



РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛЯ ТОПКИ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Михайлов А.Г., Батраков П.А.

Омский государственный технический университет, Россия

Реферат – Рассмотрены вопросы образования оксидов азота при горении органического топлива в газотрубном котле, изложенные в отечественной и зарубежной литературе за последние годы. Предлагаются химические реакции и математические модели, сопровождающие появление термического, быстрого и топливного NO_x . Приведена оценка влияния формы топки газотрубного котла на состав продуктов сгорания газообразного топлива.

Ключевые слова: горение, оксиды азота, термический, быстрый, топливный.

COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF PROFILE OF FURNACE BOILER ON FORMATION OF NITROGEN OXIDES DURING GASEOUS FUEL BURNING

MIKHAILOV Andrey, BATRAKOV Peter

Omsk State Technical University, Russia

Abstract – The problems of formation of nitrogen oxides during combustion of fossil fuels in the boiler set out in the domestic and foreign literature in recent years. Proposed chemical reactions and mathematical models that accompany the appearance of thermal, fast and fuel NO_x . The estimation of influence of the shape of the furnace boiler the composition of the products of combustion.

Keywords: combustion, nitrogen oxides, thermal, fast, fuel.

INVESTIGAREA DE CALCUL A INFLUENȚEI PROFILULUI FOCARULUI CAZANULUI CU TURBINĂ PE GAZ ASUPRA FORMĂRII OXIZILOR DE AZOT LA ARDEREA COMBUSTIBILULUI GAZOS

Mihailov A.G., Batrakov P.A.

Universitatea tehnică de stat din Omsk, Rusia

Rezumat – Sunt analizate întrebările ce țin de formarea oxizilor de azot la arderea combustibilului organic în cazanul cu turbină pe gaz ce sunt expuse în literatura locală și străină de parcursul ultimilor ani. Se propun reacții chimice și modele matematice, ce însoțesc apariția NO_x -ului termic, rapid și de combustibil. Se prezintă evaluarea formei focarului cazanului cu turbină pe gaz asupra conținutului produselor formate la arderea combustibilului gazos.

Cuvinte cheie: ardere, oxizi de azot, termic, rapid, combustibil.

В России все более широкое применение находит автономное (децентрализованное) теплоснабжение. Оно особенно развито в тех регионах России, где нет недостатка в сетевом (природном) газе и имеется достаточно развитая система газоснабжения. Эти системы обеспечивают более высокий уровень теплового комфорта и создают дополнительные возможности для энергосбережения.

Под термином «Автономное теплоснабжение» понимают систему, состоящую из источника теплоты и потребителя – системы отопления, горячего водоснабжения, вентиляции и технологического снабжения горячей водой жилых, общественных и производственных зданий.

Одной из важнейших частей автономного теплоснабжения является газотрубные котлы малой мощности, которые нужны для получения пара и

горячей воды. Интенсифицировать процессы переноса энергии и улучшить характеристики котла возможно за счёт изменения формы топки котла. В этом случае математическое моделирование процессов, происходящих в топке газотрубного котла, осуществляется с помощью расчетного комплекса ANSYS [1, 2].

Для описания турбулентных течений реагирующих газов используется модель турбулентного горения с двумя уравнениями. Эта модель турбулентности получила название $k-\varepsilon$ (k – турбулентная кинетическая энергия, ε – величина рассеивания кинетической энергии).

Допущения при которых проводятся расчеты следующие [3]: газовая смесь, заполняющая топочный объем – серое тело; теплота от факела к стенке в основном переносится излучением, конвекцией и

молекулярной теплопроводностью; внутри пограничного слоя давление не изменяется вдоль нормали к контуру тела и равно соответствующему давлению на внешней границе пограничного слоя; внутри температурного пограничного слоя члены, характеризующие изменение энергии вследствие конвекции и изменения времени, одного порядка с членами, характеризующими изменение энергии вследствие молекулярной теплопроводности; суммарный перенос теплоты на границе раздела газовой смеси – стенка осуществляется за счет конвекции и излучения; реагирующий газ CH_4 – 100 %, окислитель – воздух.

