

продуктов — единственный механизм транспорта энергии в данной модели, скорость пламени  $D$  ограничена сверху максимальной скоростью продуктов  $v_0$ .

Выведенные уравнения распространения пламени в диффузионном приближении содержат те же три независимых размерных параметра ( $l, t_r, v_0$ ) и приводят к правильной асимптотике (22) в пределе медленного горения, т. е. правильно описывают «недиффузионный» характер движения быстрых продуктов. В противоположном пределе  $\omega(0,5) \rightarrow \infty$  эти уравнения качественно правильно приводят к конечным значениям  $D = v_0 \tilde{D}_\infty$  (см. (24)). И хотя формально при достаточно низких температурах зажигания  $T_3 \ll T_k$  значение  $\tilde{D}_\infty \sim \sqrt{\frac{T_k}{T_3}}$  может в рамках диффузионного приближения стать как угодно большим, эта расходимость не сильная и практического значения не имеет. В результате приходим к выводу, что уравнение диффузии (13) позволяет адекватно описать распространение пламени за счет быстрых продуктов, движущихся вдоль прямолинейных траекторий.

Авторы признательны С. И. Ближнему и А. М. Хохлову за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции.— М.: Физматгиз, 1960.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
3. Баско М. М., Будько А. Б. Препринт ИТЭФ, № 27, 1986.
4. Баско М. М., Будько А. Б. Препринт ИТЭФ, № 28, 1986.
5. Баско М. М. Препринт ИТЭФ, № 23, 1981.
6. Канель Я. И. Докл. АН СССР, 1963, 149, 2, 367.
7. Fowler W. A., Caughlan G. R., Zimmerman V. A. Ann. Rev. Astron. and Ap., 1975, 13, 69.
8. Зельдович Я. Б., Франк-Каменецкий Д. А. ЖФХ, 1938, 12, 1, 100.

Поступила в редакцию 3/VII 1986,  
после доработки — 12/I 1987

### ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

К. Ф. Ридер, Р. Л. Релин, Е. Н. Шуркин  
(Москва)

Одно из направлений повышения эффективности использования топлива — сжигание газообразного топлива в стационарном слое дробленого огнеупорного материала. Исследования поверхностного горения показали, что такой метод за счет резкой интенсификации процесса позволяет значительно повышать тепловые напряжения топочного пространства, которые в этом случае на два порядка выше, чем при факельном режиме горения [1, 2]. Наряду с теплотехническими показателями при работе горелочных устройств важна токсикологическая характеристика выбрасываемых продуктов сгорания, которая при работе установки на газообразном топливе определяется главным образом содержанием окислов азота. Цель данной работы — исследование закономерностей образования окислов азота в процессе поверхностного горения топлива. Для достижения поставленной цели необходимо установить диапазон изменения параметров, обеспечивающих полноту выгорания топлива, и их влияние на образование  $\text{NO}_x$ .

Интенсивность образования окислов азота при сжигании газообразного топлива экспоненциально зависит от температуры в зоне горения  $T$ , линейно — от времени пребывания продуктов горения в зоне высоких

температур  $\tau$  и в степени 0,5 — от концентрации  $O_2$  в зоне горения [3]. Интенсивность окисления  $N_2$  связана с указанными факторами следующим соотношением:

$$\frac{dNO}{d\tau} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\sqrt{O_2}} \exp\left(-\frac{86000}{RT}\right) \left[ O_2 N_2 \frac{64}{3} \exp\left(-\frac{43000}{RT}\right) - (NO)^2 \right]. \quad (1)$$

Одним из способов организации поверхностного горения газообразного топлива является подача в слой дробленого огнеупорного материала предварительно подготовленной газоздушной смеси (кинетический режим горения). Исследования проводили на экспериментальном стенде. Продукты сгорания отбирали многоканальным (капиллярным) водоохлаждаемым зондом, выполненным из нержавеющей стали, и анализировали на газоанализаторах Газохром-3101 и ВТИ-2.

При определении содержания окислов азота использовался метод с реактивом Грисса — Илосвая, где реактив одновременно является поглощающим и индикаторным раствором. В качестве окислителя применялся хромовый ангидрид. Плотность окрашенных растворов определялась на фотокolorиметре ФЭК-56. Используемый метод отличается высокой чувствительностью (0,7 мг/м<sup>3</sup>). Опыты многократно дублировались, а их результаты подвергались статистической обработке. Температуру в слое дробленого огнеупорного материала измеряли платинаплатинородиевой термопарой, на спай которой с целью исключения каталитического воздействия нанесена обмазка из корундового раствора. Степень выгорания топлива находилась в соответствии с величиной химического недожога [4].

Экспериментальные исследования показали, что основное количество топлива выгорало на участке слоя высотой  $h = 3d$ , где  $d$  — приведенный средневзвешенный диаметр элемента дробленого огнеупорного материала, и завершалось при  $h/d \approx 5$ . Соответствующие результаты при постоянном значении коэффициента расхода воздуха  $\alpha$ , приведенные на рис. 1, можно описать соотношением  $\kappa = 1 - \exp\left(-0,23\left(\frac{h}{d}\right)^3\right)$ , где  $\kappa$  — полнота сгорания.

