

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД «R-Q-L» - ТИПА

Альметов Ф.М., Бакиров Ф.Г., Кружков В.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Проблему выбросов токсичных веществ обостряют тенденции в современном авиадвигателестроении. В частности, повышение π_{κ}^* , Γ_{Γ}^* , снижение α_{Σ} интенсифицируют образование NO_x . Так, рост π_{κ}^* до современного уровня, согласно данным [1], увеличивает выбросы NO_x на 3 порядка. С другой стороны, вследствие удорожания очистки в транспортной авиации могут применяться топлива с повышенным содержанием связанного азота. Эти два фактора могут приводить к неприемлемо высоким уровням выброса NO_x .

Основные способы снижения NO_x достаточно полно освещены как отечественными, так и зарубежными авторами [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9...11]. Рассмотрим некоторые из них. Наиболее распространенными являются впрыск пара в первичную камеру сгорания, обеднение первичной зоны предварительное смешение горючего и окислителя, интенсификация смешения топлива и воздуха и уменьшение протяженности стехиометрических областей, характерное, например, для двухзонных камер сгорания. Каждый из этих способов обладает своими существенными недостатками, затрудняющими их широкое применение. Общий подход для этих способов заключается в том, что основная цель состоит в подавлении образования NO_x в начальной стадии горения, однако при этом не решается проблема снижения «топливных» NO_x . Как показали исследования [7, 8, 9...11], одним из перспективных способов снижения NO_x является двухстадийное сжигание, когда первичная зона является богатой, вторичная – бедной (так называемая «R-Q-L»-камера). Среди их авторов распространены две различные точки зрения. По мнению авторов [7], пониженный выход NO_x обеспечивается первичной зоной, благодаря исключительно низкой температуре в ней. Другая точка зрения [9...11] состоит в том, что оксиды азота, первоначально образовавшиеся в диффузионном факеле, подвергаются разложению. При этом

преобладающую роль играют радикалы CH , начальная концентрация NO_x и достаточное время пребывания для протекания реакций:



При этом в богатой зоне с $\alpha=0,6$ уменьшение содержания NO_x может достигать от 10 до 80% [10] по сравнению с начальным уровнем. Что же касается вторичной (бедной) зоны, авторы перечисленных работ [7, 9...11] единодушны во мнении о дальнейшем влиянии пониженных температур на разложении NO_x в этой зоне. Вместе с тем, на пути реализации камер сгорания "R-Q-L"-типа стоит множество проблем. В частности, возможность появления "новых" NO_x после смесителя, а также проблемы сажеобразования в первичной зоне [7] и др.

В данной работе приведены результаты исследований закономерностей образования и разложения оксидов азота в условиях, характерных для камеры сгорания "R-Q-L"-типа, выполненных на кафедре теории авиационных и ракетных двигателей УГАТУ. В экспериментах камера сгорания "R-Q-L"-типа моделировалась тремя реакторами (рис.1): диффузионным реактором I с $\alpha_1 < 1$ (первичная зона), зоной диффузионного смешения продуктов сгорания богатой зоны со вторичным воздухом II и диффузионным реактором III с $\alpha_2 > 1$ (вторичная зона).

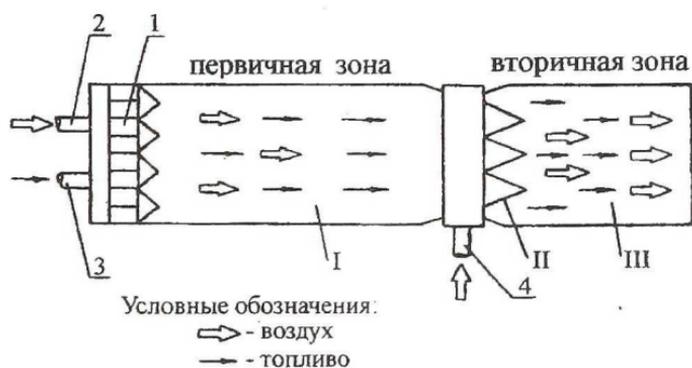


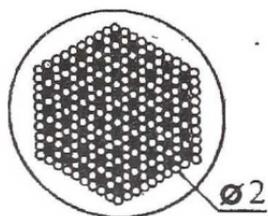
Рис. 1. Схема КС:

- 1 – форсунная головка;
- 2 – штуцер подачи воздуха;
- 3 – штуцер подачи топлива;
- 4 – штуцер подачи вторичного воздуха.

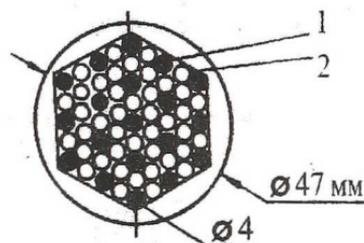
На концентрацию оксидов азота, по данным работы [3], значительно влияют турбулентные пульсации, температура и неравновесность процесса горения. Важная роль в постановочных опытах была отведена организации горения с возможностью регулирования объема стехиометрических областей в первичной зоне. Вместе с тем, горение в первичной зоне должно быть тур-

булентным диффузионным, т.е. происходит в условиях, близких к натурным условиям реальной камеры сгорания. Возможность регулирования объема стехиометрических областей в диффузионном реакторе в богатой зоне может быть реализована с помощью форсуночной головки с сотовым расположением каналов топлива 1 и воздуха 2 (см. рис.2).

