе [1, 2], однако современный уровень развития физико-химического и математического моделирования не позволяет получать модели, пригодные для практических работ по созданию камер сгорания RQL-типа. Они либо не удовлетворяют по точности, либо очень сложны для практического использования. Поэтому такие модели могут быть получены экспериментальным путем.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на модельной установке, представленной на рис. 1.

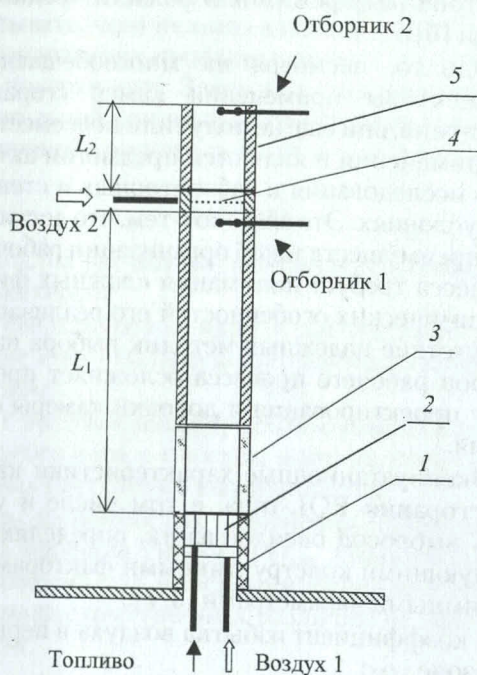
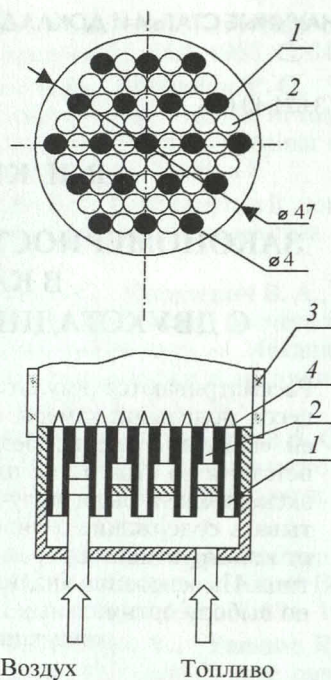


Рис. 1. Схема модельной камеры сгорания RQL-типа: 1 — керамическая секция; 2 — стабилизирующая решетка; 3 — прозрачная секция жаровой трубы из кварцевого стекла; 4 — смесительное устройство; 5 — жаровая труба



Воздух Топливо



Рис. 2. Стабилизирующая решетка сотовой схемы: 1 — канал подвода топлива, 19 шт; 2 — канал подвода воздуха, 42 шт; 3 — жаровая труба; 4 — фронт пламени

Горение осуществлялось при давлении, близком к атмосферному, в цилиндрическом канале диаметром 47 мм и близких к адiabатическим условиям. В качестве топлива использовался газообразный пропан, имеющий близкие к керосину физико-химические свойства. Применение газообразного топлива позволило исключить из рассмотрения влияние сложных процессов смесеобразования при подаче жидкого топлива. Подача топлива и воздуха осуществлялась через систему параллельных каналов, имеющих «сотовое» расположение в стабилизирующей решетке, рис. 2. Каналы соединялись при помощи коллекторов к двум независимым подводящим магистралям. При отдельной подаче топлива и воздуха в эти коллекторы реализовывался так называемый режим микродиффузионного горения. При этом характерный масштаб начальной неоднородности состава определялся размером каналов в стабилизирующей решетке, а сотовое располо-

