

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

С. И. Футько

Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь, foutko@itmo.by

Проведен анализ кинетики образования оксидов азота в условиях фильтрационного горения бедных и богатых метановоздушных смесей. Интенсивный межфазный теплообмен в волне фильтрационного горения газов приводит к резкому снижению времени пребывания газа в высокотемпературной области, а также к уменьшению максимальных температур в зоне реакции. В результате процессы фильтрационного горения газов характеризуются пониженными индексами эмиссии оксидов азота по сравнению с диффузионными пламенами. В этих условиях термический механизм не вносит существенного вклада в образование NO и доминирующими являются NNH-канал для бедной смеси и механизм Фенимора для богатой. Оксиды азота в бедных смесях представлены в основном NO и N₂O, а для богатых характерны азотсодержащие компоненты HCN и NH₃. Разрушение NO в богатых смесях происходит в реакциях «дожигания» с участием радикалов HCCO, CH₃ и CH₂.

Ключевые слова: оксиды азота, фильтрационная волна, сверхадиабатический эффект, волна горения, химическая структура, кинетический анализ, бедные смеси, богатые смеси.

К настоящему времени хорошо известно вредное воздействие оксидов азота NO, NO₂ (NO_x) на атмосферу. Эмиссия NO_x вызывает формирование кислотных дождей и образование озона в тропосфере [1]. С 1993 г. в Европе введены строгие ограничения на промышленные выбросы оксидов азота в окружающую среду. Такой подход, в частности, ужесточает экологические требования к газовым технологиям, использующим процессы горения.

Технологии, функционирующие на основе фильтрационного горения газов (ФГГ), характеризуются низкими выходными концентрациями NO_x (от типичных значений ≈ 10 ÷ 25 ppm [2] вплоть до 0,2 ÷ 0,6 ppm [3] в зависимости от структуры пористой среды и состава смеси), что делает их особенно перспективными для широкого использования.

Имеется ряд работ, посвященных измерению концентрации NO_x в радиационных нагревателях на основе ФГГ [3–9]. Полученные результаты дали очень низкий по сравнению с диффузионными пламенами индекс эмиссии NO_x (типичные значения 0,1 ÷ 0,35 г/кг). Кинетика образования оксидов азота в процессах ФГГ исследована существенно хуже. Так, например, в работе [5] подчеркивается важность как термического канала, так и канала Фенимора при образовании NO в радиационных нагревателях на метановоздушных смесях с эк-

вивалентным отношением топливо/окислитель $\Phi = 0,5 \div 1,0$.

В данной работе анализируются характерные кинетические особенности образования NO_x в условиях сверхадиабатической волны ФГГ для бедных и богатых метановоздушных смесей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Уравнения, описывающие распространение волны ФГГ в инертной пористой среде (в системе координат, движущейся с фронтом горения с постоянной скоростью), имеют следующий вид [6, 10, 11]:

$$c_{p,g}G \frac{dT_g}{dx} = \varepsilon \frac{d}{dx} \left(\lambda_g \frac{dT_g}{dx} \right) - \varepsilon \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k + \alpha_V (T_s - T_g), \quad (1)$$

$$-(1 - \varepsilon)c_s \rho_s u_w \frac{dT_s}{dx} = (1 - \varepsilon) \frac{d}{dx} \lambda_s \frac{dT_s}{dx} - \alpha_V (T_s - T_g), \quad (2)$$

$$G \frac{dY_k}{dx} = -\varepsilon \frac{d}{dx} (\rho_g Y_k V_k) + \varepsilon \dot{\omega}_k W_k. \quad (3)$$

Здесь T — температура; $c_{p,g}$ — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; c_s —

удельная теплоемкость каркаса; G — массовый расход смеси; u_g — скорость фильтрации; u_w — скорость распространения фронта горения; ρ — плотность; ε — пористость; Y_k, W_k — массовая доля и молярная масса k -го компонента; $\dot{\omega}_k, V_k$ — скорость образования и диффузионная скорость k -го компонента; h_k — удельная энтальпия k -го компонента; λ — коэффициент теплопроводности; α_V — коэффициент межфазного теплообмена; индексы: g — газ, s — каркас.