При  $q_F = 1 \div 4$  МВт/м<sup>2</sup> обеспечивалось устойчивое горение газоздушной смеси без выноса факела из слоя. Для оценки влияния состава смеси проведена серия экспериментов при различных коэффициентах расхода воздуха (рис. 2). Приведенная кривая соответствует уравнению  $c_{NO_x} = 140 \exp(-14(\alpha - 1)^2)$ , где  $c_{NO_x}$  выражено в мг/м<sup>3</sup>. Как видно из рис. 2, максимальный выход окислов азота наблюдался при горении газоздушной смеси, близкой к стехиометрии. Уменьшение  $c_{NO_x}$  при  $\alpha < 1$  можно объяснить снижением концентрации  $O_2$  в зоне горения, а также падением температуры в этой зоне из-за балластирования избыточным газом. Снижение выхода окислов азота по мере увеличения  $\alpha$  при  $\alpha > 1$  вызвано падением температуры в зоне горения из-за балластирования избыточным воздухом.

Образование  $NO_x$  изучалось при различных нагрузках по газообразному топливу. В результате установлено, что в диапазоне  $q_F = 1 \div 4$  МВт/м<sup>2</sup> выход  $NO_x$  практически не зависит от величины  $q_F$  и при  $\alpha = 1,02 \div 1,05$  составляет  $\sim 130$  мг/м<sup>3</sup> продуктов сгорания (рис. 3).

Указанные преимущества кинетического режима горения газообразного топлива в слое дробленого огнеупорного материала позволяют широко использовать этот способ в промышленности. Однако сфера его применения ограничена теплогенераторами малой мощности. При повышении мощности возникает опасность проскока пламени в раздаточный коллектор. Необходимо учитывать также, что склонность к проскоку пламени возрастает при подаче подогретого воздуха (например, при использовании рекуперации тепла) вследствие возрастания скорости распространения пламени [4]. Устранить это явление можно организацией раздельной подачи в слой дробленого огнеупорного материала газообраз-

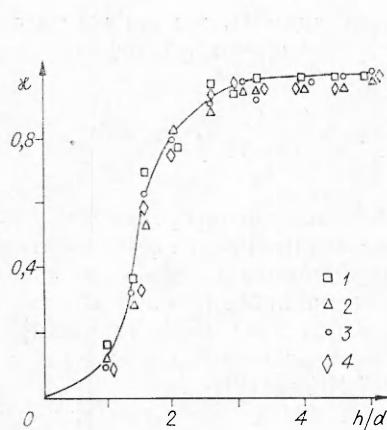


Рис. 1. Выгорание газообразного топлива по высоте слоя при кинетическом режиме горения.  
 $q_F$ , МВт/м<sup>2</sup>: 1 — 1,22, 2 — 1,53, 3 — 2,0, 4 — 3,21.

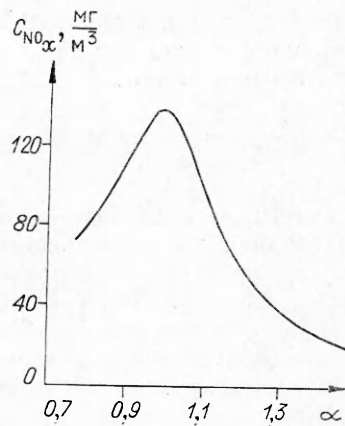


Рис. 2. Выход окислов азота при кинетическом режиме горения в слое в зависимости от коэффициента расхода воздуха.

ного топлива и воздуха (диффузионный режим горения). В этом случае слой огнеупора становится смесителем потоков топлива и воздуха и газосжигающей поверхностью одновременно. Нижняя часть засыпки должна обеспечивать смешение потоков топлива и воздуха и частичное сжигание образовавшейся газозвушной смеси, а верхняя — работать в условиях установок кинетического режима горения топлива в слое. Различие, по-видимому, будет состоять в том, что газозвушная смесь в верхней части насыпного слоя будет несколько разбавлена продуктами сгорания, образовавшимися в нижней (турбулизирующей) части засыпки.

Экспериментальные результаты, соответствующие диффузионному режиму поверхностного горения (рис. 4), аппроксимируются уравнением  $\eta = \theta(d-3)\exp(-0,036(d-3)^3)$ , где  $\theta(x)$  — функция Хевисайда. Устойчивый диффузионный режим поверхностного горения без выноса факела из слоя происходил при  $q_F = 1,2 \div 3,2$  МВт/м<sup>2</sup>.

