

время порядка сотых долей секунды. Все это указывает, что нет необходимости включать в расчеты уравнения (3) и (5), а использовать приближение тепловой релаксации и балансные соотношения энергии при определении температуры частиц. Влияние теплоты десорбции на кинетику процесса проявляется только при нагреве частиц с коэффициентом внешнего теплообмена менее  $100 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . Время же диффузионной релаксации сильно зависит от температуры частиц и на несколько порядков превышает время тепловой релаксации.

### Литература

1. Романюк В.Н., Несенчук А.П. Интенсификация непрерывного процесса тепловой десорбции. – Рукопись деп. в ВИНТИ. – М., 1979, № 6. – 77 с. 2. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. – М.: Мир, 1976.

УДК 662.76

В.С.Северянин, канд. техн. наук,  
М.Г.Горбачева, инженер (БИСИ)

### ОБ ЭМИССИИ ОКИСЛОВ АЗОТА ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ГОРЕНИИ

Известно, что концентрация окислов азота в продуктах сгорания зависит от температуры факела, времени пребывания газов в зоне высоких температур, от содержания кислорода в зоне горения [1]. Наибольшее влияние на выход окислов азота оказывает температура [2]:

$$C_{\text{NO}} = 4,6 \sqrt{C_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{N}_2}} \exp\left(-\frac{21500}{R\theta}\right),$$

где  $C_{\text{NO}}$  – равновесная концентрация окиси азота;  $C_{\text{O}_2}$  и  $C_{\text{N}_2}$  – концентрация кислорода и азота в продуктах сгорания;  $\theta$  – температура в зоне реакции.

Одним из форсированных методов сжигания является пульсирующее горение. При этом способе сжигания топлива существенно снижается температура в зоне горения. Количественно это снижение можно охарактеризовать следующим образом.

Кинетическая энергия элементарной массы потока

$$dE = \frac{W^2}{2} dm,$$

где  $dm = \rho dV = \rho \cdot S \cdot W \cdot d\tau$ .

Здесь  $\rho$  - плотность газа;  $V$  - объем газа, прошедший со скоростью  $W$  поперечное сечение  $S$  камеры горения за время  $d\tau$ .

За время периода  $T$  пульсаций энергия стационарного потока

$$E_{\text{ст}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{\text{ср}}^3;$$

кинетическая энергия осциллирующего потока

$$E_{\text{осц}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot 4 \int_0^{\pi/2} W_a^3 \cdot \sin^3 \omega \tau d\tau = \frac{2}{3\pi} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_a^3;$$

кинетическая энергия пульсирующего потока

$$\begin{aligned} E_{\text{п}} &= \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot S}{\omega} \int_0^{2\pi} (W_{\text{ср}} + W_a \cdot \sin \omega \tau) d(\omega \tau) = \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{\text{ср}}^3 + \frac{3}{4} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{\text{ср}} \cdot W_a^2. \end{aligned}$$

Здесь  $W_{\text{ср}}$  - среднерасходная скорость;  $W_a$  - амплитуда пульсаций.

Таким образом, для ускорения знакопеременного пульсирующего потока требуется больше энергии, чем для ускорения стационарного потока, на величину

$$\Delta E = \frac{3}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{\text{ср}} \cdot W_a^2.$$

По этой причине снижается энтальпия газового потока; относительное снижение энтальпии

$$\epsilon = \frac{E_{\text{п}} - E_{\text{ст}}}{E_{\text{ст}}} = \frac{3}{2} \left( \frac{W_a}{W_{\text{ср}}} \right)^2.$$

Температура также может снизиться на величину

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{\Sigma v c},$$

где  $\Sigma v c$  - суммарная теплоемкость газов.

Таким образом, чем больше амплитуда переменной скорости  $W_a$  по сравнению со среднерасходной  $W_{\text{ср}}$ , тем большее относительное снижение температуры газа в камере.

Обычно при  $W_{\text{ср}} = 100-200$  м/с;  $W_a = 20-100$  м/с;  $\epsilon = 0,09$ , т. е. снижение температуры может быть примерно 10% или порядка  $100-150^\circ\text{C}$ .

Результаты эксперимента показаны на рис. 1. На этих графиках  $l$  - относительная длина канала;  $d$  - относительный по-

перечный размер (диаметр);  $q$  – тепловая нагрузка (расход топлива), при этом  $q_4 > q_3 > q_2 > q_1$ . При больших нагрузках на графиках имеется подъем, т. е. дожигание топлива смещается вниз по тракту. В этих опытах механический и химический недожог отсутствовал [3, 4].