Для анализа кинетики образования NO_x в зависимости от состава смеси систему уравнений (1)–(3) интегрировали с помощью пакета программ CHEMKIN-II [12]. При этом пренебрегали диффузией и теплопроводностью в газовой фазе, а вместо уравнения (2) использовали измеренные в эксперименте [10, 11] профили температур каркаса $T_s(x)$ для значений $G = 0,12 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $\varepsilon = 0,4$.

В литературе имеются различные модели образования оксидов азота: Leeds v1.3 [13], Dean и Bozzelli [14], GRI-Mech 3.0 [15] и др. Из них был выбран кинетический механизм GRI-Mech 3.0, поскольку он наиболее хорошо тестирован в широком диапазоне экспериментальных условий (в том числе и для богатых смесей вплоть до $\Phi \cong 1,5 \div 1,6$) и в нем модель образования оксидов азота приведена совместно с кинетикой окисления метана в воздухе (см. [15]). Механизм GRI-Mech 3.0 содержит модель образования оксидов азота из 18 компонентов и 105 обратимых реакций, включающую недавно идентифицированный NNN-канал образования NO_x [16]. В более ранних работах [4–7] данный канал генерации оксидов азота не учитывался.

Отметим, что все упомянутые выше кинетические механизмы недостаточно экспериментально проверены в области составов с $\Phi \geq 1,6$ и не позволяют получить информацию об образовании соединений $\text{HNO}_2, \text{HNO}_3, \text{NO}_3$, важных для тропосферной химии. Поэтому приводимые ниже кинетические данные для богатых смесей являются, прежде всего, качественными, имеющими тем не менее важное методологическое значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Следуя подходу [10, 11], для выяснения кинетических особенностей генерации оксидов азота в богатых смесях по сравнению с бедными в условиях волны ФГГ сравнивали смеси с

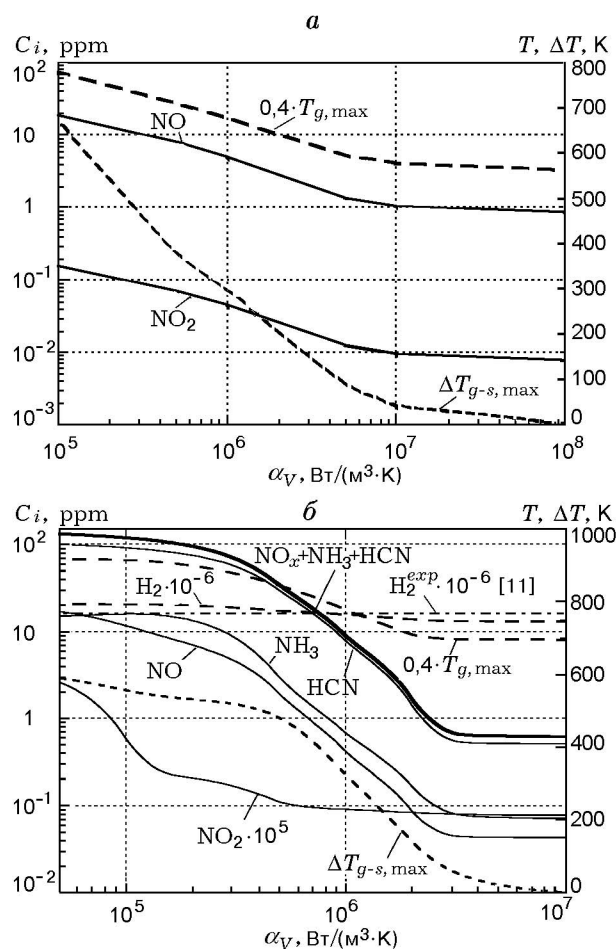


Рис. 1. Зависимость выходных концентраций оксидов азота и температур в волне ФГГ от коэффициента межфазного теплообмена для бедной (а, $\Phi = 0,37$) и богатой (б, $\Phi = 2,58$) смесей

$\Phi = 0,37$ и $\Phi = 2,58$, одинаковой калорийности (адиабатический разогрев $\Delta T_{ad} \cong 920 \text{ К}$). Данные смеси находятся за концентрационными пределами распространения ламинарного пламени, и их стабильное горение возможно лишь в режиме «спутной» волны ФГГ как следствие теплового рекуперативного цикла с конвективным потоком, обусловленным движением твердой фазы относительно реакционного фронта волны [17].

