

диффузора к радиальному размеру входа (с другой стороны) является ограниченным. Расчет и эксперименты показывают, что толщина пограничного слоя у стенок тракта на входе в диффузор оказывает весьма существенное влияние на это ограничение. Сам по себе отрыв потока от стенок диффузора, как известно, не является стационарным.

Описанные изменения характеризуются сохранением постоянного суммарного расхода воздуха на горение и подмешивание. Они должны реализоваться при синхронности изменений в разных продольных диаметральных плоскостях камеры сгорания, в отсутствие окружных неравномерностей. Для выяснения причин окружных неравномерностей температуры на выходе камеры сгорания, оценки реальных амплитуд колебаний местных температур и скоростей газа в зоне горения и на выходе камеры сгорания следует учитывать возможность как асинхронности колебаний в указанных плоскостях, так и окружной неравномерности отрыва потока от стенок в диффузоре при синхронных и асинхронных колебаниях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. -М.: Наука, 1973.
2. Монин А.С., Яглом А.М.. Статистическая гидромеханика. Ч. I, -М.: Наука, 1995, ч. II. - М.: Наука, 1967.
3. Идельчик И.Е.. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. -М.: Машиностроение, 1992.
4. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. -М.: Энергия, 1970.

УДК 632.15.621.311.22

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА (NO) В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Ивлиев А.В.

*Самарский государственный аэрокосмический университет, г.Самара*

Источники образования оксидов азота при горении можно разделить на три основные группы: "термические", "быстрые" и "топливные" NO.

Основные реакции, определяющие образование термической NO и мо-

лекулярного азота во время горения, даны Зельдовичем [1]:



Реакция (1.3) становится значимой только при составах, близких к стехиометрическим, и при горении богатой смеси, дающей высокую температуру в течение времени, достаточно длительного для образования значительного количества NO.

Скорость образования термической NO гораздо меньше скорости горения. Вообще в системах со значительным уровнем эмиссии основная часть NO образуется после завершения горения. Выделив послепламенную зону, которая расположена по потоку ниже основной зоны реакции, можно отделить процесс образования NO от процесса горения и рассчитать скорость образования NO в предположении равновесности реакций горения. Таким образом, расчет скорости образования NO сильно упрощается при введении равновесных значений температуры и концентраций  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , O и OH в уравнения скорости образования NO.

Константы скоростей реакций в прямом и обратном направлении измерены в большом числе экспериментальных работ. Так как значения констант достаточно хорошо определены, расчет скорости образования NO требует только знания величин локальной температуры и локальных концентраций  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , O и OH.

При стационарном режиме горения реакция горения и следующая за ней (или частично совпадающая по времени) реакция образования оксида азота протекает при переменной температуре. За характерную температуру принята максимальная температура. Вследствие значительного энергетического барьера реакции ( $E_1 = 561$  кДж/моль) можно считать, что образование основного количества оксида азота, определяющего концентрацию в конечных продуктах сгорания, происходит при максимальной температуре и остается существенным на некотором температурном интервале (температурной ступеньке).

Простейшей аппроксимацией для расчета кинетики окиси азота является предположение о равновесии CNO. В этой аппроксимации предполагается, что время, требуемое для достижения равновесной концентрации окиси

азота, много больше, чем время, требуемое для достижения равновесия других продуктов сгорания. Концентрации всех веществ (особенно атомарного кислорода) и температура рассчитываются равновесными методами с исключением NO из списка возможных веществ. Вследствие своей простоты предположение о равновесии СНО интенсивно использовалось в моделях образования оксида азота. Обычно оно более справедливо при более высоких давлениях и бедных смесях.

В данной работе, для повышения точности расчета, соединена кинетика окисления азота с моделью кинетики горения. С этой целью к ранее разработанной кинетической схеме горения, см.[2,3], добавлены указанные уравнения цепного механизма Зельдовича.

Такой подход позволяет описать образование “термических”, а также, до некоторой степени, “быстрых” оксидов азота.

Вопрос образования “топливных” NO применительно к газообразному и авиационному топливу существенной роли не играет, так как связанный азот в этом топливе практически отсутствует.

Разработанная математическая модель процесса образования оксидов азота при сжигании углеводородного топлива реализована (для изотермического случая) в виде программы для ПЭВМ написанной на языке Турбо-Паскаль V 7.0 инвариантной (за счет разработанного входного проблемно-ориентированного языка описания моделируемого процесса) относительно кинетической схемы процесса. Инвариантность позволяет легко использовать любые кинетические схемы, задав их с помощью любого текстового редактора.

