

1. Смурага Л.Н., Степанчук В.Ф., Козлов А.И. Оптимизация толщины футеровки печей из волокнистых огнеупорных материалов // Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук. – 1981. – № 2. – С. 66–70.

УДК 621.181.12

Г.И.ЖИХАР, канд.техн.наук, И.Г.БОГДАНОВИЧ,  
Н.П.КЕДА, канд.физ.-мат. наук (БПИ)

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА И СЕРЫ ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА

В нашей стране и за рубежом проводятся теоретические исследования, позволяющие анализировать роль отдельных физических факторов при образовании окислов азота и серы в котлоагрегатах [ 1, 2]. Однако нет еще приемлемых моделей для образования окислов азота из азота топлива. Важным вопросом является также образование окислов серы и азота при двухступенчатом сжигании углеводородного топлива. Поэтому сделана попытка разработать кинетическую модель процесса горения углеводородного топлива и образования окислов азота и серы.

В качестве паровой фазы жидкого топлива можно принять газ следующего состава [ 1]:  $\text{CH}_4 = 35 \%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4 = 29$ ,  $\text{H}_2 = 32,2$ ,  $\text{S}^{\text{P}} = 2,5$ ,  $\text{N}^{\text{P}} = 0,3$ ,  $\text{W}^{\text{P}} = 1 \%$ . В предлагаемой кинетической модели учтены реакции горения метана и водорода, исследованные в лаборатории горения газов ИХФ АН СССР [ 3].

Механизм горения этилена принят по схеме высокотемпературного окисления  $\text{C}_2\text{H}_4$ , предложенной в работе [ 4]. Поскольку рассматриваемый механизм предполагалось использовать для расчетов процессов горения в высокотемпературной области, где необходимо учитывать термическую диссоциацию продуктов сгорания, он был дополнен реакциями разложения  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ .

Реакции образования окислов серы выбраны на основании [ 2].

Описание процессов образования термических окислов азота осуществляется с помощью расширенного механизма Я.Б.Зельдовича.

Процессы образования топливной окиси азота значительно сложнее и в настоящее время мало изучены. Исследования в области сжигания органических топлив указывают на то, что, согласно химической кинетике, процесс превращения азота топлива в окислы можно представить следующим образом: в зоне неравновесных реакций факела происходит распад азота топлива с образованием промежуточных соединений  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NH}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{HCN}$  и т. д., которые при дальнейшем окислении образуют  $\text{NO}$ . Предполагается, что исходный азот топлива находится в виде соединений  $\text{NH}_3$  и  $\text{HCN}$ . Хотя в пламени могут протекать и другие реакции с участием промежуточных соединений, их вкладом в кинетику образования  $\text{NO}$  и  $\text{N}_2$  из-за низкой концентрации можно пренебречь. Можно пренебречь также скоростями обратных реакций, поскольку предполагается, что начальная концентрация азотсодержащих компонентов больше, чем

соответствующая им равновесная концентрация при температуре пламени. Естественно, что рассмотрение кинетики многофакторного процесса невозможно без некоторых упрощений, не изменяющих физико-химическую сущность процесса.

К основным допущениям относятся:

1) процесс горения рассматривается только на стадии паровой фазы и в кинетической области;

2) присутствующие в топливе азот и сера окисляются пропорционально выгоранию топлива;

3) изменение коэффициента избытка воздуха и доли рециркуляции дымовых газов учитывается в начальных условиях задачи;

4) смешение вторичного воздуха и газов внешней рециркуляции происходит мгновенно.

Изменение концентраций реагентов во времени описывается кинетическим дифференциальным уравнением вида

$$dC_i/d\tau = \sum_{j,k,l \neq i} K_{jkl} \cdot C_j \cdot C_k \cdot C_l - \sum_{i,m,n} K_{imn} \cdot C_i \cdot C_m \cdot C_n ,$$

где  $K_{jkl}$ ,  $K_{imn}$  – кинетические константы скоростей реакций;  $C_{j,k,l,i,m,n}$  – концентрации реагентов.

