

УДК 662.7

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА НА ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЛА БКЗ–320–140**

*Визгавлюст Н.В., Старченко А.В. \*, Гиль А.В.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*\*Томский государственный университет, г. Томск*

Одной из наиболее актуальных проблем современности является защита атмосферного воздуха, необходимость которой инициирована несовершенной хозяйственной деятельностью человека. Наибольшую опасность создают искусственные антропогенные источники загрязнения воздуха, в первую очередь, связанные с процессами сжигания органических топлив. К основным, постоянно действующим источникам загрязнения воздушного бассейна относятся работающие на угле теплоэлектростанции и промышленные топливосжигающие установки, поставляющие в атмосферу в больших количествах кроме оксидов серы ( $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ) и оксидов азота ( $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ), твердые частицы (зола, пыль, сажа), а так же (в меньших количествах) оксиды углерода, альдегиды, органические кислоты [1]. Поэтому прогнозирование образования вредных веществ при сжигании натурального топлива в котлоагрегатах тепловых электростанций остается одной из актуальных задач для энергетики. Получение сведений при испытаниях, необходимых для оценки конструктивных изменений и оптимизации инженерных решений путем промышленных испытаний или физического моделирования процессов, имеет существенное ограничение из-за большой трудоемкости и высокой стоимости. В такой ситуации одним из выходов является применение методов математического моделирования.

В представляемом исследовании описывается численное моделирование образования оксидов азота при горении пылевидного топлива в топке промышленных котлоагрегатов на базе разработанной Митчеллом и Тэрбеллом [2] кинетической модели образования  $\text{NO}$  при сжигании угольной пыли. Эта модель удобна в использовании, т.к. ее кинетическая схема включает только 13 реакций (сюда входят реакции догорания коксового остатка и выхода и горения летучих) и соответствует современному представлению о химических процессах, ведущих к образованию оксидов азота при сжигании твердого топлива.

Процесс образования оксидов азота можно представить следующим образом (рис. 1): при быстром нагреве поступившей в топку частицы угля происходит ее термическое разложение (пиролиз), в результате которого имеет место выход летучих компонентов угля, в том числе углеводородов и азота топлива. При этом часть связанного азота топлива (до 70–80 %) практически мгновенно (реакция 1) переходит, а газовую фазу в виде цианидов. Затем происходит газовое горение углеводородных компонентов летучих и гетерогенное догорание коксового остатка. Остальной азот (20–30 %), равномерно распределенный по частице кокса, окисляется прямо до  $\text{NO}$  со скоростью, пропорциональной скорости догорания коксового остатка (реакция 2). Цианиды, образовавшиеся при вы-

ходе летучих, переходят (реакция 3) в амины, которые, реагируя с O<sub>2</sub> (реакция 4) или NO (реакция 5), могут способствовать образованию оксидов азота либо восстановлению N<sub>2</sub> из NO. Кроме того, важным с точки зрения конверсии оксидов азота является реакция образования HCN в результате взаимодействия с NO (реакция 6) и гетерогенная реакция между NO и частицей кокса (реакция 7).

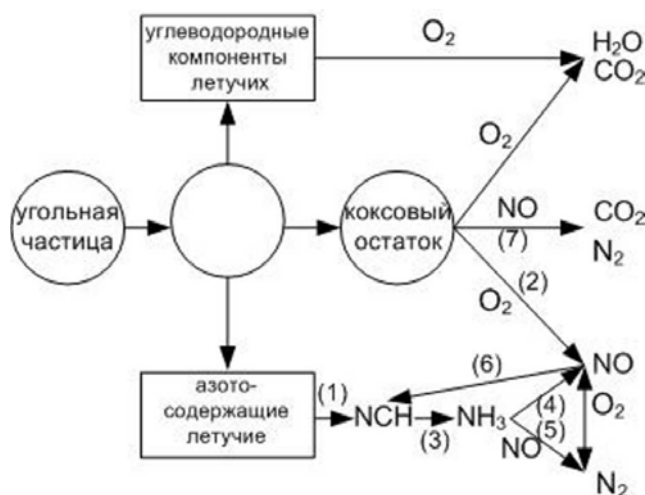


Рис. 1 Схема суммарного кинетического механизма горения угольной частицы и образования оксидов азота [2]

Формальная запись химических реакций образования NO по модели Митчелла-Тэрбелла приведены в табл. 1.