(Автор благодарит А.Ф. Урывского за помощь в постановке задачи и С.А. Ивлиева, выполнившего основную работу по программированию).

С помощью указанной программы произведен расчет для некоторых случаев изотермического горения пропано-воздушной смеси, представленные на рис 1...3. Следует отметить, что концентрация NO на представленных графиках приведена в миллиграммах NO на миллиграмм исследуемых продуктов сгорания. Чтобы перейти к измерению концентрации NO в обычно применяемых единицах - миллиграммах NO на кубический метр, необходимо приведенную на представленных графиках концентрацию NO разделить на массу кубометра смеси в миллиграммах (примерно на  $1.23 \times 10^6$ ).

Из рис 1 можно видеть, что при одинаковой, достаточно высокой

температуре 2500 К, обогащение смеси, в особенности для  $\alpha < 1$ , приводит к уменьшению выхода NO, уже при временах пребывания, больших, чем 2..3 микросекунды.

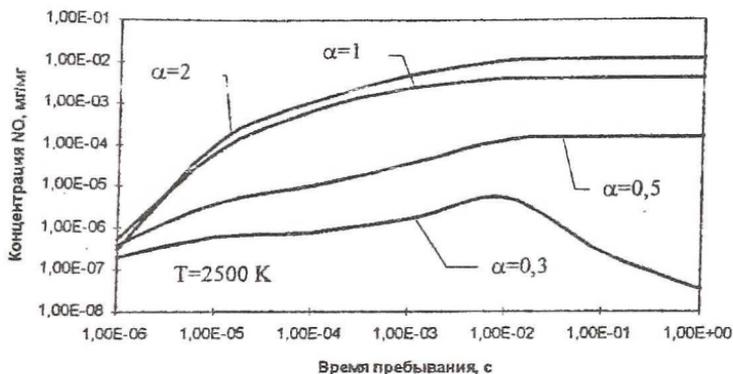


Рис. 1. Образование оксида азота для разных составов смеси

При малых временах пребывания, напротив, обогащение смеси приводит к увеличению выхода NO. Это можно объяснить появлением так называемой "быстрой" NO.