Анализ содержания NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания не выявил существенной связи между тепловой нагрузкой и  $c_{NO_x}$ . Значения  $c_{NO_x} = 90 \div 110$  мг/м<sup>3</sup> при диффузионном режиме горения в слое оказались

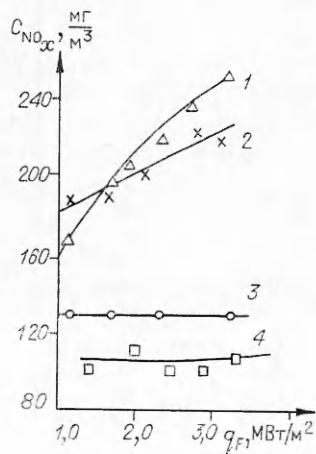


Рис. 3. Влияние тепловой нагрузки на выход NO<sub>x</sub> ( $\alpha = 1,02 \div 1,05$ ).  
 1, 2 — кинетический и диффузионный режимы горения в факеле; 3, 4 — кинетический и диффузионный режимы горения в слое.

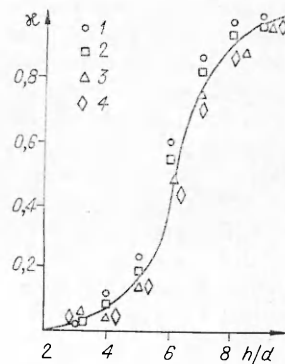
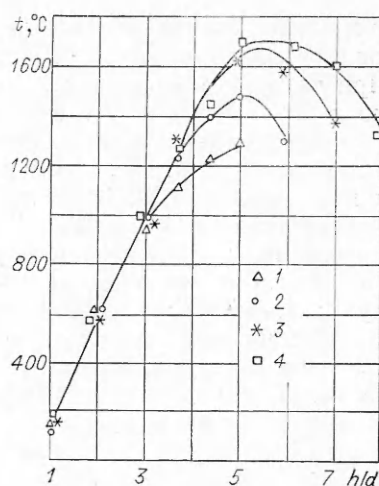


Рис. 4. Выгорание газообразного топлива по высоте слоя в диффузионном режиме горения.  
 $q_F$ , МВт/м<sup>2</sup>: 1 — 1,14, 2 — 1,72, 3 — 2,53, 4 — 3,06.

Рис. 5. Изменение температуры в слое огнеупора при  $H/d = 5$  (1), 6 (2), 7 (3), 8 (4).



ниже соответствующих значений, полученных при кинетическом режиме поверхностного горения (см. рис. 3). Приведенный результат можно объяснить следующим образом. В начальной стадии горения, когда концентрация  $\text{O}_2$  в топливной смеси имеет наибольшее значение, температура сравнительно низка из-за большого разбавления продуктов горения. По мере выгорания топлива температура в зоне горения, естественно, повышается, однако при этом концентрация кислорода падает. «Растягивание» выгорания топлива при диффузионном режиме в соответствии с (1) приводит к снижению выхода окислов азота.

На рис. 3 для сравнения приведены данные, полученные при факельном горении. Снижение выбросов окислов азота при поверхностном горении объясняется резкой интенсификацией процесса горения топлива на раскаленных поверхностях дробленого огнеупорного материала и, как следствие, сокращением высокотемпературной зоны. Кроме того, интенсивное излучение тепла с раскаленной поверхности дробленого огнеупорного материала приводит к падению температуры в слое, что в соответствии с (1) также способствует снижению выхода  $\text{NO}_x$ .

Наряду с анализом химического состава продуктов сгорания в кинетическом режиме горения газообразного топлива проводились измерения температуры внутри слоя при различной высоте засыпки  $H$ , которая варьировалась от  $5$  до  $8d$ . Результаты экспериментов приведены на рис. 5. Замедление темпа роста, а затем и убывание  $t$  связаны с тепловым излучением огнеупора.

Таким образом, в соответствующих диапазонах изменения  $q_F$  при диффузионном режиме поверхностного горения в засышке дробленого огнеупорного материала высотой  $(8 \div 10)d$  и  $(3 \div 5)d$  при кинетическом режиме горения обеспечивается высокая полнота сгорания топлива, создаются необходимые условия для максимального теплосъема излучением с торцевой части насыпного слоя и в соответствии с (1) минимизация выбросов окислов азота.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Равич М. Б. Газ и его применение в народном хозяйстве.— М.: Наука, 1974.
2. Спейсер В. А. Сравнительная характеристика различных типов газовых горелок предварительного смешения.— М., 1959.
3. Зельдович Я. Б., Садовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении.— М.: Изд-во АН СССР, 1946.
4. Хитрий Л. Н. Физика горения и взрыва.— М.: Изд-во МГУ, 1957.

Поступила в редакцию 12/VI 1986,  
после доработки — 14/X 1986

### ИСПАРЕНИЕ ГОРЯЩЕЙ УГЛЕРОДНОЙ ЧАСТИЦЫ В ИНТЕНСИВНОМ ОПТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. И. Букатый, В. Н. Краснопецев, А. М. Шайдук  
(Барнаул)

Предложенная в [1—4] модель горения углеродной частицы в поле лазерного излучения описывает динамику температуры и радиуса частицы при температурах поверхности  $T_s \leq 3700$  К, когда испарением углерода с поверхности частицы можно пренебречь. Данная модель под-