Ввиду сильной зависимости конечных концентраций продуктов горения от максимальной температуры газа [18, 19], коэффициент межфазного теплообмена выбирали таким образом, чтобы получить соответствие расчетных концентраций H_2 в продуктах сгорания экспериментальным данным [10, 11] для смеси с $\Phi = 2,58$ (рис. 1, б). Соответствие расчет-

ных и экспериментальных данных с точностью $10 \div 15\%$ достигается при $\alpha_V = 10^6$ Вт/(м³·К). Это значение α_V и использовалось в расчетах.

Из рис. 1 видно, что концентрации основных азотсодержащих компонентов как для богатых, так и для бедных смесей уменьшаются примерно на порядок при увеличении коэффициента α_V от 10^5 до $5 \cdot 10^6$ Вт/(м³·К) (последнее значение для богатых смесей соответствует однотемпературному режиму: $T_g \cong T_s$). Из данных рис. 1 следует, что одним из эффективных способов снижения выхода оксидов азота является применение в устройствах ФГГ мелкодисперсных пористых сред с повышенными значениями коэффициента теплообмена $\alpha_V \geq 5 \cdot 10^6 \div 10^7$ Вт/(м³·К) (например, высокопористых пенообразных керамик [20]). Данный подход имеет и недостаток, так как в силу тех же причин (уменьшение максимальных температур в зоне реакции), например, в технологиях по конверсии метана в синтез-газ снижается выход целевых продуктов H₂ и CO, а в устройствах по очистке отходящих газов от органических примесей, использующих бедные смеси, повышается нежелательный выброс CO [3]. Учитывая эти две противоположные тенденции, выбор оптимальных характеристик пористой среды должен проводиться исходя из особенностей конкретного технологического процесса.

На рис. 2 представлены профили концентраций азотсодержащих соединений для смесей с $\Phi = 0,37$ и $\Phi = 2,58$ в волне ФГГ. Из рис. 2 видно, что область генерации оксидов азота совпадает с областью высоких концентраций радикалов H, OH, O (мольные доли $\approx 10^{-3} \div 10^{-4}$). В бедных смесях оксиды азота образуются в основном в виде NO, N₂O и NO₂ (выходные концентрации 5,0, 1,0 и 0,04 ppm соответственно, рис. 2,а). Для богатых смесей в продуктах окисления содержатся в основном HCN, NH₃, NO, HNCO и NO₂ (выходные концентрации 6,4; 0,6; 0,3; $3 \cdot 10^{-2}$ и $9 \cdot 10^{-7}$ ppm, рис. 2,б). Впрочем, как HCN, так и NH₃ далее быстро превращаются в NO при попадании в атмосферу [1].

Из рис. 2 видно, что типичны следующие соотношения между выходными концентрациями азотсодержащих компонентов: $[NO]_{\max} > [N_2O]_{\max} > [NO_2]_{\max}$ для бедной ($\Phi = 0,37$) и $[HCN]_{\max} > [NH_3]_{\max} > [NO]_{\max} > [HNCO]_{\max}$ для богатой ($\Phi = 2,58$) смеси.