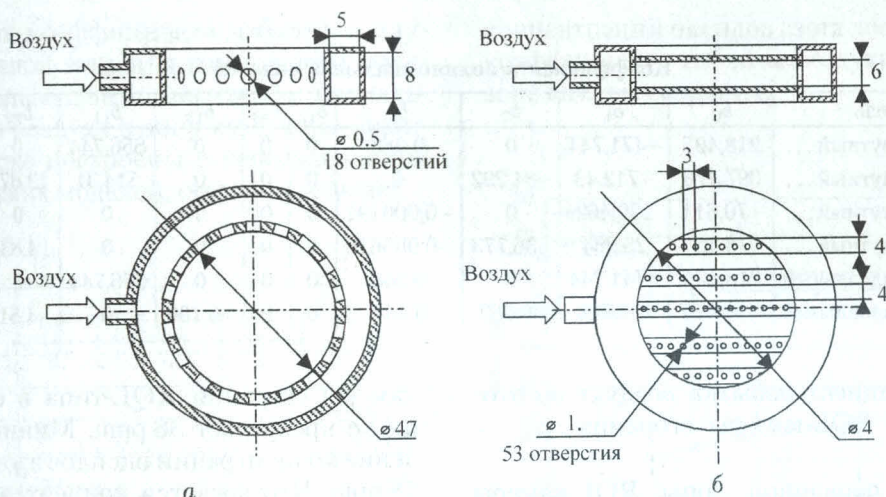


Рис. 3. Схема смесителя для подачи вторичного воздуха: а — смеситель радиального типа; б — смеситель спутного типа

ние каналов способствовало быстрому макроперемешиванию. Режим гомогенного горения осуществлялся при подаче в оба коллектора предварительно перемешанной смеси.

Для исследования влияния качества смешения в зоне диффузионного смешения продуктов сгорания первичной зоны камеры сгорания со вторичным воздухом были применены два типа смесителей: со спутной и радиальной подачей воздуха (рис. 3).

Воздух, подаваемый в первичную и вторичную зоны камеры сгорания, подогревался до температуры 200° С.

Отбор газовых проб производился через охлаждаемый маслом до 150° С пробоотборник для предотвращения влияния отборника на зону горения и замораживания происходящих в нем химических реакций. Газовый анализ проводился по методам ГОСТ 17.2.2.04-86 с применением газоанализаторов ДИТАНГАЗ-16 и АСГА-Т.

Измерение параметров выполнялось в автоматизированном режиме. Информация о режимных параметрах фиксировалась при помощи системы КАМАК, производилась ее предварительная обработка, фильтрация и сохранение в базе данных.

2. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью снижения трудоемкости и стоимости экспериментальных исследований RQL-камеры сгорания, а также повышения эффективности эксперимента при его проведении вместо последовательной проверки влияния каждого фактора была спланирована серия испытаний с одновременным изменением ряда параметров, с оценкой влияния

каждого фактора в отдельности на выход оксидов азота в первичной и вторичной зонах исследуемой камеры сгорания. Такой подход уже использовался при исследованиях эмиссионных характеристик камер сгорания [8].

При планировании был использован ротатбельный композиционный план второго порядка (РЦКП-II). При этом получаемая в результате обработки эксперимента математическая модель имеет полиномиальный вид

$$y_i = f(x_1; x_2; \dots; x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2,$$

где x_i — значения варьируемых факторов, b_i , b_{ij} , b_{ii} — коэффициенты модели, устанавливаемые после обработки эксперимента.

Объектом исследования в экспериментах являлась модельная камера сгорания RQL-типа. Параметром оптимизации или целевой функцией была выбрана концентрация оксидов азота на выходе первичной зоны и на выходе вторичной зоны камеры сгорания RQL-типа.

Из множества параметров, определяющих рабочий процесс камеры сгорания на основании анализа априорной информации, а также предварительных экспериментов наиболее существенные были выбраны в качестве факторов — способов воздействия на исследуемую систему:

1. Коэффициент избытка воздуха в первичной зоне RQL-камеры сгорания $\alpha_x = 0,6 \dots 0,9$.

