

УДК 621.18.01

UDC 621.18.01

**РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ
СНИЖЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ
АЗОТА В ТОПКАХ ГАЗОТРУБНЫХ КОТЛОВ****DEVELOPMENT OF THE THEORETICAL
BASIS OF REDUCED FORMATION OF
NITROGEN OXIDES IN THE FURNACE OF
BOILERS**

Михайлов Андрей Гаррьевич
к.т.н., доцент

Mikhailov Andrey Garrievich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Батраков Петр Андреевич
аспирант

Batratkov Petr Andreevich
postgraduate student

Теребилев Сергей Викторович
аспирант
*Омский государственный технический
университет, Омск, Россия*

Terebilov Sergey Victorovich
postgraduate student
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

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

The problems of formation of nitrogen oxides during combustion of organic fuels in the boiler set out in the national and international literature in recent years. Chemical reactions and mathematical models that accompany the emergence of thermal, prompt and fuel NO_x are discussed in this article. Impact assessment forms furnace boiler composition of the products of combustion of gaseous fuels cited by the authors

Ключевые слова: ГОРЕНИЕ, ОКСИДЫ АЗОТА, ТЕРМИЧЕСКИЙ, БЫСТРЫЙ, ТОПЛИВНЫЙ

Keywords: COMBUSTION, OXIDES OF NITROGEN, THERMAL, FAST, FUEL

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.

Одной из важнейших частей автономного теплоснабжения является газотрубные котлы малой мощности, которые нужны для получения пара и горячей воды. Интенсифицировать процессы переноса энергии и улучшения характеристик котла возможны с помощью изменения геометрических характеристик топки котла.

Моделирование процессов, происходящих в топке газотрубного котла, осуществляется с помощью расчетного комплекса ANSYS [1, 2].

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

Рассмотрим основные уравнения, которые описывают реагирующую газовую смесь при следующих основных допущениях [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 поверхности 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 адвекции и излучения; реагирующий газ CH_4 – 100 %, окислитель – воздух.

1. Неразрывности для всей смеси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность газовой смеси, \mathbf{U} – вектор скорости, t – время.

2. Неразрывности для каждого компонента:

$$, \quad (2)$$

S_I – скорость образования I -компонента, $Y_I = \frac{r_I}{r}$ – концентрация вещества I -компонента, r_I – плотность каждого I -компонента, – коэффициент

диффузии, Γ_l – коэффициент диффузии для l -компонента, μ_t –

$$Sc_t = \frac{\nu}{\Gamma}$$

турбулентная составляющая динамической вязкости, – число Шмидта, ν — кинематическая вязкость.

3. Моментов:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -\nabla P' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) \mathbf{I}^T + B, \quad (3)$$

где B – сумма всех сил, действующих на объем газа, μ_{eff} – эффективная турбулентная вязкость, P – давление.

В формулах (1) – (3) используются следующие обозначения:

$$U = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}, \nabla \cdot U = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z},$$

$$\nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y U_x) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z U_x) \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y U_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z U_y) \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_z) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y U_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z U_z) \end{bmatrix}.$$

4. Энергии и диссипации:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon - S^R, \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{\varepsilon 1} P_k \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon. \quad (5)$$

где S^R – источниковый член, C_{e1} , C_{e2} , s_k , s_e – справочные константы [1, 2], P_k – параметр турбулентности, характеризует соотношение между силами вязкости и силами выталкивающими P_{kb} [1, 2]:

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb}. \quad (6)$$

5. Определение энтальпии:

Общая удельная энтальпия h_{tot} определяется следующим выражением:

$$h_{tot} = h + k, \quad (7)$$

где h – удельная энтальпия неподвижной газовой смеси.

6. Определения вязкости:

k - ϵ модель основывается на концепции турбулентной вязкости, поэтому:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad (8)$$

где μ – динамическая вязкость. В данной модели предполагается, что турбулентная вязкость связана с турбулентной кинетической энергией и диссипацией через выражение:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (9)$$

где C_μ – справочная константа [1, 2].