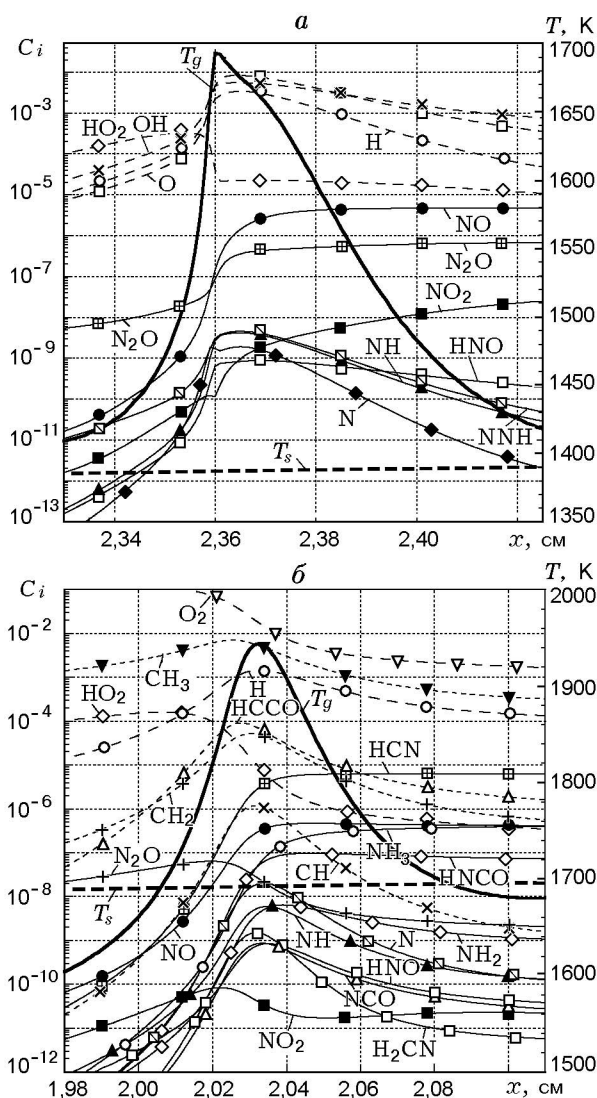


Рис. 2. Распределение концентраций (мольные доли) компонентов во фронте волны ФГГ для бедной (а, $\Phi = 0,37$) и богатой (б, $\Phi = 2,58$) смесей

Отметим, что расчетное значение выходной концентрации $[NO] \cong 5$ ppm для смеси с $\Phi = 0,37$ хорошо согласуется с оценкой (6 ± 1) ppm, полученной в экспериментах [9] при условиях, близких к рассматриваемым в данной работе. Состав азотсодержащих компонентов для смеси с $\Phi = 2,58$ качественно соответствует результатам экспериментов [21] по богатым ($\Phi \leq 1,7$) пропановоздушным пламенам.

Бедные смеси

На рис. 3 представлены схемы основных каналов образования и разрушения оксидов азо-

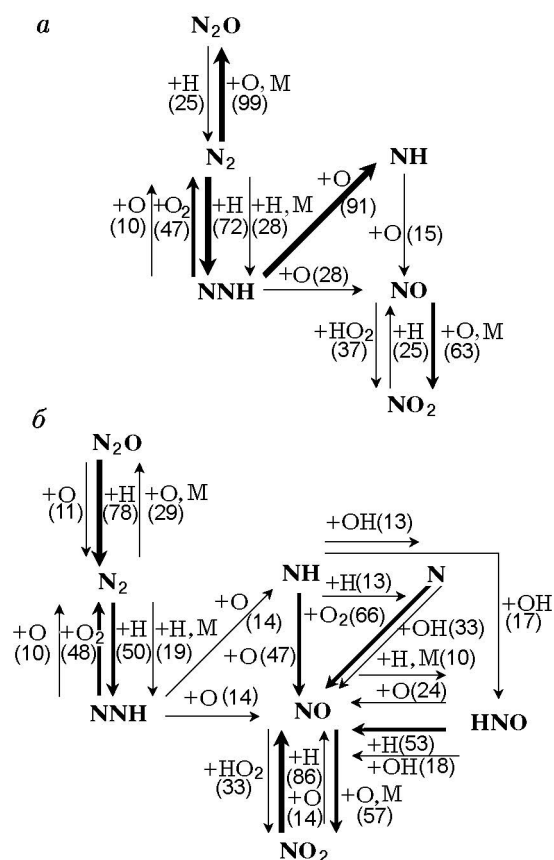


Рис. 3. Скелетная схема каналов образования оксидов азота в волне ФГГ бедной смеси ($\Phi = 0,37$):

a — образование; *б* — разрушение; вклады не менее 10 %; \leftarrow менее 40 %, \leftarrow 40 ÷ 70 %; \leftarrow более 70 %

