

ЛИТЕРАТУРА

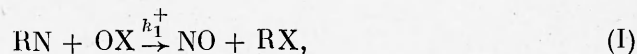
1. Г. Н. Абрамович. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.
2. Р. Бусеройд. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1974.
3. Л. А. Вулкс, Л. П. Ярин. Аэродинамика факела. Л.: Энергия, 1978.
4. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957.

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ОКИСЛОВ АЗОТА

К. А. Гордин
(Москва)

В одной из первых экспериментальных работ [1] по исследованию механизма образования окислов азота из азота топлива рассмотрена простая модель образования NO и N₂ — основных термодинамически устойчивых соединений при сжигании обедненных и стехиометрических смесей.

Согласно этой модели, весь азот топлива превращается в процессе термического пиролиза в промежуточное соединение RN, которое полностью реагирует в соответствии с реакциями



где OX — кислородсодержащий компонент в продуктах горения, которым, согласно экспериментальным данным [1—5], вероятнее всего, является радикал OH. Работы [4—7] подтверждают выводы [1], что вещество RN представляет собой одну из аминогрупп, но сложность независимого определения констант скоростей NH_i (i = 0, 1, 2, 3) в реакции (I) не позволяет пока однозначно идентифицировать RN.

В предположении, что окислы азота потребляются лишь по реакции (II), весь азот топлива вступает в реакцию, и вещество RN расходуется по реакциям (I) и (II), в [1] получена аналитическая формула, связывающая [NO] в продуктах сгорания с концентрацией исходного азотсодержащего соединения. Наличие в этом уравнении экспериментально подбираемого эмпирического параметра позволило успешно использовать формулу для расчета выхода топливных окислов азота в предварительно перемешанных и диффузионных пламенах ряда органических топлив.

Высокая степень конверсии азота топлива в NO должна наблюдаться лишь при сжигании стехиометрических и обедненных смесей, для которых велики равновесные концентрации окислов азота. При увеличении степени обогащения горючей смеси ($\alpha \lesssim 0,7$) основными азотсодержащими соединениями в продуктах сгорания становится аммиак, а при достаточно низких коэффициентах избытка окислителя — и сильная кислота (рис. 1). Поэтому при этих режимах сжигания органического топлива уже нельзя пренебрегать скоростью обратной реакции (I).

Теоретические оценки констант скоростей образования NO из аминов [6, 7], а также экспериментальные данные по кинетике конверсии топливного азота показывают, что скорость R₁ как прямой, так и обратной реакции (I) более чем на порядок выше скорости R₂ реакции (II) при сжигании обогащенных смесей (рис. 2).

Цель настоящей работы — получение методом сращиваемых асимптотических разложений аналитических зависимостей концентраций азотсодержащих соединений от времени для более широкого интервала α .

Постановка задачи. На основании реакций (I) и сделанных выше

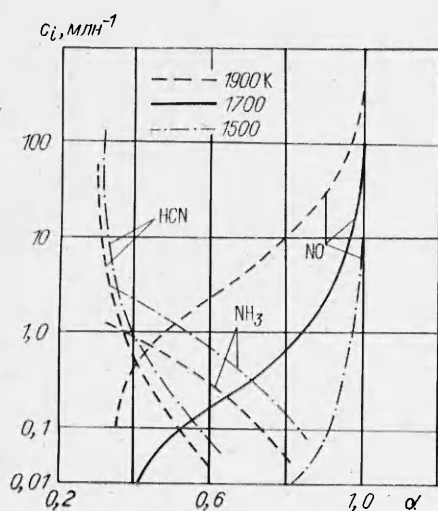


Рис. 2. Отношение скоростей реакций R_1/R_2 в зависимости от α для различных температур по данным [5].

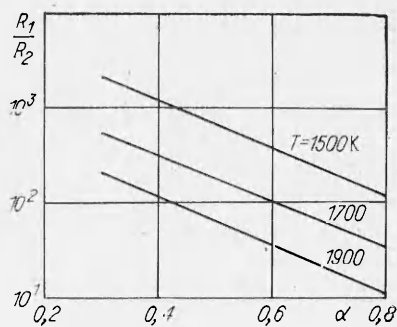


Рис. 1. Зависимость равновесных концентраций аммиака, синильной кислоты и окислов азота от α при сжигании угля с воздухом для различных температур.

