

УДК 662.6.9:519.6

ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА В УХОДЯЩИХ ГАЗАХ ОТ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Герцык С.И.¹, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование
металлургического производства» (gertsyk@mail.ru)

Туктаров Д.Б.², инженер

¹Московский государственный машиностроительный университет
(107023, Россия, Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38)

²ООО «Приоритет»
(117420, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, д. 57)

Аннотация. На основе эмпирических методик рассчитаны концентрации диоксида азота в дымовых газах при сжигании топлива в горелках с разными способами формирования топливовоздушной смеси. Показано, что минимальная концентрация оксидов азота в дымовых газах образуется при сжигании топлива в горелках с разомкнутыми факелами и внешним смешением при сжигании низкокалорийных видов топлива. Подогрев воздуха горения в несколько раз увеличивает концентрацию оксидов азота в продуктах горения. Получена экстремальная зависимость концентрации оксидов азота в дымовых газах от величины коэффициента расхода воздуха, критическое значение которого, соответствующее максимальной величине концентрации, составляет 1,16 – 1,17.

Ключевые слова: оксиды азота, дымовые газы, горелка, способ смешения, подогрев воздуха горения, коэффициент расхода воздуха, экстремальная зависимость.

Металлургическая и машиностроительная отрасли промышленности являются основными потребителями топливных ресурсов и, вследствие этого, производителями большого количества загрязняющих атмосферу вредных веществ. При проектировании систем отопления печей и котлов надо учитывать ряд факторов, среди которых важную роль играет проблема защиты окружающей среды от вредных выбросов, содержащихся в продуктах горения твердого, жидкого и газообразного видов топлива.

Как известно, наиболее токсичные вещества, содержащиеся в продуктах сгорания любого топлива, это оксиды азота – NO (монооксид) и NO₂ (диоксид), которые наносят ущерб не только здоровью людей, но и окружающей природе. Оценка (прогноз) величины их концентрации в продуктах горения в зависимости от параметров сжигания топлива – один из путей решения проблемы защиты окружающей среды при выборе типа и конструкции не только горелочных устройств, но и системы утилизации тепла уходящих продуктов горения.

Практически все нагревательные и термические печи металлургической и машиностроительной отраслей промышленности оснащены системой рекуперации тепла уходящих газов, что приводит к существенной экономии топлива и, следовательно, к снижению объема образующихся и выбрасываемых в атмосферу продуктов горения. Однако повышение температуры горения (при подогреве воздуха горения и /или топлива с низкой теплотой сгорания) резко увеличивает концентрацию оксидов азота в дымовых газах тем в большей

степени, чем выше температура подогрева компонентов горения и чем выше теплота сгорания топлива. Поэтому снижение расхода топлива за счет утилизации тепла дымовых газов не всегда приводит к снижению валовых выбросов в атмосферу вредных веществ.

При проектировании новых печных агрегатов и реконструкции старых часто приходится сталкиваться со взаимопротивоположными требованиями: с одной стороны, необходимо обеспечить высокую температуру печных газов (температуру печи), что достигается подогревом компонентов горения и приводит к снижению удельных затрат тепла и топлива; с другой – высокая температура горения стимулирует интенсивное образование оксидов азота.

Концентрация оксидов азота в уходящих газах в большой степени определяется окислением азота воздуха горения, особенно – при использовании подогретого воздуха, подаваемого в горелочные устройства. При этом ее величина может возрастать в несколько раз по сравнению с использованием холодных топлива и воздуха [1, 2].

Как уже указывалось [2], существующие методики оценки (прогноза) образования оксидов азота в уходящих газах, полученные на основе обработки экспериментальных данных, весьма специфичны и предназначены для строго определенных теплотехнических агрегатов. Например, для котлов, отапливаемых мазутом или углем, причем обычно параметрами предлагаемых расчетных зависимостей являются такие величины, как теплоснабженность топочного объема,

производительность котла, характеристики вырабатываемого пара и пр.