Основные уравнения, которые описывают реагирующую газовую смесь – это неразрывности для всей смеси; неразрывности для каждого компонента; моментов; энергии и диссипации; определения эффективной и турбулентной вязкости; уравнение состояния Редлиха-Квонга [2].

Задаются начальные условия – принимаются значения всех параметров, входящих в систему уравнений, при времени $t = 0$ и при начальной температуре $T = 300 \text{ K}$. Формируются граничные условия:

- прилипания на непроницаемой поверхности;
- сложного теплообмена на стенке

$$q = q_C + q_R,$$

где q – плотность теплового потока через пограничный слой от реагирующей газовой смеси к стенке, q_C – плотность теплового потока, переносимого объемом газа, со стороны реагирующей газовой смеси к пограничному слою [2, 4]; q_R – плотность радиационного теплового потока со стороны реагирующей газовой смеси к пограничному слою (определяется методом Монте-Карло).

- непроницаемости;
- градиента давления в направлении нормали к поверхности.

На проницаемой границе, которой является вход в топку, задаются:

- массовая скорость;
- интенсивность турбулентности, которая является приближенным значением для внутреннего течения в трубе;

- давление P , которое является характеристикой горелки.

На проницаемой границе, которой является выход в топку, задается:

- давление P , которое является характеристикой системы для удаления продуктов сгорания.

Уравнения, входящие в $k-\varepsilon$ модель, при соответствующих граничных и начальных условиях в трехмерной постановке численно решаются с использованием программы ANSYS CFX [1, 2].

Расчетная область представляет собой горизонтальный цилиндр длиной 1,0 м, в основании которого находится эллипс площадью $0,65 \text{ м}^2$ (рис. 1, 2).

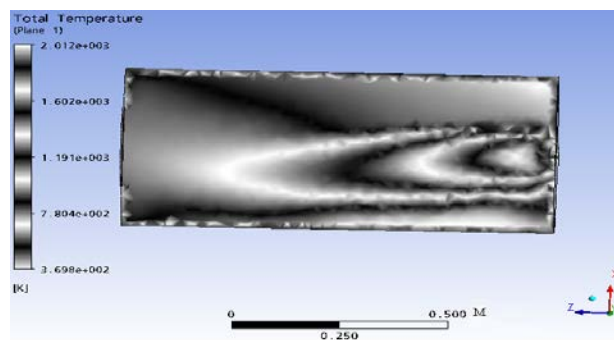


Рис. 1. Расчетная схема топки газотрубного котла по ширине

Основными результатами расчетов явилось определение значений температур, скоростей, концентрации реагирующих компонентов (CH_4 , O_2 , N_2) и состава продуктов сгорания. В том числе и концентрации соединений азота с кислородом [5].

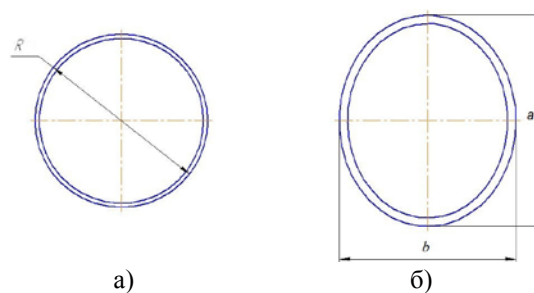
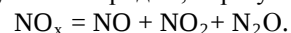


Рис. 2 Профили топки: а) круг, б) эллипс

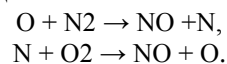
При сжигании органических топлив в топках котлов азот, содержащийся в топливе и воздухе, взаимодействуя с кислородом, образует оксиды:



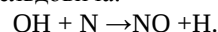
Основная доля образовавшихся в продуктах сгорания паровых и водогрейных котлов NO_x (95...99 %) приходится на монооксид (оксид) азота NO . Диоксид NO_2 и гемииоксид N_2O азота образуются в значительно меньших количествах.