предположений систему дифференциальных уравнений и начальных условий, описывающих изменение концентраций азотсодержащих компонентов, можно представить в следующем виде:

$$\frac{d[\text{RN}]}{dt} = R_1^+ - R_1^- - R_2, \quad \frac{d[\text{NO}]}{dt} = R_1^+ - R_1^- - R_2, \quad \frac{d[\text{N}_2]}{dt} = R_2,$$

$$t = 0: [\text{RN}] = J_0, [\text{NO}] = [\text{N}_2] = 0, \quad (1)$$

$$R_1^+ = k_1^+ [\text{RN}] [\text{OX}], \quad R_1^- = k_1^- [\text{NO}] [\text{RX}], \quad R_2 = k_2 [\text{RN}] [\text{NO}].$$

Здесь k_1^+ — константа скорости образования окислов азота; k_1^- — константа скорости обратной реакции (I); k_2 — константа скорости образования молекулярного азота; t — время; J_0 — начальная концентрация исходного азотсодержащего соединения.

Если по реакции (I) достигается равновесие, то должно выполняться равенство

$$k_1^+ [\text{RN}] [\text{OX}] = k_1^- [\text{NO}] [\text{RX}] \quad (2)$$

и удобно ввести параметр

$$F = [\text{NO}]_e / [\text{RN}]_e, \quad (3)$$

равный отношению равновесных концентраций окислов азота и амина (например, NH или NH_2), зависящий от температуры и коэффициента избытка окислителя. С учетом (2)

$$F = k_1^+ [\text{OX}]_e / k_1^- [\text{RX}]_e,$$

где $[\text{OX}]_e$ и $[\text{RX}]_e$ — равновесные концентрации компонентов смеси продуктов сгорания, определяемые концентрацией основных продуктов горения органического топлива.

Третье уравнение в системе дифференциальных уравнений (1) независимо, и его решение, определяющее изменение концентрации молекулярного азота по времени, может быть получено после решения первых двух равенств из закона сохранения числа атомов азота

$$[\text{RN}] + [\text{NO}] + 2[\text{N}_2] = J_0.$$

Для удобства исследования поставленной задачи перейдем к безразмерным переменным

$$\tau = t/t_0, \quad t_0 = 1/k_1^+ [\text{OX}]_e, \quad [\text{RN}] = J_0 \psi, \quad [\text{NO}] = J_0 \nu$$

и введем новые безразмерные функции искомых концентраций

$$S = \psi + v, \quad R = \psi - v/F.$$

S имеет смысл суммы всех азотсодержащих компонентов смеси, кроме N_2 , и может убывать лишь за счет образования молекулярного азота. Функция R пропорциональна безразмерной разности концентраций исходного азотсодержащего соединения и окислов азота и с учетом (3) при установлении квазиравновесия между ними должна обращаться в нуль. Тогда задача Коши для системы (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dR}{d\tau} &= -\gamma R - \varepsilon \frac{(1-1/F)}{\gamma^2} (S-R)(S/F+R), \quad R(0) = 1, \\ \frac{dS}{d\tau} &= -\frac{2\varepsilon}{\gamma^2} (S-R)(S/F+R), \quad S(0) = 1, \\ \gamma &= 1 + 1/F \quad \varepsilon = k_2 J_0 / k_1^+ [\text{OX}]_e \sim R_2 / R_1^+. \end{aligned} \quad (4)$$

Система (4) содержит малый параметр ε , пропорциональный отношению характерных скоростей образования молекулярного азота и окислов азота. Физически ясно, что рассматриваемая задача характеризуется наличием двух временных масштабов: временем выхода концентрации окислов азота на «квазиравновесный» уровень t_0 и временем образования молекулярного азота t_0/ε . Присутствие в физической задаче параметров ε , t_0 и t_0/ε позволяет построить решение методом сращиваемых асимптотических разложений [8], которое должно быть равномерно пригодным на больших интервалах времени. Параметр F , от которого должно зависеть решение системы (4), может меняться в очень широких пределах (на несколько порядков) в зависимости от температуры и степени обогащения смеси. Как будет показано ниже, удается с помощью асимптотических методов построить приближенное решение для произвольных F .