Теплообмен с окружающей средой моделировался взаимодействием реагирующей смеси с облучателем, температура которого принималась равной температуре газов после окончания горения.

Уравнение теплового баланса реагирующей смеси записывается согласно [5]:

$$C_v \rho dT/d\tau = \sum_i q_i W_i - aS/V(T - T_0) ,$$

где  $q_i$  и  $W_i$  – тепловые эффекты и скорости отдельных стадий;  $\rho$  – плотность;  $C_v$  – теплоемкость продуктов сгорания;  $V$  – объем;  $S$  – поверхность факела;  $T$  – средняя температура газовой смеси;  $a$  – коэффициент теплоотдачи.

Оценка роли отдельной реакции в общем механизме процесса производилась по значению интеграла  $I = \int_0^{\tau} W d\tau$ , где  $W$  – скорость;  $\tau$  – время реакции.

Используя данный критерий, из механизма горения топлива и образования окислов азота и серы была выделена совокупность основных реакций, представляющих собой кинетическую модель процесса горения мазута.

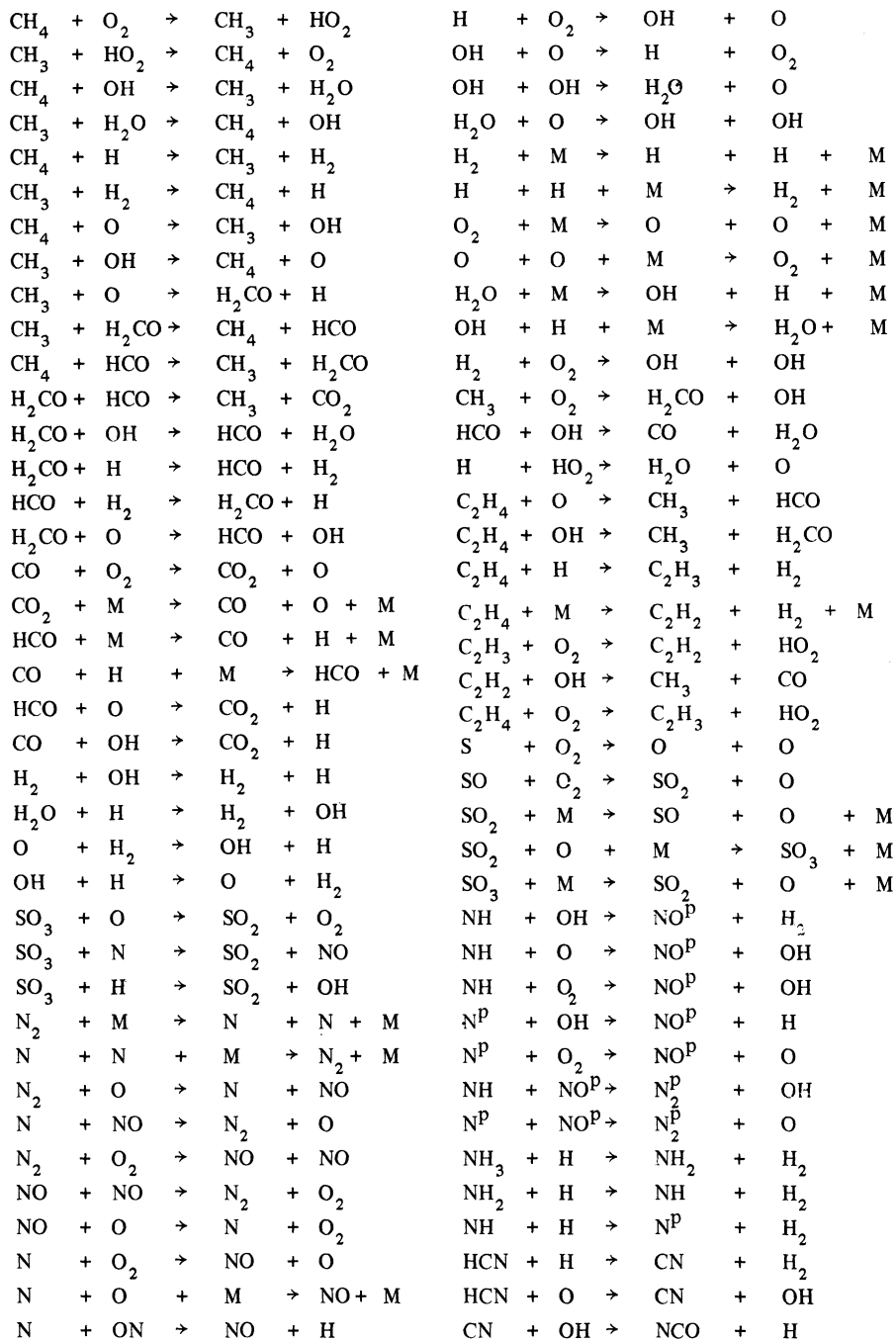
Для решения поставленной задачи была использована программа, разработанная в Институте химической физики АН СССР [6].