Переменные k и ϵ являются результатом решения дифференциальных транспортных уравнений для турбулентных кинетической энергии и диссипации:

7. Уравнение состояния:

Уравнение состояния, предложенное Редлихом-Квонгом, выглядит следующим образом [1, 2]:

$$P = \frac{RT}{v - b + c} - \frac{a(T)}{v(v + b)}, \quad (10)$$

где v – удельный объем. Величины a , b , c – константы, зависящие от конкретного вещества.

8. Начальные условия:

Принимаются значения всех параметров, входящих в систему уравнений, при времени $t = 0$ и при начальной температуре $T = 300$ K.

9. Граничные условия:

Для математического моделирования конкретных течений многокомпонентного реагирующего газа необходимо поставить

соответствующие граничные условия [1, 2]:

- условия прилипания на непроницаемой поверхности W

$$\mathbf{u}|_W = \mathbf{0} . \quad (11)$$

- задаются условия сложного теплообмена на стенке

$$q = q_C + q_R, \quad (12)$$

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 стенке, q_R – плотность радиационного теплового потока со стороны реагирующей газовой смеси к стенке (определяется методом Монте-Карло).

- непроницаемость;
- градиент давления в направлении нормали к поверхности.

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

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

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

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

Уравнения (1 - 12), входящие в k - ε 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, с площадью поперечного сечения 0,66 м² (рисунок 1) при массовом расходе топливо-воздушной смеси на входе 0,061 кг/с.

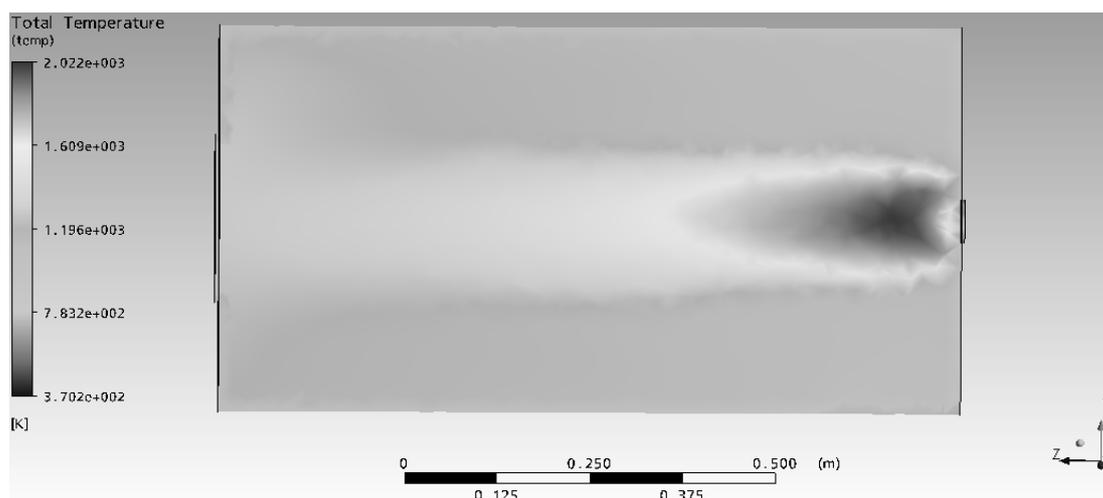
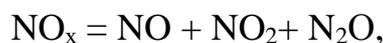


Рисунок 1. Распределение температур в топке

Основными результатами расчетов явилось определение значений температур, скоростей и состава продуктов сгорания. В том числе и концентрации соединений азота с кислородом [4].

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

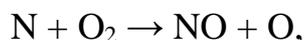
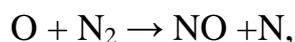


Основная доля образовавшихся в продуктах сгорания паровых и водогрейных котлов NO_x (95...99 %) приходится на монооксид (оксид) азота NO . Диоксид NO_2 и гемиоксид N_2O азота образуются в значительно меньших количествах.