Форсуночная головка №2



Форсуночная головка №4



№форс. гол.	D, мм	d, мм	n_T , шт.	n_B , шт.
1	1	0,5	271	870
2	2	1	69	271
4	4	2	19	42

D – наружный диаметр топливных трубок (микромасштаб головки);
d – внутренний диаметр трубок; n_B – количество воздушных трубок;

Рис. 2. Форсуночные головки модельной КС:

1 – топливная трубка; 2 – воздушная трубка.

Из анализа литературных данных следует, что интенсивность снижения оксидов азота в «богатом» реакторе камеры сгорания «R-Q-L»-типа сильно зависит от их количества в его начальной, стехиометрической области, образующейся при раздельной подаче компонентов. Количество оксидов азота, образовавшихся в стехиометрической области, определялось начальной температурой, давлением и способом подготовки ТВС.

Ниже рассматриваются результаты экспериментов, позволяющие установить влияние последнего фактора. Состав топливовоздушной смеси варьировался при этом от $\alpha = 0,5$ до $\alpha = 1,4$. Отбор газовых проб осуществлялся на расстоянии 290 мм от горелки, что соответствовало $\tau = 180$ мс. Результаты опытов показаны на рисунках 3 и 4.

На рис.3 приведены экспериментальные данные по выходу NO_x при горении предварительно смешанных ТВС и при раздельной подаче компонентов. При горении гомогенных смесей концентрация NO_x и ее распределение по α практически не отличаются от значений, полученных при диффу-

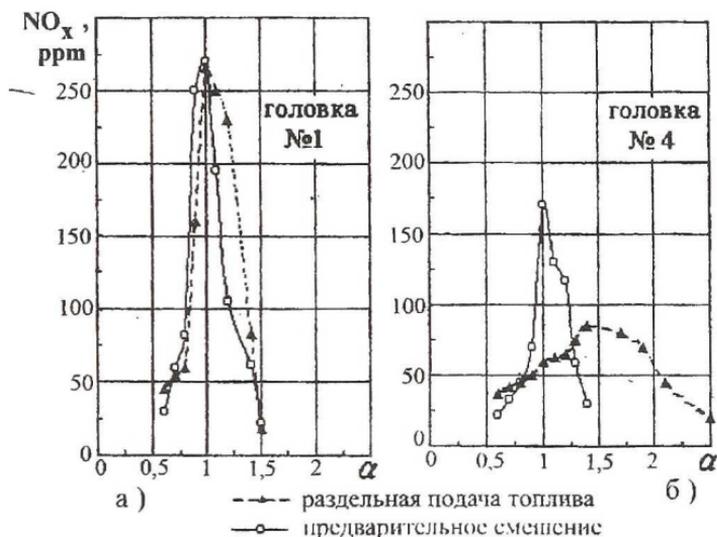


Рис. 3. Влияние начальных условий на образование NO_x для форсуночных головок № 1 и № 4

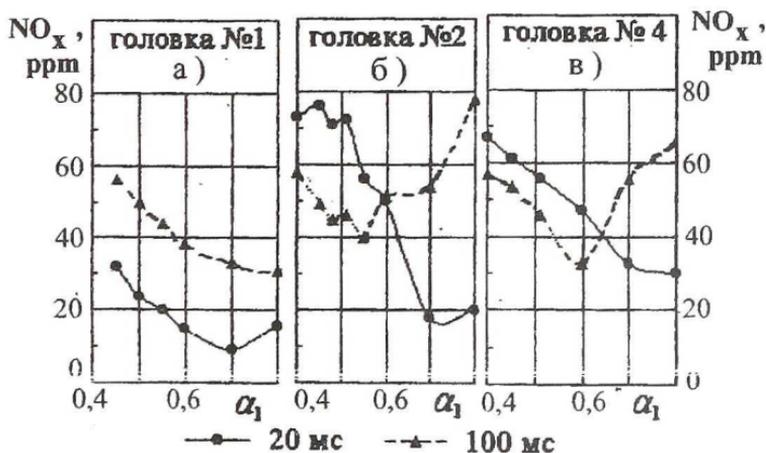


Рис. 4. Зависимость выхода NO_x от состава смеси и времени пребывания для различных форсуночных головок

зионной организации горения с применением форсуночной головки №1 с наименьшим микромасштабом неоднородности ТВС. С увеличением микромасштаба неоднородности (форсуночная головка №4) максимум концентрации NO_x смещается в сторону более бедных в среднем составов смеси и соответствует $\alpha=1,5$.