Таблица 1 Химические реакции образования NO [2]

(реакция 1)	$N \text{ (в летучих)} \rightarrow HCN$
(реакция 2)	$N \text{ (в коксе)} + 0,5O_2 \rightarrow NO$
(реакция 3)	$HCN + H_2O + 0,5O_2 \rightarrow NH_3 + CO_2$
(реакция 4)	$NH_3 + O_2 \rightarrow NO + H_2O + 0,5H_2$
(реакция 5)	$NH_3 + NO \rightarrow N_2 + H_2O + 0,5H_2$
(реакция 6)	$NO + \text{углеводороды} \rightarrow HCN + H_2O$
(реакция 7)	$C \text{ (кокс)} + 2NO \rightarrow CO_2 + N_2$
(реакция 8)	$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO$
(реакция 9)	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$

Численные исследования на основе предложенной трехмерной модели проведены в камерной топке котла БКЗ–320–140ПТ с последующей верификацией полученных результатов по экспериментальным данным [3].

Котельный агрегат БКЗ–320–140ПТ спроектирован для сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна [3]. Выполнен однокорпусным по П – образной компоновке с симметричным расположением поверхностей нагрева. Топочная камера (рис. 2) – полуоткрытого типа с жидким шлакоудалением. Фронталь-

ный и задний экраны образуют «пережим», отделяющий камеру горения от камеры охлаждения. Камера горения состоит из двух сообщающихся восьмигранных предтопков с футерованными экранами, каждый из предтопков оборудован четырьмя прямоточными горизонтально щелевыми горелками. Оси горелок каждого предтопка направлены по касательной к воображаемой окружности диаметром 980 мм и наклонены к поду на  $15^\circ$ . В «пережиме» расположены сбросные горелки, через которые производится сброс в топку слабо запыленного сушильного агента из системы пылеприготовления.