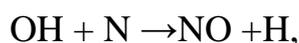
Образование монооксида (оксида) азота при сжигании органического топлива CH_4 происходит за счет окисления азота воздуха N_2 . В настоящее время известны три механизма, по которым происходит образование оксидов азота: термический, быстрый и топливный. При образовании термических и быстрых NO – источником 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 [5, 6, 7, 8] и включает следующие реакции:



Позднее он был дополнен реакцией атомарного азота с гидроксиллом 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:

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

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

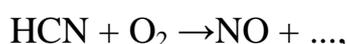
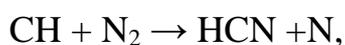
$$k_3 = 3,0 \cdot 10^{13}.$$

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 $S_{\text{NO},thermal}$ определяется выражением:

$$S_{\text{NO},thermal} = W_{\text{NO}} k_{thermal} [\text{O}][\text{N}_2],$$

где $k_{thermal} = 2k_1$, W_{NO} – молярная масса термического NO; $[\text{O}]$, $[\text{N}_2]$ – мольные концентрации кислорода и азота.

Исследования по сжиганию углеводородных топлив, проведенные Фенимором [2, 6, 7, 8], 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 $S_{\text{NO}, \text{prompt}}$ определяется выражением согласно [2]:

$$S_{\text{NO}, \text{prompt}} = W_{\text{NO}} k_{\text{prompt}} [\text{O}_2]^{1/2} [\text{N}_2] [\text{Fuel}] \left(\frac{W}{\rho}\right)^{3/2},$$

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

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].

В качестве объектов для расчетных исследований авторами рассмотрены топки газотрубного котла с профилями окружность и эллипс. Расчетные модели имеют следующие геометрические характеристики (Рисунок 2).

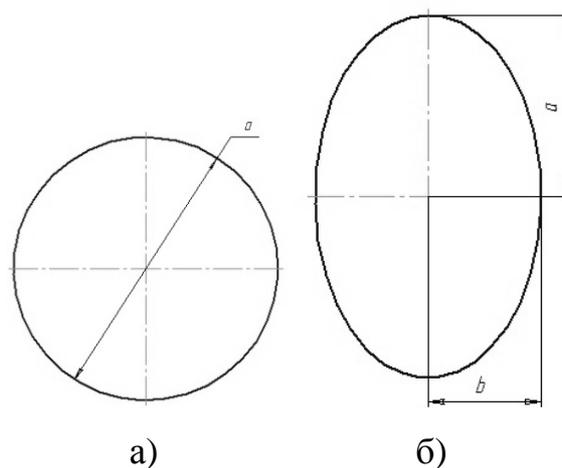
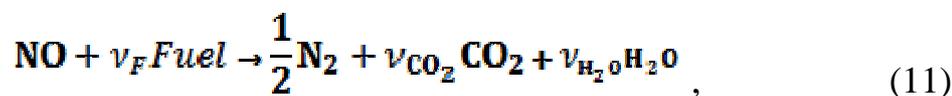


Рисунок 2. Геометрические характеристики расчетных моделей:

а – окружность: a – диаметр окружности;

б – эллипс вертикальный: a – большая полуось, b – малая полуось

Установлено, что с изменением формы профиля с окружности на эллипс наблюдается рост конвективных явлений. Это сопровождается снижением относительной концентрации оксидов азота $NO_{эл} / NO_{окр}$ ($NO_{эл}$ – массовая концентрация оксидов азота на выходе из топки с формой поперечного сечения эллипс, $NO_{окр}$ – массовая концентрация оксидов азота на выходе из топки с формой поперечного сечения окружность) на выходе из топки газотрубного котла (Рисунок 3), уменьшением максимальной и средней температуры T (Рисунок 4) газовой смеси внутри топки и процессами рециркуляции в соответствии с уравнением:



где ν – стехиометрический коэффициент; $Fuel$ – разновидность топлива.

Все выше перечисленные явления приводят к уменьшению относительной концентрации $NO_{эл} / NO_{окр}$ на выходе из топки до 22 % в диапазоне a/b от 1,2 до 1,4.