та в волне ФГГ для смеси с $\Phi = 0,37$. Здесь используется вариант скелетной схемы, предложенный в [22]. В скобках приведены вклады (не менее 10 %) каналов окисления соответствующих компонентов (в процентах от суммарной скорости их распада) по интегрально-осредненным данным во фронте волны ФГГ. Минимально необходимое число частиц в такой схеме определяется естественным образом в процессе ее последовательного построения, начиная с NO. Обозначение +O, например, соответствует элементарной обратимой реакции с участием атомарного кислорода.

Из рис. 3, *a* видно, что NO образуется в основном в реакциях $NNH + O = NH + NO$, $NO_2 + H = NO + OH$ и $NH + O = NO + H$ (см. также табл. 1). За разрушение NO ответственны реакции $NO + O + M = NO_2 + M$,

$HO_2 + NO = NO_2 + OH$ и $H + NO + M = HNO + M$ (рис. 3, *б*).

Диоксид азота NO_2 образуется в реакциях $NO + O + M = NO_2 + M$ и $HO_2 + NO = NO_2 + OH$ (см. рис. 3, *a*). При этом из-за высоких концентраций радикалов H, O в зоне реакции (см. рис. 2, *a*) NO_2 быстро превращается в NO по каналам $NO_2 + H = NO + OH$ и $NO_2 + O = NO + O_2$ (см. рис. 3, *б*).

N_2O образуется (96 %) в реакции $N_2 + O(+M) = N_2O(+M)$. В присутствии достаточного количества радикалов H и O закись азота восстанавливается до молекулярного азота в реакциях $N_2O + H = N_2 + OH$ (79 %) и $N_2O + O = N_2 + O_2$ (10 %).

Объединение элементарных реакций в отдельные механизмы генерации NO проводилось на основе общепринятой классификации [23]. При этом применялась процедура «взвешивания» вкладов элементарных реакций в образование рассматриваемого компонента. Вклады в термический механизм образования NO дают реакции 1–3, в образование по N_2O -каналу — реакции 4 и 9, по NO_2 -каналу — реакции 5 и 6, а по NNH-каналу — реакции 7, 8, 10 и 12–15 (см. табл. 1). Все результаты сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что механизм термического образования NO в бедных смесях не дает значительного вклада в условиях волны ФГГ. Это объясняется тем, что его роль заметна лишь при достаточно высоких температурах, но вследствие сильного межфазного теплообмена такие температуры не характерны для процессов ФГГ в типичных пористых средах с диаметром зерна засыпки $d \cong 3 \div 6$ мм. Детальный анализ показывает (см. табл. 2), что в этом случае доминирует NNH-канал образования NO, идентифицированный в [16]. Данный механизм состоит из реакций $N_2 + H = NNH$ и $N_2 + H(+M) = NNH(+M)$ с последующим образованием NO в реакциях $NNH + O = NH + NO$ и $NH + O = NO + H$. Отметим, что заметные вклады дают также NO_2 - и N_2O -каналы.

Низкие выходные концентрации оксидов азота ($\approx 0,2 \div 25$ ppm [2–9]), характерные для процессов ФГГ, по сравнению с аналогичными данными для диффузионных пламен ($\approx 50 \div 150$ ppm [24–26]) обусловлены резким сокращением времени пребывания газа в высокотемпературной зоне (с температурами $\approx T_{g,max}$) и снижением значений максимальной температуры в волне ФГГ в результате интенсивного теплообмена между газом и пористой средой.