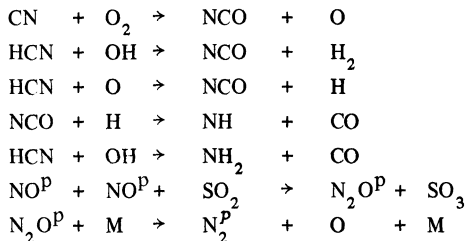
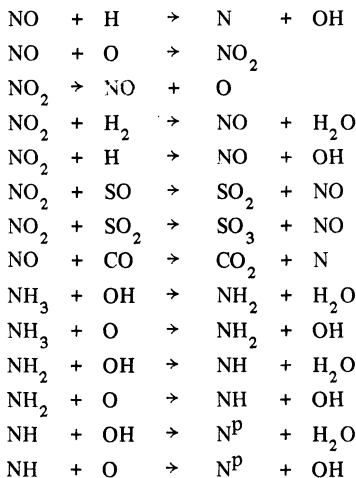
Расчеты выполнялись на машине БЭСМ-6. Результаты расчетов по предлагаемой кинетической модели приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1, а показаны кривые зависимости концентрации окислов азота от суммарного коэффициента расхода воздуха при одноступенчатом и двухступенчатом сжигании мазута. Как видно из рисунка, при двухступенчатом сжигании топлива выход окислов азота снижается и максимальная концентрация окислов азота смещается в сторону больших значений коэффициента расхода воздуха.

Зависимость концентрации серного ангидрида в продуктах сгорания сернистого мазута от коэффициента избытка воздуха показана на рис. 1, б.

Кинетическая модель процесса горения мазута





Рассматривая полученные зависимости, можно сделать вывод, что увеличение избытка воздуха приводит к росту концентрации  $\text{SO}_3$  в продуктах сгорания. Причем концентрация серного ангидрида при двухступенчатом сжигании несколько ниже, чем при одноступенчатом.

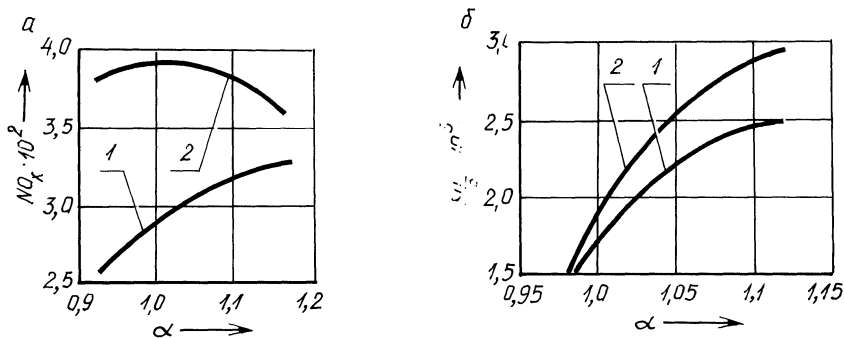


Рис. 1. Зависимость концентрации окислов азота (а) и серы (б) от суммарного коэффициента расхода воздуха:

1 — двухступенчатое сжигание ( $\alpha_1 = 0,8$ ); 2 — одноступенчатое сжигание.