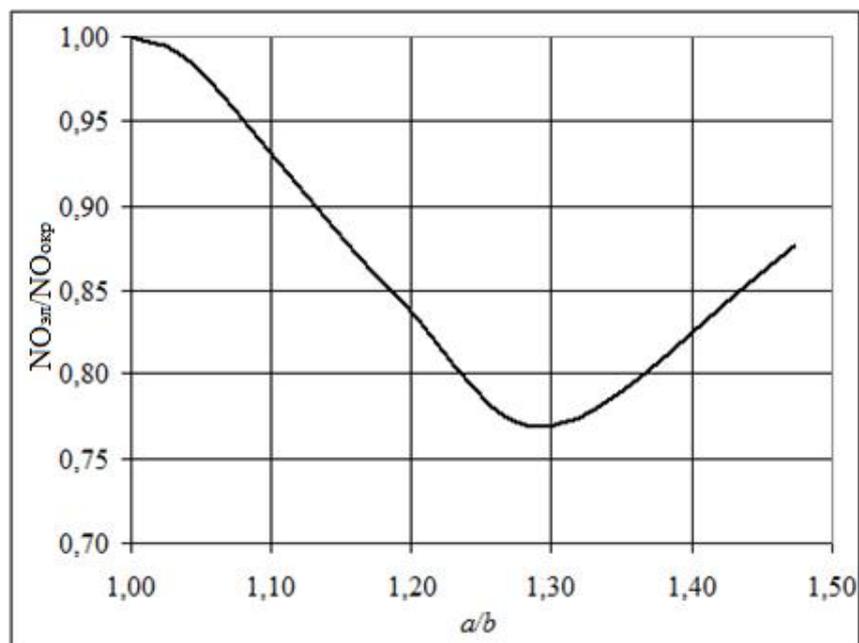


Рисунок 3. Зависимость относительной концентрации $NO_{эл} / NO_{окр}$ от отношения большей полуоси к малой полуоси эллипса

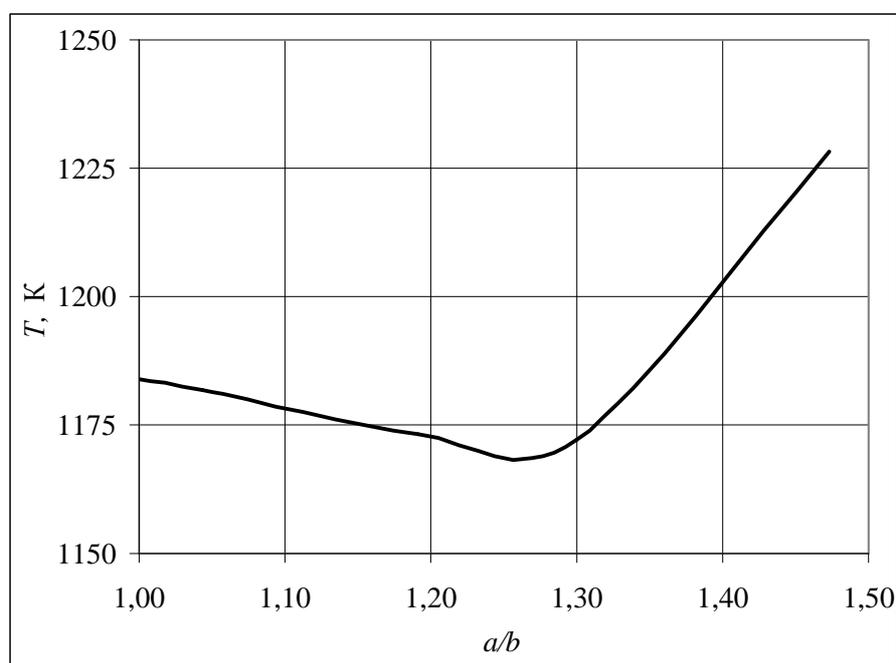


Рисунок 4. Зависимость температуры газовой смеси осредненной по объему от отношения большей полуоси к малой полуоси эллипса