Таблица 1

Реакции	Вклады*, %	
	$\Phi = 0,37$	$\Phi = 2,58$
Образование NO		
1. $O + N_2 = N + NO$	1,1	0,4
2. $N + O_2 = NO + O$	0,7	69,8
3. $N + OH = NO + H$	0,3	5,8
4. $N_2O + O = 2NO$	2,9	—
5. $NO_2 + O = NO + O_2$	3,9	—
6. $NO_2 + H = NO + OH$	24,7	1,0
7. $NH + O = NO + H$	14,5	0,3
8. $NH + O_2 = NO + OH$	0,7	0,7
9. $N_2O + H = NH + NO$	2,3	1,7
10. $NNH + O = NH + NO$	28,2	0,3
11. $HNO + M = H + NO + M$	—	3,4
12. $HNO + O = NO + OH$	2,7	—
13. $HNO + H = H_2 + NO$	6,0	14,2
14. $HNO + OH = NO + H_2O$	2,0	0,3
15. $HNO + O_2 = HO_2 + NO$	0,5	0,4
16. $NCO + O = NO + CO$	0,4	—
17. $N + CO_2 = NO + CO$	—	1,8
Разрушение N_2		
18. $O + N_2 = N + NO$	0,7	—
19. $N_2 + HO_2 = N_2O + OH$	0,2	1,8
20. $N_2 + O(+M) = N_2O(+M)$	28,8	—
21. $N_2 + H = NNH$	49,8	4,2
22. $N_2 + H + M = NNH + M$	19,1	2,4
23. $C + N_2 = CN + N$	—	0,5
24. $CH + N_2 = HCN + N$	0,8	87,0
25. $CH + N_2(+M) = HCNN(+M)$	0,7	3,9

Примечание. *Вклады не менее 0,1 %.

Как для ФГГ, так и для диффузионных пламен образующиеся оксиды азота состоят главным образом из NO. Отличие механизмов образования NO (табл. 2) для бедных смесей в условиях волны ФГГ и в диффузионных пламенах обусловлено тем, что во втором случае в области горения $\Phi \cong 1,0$ и, следовательно, зона реакции характеризуется более высокими температурой и концентрацией топлива. Послед-

нее приводит к тому, что в диффузионных пламенах основной вклад (≈ 90 %) в образование NO_x приходится на механизм Фенимора, а термический механизм дает только ≈ 10 % [24, 26].

Богатые смеси

На рис. 4 представлены скелетные схемы каналов образования и разрушения оксидов азота в волне ФГГ для $\Phi = 2,58$.

Таблица 2

Механизмы образования NO	Вклады*, %		
	$\Phi = 0,37$	$\Phi = 2,58$	Диффузионные пламена**
1. Термический [23]: $O + N_2 = NO + O$, $N + O_2 = NO + O$ и $N + OH = NO + H$	2,1 (0,7)	0,4 (< 0,1)	10,0
2. Фенимора [23]: $CH + N_2 \rightarrow HCN + N \rightarrow \dots \rightarrow NO$	1,5 (0,8)	95,6 (87,0)	90,0
3. N_2O -канал [23]: $N_2 + O + M \rightarrow N_2O + M \rightarrow \dots \rightarrow NO$	5,2 (30,0)	2,7 (1,8)	—
4. NO_2 -канал [23]: $NO_2 + O = NO + O_2$, $NO_2 + H = NO + OH$	28,6	1,0	—
5. NNH -канал [16]: $N_2 + H(+M) \rightarrow NNH(+M) \rightarrow \dots \rightarrow NO$	62,5 (68,9)	0,3 (6,6)	—

Примечания. *Числа без скобок соответствуют образованию NO, в скобках — разрушению N_2 .
**Данные [24, 26].

