

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ГОМОГЕННОЙ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ И ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ГАЗА В ЗОНЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА УРОВЕНЬ ОБРАЗОВАНИЯ «ТЕРМИЧЕСКИХ» $NO$

Лукачев С.В., Диденко А.А.

*Самарский государственный аэрокосмический университет*

Состав топливно-воздушной смеси, оцениваемый по величине коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , неравномерность смеси по составу  $\Delta\alpha$ , а также время пребывания  $\tau$  продуктов сгорания в послепламенной зоне высоких температур являются основными физическими факторами, влияющими на уровень концентраций образующихся «термических» окислов азота  $NO$  [1]. Каждому из этих факторов посвящено большое число теоретических и экспериментальных исследований. Однако представляется, что для ответа на вопрос о том, насколько детальной должна быть модель химической кинетики окисления горючего и образования  $NO$  в методиках проектирования камер сгорания ГТД, результатов выполненных исследований пока ещё не достаточно. Авторы данной работы также присоединились к изучению и обсуждению этой актуальной темы и обозначенных научно-технических вопросов [2-4]. Данная работа является продолжением и развитием их собственных исследований, при этом авторы остаются пока в пределах химико-кинетических задач.

Для оценки влияния  $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$  и  $\tau$  использовалась ранее разработанная и апробированная упрощенная математическая модель кинетики окисления углеводородного горючего  $C_nH_m$  (типа авиационного керосина) и образования окислов азота  $NO$  [3]. В модели химической кинетики рассматривается участие 34 веществ, которые реагируют в 54 реакциях. Принимается, что образование  $NO_x$  (в сумме  $NO$ ,  $NO_2$  и  $N_2O$ ) может протекать по 6 возможным химическим механизмам и в совокупности по 15 реакциям. Вклад каждой из этих реакций на различных стадиях окисления горючего, а также в послепламенной зоне для ряда значений  $\alpha$  и  $\tau$  подробно изучался в [4]. Во всех рассмотренных случаях, как и в [2], принималось, что в каждой отдельной  $i$ -ой элементар-

ной зоне химических реакций, из которых состоит общая зона, компоненты распределены равномерно; диффузия веществ, скорость движения газа и теплообмен отсутствуют; химические реакции протекают сразу по всему пространству элементарной зоны. Для учета влияния неравномерности смеси по составу для всей макрореакционной зоны вводилась в употребление функция распределения плотности вероятности (ФРПВ)  $g_T(\alpha_i)$  типа нормального закона распределения. Она показывает, какое относительное количество горючего, в сумме для всей макрореакционной зоны, окисляется в среднем при том или ином местном  $\alpha_i$ . Средняя для всей зоны реакций величина неравномерности смеси по составу  $\Delta\alpha$  представлялась как ширина ФРПВ на половине её высоты, отнесенная к величине среднеарифметического для нее  $\alpha$  (среднего  $\alpha$ ). В данной работе неравномерность смеси по составу имела следующие значения  $\Delta\alpha = 0; 0,1; 0,2; 0,3$  и  $0,4$ .

Так как данная работа ограничивалась рассмотрением образования только «термических»  $NO$  (образующихся по трем реакциям расширенного механизма Зельдовича) и поскольку к моменту появления сколь угодно заметных их концентраций реакции окисления горючего практически уже завершены и почти все остальные компоненты находятся при равновесных или квазиравновесных концентрациях, поэтому концентрация «термических»  $NO$  рассчитывалась из решения всего лишь одного дифференциального уравнения [3]:

$$\frac{d[rNO]}{d\tau} = \frac{2 \cdot k_{11}' \cdot \left( \frac{[O]_e [N_2]}{[NO]_e} \right) \cdot (1 - [rNO]^2)}{1 + \frac{k_{11}' \cdot [NO]_e}{k_{12}' \cdot [O_2]_e} \cdot [rNO]}$$

Здесь:  $k_{11}'$ ,  $k_{12}'$  константы прямых и  $k_{11}''$  - константа обратной реакций 11 и 12 [3]; с нижним индексом «e» обозначены равновесные концентрации веществ;  $[rNO] = [NO]/[NO]_e$  относительная концентрация  $NO$ .

Для каждого  $\alpha$  предварительно рассчитывались равновесные состав и температура продуктов сгорания (окисления).

Результаты расчетов для времен пребывания  $\tau = 1, 3$  и  $5$  миллисекунд представлены, соответственно, на рисунках 1, 2 и 3 в виде

зависимостей параметра удельного выброса  $EI_{NO}$  (в граммах  $NO$  /килограмм горючего) от величины  $\alpha$  и  $\Delta\alpha$ . Расчеты выполнены для следующих условий: горючее – авиакеросин типа ТС-1, окислитель – воздух; в зоне химических реакций давление  $p = 25$  ат, температура воздуха на входе  $T = 800$  К. На всех рисунках нанесена линия для отсеков и натурных камер сгорания ГТД, данные для которых взяты из открытой печати, в основном из журнала “Новое в зарубежном авиадвигателестроении», №1 за 1978г.