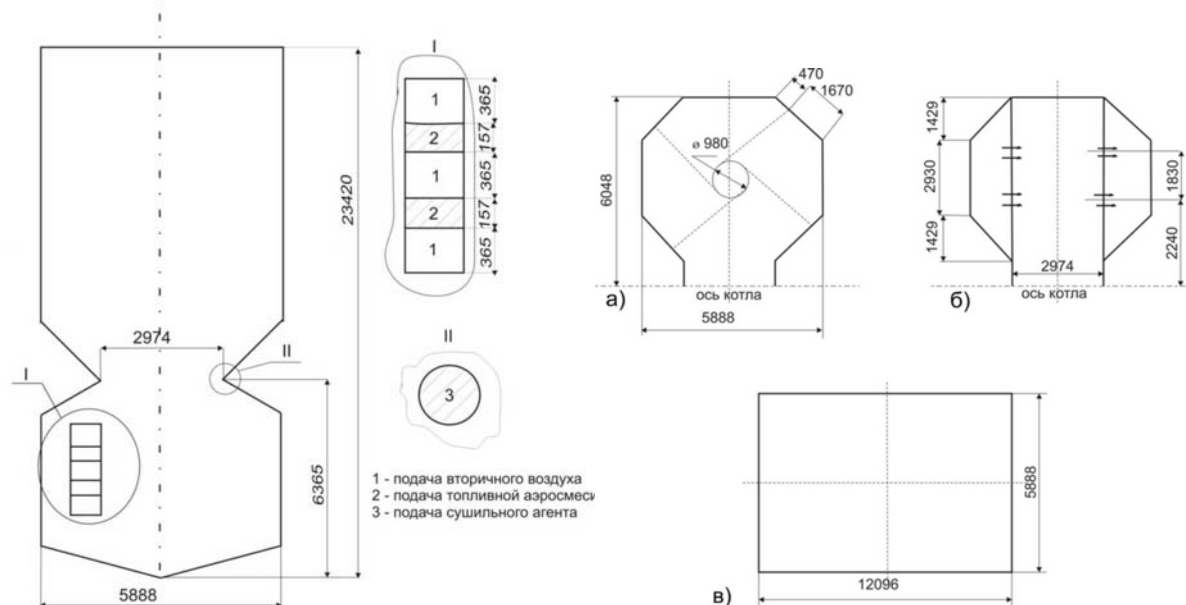


Рис. 2 Геометрические характеристики топки котла БКЗ–320–140:

а) горизонтальное сечение камеры горения на уровне горелок; б) горизонтальное сечение пережима топочной камеры; в) горизонтальное сечение камеры охлаждения

Расчеты распределения концентрации оксидов азота, температуры и концентрации кислорода по высоте топки в зависимости от избытка воздуха при нагрузке 300 т/час, выполнялись с использованием аэротермодинамических и температурных полей, полученных с помощью пакета прикладных программ FIRE 3D [4] и разработанного постпроцессора FIRE 3D–NO<sub>x</sub>.

На рис. 3 представлено типичное распределение интегральных значений температуры, концентраций оксидов азота и кислорода по высоте топочной камеры. Как видно из рисунка 3, распределение характеристик по высоте топочной камеры, указывает, что процесс горения топлива завершается на высоте  $\approx 10$  м, область максимальных значений средней температуры (до  $1400^\circ\text{C}$ ) и процесс образования оксидов имеет место в сравнительно не большой зоне выше уровня горелочного пояса. Из-за относительного низкого уровня температур в области горелок в топочной камере NO<sub>x</sub> образуются в основном из азота топлива. В том числе локальные значения температуры вблизи стен топочной камеры ниже ярусов горелок достигают значений  $\approx 1600^\circ\text{C}$ . На выходе из топочной камеры наблюдаются концентрации NO<sub>x</sub>, не превышающие Федеральные нормы предельно допустимых выбросов [1].

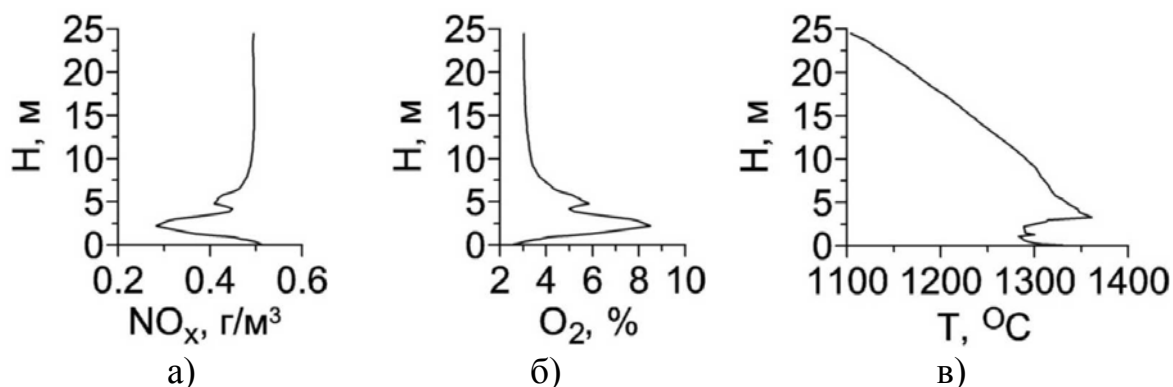


Рис. 3. Распределение средних в горизонтальных сечениях по высоте топочной камеры: а) концентрации оксидов азота, б) концентрации кислорода, в) температуры факела

Проведенные численные исследования образования оксидов азота в топке котла БКЗ–320–140ПТ воспроизводят взаимосвязь генерации «топливных» и «термических» оксидов азота, когда при уменьшении или увеличении коэффициента избытка воздуха относительно величины, соответствующей максимальной эмиссии оксидов азота, происходит изменение смесеобразования и температуры топочного процесса.