Для дальнейшего снижения температуры в зону факела устройства пульсирующего горения можно вносить тепловоспринимающие поверхности нагрева [5]. Отмечается, что в этом случае режим схож с низкотемпературным горением в кипящем слое. Итак, при пульсирующем горении ощутимо снижена температура процесса без ухудшения технико-экономических показателей топки.

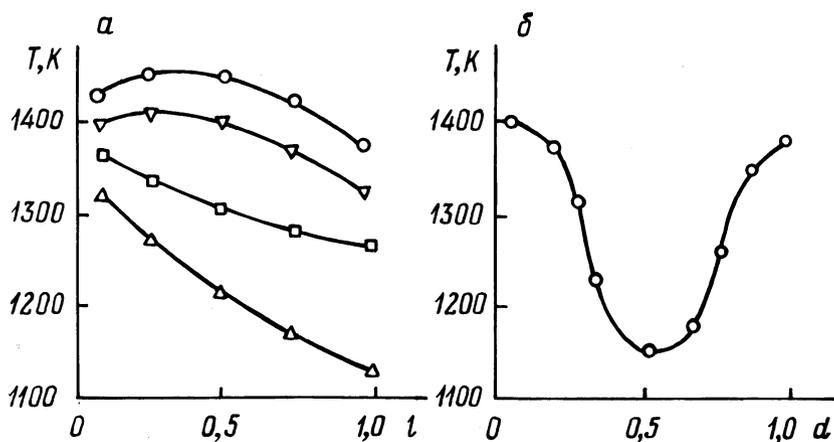


Рис. 1. Температурные поля в устройствах пульсирующего горения: а – по длине зоны горения; б – по диаметру камеры.

Время пребывания газов в зоне горения характеризуется скоростью потока (рис. 2). Обычные габариты (длина) устройства пульсирующего горения 1–3 м, поэтому время реагирования составляет сотые доли секунды (несмотря на удлиненную траекторию движения). По сравнению с обычными топочными устройствами время пребывания газов в зоне горения, таким образом, снижается на порядок.

Наконец, возможность ведения режима при коэффициенте избытка воздуха, близком к единице, с одной стороны, и чрезвычайная турбулизация потока внутри газового тракта устройства – с другой, ведут к очень малым концентрациям кислорода в зоне горения. Так, по данным [4], содержание  $O_2$  в камере

воспламенения по ее сечению в среднем составляло 2–3% и характеризовалось большой равномерностью по объему; на выхлопе при правильной организации пульсационного режима свободного кислорода не обнаруживалось. Значит, парциальное давление кислорода в зоне реакции при пульсирующем горении намного ниже, чем при стационарном горении.

Исследования, ведущиеся в Брестском инженерно-строительном институте по использованию пульсирующего горения, подтверждают достоинства этого метода сжигания с точки зрения уменьшения вредных выбросов.

При испытаниях воздухоподогревателя и разжижителя битума с камерами пульсирующего горения получены следующие данные (табл. 1).

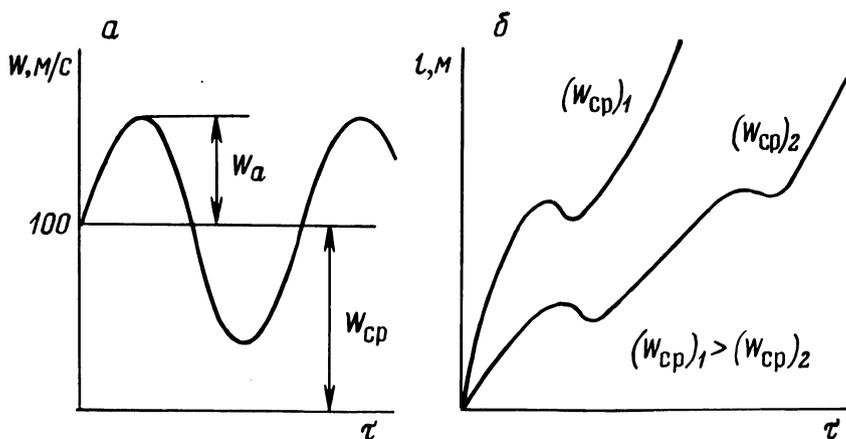


Рис. 2. Скорость газа (а) и траектория его движения (б) внутри устройства пульсирующего горения.

Таблица 1.