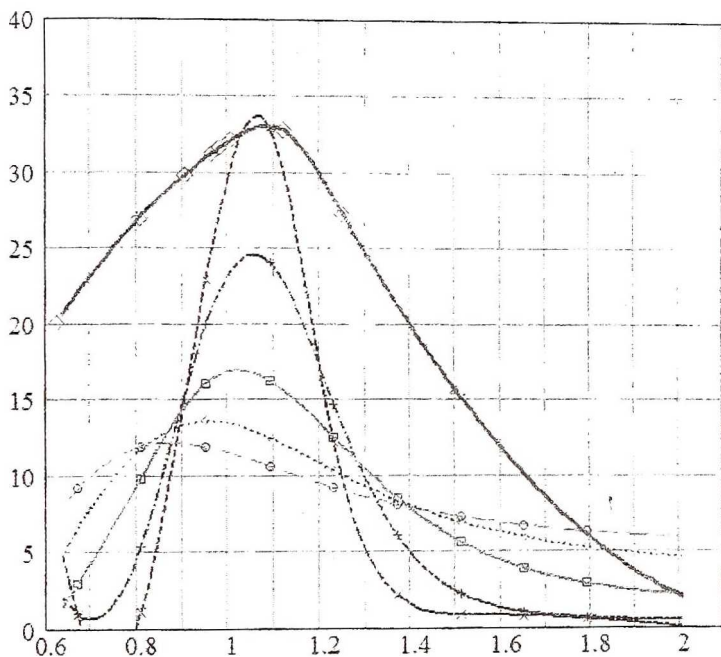


Рис. 1. Влияние параметров качества смеси ( $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$ ) на удельный выброс  $NO$ . (Время пребывания  $\tau = 1$  мс)

Из рассмотрения полученных графических зависимостей можно сделать следующие выводы.

1. Все расчетные зависимости качественно очень хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными результатами, опубликованными в литературе, в частности, в [1] и в др.

2. Из рисунков хорошо видно, что линия, условно, “отсеки КС” наиболее хорошо согласуется с расчетными зависимостями для случая  $\tau = 3$

мс (рис. 2), особенно с линиями, соответствующими неравномерности смеси по составу  $\Delta\alpha = 0,2$  и  $0,3$ . При этом она не пересекается с линиями для других неравномерностей, как это имеет место, в частности, на рис. 3 для времени  $\tau = 5$  мс.

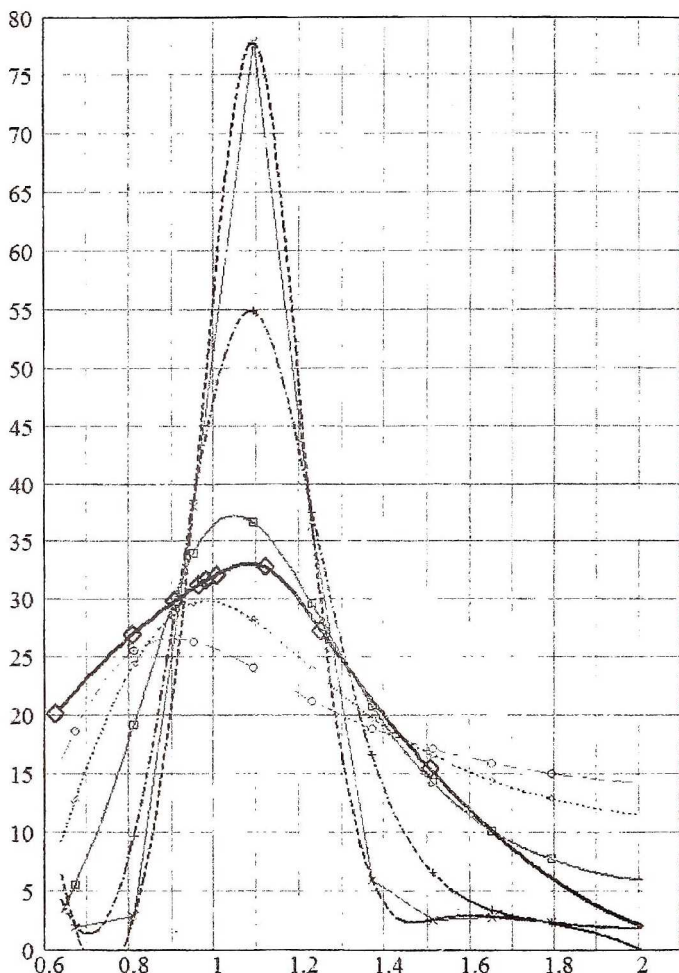


Рис. 2. Влияние параметров качества смеси ( $\alpha$ ,  $\alpha$ ) на удельный выброс  $\text{NO}$ . (Время пребывания  $\tau = 3$  мс)