Метод решения. Рассмотрим частный случай $F=1$. Система дифференциальных уравнений (4) существенно упрощается:

$$dR/d\tau = -2R, \quad dS/d\tau = -\varepsilon/2 \cdot (S^2 - R^2), \quad S(0) = R(0) = 1.$$

Первое выражение легко интегрируется, и его решение имеет вид

$$R = \exp(-2\tau).$$

Тогда оставшаяся формула

$$dS/d\tau + (\varepsilon/2)S^2 = (\varepsilon/2)\exp(-4\tau), \quad S(0) = 1 \quad (5)$$

является уравнением типа Риккати [9], которое после замены переменных $S = (2/\varepsilon) \cdot (dy/d\tau)/y$ можно свести к дифференциальному уравнению второго порядка

$$d^2y/d\tau^2 = \left[\frac{\varepsilon}{2} \exp(-2\tau) \right]^2 y,$$

решение которого можно выразить через модифицированные функции Бесселя [9] нулевого порядка:

$$y = C_1 I_0(x) + C_2 K_0(x), \quad x = (\varepsilon/4) \exp(-2\tau).$$

С учетом начального условия (5) найдем, что

$$S(\tau) = e^{-2\tau} \frac{K_1(x) - C I_1(x)}{C I_0(x) + K_0(x)}, \quad C = \frac{K_1(\varepsilon/4) - K_0(\varepsilon/4)}{I_1(\varepsilon/4) + I_0(\varepsilon/4)}. \quad (6)$$

Здесь I_0 , K_0 , I_1 , K_1 — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно. Воспользовавшись разложением функций Бесселя в ряды по x ($x \ll 1$) [10], разложим точное решение (6) в асимптотический ряд по ε

$$S(\tau) \simeq \frac{1}{1 + T/2} + \frac{\varepsilon}{8} \left[\frac{1}{(1 + T/2)^2} - e^{-4\tau} \right] + O(\varepsilon^2). \quad (7)$$

Здесь $T = \varepsilon\tau$ — «медленное» время, определяющее характерную скорость образования молекулярного азота.

Ищем решение задачи (5) при $\varepsilon \rightarrow 0$ во внутренних переменных в виде асимптотического разложения

$$S(\tau, \varepsilon) = f_0(\tau) + \varepsilon f_1(\tau) + O(\varepsilon^2). \quad (8)$$

В результате подстановки (8) в (5) получим последовательность приближенных уравнений с начальными условиями

$$\frac{df_0}{d\tau} = 0, \quad \frac{df_1}{d\tau} + \frac{f_0^2}{2} = \frac{\exp(-4\tau)}{2}, \quad f_0(0) = 1, \quad f_1(0) = 0,$$

решение которых дает

$$S(\tau, \varepsilon) = 1 + \varepsilon \left[\frac{1}{8} - \frac{\tau}{2} - \frac{1}{8} \exp(-4\tau) \right] + O(\varepsilon^2).$$

Разложение, пригодное на больших временах (внешнее разложение), связано с пределом $\varepsilon \rightarrow 0$, $T = \varepsilon\tau$ — фиксировано. Предположим, что асимптотическое разложение во внешних переменных выражается формулой

$$S(T, \varepsilon) = h_0(T) + \varepsilon h_1(T) + O(\varepsilon^2). \quad (9)$$

Уравнения, полученные в результате приравнивания членов одного и того же порядка малости после подстановки разложения (9) в (5) и их решения, имеют вид

$$\frac{dh_0}{dT} = -\frac{h_0^2}{2}, \quad h_0(T) = \frac{1}{(A + T/2)};$$

$$dh_1/dt = -h_0 h_1, \quad h_{11}(T) = B/(A + T/2)^2.$$

Здесь A и B — постоянные интегрирования, определяемые в результате срачивания внешнего разложения (9) с (8), которое учитывает начальное условие. Выполнив процедуру срачивания (8) и (9), можно найти

$$A = 1, \quad B = 1/8.$$

С помощью выражений (9) и (8) построим равномерно пригодное асимптотическое разложение, воспользовавшись методом аддитивного составления [8]:

$$S = \frac{1}{1 + T/2} + \frac{\varepsilon}{8} \left[\frac{1}{(1 + T/2)^2} - e^{-4\tau} \right] + O(\varepsilon^2). \quad (10)$$

Первый член (10) совпадает с разложением точного решения (7) соответствующего порядка. Определяя последовательно члены рядов (8) и (9) и продолжая процедуру срачивания, можно построить последующие члены (10).