Протяженность обогащенной зоны, как показывают данные зарубежных авторов [11] для "R-Q-L"-камеры, а также исследования в рамках данной работы, играет немаловажную роль для снижения концентрации NO_x .

С целью исследования оценки влияния микромасштаба неоднородности ТВС в настоящей работе были проведены опыты с использованием 3 форсуночных головок: №1, №2, и №4. Опыты были проведены при начальной температуре подогрева воздуха $T = 573 \text{ K}$, во всех случаях было организовано диффузионное горение. На рис 4а изображена зависимость выхода NO_x от состава смеси для форсуночной головки №1 с наименьшим микромасштабом неоднородности ТВС. Характерно, что независимо от среднего состава смеси с ростом времени пребывания в богатой области от 20 до 100 мс концентрация NO_x существенно увеличивается. Это можно объяснить преобладанием в этих условиях термического механизма образования NO_x . При увеличении микромасштаба неоднородности ТВС (форсуночные головки №2 и №4 на рис. 4б, в) изменяется относительное расположение зависимостей $\text{NO}_x = f(\alpha_1)$ для разных времен пребывания. При значениях $\alpha_1 < 0,6$ наблюдается уменьшение концентрации NO_x по времени пребывания, наиболее выраженное для форсуночной головки №2. Это связано с преобладающей ролью механизма образования «быстрых» NO_x в стехиометрических областях первичной зоны и возрастанием степени неравновесности процесса горения. Полученные результаты вполне согласуются с данными работы Ризка с сотрудниками [11]: чем больше в начальной стадии процесса NO_x образовалось, тем эффективнее в богатой области протекают реакции их разложения вида (1) и (2). В области $\alpha_1 > 0,6$ преобладающим является влияние температуры и термического механизма образования NO_x , что объясняет возрастание концентрации NO_x по времени пребывания.

Таким образом, очевидны три фактора, влияющие на снижение уровня NO_x в «богатой» зоне: состав смеси ($\alpha = 0,4 \dots 0,6$), протяженность зоны и микромасштаб форсуночной головки. Особенности проявляются в том, что

нельзя сильно увеличивать микромасштаб головки – это может привести к увеличению степени неравновесности процесса и, как следствие, к уменьшению эффекта снижения NO_x в «богатой» зоне. Экспериментально установлено, что наибольший эффект в обогащенной зоне достигается при $\alpha=0,45\dots 0,51$.

В целом по результатам исследований можно сделать вывод о том, что с точки зрения минимизации появления «новых» NO_x представляется возможным и необходимым выявить оптимальный состав смеси в первичной зоне. Проведенные нами оценки показали, что применение камеры сгорания «R-Q-L»-типа может дать снижение выбросов NO_x приблизительно на 40% по сравнению с камерой традиционного типа при условии $\alpha_1 = 0,55\dots 0,6$, $\alpha_2 = 2,5\dots 3,0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.Р. Образование окислов азота в камерах сгорания ГТД. // Труды ЦИАМ, № 1086.-М.: ЦИАМ, 1983.
2. Ахмад Т., Пли С., Майерс Д. Расчет количества выбросов окислов азота и сажи, образующихся в турбулентных диффузионных пламенах. // Труды ASME, Сер.Энергетические машины, 1985, т.107, №1.
3. Бурико Ю.Я., Кузнецов В.Р. О возможном механизме образования окислов азота при турбулентном диффузионном горении. //Физика горения и взрыва, том 14, 1978 № 3. – с. 32...42.
4. Бурико Ю.Я., Кузнецов В.Р. Образование окислов азота при турбулентном диффузионном горении в течениях струйного типа. // Труды ЦИАМ №1086.-М.: ЦИАМ, 1983.-С.1-7.
5. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986.-566с.
6. Сотеран А., Пиерс Д.Е., Овертон Д.Л. Некоторые вопросы, связанные с применением малотоксичной двухзонной камеры сгорания. // Труды ASME, Сер.Энергетические машины и установки, т.107, № 1, 1985. – С.1...9.
7. Хилт М.Б., Уаслоу Дж. Конструктивные способы снижения окислов азота из камер сгорания мощных газовых турбин. // Труды ASME, Сер.Энергетические машины, 1984, т.106, №4. – С.79...89.
8. Meisl J., Kneer R. and Wittig S. Study of NO_x Emission characteristics conditions. // The 25th international symposium of combustion, 1996. – pp.530.
9. Risk N.K., Mongia H.C. Gas turbine combustor design methodology. // Allison gas turbine division. Indianapolis, Indiana 40206-420, 1986.
10. Risk N.K., Mongia H.C. Ultra-Low NO_x Reach-Lean combustion. // ASME Paper, № 90 – GT-87, 1990.
11. Risk N.K., Mongia H.C. Low NO_x Rich-Lean combustion concept application. // AIAA/SAE/ASME 27th joint propulsion conference. June 24...26, 1991 /Sacramento, CA