3. Если ориентироваться на данные для лучших камер сгорания современных ГТД, имеющих на режимах взлета и набора высоты  $EI_{\text{NO}} = 15 \dots 20$  г/кг-топл. и на характерное время пребывания на участке от

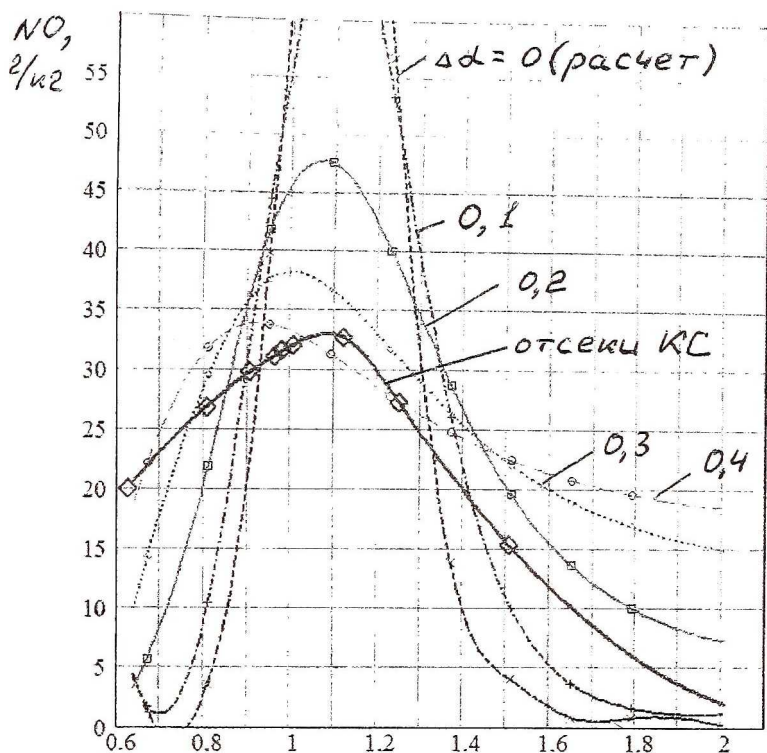


Рис. 3. Влияние параметров качества смеси ( $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$ ) на удельный выброс  $NO$ . (Время пребывания  $\tau = 5$  мс)

первичной зоны горения и до сечения на выходе из камеры  $\tau = 3$  мс, то из совпадения линии “отсеки КС” с близко расположенными расчетными линиями, особенно для бедных составов ( $\alpha = 1,2$ , рис.2), можно считать уровни неравномерности смеси по составу  $\Delta\alpha = 0,2 \dots 0,3$  для камер сгорания ГТД как вполне характерные. Здесь же можно отметить, что значения  $EI_{NO}$  при  $\alpha = 1,35 \dots 1,45$  оказываются мало чувствительными к изменению величины неравномерности  $\Delta\alpha$  внутри практического диапазона  $\Delta\alpha = 0,2 \dots 0,4$ .

4. Из рис.2 в отношении линии “отсеки КС” видно, что у этой линии темп уменьшения  $EI_{NO}$  по правой ветви, т.е. при обеднении смеси свыше  $\alpha = 1,2$ , качественно очень хорошо совпадает с соответствующим

темпом для расчетной линии, в частности для линии с  $\Delta\alpha = 0,2$ . В области же богатых смесей с  $\alpha = 0,9$  линия “отсеки КС” проходит положе и заметно выше расчетных линий с  $\Delta\alpha = 0,2; 0,3$  и даже  $0,4$ . Последнее может означать, что для отсеков и натуральных камер сгорания в общем количество  $NO$  значительный вклад вносят уже, так называемые, “быстрые”  $NO$ , которые образуются одновременно с окислением горючего и непосредственно в пламени. Следовательно, при расчете  $EI_{NO}$  для условий в камерах сгорания ГТД с  $\alpha = 0,9$  необходимо рассчитывать концентрации в сумме “быстрые”+”термические”  $NO$ ; для условий с  $\alpha = 1,2$  достаточно учитывать вклад лишь “термических”  $NO$ .

Полученные результаты могут быть использованы для изучения характеристик по выбросам  $NO$  из камер сгорания ГТД и других горелочных устройств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД. /Перевод с англ. Под ред. В.Е.Дорошенко.-М.: Мир, 1986.-566с.
2. Диденко А.А. Расчет равновесного состава и температуры продуктов сгорания для гомогенной керосино-воздушной смеси.//Тез. Докл. IV Всеросс. науч.-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». – Самара, 2002.-С.54-59.
3. Диденко А.А., Лукачев С.В. Упрощенная математическая модель кинетики окисления углеводородного топлива и образования окислов азота  $NO$ .// Там же. –С.59-66.
4. Диденко А.А., Некрасова С.О. Анализ химико-кинетических механизмов образования окислов азота  $NO_x$  в условиях камер сгорания ГТД.// Труды межд. науч.-техн. конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». –Самара, 2003. –С.128-135.