На рис. 4 представлено сравнение полученных численных результатов образования оксидов азота с натурными исследованиями [3] в зависимости от избытка воздуха на выходе из топки.

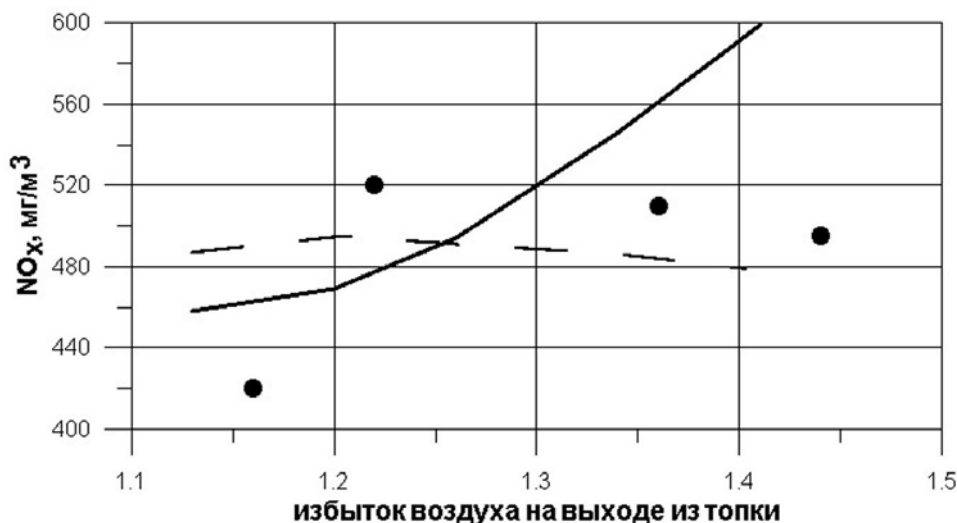


Рис. 4. Изменение концентрации оксидов азота в зависимости от избытка воздуха: ● – экспериментальные измерения [3], - - - - расчет с помощью ППП FIRE–3D–NO<sub>x</sub>, — — — — расчет по нормативному методу [5]

Из рисунка 4, видно, что разработанная численная модель имеет достаточно высокую степень адекватности предсказания генерации оксидов азота, поскольку погрешность между численными результатами и экспериментальными данными составляет 12 %. И в дальнейшем она может рассматриваться как пост-процессор к пакету Fire3D [4] и вместе с ним использоваться для вариантной проработки конструктивных решений при проектировании и модернизации котельных агрегатов.

Кинетическая схема Митчелла–Тербелла [2] была создана для расчета концентрации  $\text{NO}_x$  в точке или в одномерном потоке. В данной работе эта модель была распространена для трехмерных топочных потоков с учетом зависимости конвективно-диффузионного переноса  $\text{NO}_x$  и других химических компонентов кинетической схемы от конвекции и турбулентной диффузии [6].

Применение разработанной модели образования  $\text{NO}$  при горении угля по модели [2] позволит оптимизировать процесс сжигания пылевидного топлива в котлоагрегатах тепловых электрических станций для повышения эффективности выгорания топлива и уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$ .

### Литература

1. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 144 с., ил.
2. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during coal combustion // American Institute of Chemical Engineers Journal. – 1982. – V. 28. – № 2. – P. 302–310.
3. Будилов О.И., Заворин А.С. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции. – Томск.: Издательство «Красное знамя», 1994. – 100 с.
4. Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 369–371.
5. Безгрешнов А.Н., Липов Ю.М., Шлейфер Б.М. Расчет паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240с.
6. Старченко А.В, Иванова Н.В. Моделирование образования оксидов азота в процессах сжигания пылевидного топлива // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – Т. 1. – С. 163–167.