Содержание  $\text{NO}_x$  в выхлопе устройств пульсирующего горения

Тепловая нагрузка в % от номинальной	Содержание $\text{NO}_x$ , мг/м <sup>3</sup>	
	теплогенератор	разжижитель битума
30	35,7	26,9
50	39,5	28,0
80	44,8	30,0
100	61,8	35,0
110	74,0	52,0

Концентрация окислов азота по тракту устройства пульсирующего горения показана на рис. 3.

В этих опытах содержание  $\text{NO}_x$  определялось по известному методу ВТИ с использованием реактива Грисса.

При этом мощность и размеры описанных устройств незначительны.

В то же время размер (см. формулу Сигала [1]) влияет на  $\text{C}_{\text{NO}_x}$  в степени 0,8. Однако сопоставление с аналогичными устройствами стационарного горения ( $250\text{--}400 \text{ мг/м}^3$ ) при сжигании жидкого топлива без специальных мер подавления  $\text{NO}_x$  позволяет экстраполировать эту разницу в  $\text{NO}_x$  и на большие мощности.

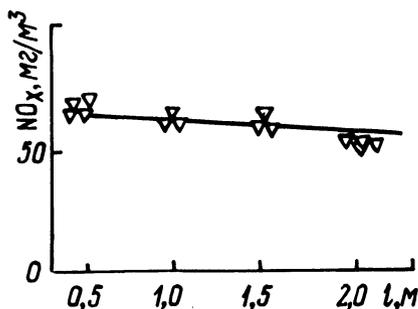


Рис. 3. Содержание окислов азота по тракту устройств пульсирующего горения.

Следует предположить, что при пульсирующем горении имеется фактор, действующий в сторону увеличения содержания  $\text{NO}_x$ . Это особые физико-химические условия в зоне реакции при пульсирующем горении, когда концентрация радикалов намного выше, чем в стационарном факеле. Поэтому можно ожидать увеличения  $\text{NO}_x$ , искусственно увеличив температуру и время пребывания реагентов в зоне реакции, а также увеличив избыток воздуха.

Устройства пульсирующего горения в предложенном виде, как генератор тепла и высокоскоростной струи газов, являются эффективным средством снижения окислов азота в продуктах сгорания.

### Литература

1. Кулиш О.Н. Предотвращение образования окислов азота в продуктах сгорания топлива. — В кн.: Итоги науки и техники. Сер. Топливный баланс. М.: ВИНТИ, 1980, т. 3, с. 32–37.
2. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменец-

кий Л.А. Окисление азота при горении. - М.-Л.: АН СССР, 1947. - 157 с. 3. Северянин В.С., Вербя М.И. Конвективный теплообмен в устройствах пульсирующего горения. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Высшая школа, 1980, вып. 7, с. 58-61. 4. Кацнельсон Б.Д., Таракановский А.А. Исследования сжигания жидкого топлива в пульсирующем потоке. - В сб.: Высокофорсированные огневые процессы. М.-Л.: Энергия, 1967, с. 9-16. 5. Северянин В.С. О нагревателях с пульсирующим горением. - Изв. вузов. Энергетика, 1974, № 5, с. 9-13.

УДК 662.96:621.311.22.001

М.А.Маркевич, инженер, В.Н.Альшевский, инженер  
(ВНИПИэнергопром)

### ВЛИЯНИЕ ОЗОНА НА КОНВЕРСИЮ $\text{NO}$ В $\text{NO}_2$ В ДЫМОВОМ ФАКЕЛЕ ТЭС

В процессе сжигания органического топлива в топках энергетических котлов образуются окислы азота. При этом на выходе из дымовой трубы основная часть окислов азота находится в форме  $\text{NO}$  и лишь 1-8% в виде двуокиси азота [1]. По мере рассеивания дымовых газов, выходящих из дымовой трубы ТЭС, происходит химическое взаимодействие отдельных компонентов между собой и с атмосферным воздухом, в результате чего некоторые загрязняющие вещества, в том числе и  $\text{NO}_2$ , формируются в атмосферном воздухе. Действующими в СССР санитарными нормами регламентируется только приземная концентрация двуокиси азота, предполагая, что вся окись азота превращается в  $\text{NO}_2$  [2]. Для оценки реальной экологической нагрузки в зоне максимальных приземных концентраций необходимо знать истинное соотношение  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ , так как двуокись азота обладает большей токсичностью и реакционной способностью по сравнению с окисью азота.

Кинетика окисления  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  молекулярным кислородом при непрерывном разбавлении дымовых газов окружающим воздухом рассмотрена в [3]. Было показано, что по мере достижения факелом зоны максимальных приземных концентраций степень перехода  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  за счет молекулярного кислорода незначительна. Натурные исследования по составу дымового факела