Коэффициенты полиномиальных моделей

Смеситель	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{23}	b_{13}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
NO _x 1 гомог. спутный ...	218,405	-471,744	0	0,088	0	0	0	656,744	0	0,00008005
NO _x 2 гомог. спутный ...	397,476	-712,43	-84,292	0	0	0	0	514,31	13,072	0
NO _x 1 дифф. спутный ...	-70,611	150,462	0	-0,000191	0	0	0	0	0	0
NO _x 2 дифф. спутный ...	78,45	25,264	-36,773	-0,003626	0	0	0	0	4,83	-0,0000237
NO _x 1 гомог. радиальный	218,405	-741,744	0	0,088	0	0	0	656,744	0	0,00008005
NO _x 2 гомог. радиальный	-139,967	130,708	30,662	0,141	0	0	-0,109	0	-4,513	-0,0000748

2. Коэффициент избытка воздуха во вторичной зоне RQL-камеры сгорания $\alpha_y = 2,0 \dots 4,0$.

3. Длина первичной зоны RQL-камеры сгорания $L = 183 \dots 915$ мм (что соответствовало времени пребывания в первичной зоне $\tau_1 = 50 \dots 250$ мс).

Диапазоны варьирования коэффициентов избытка воздуха, а также время пребывания в экспериментальной камере сгорания выбирались с тем условием, чтобы перекрывать известные диапазоны изменения этих параметров для существующих камер сгорания RQL-типа [1, 2, 4, 5].

В соответствии с планом эксперимента проводилось (без учета повторений) 20 экспериментов. Таким образом, всего в исследовании с учетом четырех конфигураций камеры сгорания (гомогенная или диффузионная первичная зона и радиальный или спутный смеситель) было проведено 60 экспериментов и получено 6 математических моделей для расчета концентрации оксидов азота в первичной и вторичной зонах экспериментальной камеры сгорания RQL-типа. Аргументами зависимостей являются коэффициент избытка воздуха в богатой и бедной зонах, а также длина первичной зоны камеры сгорания. В таблице приведены полученные в результате обработки экспериментов коэффициенты полиномов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Концентрации оксидов азота, рассчитанные по полученным моделям для гомогенного и диффузионного факела в первичной зоне при использовании смесителя со спутной подачей воздуха в зону смешения, приведены на рис. 4.

Концентрация оксидов азота при использовании диффузионного смешения топлива и окислителя в первичной зоне камеры сгорания и при горении предварительно подготовленной топливовоздушной смеси близки. Концентрация оксидов азота на выходе

камеры сгорания RQL-типа в обоих случаях не превышает 38 ppm. Минимальное значение концентрации оксидов азота составляет 18 ppm. Что касается концентрации оксидов азота на выходе первичной зоны камеры сгорания, то при гомогенном горении образуются значительно более низкие по сравнению с диффузионным горением концентрации. Разница составляет порядка 20 ppm.

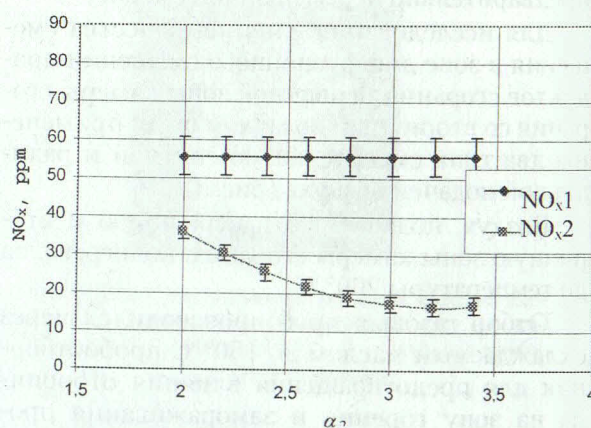


Рис. 4. Зависимость концентрации оксидов азота от коэффициента избытка воздуха во вторичной зоне. Первичная зона — однородная смесь; смеситель со спутной подачей

Таким образом, применение камеры сгорания RQL-типа позволяет при использовании диффузионного смешения топлива и окислителя в первичной зоне камеры сгорания получать удовлетворяющие международным нормам значения концентрации оксидов азота на выходе, что позволяет:

- исключить сложную аппаратуру по предварительной подготовке топливовоздушной смеси;
- обеспечить более широкие пределы устойчивого горения;
- исключить опасность срыва пламени.