Значительное количество генерируемого HCN (≈ 10 ppm) в волне ФГГ в этом случае объясняется тем, что этот компонент является продуктом реакции $CH + N_2 = HCN + N$ (в ней расходуется 90 % N_2). Оставшиеся 10 % N_2 расходуются в реакциях $N_2 + H = NNH$, $CH + N_2(+M) = HCNN(+M)$, $N_2 + H + M = NNH + M$ и $N_2 + HO_2 = N_2O + OH$ (см. табл. 1). Соединения NNH, HCNN и N_2O быстро восстанавливаются до N_2 в реакциях с H, CH_3 , O_2 и поэтому заметного вклада в образование оксидов азота не вносят (рис. 4, б). При этом N также в основном переходит в HCN в двухстадийном процессе с участием H_2CN : $CH_3 + NH_2 = CN + H$ и $H_2CN + M = H + HCN(+M)$. Последняя реакция дает ≈ 100 % распада H_2CN . Еще 14 % N конвертируется в HCN по каналу $CH_3 + N = HCN + H_2$.

Относительно низкие выходные концентрации NO (мольная доля $C_{NO} \approx 1$ ppm, рис. 2, б) характерны для богатых смесей. Вследствие существенного дефицита O_2 лишь ≈ 14 % атомарного азота окисляется в реакции $N + O_2 = NO + O$, которая является основным каналом генерации NO (70 %). Небольшая часть оксида азота (14 %) образуется и в реакции дегидрогенизации HNO: $HNO + H = H_2 + NO$. Соединение HNO образуется из NH в параллельных реакциях $NH + H_2O = HNO + H_2$ (84 %) и $NH + O_2 = HNO + O$ (11 %). Цианид

NH, в свою очередь, образуется преимущественно в реакции $N + H_2 = NH + H$ (70 %).

Имеет место также эффективное разрушение NO (40 % от суммарной генерации). Детальный анализ показывает (см. рис. 4, б), что распад NO осуществляется главным образом (80 %) в реакциях «дожигания» NO [23]. В фильтрационной волне горения богатой смеси основной вклад в разрушение NO вносит реакция с участием кетена: $HCCO + NO = HCNO + CO$. Кетен HCCO является продуктом окисления метана и образуется из ацетилена по каналу $O + C_2H_2 = H + HCCO$ (83 %) и в реакции $H + CH_2CO = HCCO + H_2$ (11 %), разрушается же он в реакциях $H + HCCO = {}^1CH_2 + CO$ (52 %) и $HCCO + O_2 = OH + 2CO$ (45 %). По сравнению с этими каналами в реакциях с азотсодержащими компонентами потребляется лишь незначительная часть кетена (менее 1 %). Реакции «дожигания» с участием радикалов CH_3 и CH_2 : $CH_2 + NO = H + HCNO$ (21 %) и $CH_3 + NO = HCN + H_2O$ (20 %) — тоже вносят существенный вклад в разрушение NO (см. рис. 4, б).

Значительный уровень (≈ 1 ppm) NH_3 обусловлен его эффективным образованием в реакциях $NH_2 + H_2 = NH_3 + H$ (86 %) и $NH_2 + H_2O = NH_3 + OH$ (14 %) при достаточно высоких концентрациях H_2 и H_2O в системе (C_{H_2} , $C_{H_2O} \approx 10^{-1}$, рис. 2, б). Одновременно