При $F = 1$ решение $R(\tau)$ системы (4) не зависит от ε , потому что быстро устанавливающееся «квазиравновесие» между аминем и окислами азота в системе ($\psi = \nu$) не может быть нарушено за счет реакции (II), так как эти компоненты исчезают в равных количествах. В любом другом случае $R = R(\tau, \varepsilon)$.

Получив выше подтверждение корректности используемого метода или построения решения в случае $F = 1$, перейдем к построению решения в общем случае.

Образование окислов азота при $F \neq 1$. Для исходной системы (4) рассмотрим асимптотическое разложение, соответствующее решению при малых t ; τ — фиксировано, $\varepsilon \rightarrow 0$ (внутреннее разложение). Из начальных условий следует, что первые члены разложений имеют порядок единицы. Поэтому рассмотрим разложение, соответствующее пределу пограничного слоя:

$$S(\tau, \varepsilon) = S_0(\tau) + \varepsilon S_1(\tau) + \dots, \quad (11)$$

$$R(\tau, \varepsilon) = R_0(\tau) + \varepsilon R_1(\tau) + \dots$$

Здесь и ниже многоточием отмечены члены более высокого порядка малости. Подставляя (11) в (4) и учитывая начальные условия, получим последовательность приближенных уравнений

$$dR_0/d\tau = -\gamma R_0, \quad dS_0/d\tau = 0, \quad R_0(0) = S_0(0) = 1,$$

решение которых имеет вид

$$S_0 = 1, \quad R_0 = \exp(-\gamma\tau); \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_1}{d\tau} + \gamma R_1 &= -\frac{(1-1/E)}{\gamma^2} (1 - e^{-\gamma\tau}) \left(\frac{1}{\gamma} + e^{-\gamma\tau} \right), \\ \frac{dS_1}{d\tau} &= -\frac{2}{\gamma^2} (1 - e^{-\gamma\tau}) \left(\frac{1}{F} + e^{-\gamma\tau} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

$$R_1(0) = S_1(0) = 0.$$

Интегрируя систему (13) и учитывая начальные условия, получим

$$\begin{aligned} R_1 &= -\frac{(1-1/F)}{\gamma^2} \left[\frac{1}{\gamma F} (1 - e^{-\gamma\tau}) + \tau (1 - 1/F) e^{-\gamma\tau} + \frac{e^{-\gamma\tau}}{\gamma} (e^{-\gamma\tau} - 1) \right], \\ S_2 &= -\frac{2}{\gamma^2} \left[\frac{\tau}{F} + \frac{(1-1/F)}{\gamma} (1 - e^{-\gamma\tau}) - \frac{1}{2\gamma} (1 - e^{-2\gamma\tau}) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Дальше можно найти во внутреннем разложении члены любого порядка. Перейдем в (4) к внешним переменным и рассмотрим предел: T фиксировано, $\varepsilon \rightarrow 0$. Найдем асимптотическое разложение, соответствующее большим временам (внешнее разложение),

$$S(T, \varepsilon) = g_0(T) + \varepsilon g_1(T) + \dots, \quad (15)$$

$$R(T, \varepsilon) = u_0(T) + \varepsilon u_1(T) + \dots$$

Подставляя (16) в (4) и приравнивая члены одного порядка малости по ε , получим следующую последовательность приближенных уравнений:

$$u_0(T) = 0, \quad u_1(T) = -\frac{(1-1/F) g_0^2}{\gamma^3 F^2} \quad (16)$$

$$\frac{dg_0}{dT} = -\frac{2 g_0^2}{\gamma^2 F}, \quad \frac{dg_1}{dT} + \frac{4}{\gamma^2 F} g_0 g_1 = \frac{2(1-1/F)^2}{F\gamma^5} g_0^3. \quad (17)$$

После интегрирования (17) имеем

$$\begin{aligned} g_0(T) &= 1/(L + 2T/F\gamma^2), \\ g_1(T) &= \left[M + \frac{(1-1/F)^2}{L^2\gamma^3} \ln(1 + 2T/LF\gamma^2) \right] / (1 + 2T/LF\gamma^2)^2, \end{aligned} \quad (18)$$