На рис. 5 представлены зависимости концентрации оксидов азота на выходе из первичной и вторичной зон камеры сгорания

RQL-типа от коэффициента избытка воздуха во вторичной зоне для гомогенного факела при использовании смесителя с радиальной подачей воздуха в зону смешения. Зависимости также построены с использованием математических моделей, описанных выше.

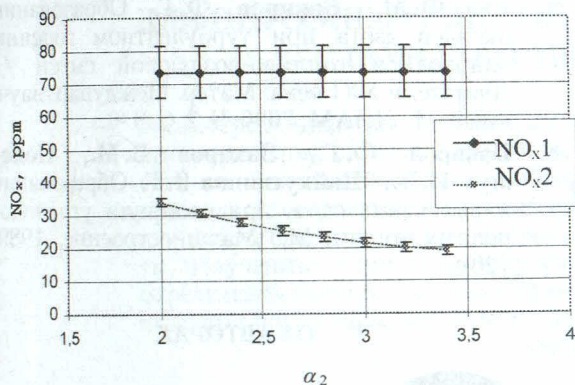


Рис. 5. Зависимость концентрации оксидов азота от коэффициента избытка воздуха во вторичной зоне. Первичная зона — микродиффузионный факел; смеситель со спутной подачей вторичного воздуха

Применение данного типа смесителя, как следует из полученных результатов, приводит к увеличению концентрации оксидов азота при обеднении вторичной зоны камеры сгорания. Возможным объяснением данного результата является влияние конструктивных особенностей смесителя: с ростом расхода воздуха через смеситель увеличивается проникновение струй в поток и время пребывания в высокотемпературных зонах продуктов сгорания первичной зоны, которые и являются поставщиками оксидов азота. Однако использование смесителя с радиальной подачей воздуха позволяет достичь значений концентрации оксидов азота, в 2–3 раза меньших, чем при использовании спутного смесителя. Объяснением этому может служить влияние макроструктуры смешения, в частности, глубины проникновения струй.

На рис. 6, 7 представлены данные, полученные с помощью математических моделей, иллюстрирующие изменение концентрации оксидов азота в зависимости от времени пребывания и соответственно от длины первичной зоны камеры сгорания RQL-типа. Максимальные значения концентрации оксидов азота наблюдаются при времени пребывания, соответствующем 120 мс, затем до 250 мс происходит снижение до значений 15–55 ppm в зависимости от коэффициента избытка воздуха в первичной зоне. Наименьшие значения

концентраций оксидов азота достигаются при коэффициенте избытка воздуха в первичной зоне камеры сгорания.

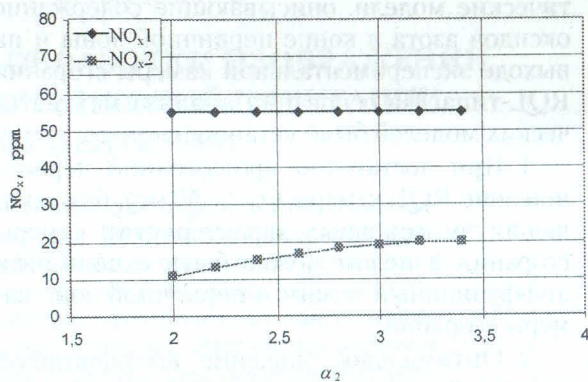


Рис. 6. Зависимость концентрации оксидов азота от коэффициента избытка воздуха во вторичной зоне. Первичная зона — гомогенный факел; смеситель с радиальной подачей вторичного воздуха