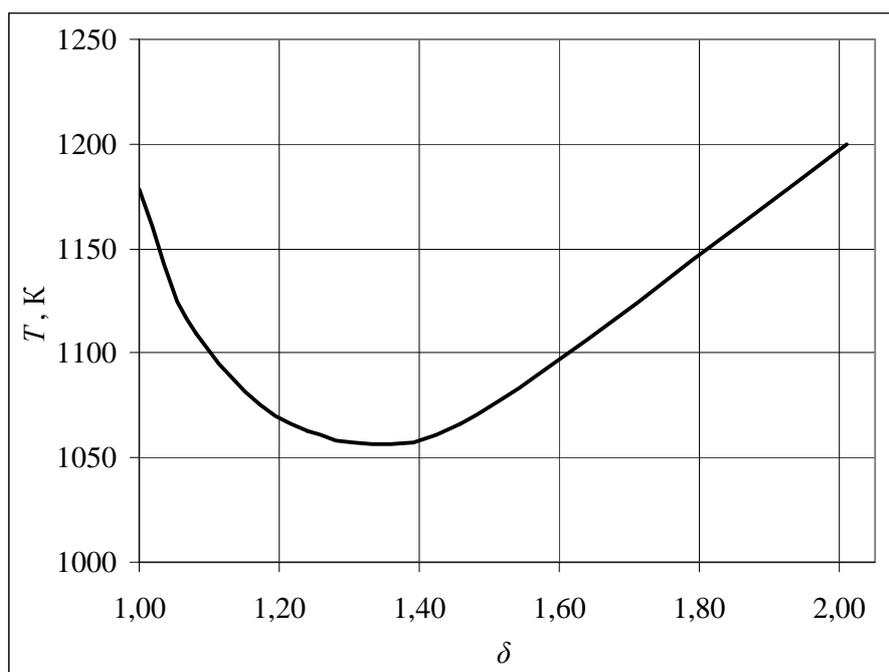


Рисунок 5. Зависимость температуры газовой смеси осредненной по объему от коэффициента оребрения

Аналогичные эффекты – уменьшение средней температуры в газовом объеме (Рисунок 5), явление рециркуляции достигаются с использованием цилиндрической топки с внутренним поперечным оребрением (Рисунок 6).

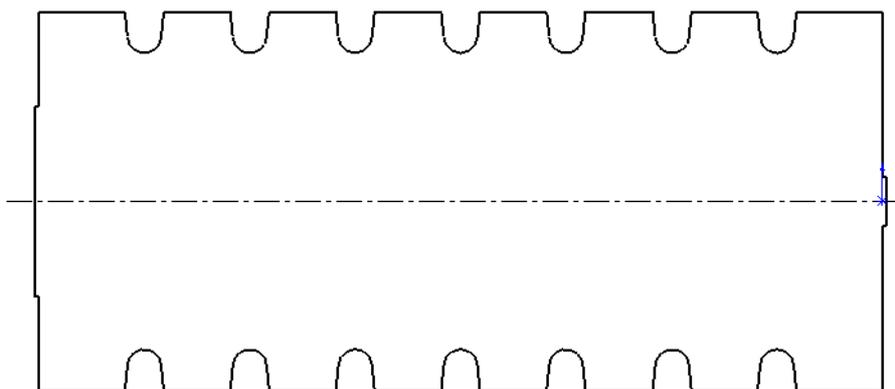


Рисунок 6. Расчетная схема цилиндрической топки с внутренним поперечным оребрением

На рисунке 7 приведена зависимость относительной концентрации $NO_{ор} / NO_{окр}$ от коэффициента оребрения δ , где $NO_{ор}$ – массовая концентрация оксида азота на выходе из цилиндрической топки с оребренной внутренней поверхностью топки, δ – отношение площади поверхности оребренной топки к неоребренной. Откуда следует, что данная конструкция топки позволяет снизить концентрацию оксидов азота до 50 % в диапазоне значений коэффициента оребрения от 1,05 до 1,5.