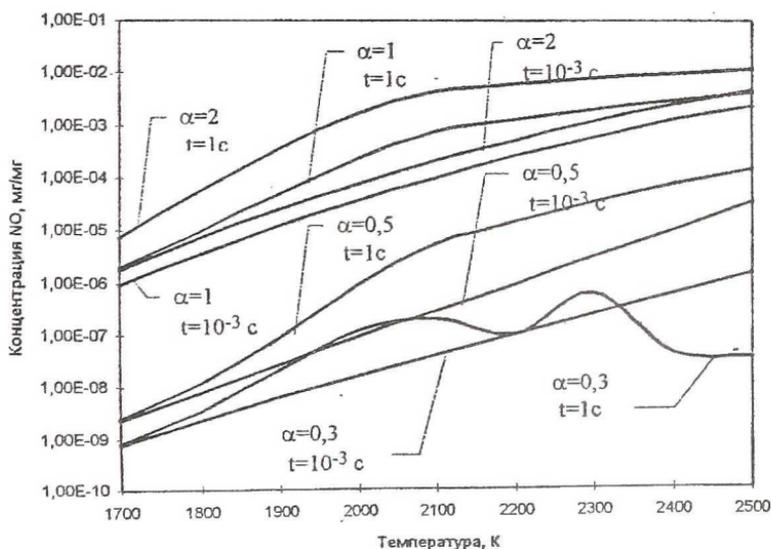


Рис. 2. Образование оксида азота для разных составов смеси и времени пребывания

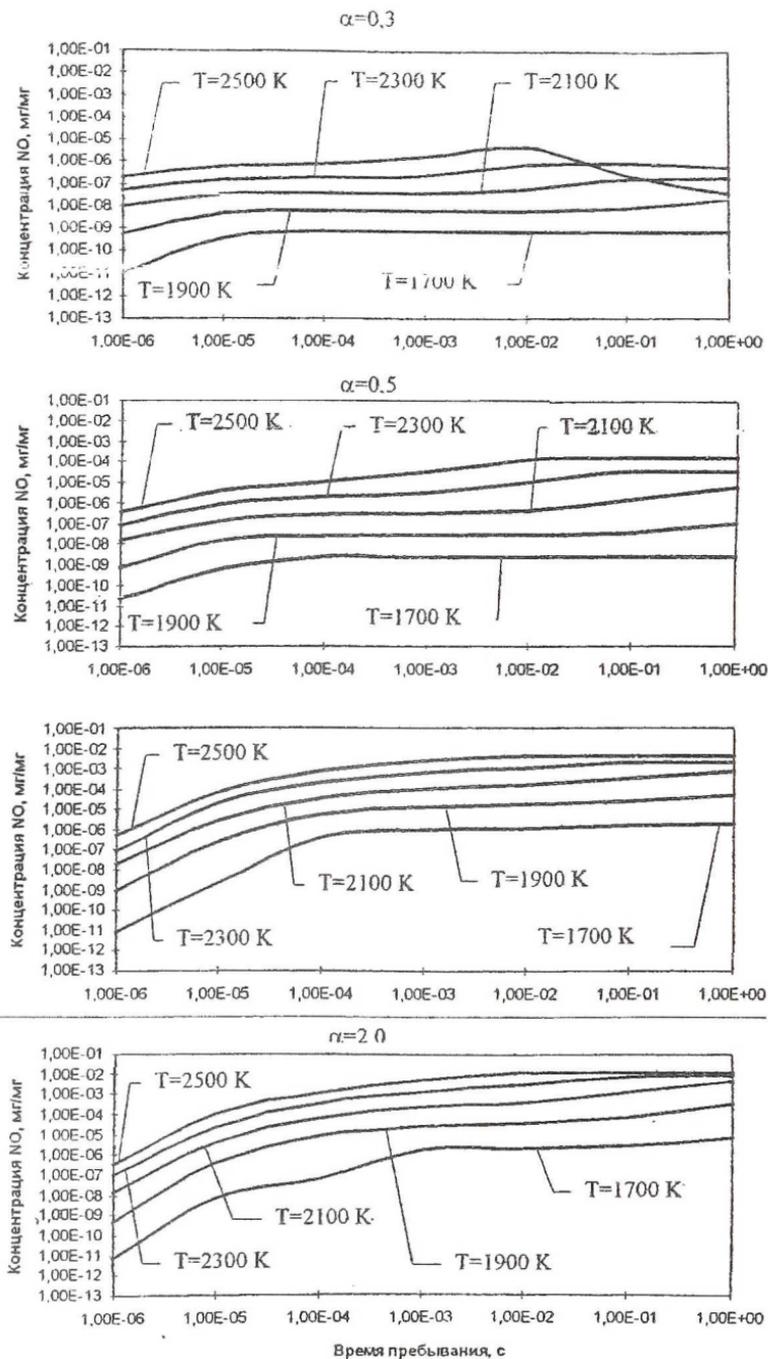


Рис. 3. Влияние времени пребывания на образование оксида азота для разных температур и составов смеси

Снижение концентрации NO при  $\alpha = 0,3$  и времени пребывания более 10 мс объясняется, по-видимому, появлением большого количества восстановителей, реагирующих с NO.

Роль температуры, оказывающей экспоненциальное влияние на выход NO, видна из рис.2. Можно видеть, что при температурах, меньших 1700 К, даже при достаточно больших временах пребывания, достигаемые концентрации NO невелики.

Изложенное иллюстрируют также графики рис.3, где представлены полученные зависимости, систематизированные по составам смеси и температурам.

Таким образом, результаты численного моделирования образования оксида азота при горении в первом приближении позволяют подтвердить ранее полученные экспериментальные результаты [4].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. – М.: АН СССР, 1947. - 70с.
2. Ивлиев А.В., Ивлиев С.А. Математическая модель процесса образования оксида азота при горении газообразного топлива. - В сб.: Тезисы докладов XXVI Международного научно-технического совещания по динамике и прочности двигателей, посвященного 85-летию со дня рождения Генерального конструктора академика Н.Д. Кузнецова "Динамика и прочность двигателей" –Самара : ТОО "Венета", 1996, -С.71-72.
3. Ивлиев С.А. Математическая модель процесса образования оксида азота. - В сб.: Тезисы докладов X Всероссийской межвузовской научно-технической конференции "Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели". -М.: МГТУ, 1996, -С.72.
4. Ивлиев А.В. Разработка экологически безопасной газовой горелки схемы "богатая-бедная" смесь. // Вестник СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 1. –Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1998, -С.146-149.