где L, M — постоянные интегрирования, определяемые путем сращивания с внутренним разложением. Срастим внутреннее и внешнее разложение, записав их в промежуточных переменных: $\varepsilon \rightarrow 0$, $t_\eta = T/\eta(\varepsilon)$ фиксировано, где $\eta(\varepsilon) \rightarrow 0$ и $\eta/\varepsilon \rightarrow \infty$, при этом $T = \eta t_\eta \rightarrow 0$ и $\tau = \eta/\varepsilon \cdot t_\eta \rightarrow \infty$. Из (12), (14), (16), (18), отбрасывая трансцендентально малые члены, в результате сращивания найдем константы интегрирования

$$L = 1, \quad M = (2 - F)/F\gamma^3.$$

Складывая внутреннее и внешнее разложение и вычитая общую часть, получим равномерно пригодное составное разложение

$$\begin{aligned} S(T, \tau, \varepsilon) &= 1 / \left(1 + \frac{2T}{F\gamma^2} \right) + \varepsilon \left\{ \left[\frac{2-F}{F\gamma^3} + \frac{(1-1/F)^2}{\gamma^3} \ln \left(1 + \frac{2T}{F\gamma^2} \right) \right] / \left(1 + \frac{2T}{F\gamma^2} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2(1-1/F)}{\gamma^3} e^{-\gamma\tau} - \frac{1}{\gamma^3} e^{-2\gamma\tau} \right\} + \dots, \end{aligned} \quad (19)$$

$$R(T, \tau, \varepsilon) = e^{-\gamma\tau} - \varepsilon \frac{(1-1/F)}{\gamma^2} \left[\frac{e^{-2\gamma\tau}}{\gamma} + (1-1/F) \tau e^{-\gamma\tau} - \right. \\ \left. - (1+1/F) \frac{e^{-\gamma\tau}}{\gamma} + 1/F\gamma \left(1 + \frac{2T}{F\gamma^2} \right)^2 \right] + \dots$$

При $F = 1$ общее решение (19) совпадает с (10). При ограничении членами нулевого порядка по ε в (19) формулы, определяющие изменение концентраций окислов азота и азотсодержащих компонентов, можно представить в виде

$$\psi = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{S}{F} + R \right) \simeq \frac{1}{\gamma} \left[\frac{1}{F(1+2T/F\gamma^2)} + e^{-\gamma\tau} \right], \quad (20)$$

$$v = \frac{1}{\gamma} (S - R) \simeq \frac{1}{\gamma} \left[\frac{1}{(1+2T/F\gamma^2)} - e^{-\gamma\tau} \right]. \quad (21)$$

Концентрация окислов азота в процессе конверсии топливного азота для любых конечных F имеет максимум при τ_* , определяемом из уравнения

$$(2\varepsilon/F\gamma^3)^{1/2} \simeq (1 + 2\varepsilon\tau_*/F\gamma^2) \exp(-\gamma\tau_*/2).$$

Приближенно можно считать $\tau_* \approx \frac{1}{\gamma} \ln(F\gamma^3/2\varepsilon)$.

Для больших значений F (соответствующих продуктам сгорания стехиометрических смесей) точка максимума $[\text{NO}]$ смещается в сторону больших времен, поэтому, вероятно, не регистрировалась в работах [1, 2]. Основная часть азота топлива в этих условиях за достаточно малое время переходила в NO .

Предельная концентрация окислов азота в продуктах сгорания при $\alpha \approx 1$ находится из решения системы (1) в предположении $F \gg 1$ и $\varepsilon \sim R_2/R_1 = 0(1)$ (см. рис. 2). В этом случае (1) имеет первый интеграл

$$\psi = 1 + v + (2/\varepsilon) \ln(1 - \varepsilon v)$$

и при условии, что все исходные азотсодержащие соединения переходят в NO или N_2 ($\psi(\infty) = 0$), получаем хорошо известную эмпирическую формулу [1]

$$\varepsilon v_\infty = 1 - \exp\{-\varepsilon(1 + v_\infty)/2\}.$$

В продуктах сжигания сильно обогащенных смесей, для которых $F \ll 1$, решение (20), (21) дает низкую концентрацию NO и в основном азот топлива присутствует в виде аммиака и синильной кислоты (высокая концентрация которой объясняется взаимодействием аминов с несгоревшими углеводородами), что подтверждается экспериментальными данными [5-7].