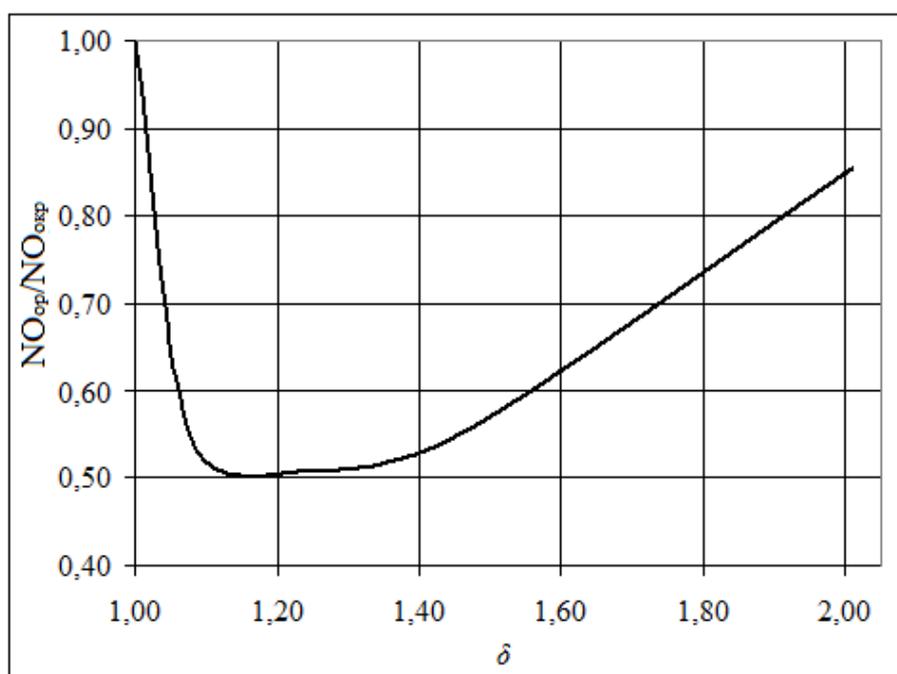


Рисунок 7. Зависимость относительной концентрации $NO_{ор} / NO_{окр}$ от коэффициента оребрения

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) за счет окисления азота воздуха.

Изменение формы поперечного сечения топочной камеры с окружности на эллипс, а также оребрение внутренней поверхности цилиндрической топки приводит к:

1. Интенсификации конвективных явлений.
2. Увеличению рециркуляции продуктов сгорания.
3. Уменьшению концентраций оксидов азота на выходе из топки.

Литература

1. Михайлов А.Г., Батраков П.А., Теребиллов 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. Михайлов А.Г. Вопросы образования оксидов азота при сжигании газообразных и жидких топлив // Омский научный вестник. – 2009. – № 3 (83). – С. 103 – 106.
5. Пашков Л. Т. Основы теории горения. – М. : МЭИ, 2002. – 136 с.
6. Росляков П.В., Закиров И.А. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях. – М. : МЭИ, 2001. – 144 с.
7. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flame // 13-th Sympos. (Interm.) On Combustion. 1971. P. 373.
8. Hayhursts A.N., Vince I.M. Nitric oxide formation from N₂ in flames: The importance of «prompt» NO // In Progress in Energy and Combustion Science. Oxford, 1980. Vol. 6. P. 35 – 51.

References

1. Mikhailov A.G., Batrakov P.A., Terebilov S.V. Numerical modeling of heat and mass transfer in combustion of fuel in the combustion volume // Natural and Technical Sciences. - 2011. – № 5 (55). – P. 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. Alexeev B.V. Physical Gas Dynamics reacting media. – M.: Higher School, 1985. – 464 p.
4. Mikhailov A.G. Questions of nitrogen oxide combustion of gaseous and liquid fuels // Omsk Scientific Bulletin. – 2009. – № 3 (83). – P. 103 – 106.
5. Pashkov L.T. The fundamental theory of combustion. – M.: MEI, 2002. – 136 p.
6. Roslyakov P.V., Zakirov I.A. Non-stoichiometric combustion of natural gas and fuel oil for thermal power plants. – M.: MEI, 2001. – 144 p.
7. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flame // 13-th Sympos. (Interm.) On Combustion. 1971. P. 373.
8. Hayhursts A.N., Vince I.M. Nitric oxide formation from N₂ in flames: The importance of «prompt» NO // In Progress in Energy and Combustion Science. Oxford, 1980. Vol. 6. P. 35 – 51.