Образование монооксида (оксида) азота при сжигании органических топлив происходит как за счет окисления азота воздуха N_2 , так и за счет окисления азота, содержащегося в топливе. В настоящее время известны три механизма, по которым происходит образование оксидов азота: термический, быстрый и топливный. При образовании термических и быстрых NO – источником азота является воздух, а в случае образования топливных NO азотсодержащие составляющие топлива.

Механизм образования термических оксидов азота при соответствующих граничных и начальных условиях в трехмерной постановке решаются с использованием программы ANSYS CFX [2]. Он был предложен Я.Б. Зельдовичем [6] и включает следующие реакции:



Позднее он был дополнен реакцией атомарного азота с гидроксидом и получил название расширенного механизма Я.Б. Зельдовича:



Реакции образования термических NO характеризуются высокой энергией активации, поэтому образование оксидов азота происходит в области высоких температур, превышающих 1800 К. Концентрация термических NO интенсивно возрастает от начала зоны горения и достигает наибольших значений непосредственно за зоной максимальных температур. Далее по длине факела концентрация оксидов азота практически не изменяется. Выражения для констант скоростей k каждой из трех реакций представлены в работе [2] и выглядят следующим образом:

$$k_1 = (1,8 \cdot 10^{11}) \exp\left(-\frac{38370}{T}\right),$$

$$k_2 = (6,4 \cdot 10^9) \exp\left(-\frac{3162}{T}\right),$$

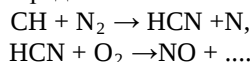
$$k_3 = 3,0 \cdot 10^{13}.$$

Образование термического NO определяет следующие основные факторы: температура в зоне горения, коэффициент избытка воздуха и время пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур. Количество этого компонента $S_{NO,thermal}$ определяется выражением:

$$S_{NO,thermal} = W_{NO} k_{thermal} [O][N_2],$$

где $k_{thermal} = 2k_1$, W_{NO} – молярная масса термического NO; $[O]$, $[N_2]$ – молярные концентрации кислорода и азота.

Исследования по сжиганию углеводородных топлив, проведенные Фенимором [2], показали, что во фронте пламени за весьма короткий промежуток времени происходит образование оксидов азота по механизму, отличному от предложенного Я.Б. Зельдовичем. Обнаруженный оксид азота был назван быстрым из-за достаточно большой скорости его образования в корневой части факела. При этом вблизи зоны горения наблюдались значительные количества цианида водорода HCN, что объясняется реагированием молекулярного азота с углеводородными радикалами:



Реакции образования быстрых оксидов NO протекают достаточно энергично при температурах 1200...1600 К, когда образование термических оксидов азота практически не происходит.

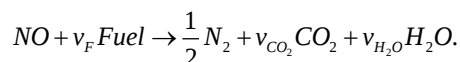
Количество этого компонента $S_{NO,prompt}$ определяется выражением согласно «ANSYS CFX-Solver. Theory Guide»:

$$S_{NO,prompt} = W_{NO} k_{prompt} [O_2]^{1/2} [N_2][Fuel] \left(\frac{W}{\rho}\right)^{3/2},$$

$$k_{prompt} = A_{prompt} \exp(-TA_{prompt}/T).$$

где W_{NO} обозначает молярную массу NO, A_{prompt} – число Аррениуса. Приведенные формулы для вычисления скоростей реакций применимы только к течениям с небольшими значениями Re (критерий Рейнольдса). В турбулентных системах колебания параметров могут оказать доминирующее влияние на скорость формирования NO. В этом случае для расчетов используются статистические методы [2].