Приведем пример численного расчета содержания NO в продуктах сгорания метана с воздухом ($\alpha = 0,6$) с добавкой аммиака ($J = 600 \text{ } ^\circ/\text{000}$) в изотермических условиях ($T = 1850 \text{ K}$) в предположении, что образование NO в реакции (1) идет через группу NH , концентрация которой квазиравновесна по отношению к NH_3 , т. е. $[\text{NH}] \approx 10^{-3} [\text{NH}_3]$, $F = 1,5$ и $[\text{OH}]_e = 6,5 \cdot 10^{-11} \text{ моль/см}^3$. Принимая [5, 7] $\varepsilon \approx 8 \cdot 10^{-3}$, $k_2 = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ моль/см}^3 \cdot \text{с}$, получим, что через $t = 0,3 \text{ с}$ $[\text{NO}] \sim 50 \text{ } ^\circ/\text{000}$. Это значение весьма близко к экспериментально замеренному [7].

Рассчитанное по (21) отношение обратных величин суммарных концентраций азотсодержащих компонентов для разных условий сжигания обогащенных смесей метана с воздухом при $t = 0,05 \text{ с}$, составляющее

$$n = [1/(\psi + v)]_{\alpha=0,55}^{T=1850\text{K}} / [1/(\psi + v)]_{\alpha=0,6}^{T=1850\text{K}}$$

почти совпадает с $n = 1,17$, вычисленным по результатам измерений [7] и остающимся постоянным в течение первых 100 мс.

Таким образом, полученные в работе зависимости позволяют рассчитать концентрацию окислов азота и азотсодержащих компонентов в

продуктах сгорания обогащенных смесей со связанным азотом, дают правильное качественное описание экспериментальных закономерностей, однако в дальнейшем требуются дополнительные экспериментальные проверки и уточнения.

Поступила в редакцию 27/III 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. C. P. Fenimore. Comb. Flame, 1972, 19, 289.
2. G. G. De Soette. XV-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1975.
3. B. S. Haynes, D. Iverach, N. Y. Kirov. Ibid.
4. C. Morley. XVIII-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1981.
5. C. P. Fenimore. XVII-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1978.
6. T. Takagi, T. Tatsumi, M. Ogasawara. Comb. Flame, 1979, 35, 17.
7. Y. H. Song, D. W. Blair, V. J. Siminski e. a. XVIII-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1981.
8. Дж. Коул. Методы возмущений в прикладной математике. М.: Мир, 1972.
9. Э. Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971.
10. Г. Бейтмен, А. Эрдейи. Высшие трансцендентные функции. М.: Наука, 1974.

К ВОПРОСУ О ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

К. А. Гордин, В. М. Масленников

(Москва)

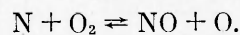
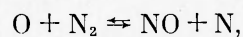
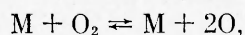
Вопрос о предотвращении выбросов окислов азота при сжигании органических топлив — один из наиболее актуальных при решении глобальной проблемы снижения антропогенного влияния на окружающую среду. Имеются два основных источника поступления окислов азота в атмосферу в результате человеческой деятельности — транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания и стационарные, главным образом, энергетические установки на органическом топливе. Как ни парадоксально, химическая промышленность включая производство азотной кислоты значительно меньше загрязняет окружающую среду выбросами окислов азота, чем энергетика.

В данной статье речь идет о предотвращении выбросов окислов азота от стационарных промышленных источников, сжигающих органическое топливо.

В настоящее время общепризнаны три механизма образования окислов азота, условно обозначаемых NO_x , в топочных устройствах: окисление атмосферного азота при высоких температурах (термические NO_x); образование NO_x во фронте пламени при окислении органического топлива (так называемые «быстрые» NO_x) и за счет окисления азота топлива (топливные NO_x).

Термические NO_x . На рис. 1 приведены значения термодинамически равновесной концентрации частиц NO как функции температуры и избытка окислителя, дающие представление о достижимых уровнях концентрации NO_x в топочных устройствах.

Фактическое содержание NO_x в дымовых газах определяется кинетикой окисления атмосферного азота. Для бедных смесей она достаточно хорошо описывается ценным механизмом Я. Б. Зельдовича [1]



Для богатых смесей обычно используется расширенная модель Я. Б. Зельдовича с включением дополнительных уравнений, основное из