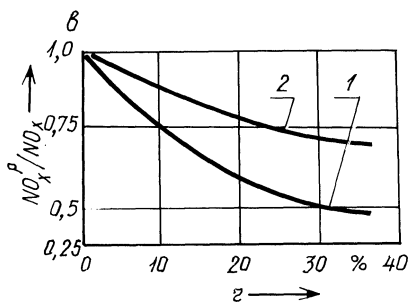


Рис. 2. Влияние рециркуляции дымовых газов на образование окислов азота: 1 — двухступенчатое сжигание ( $\alpha_1 = 0,8$ ;  $\alpha_0 = 1,05$ . Ввод газов рециркуляции во вторичный воздух); 2 — одноступенчатое сжигание ( $\alpha = 1,05$ ).

Одним из возможных способов сокращения содержания окислов азота в продуктах сгорания является применение рециркуляции топочных газов. Это снижает температуру факела и тем самым уменьшает образование окислов азота (рис. 2). В результате снижение выхода  $\text{NO}_x$  происходит за счет уменьшения образования термических окислов азота. Рециркуляция дымовых газов при двухступенчатом сжигании топлива является более эффективной, так как вследствие ступенчатого подвода воздуха снижается также выход топливных окислов азота.

Таким образом, предлагаемая кинетическая модель достаточно полно описывает процессы горения сернистого мазута и образования окислов азота и серы, а результаты расчетов хорошо согласуются с известными опытными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Изюмов М.А., Росляков П.В. Расчетные исследования образования окислов азота и серы при сжигании жидких и газообразных топлив // Изв. вузов. Энергетика. – 1981. – № 10. – С. 40–46.
2. Хантер С. Механизмы образования  $\text{SO}_3$  в газовых турбинах // Энергет. машины и установки. – 1982. – № 1. – С. 26–35.
3. Басевич В.Я., Когарко С.М., Посвянский В.С. Кинетика реакций при распространении метано-кислородного пламени // Физика горения и взрыва. – 1975. – № 2. – С. 242–247.
4. Басевич В.Я., Когарко С.М., Посвянский В.С. Кинетика реакций при распространении метано-кислородного пламени // Физика горения и взрыва. – 1977. – № 2. – С. 193–200.
5. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – С. 435.
6. Азатян В.В., Коган А.М., Нейгауз М.Г., Пороикова А.И., Александров Е.Н. Роль саморазогрева при горении водорода вблизи первого предела воспламенения // Кинетика и катализ, 1975. – Т. 16, вып. 3. – С. 577–585.

УДК 621.311.22

А.Д.КАЧАН, П.Н.ШИШЕЯ, канд.-ты техн.наук,  
В.А.ГАНЖИН, М.А.ЛЕВАНОВИЧ,  
А.В.БАЛАЕВ (БПИ)

### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ОТБОРОВ ТУРБИН ТЭЦ

Критерием оптимального распределения тепловых нагрузок между турбинами базовых ТЭЦ одного уровня начальных параметров пара является, как правило, достижение максимума теплофикационной выработки электроэнергии.

Закономерность распределения отопительной нагрузки между отборами турбин зависит при этом от характера изменения относительного прироста теплофикационной мощности  $N_T$  по нагрузке отопительных отборов  $Q_{от}$ , т. е. от вида зависимостей

$$dN_T/dQ_{от} = f(Q_{от}). \quad (1)$$

Очевидно, что при падающем характере зависимостей (1), т. е. при невыпуклых характеристиках  $N_T = f(Q_{от})$ , отопительная нагрузка должна распреде-