Результаты расчетов представлены на рисунке 3, где изображены зависимости числа n и изменения числа Re при различных отношениях характерных размеров a/b ($n = m_{NO_{эл.}}/m_{NO_{кр.}}$, $m_{NO_{эл.}}$ – массовая доля оксидов азота в газовой смеси в топке с поперечным сечением эллипс, $m_{NO_{кр.}}$ – массовая доля оксидов азота в газовой смеси в топке с поперечным сечением круг, a – больший диаметр эллипса, b – малый диаметр эллипса). На графике наблюдается, что область минимальных значений чисел n соответствует интервалу $a/b = 1,15 \dots 1,40$. Но при этих значениях интервала a/b наблюдается область максимальных значений Re, т. е. конвективные явления в топке развиты. Это приводит к процессам рециркуляции и уменьшению выбросов NO в соответствии с уравнением:



В данных расчетах скорость газозвдушной смеси на входе принимается равной 10 м/с, фронт горения кинетический.

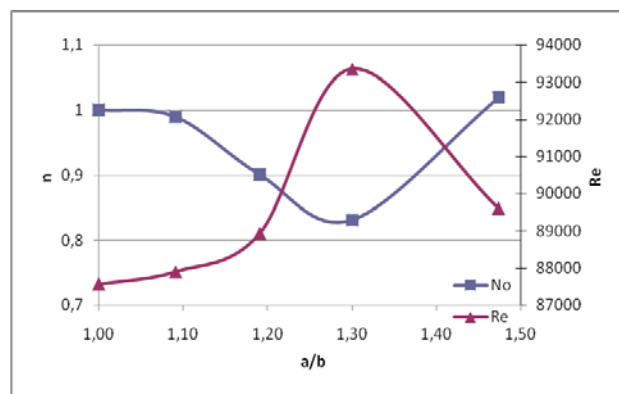


Рис. 3. Зависимость n и Re на выходе из топки при различных отношениях характерных размеров a/b

Очевидно, что рассмотренная математическая k - ϵ модель горения, решаемая с помощью специализированного расчетного комплекса ANSYS, позволяет моделировать распределение NO в топочном объеме и на выходе, помогая определить рациональные значения при выборе размеров и формы топочных камер газотрубных котлов.

Выводы

Показано, что процессы горения в топках газотрубных котлов всегда сопровождаются движением газов – воздуха, газообразного топлива, продуктов сгорания и являются совокупностью взаимообусловленных аэродинамических, тепловых и химических процессов. Так же при сжигании органического топлива происходит образование монооксида азота (оксида) как за счет окисления азота воздуха, так и за счёт окисления азота, содержащегося в топливе. Изменение формы поперечного сечения топочной камеры с круглой формы на эллиптическую при отношении большего диаметра к меньшему в пределах 1,15...1,40 ведет:

1. к интенсификации конвективных явлений – росту числа Рейнольдса до 92000 – 93500,

2. к увеличению рециркуляции продуктов сгорания,
3. к уменьшению массовой доли NO в пределах 18 %.

Литература:

- [1] Михайлов А.Г., Батраков П.А., Теребилов С.В. Численное моделирование процессов тепломассопереноса при горении газообразного топлива в топочном объеме // Естественные и технические науки. – 2011. – №5(55). – С. 354-358.
- [2] ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 11.0 / ANSYS, Inc. // Southpointe 275 Technology Drive. – Canonsburg : PA 15317, 2006. – 312 p.
- [3] Алексеев Б. В. Физическая газодинамика реагирующих сред. – М.: Высшая школа, 1985. – 464 с.
- [4] Kader B.A., “Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24(9): 1981, 1541-1544.
- [5] Михайлов А.Г. Вопросы образования оксидов азота при сжигании газообразных и жидких топлив // Омский научный вестник. – 2009. – № 3 (83). – С. 103 – 106.

- [6] Пашков Л. Т. Основы теории горения. – М. : МЭИ, 2002. – 136 с. Работа выполнена при финансовой поддержке гос. заказа № 7.1102Ф



Михайлов Андрей Гаррьевич,
доцент, к.т.н., область научных исследований теория горения, закончил аспирантуру МГТУ им Н.Э. Бауман.



Батраков Петр Андреевич,
ассистент, аспирант, область научных исследований теория горения, аспирант 2-го года обучения по специальности 05.14.04 „Промышленная теплоэнергетика”