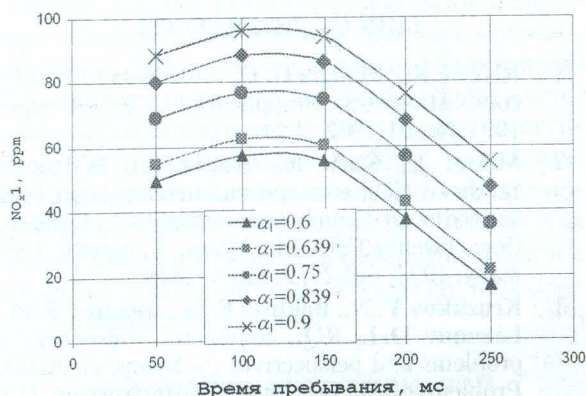


Рис. 7. Зависимость концентрации оксидов азота от времени пребывания в первичной зоне камеры сгорания для различных коэффициентов избытка воздуха в первичной зоне. Первичная зона — диффузионный факел

Минимальные значения концентрации оксидов азота на выходе камеры сгорания RQL-типа достигаются:

- при значении коэффициента избытка воздуха в первичной зоне камеры сгорания порядка $\alpha_1 = 0,6$;
- при использовании смесителя со спутной подачей — при коэффициенте избытка воздуха во вторичной зоне камеры сгорания $\alpha_2 = 3,5 \dots 4,0$;
- при использовании смесителя с поперечной подачей вторичного воздуха при $\alpha_2 = 2,0$.

ВЫВОДЫ

В результате проведения планированного эксперимента при минимальном количестве экспериментов были получены математические модели, описывающие содержание оксидов азота в конце первичной зоны и на выходе экспериментальной камеры сгорания RQL-типа. На основании анализа математических моделей было установлено, что:

1. При достаточно протяженной первичной зоне RQL камеры ($\tau_1 > 50$ мс), без ухудшения эмиссионных характеристик камеры сгорания в целом может быть использован диффузионный режим в первичной зоне камеры сгорания.

2. Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха в первичной зоне составляет $\alpha_1 = 0,60$.

3. Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха в зоне смешения зависит от способа подачи вторичного воздуха и составляет $\alpha_2 = 2,0 \dots 3,5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Risk N. K., Mongia H. C. Low NOx reach-lean combustion concept application // AIAA Paper. 1991. No. 91-1962. P. 11.
2. Meisel J., Koch R., Kneer R., Wittig S. Study of NOx emission characteristics in pressurized staged combustor concepts // Combustion: Twenty-Fifth Int. Symp. Karlsruhe, Germany, 1994. Vol. 25. P. 1043-1049.
3. Kruzhkov V. N., Bakirov F. G., Almetov F. M., Lazunov D. L. RQL combustor conception — problems and perspectives // Symp. on Actual Problems of Aircraft Engines Construction. Ufa, Russia, 1999. P. 51-53.
4. Frank P., Tan Y., Griebel P. Analysis of NO formation for rich/lean-staged combustion // 3rd Workshop on Modelling of Chemical Reaction Systems. Stuttgart, Germany, 1996. P. 7.

5. Pat. 5996351 (US), F02C1/00. Rapid-Quench Axially Staged Combustor / A.S. Feitelberg, M. C. Schmidt, S. G. Goebel. Filed 07.07.1997; Priority 07.12.1999.
6. Иноземцев А. А., Токарев В. В. Технология малоэмиссионного горения RQQL // Газотурбинные технологии. 2002. № 3. С. 12.
7. Кружков В. Н., Лазунов Д. Л., Альметов Ф. М., Бакиров Ф. Г. Образование оксидов азота при турбулентном горении однородной топливно-воздушной смеси // Двигатели XXI века: Матер. Междунар. науч. конф. М.: ЦИАМ, 2000. Ч. 2. С. 8-9.
8. Бакиров Ф. Г., Захаров В. М., Полещук И. З., Шайхутдинов З. Г. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив М.: Машиностроение, 1989. 128 с.

ОБ АВТОРАХ



Кружков Вячеслав Николаевич, доцент кафедры ТАРД. Дипл. инж.-механик по авиац. двигателям (УГАТУ, 1976). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 1987). Исследования в обл. мат. моделирования процессов горения.



Лазунов Дмитрий Леонидович, ст. преп. той же кафедры. Дипл. инж.-механик по авиац. двигателям (УГАТУ, 1991). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2003). Исследования в обл. мат. моделирования процессов горения.