ЛИТЕРАТУРА

1. **Finlayson-Pitts B. J., Pitts J. N.** Atmosphere Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. New York: Wiley and Sons, 1986.
2. **Howell J. R., Hall M. J., Ellzey J. L.** Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media // Prog. Ener. Combust. Sci. 1996. V. 22. P. 121–145.
3. **Hoffman J. G., Echigo R., Yoshida H., Tada S.** Experimental study on combustion in a porous media with a reciprocating flow system // Combust. Flame. 1997. V. 111. P. 32–46.
4. **Khinkis M. J., Kunc W., Xiong T.-Y.** Experimental evaluation of a high-efficiency surface combustor-heater concept with low pollutant emissions // Symp. (Intern.) on Combustion in Industrial Furnaces and Boilers. New Jersey, 1989.
5. **Kendall R. M., Desjardin S. T., Sullivan J. D.** Basic research on radiant burners // Annual Report (Jan. 1989 — Mar. 1990) N GRI-90/0325. Chicago, Il.: Gas Research Inst., 1990.
6. **Hsu P. F., Matthews R. D.** The necessity of using detailed kinetics in models for premixed combustion within porous media // Combust. Flame. 1993. V. 93. P. 457–466.
7. **Khanna R., Goel R., Ellzey J. L.** Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner // Combust. Sci. Technol. 1994. V. 99. P. 133–142.
8. **Chae J. O., Shim M. S., Hwang J. W.** An experimental study on the characteristics of superadiabatic reciprocating type combustor in porous media // 1st Intern. School-Seminar: Modern Problems of Combustion and its Applications. Minsk, 1995. P. 28–34.
9. **Binque J. P., Saveliev A. V., Fridman A. A., Kennedy L. A.** NO_x and CO emissions of methane/air combustion waves in an inert packed bed // Mediterranean Symp. on Combustion: Abstr. of Work-in-Progress session. Antalya, 1999. P. 15.
10. **Kennedy L. A., Binque J. P., Drayton M. K., et al.** Chemical structures of filtration combustion waves in a porous media // The 27th Symp. (Intern.) on Combustion: WIP Abstracts. Pittsburgh, 1998. P. 403.
11. **Kennedy L. A., Binque J. P., Saveliev A. V., et al.** Chemical structures of methane-air filtration combustion waves for fuel-lean and fuel-rich conditions // The 28th Symp. (Intern.) on Combustion: Abstr. of Contributed Papers. Pittsburgh, 2000. P. 208.
12. **Kee R. J., Rupley F. M., and Miller J. A.** CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics // Sandia Report SAND89-8009, 1989.
13. **Pilling M. J., Turanyi T., Hughes K. J.** The Leeds methane oxidation mechanism. <http://www.chem.leeds.ac.uk/Combustion/Combustion.html>. 1997.
14. **Dean A. M., Bozelli J. W.** A review of NO_x formation // Combustion Chemistry II / W. Gardiner, Jr. (Eds). New York: Springer-Verlag, 1999.
15. **Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., et al.** GRI-Mech 3.0. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
16. **Bozelli J. W., Dean A. M.** Direct studies of some elementary steps for the formation and destruction of nitric oxide in the H-N-O system // Intern. J. Chem. Kinet. 1995. V. 27. P. 1097–1109.
17. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Фильтрационное горение газов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988. С. 118–120.
18. **Футько С. И.** Влияние кинетических свойств смеси на макрохарактеристики волн фильтрационного горения газов // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 1. С. 15–27.
19. **Футько С. И.** Кинетический анализ химической структуры волн фильтрационного горения газов ультрабогатых составов // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 83–94.
20. **Younis L. B., Viskanta R.** Experimental determination of the volumetric heat transfer coefficient between stream of the air and ceramic foam // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1993. V. 36, N 6. P. 1425–1434.
21. **Berberius H., Just T., Kelm S., Nowak U.** Konversion von brennstoffgebundenem Stickstoff am Beispiel von dotierten Propan-Luft-Flammern // VDI-Berichte. 1987. V. 645. P. 626.
22. **Футько С. И.** Кинетический анализ химической структуры волн фильтрационного горения газов ультрабедных составов // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 3. С. 23–32.
23. **Bowman C. T.** Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: Technology driven by regulation // 24th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1993. P. 859.
24. **Nishioka M., Nakagava S., Ishikawa Y., Takeno T.** Prediction of NO_x emission index of laminar diffusion flame // Combust. Flame. 1994. V. 98. P. 127.
25. **Smyth K. C.** Experimental investigation and modeling of NO formation in diffusion flames // Combust. Sci. Technol. 1996. V. 115. P. 151.
26. **Marro M. T., Pivovarov M. A., Miller J. H.** Strategy for the simplification of nitric oxide chemistry in a laminar methane/air diffusion flamelet // Combust. Flame. 1997. V. 111. P. 208–221.

Поступила в редакцию 13/XII 2000 г.,
в окончательном варианте — 5/III 2003 г.