Для оценки величины концентрации оксидов азота в продуктах горения топлива, используемого в топливосжигающих устройствах печных агрегатов, были рассмотрены две методики, с помощью которых можно оценить степень «загрязнения» дымовых газов оксидами азота при сжигании газообразного топлива в горелочных устройствах различных конструкций с разными способами формирования топливовоздушной смеси. Показано, что при прочих равных условиях обе методики дают сопоставимые результаты, расхождение которых для высокотемпературных нагревательных печей прокатного производства находится в пределах 5–7 %, но для низкотемпературных (термических печей), особенно при высоком подогреве воздуха, подаваемого в горелки, это расхождение существенно выше.

Методика ОАО «Стальпроект» дает возможность ориентировочного определения оксидов азота в продуктах горения жидкого и газообразного топлива, причем вид топлива, конструкция горелки, температура подогрева воздуха горения и температура печи учитываются поправочными коэффициентами, входящими в итоговую формулу в качестве множителей, что делает ее использование чрезвычайно легким. Каждая группа газогорелочных устройств определяется так называемым «базовым» значением, находящимся в пределах от 100 (плоскопламенные горелки) до 350 мг/м³ (радиационные трубы). Концентрация оксидов азота в уходящих газах по предложенному соотношению линейно зависит от перечисленных факторов.

Методика [3] позволяет оценить «термические» оксиды, содержащиеся в продуктах горения в зависимости от теплотехнических характеристик работы промышленных печей и газогорелочных устройств. В качестве параметров, характеризующих тепловую работу печи и влияющих на концентрацию оксидов азота в дымовых газах, приняты:

- калориметрическая температура горения топлива при стехиометрических соотношениях топлива и воздуха горения и при выбранном значении коэффициента расхода воздуха (это позволяет прогнозировать величину оксидов азота при подогреве компонентов горения);
- температура печи или зоны горения;
- удельные объемы продуктов горения при коэффициенте расхода воздуха $n = 1$ и его фактическом значении;
- концентрация кислорода в образующихся продуктах горения.

Кроме того, в расчетную формулу введены коэффициенты, учитывающие оптическую плотность продуктов горения и коэффициент, характеризующий конструкцию сожигательного устройства, который по сути учитывает различные способы формирования топливовоздушной смеси.

Используя эти методики, были выполнены расчеты, позволяющие оценить (прогнозировать) концентрацию оксидов азота в дыме при сжигании газообразных топлив различной теплоты сгорания в горелках с различными способами смешения топлива и воздуха.

Основной классификационный признак горелок – способ смешения топлива и воздуха (с полным предварительным смешением компонентов горения, с внешним смешением и с улучшенным смешением) [4], которым определяется подготовка топливовоздушной смеси, размер факела и, следовательно, от которого зависит величина коэффициента расхода воздуха, обеспечивающего полноту сгорания топлива. В связи с этим были выполнены расчеты прогнозируемой концентрации оксидов азота в продуктах горения в горелках с различными способами образования топливовоздушной смеси для определения типа горелок с минимальным образованием оксидов азота в уходящих газах при сопоставимых условиях.

Такого рода расчеты позволяют оценить токсичность продуктов горения и решить вопрос о необходимости дополнительных мер по снижению концентрации оксидов азота с помощью рециркуляции продуктов горения (что усложняет конструкцию печи), организации ступенчатого сжигания топлива (требующего горелок нового поколения, например, серии горелок с пониженным выбросом оксидов азота, разработанных ОАО «Стальпроект») или нейтрализации оксидов каталитическими или химическими способами [5].

На рис. 1 показано изменение концентрации оксидов азота в продуктах горения природного газа ($Q_H^p = 35,5$ МДж/м³) при сжигании в различных ти-

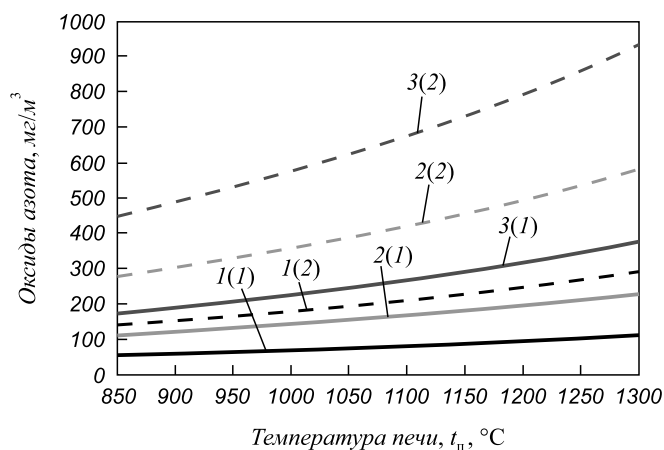


Рис. 1. Зависимость концентрации оксидов азота в уходящих газах от температуры печи:

1 – горелка с разомкнутым факелом ($n = 1,05$); 2 – горелка «труба в трубе» ($n = 1,1$); 3 – инжекционная горелка ($n = 1,02$); (1) – холодный воздух, (2) – воздух горения подогрет до 350 °C

Fig. 1. The dependence of the nitrogen oxides concentration in smoke gases from the furnace temperature:

1 – burner with open torch ($n = 1,05$); 2 – burner “tube in tube” ($n = 1,1$); 3 – injection burner ($n = 1,02$); (1) – cool air, (2) – combustion air, preheated to 350 °C

пах горелок в зависимости от температуры печи. Минимальное значение концентрации оксидов азота – в продуктах горения при сжигании топлива в горелках с разомкнутым факелом (плоско-пламенные – ГПП, радиационные – ГР и др.). В низкотемпературных печах (термических) при температуре печи $t_{\text{п}} \leq 950^\circ\text{C}$ прогнозируемое значение оксидов азота находится в пределах $55 - 70 \text{ мг/м}^3$ при отсутствии подогрева воздуха горения и примерно в 2,5 раза выше – $140 - 170 \text{ мг/м}^3$ при работе на подогретом воздухе горения ($t_{\text{в}} = 350^\circ\text{C}$). Относительно низкие значения концентрации оксидов азота объясняются тем, что в силу особенностей конструкции горелок подобного типа и профиля горелочного камня в корень факела из печного пространства подсасываются отработанные продукты горения, понижающие температуру факела, которая, как известно, оказывает решающее влияние на процесс образования оксидов азота.

В высокотемпературных промышленных печах при температурах печи $t_{\text{п}} = 1150 - 1300^\circ\text{C}$ диапазон прогнозируемых значений концентрации оксидов азота в продуктах горения этих горелок составляет $80 - 120 \text{ мг/м}^3$ (холодный воздух), а при подогреве воздуха горения – $230 - 290 \text{ мг/м}^3$ (большие цифры относятся к более высоким температурам печи).

Эти расчеты были выполнены по методике ОАО «Стальпроект», которая включает в себя минимальное по сравнению с другими конструкциями горелок значение базовой величины NO_x , равной 100 мг/м^3 .

Прогнозируемое значение концентрации оксидов азота в продуктах горения при эксплуатации горелок с внешним смешением, например, типа «труба в трубе», работающих с коэффициентом расхода воздуха $n = 1,1$, не превышает 200 мг/м^3 для термических печей и $250 - 280 \text{ мг/м}^3$ для высокотемпературных нагревательных агрегатов. При подогреве воздуха эти значения возрастают не менее, чем в полтора – два раза.

Существенно более высокие значения концентрации оксидов азота в дымовых газах, образующихся при эксплуатации горелок инжекционного типа, работающих в соотношениях смешения топлива и воздуха, близких к стехиометрическим. Очевидно, что при прочих равных условиях температура горения, обеспечиваемая горелками с полным предварительным смешением компонентов горения, наивысшая по сравнению с горелками других конструкций. Следовательно, в уходящих газах будет самая высокая концентрация оксидов азота. Ее величина примерно в полтора раза превышает аналогичные значения концентраций в дымовых газах горелок с внешним смешением и в 3 – 3,5 раза – для горелок с разомкнутым факелом при работе на холодном воздухе. При подогреве воздуха горения, поступающего в горелочное устройство, резко возрастает температура горения и концентрация оксидов азота, которая в 2,5 – 3 раза превышает аналогичные значения по сравнению с работой на холодном воздухе, достигая зна-

чений, равных $900 - 950 \text{ мг/м}^3$ при температурах печи $t_{\text{п}} \geq 1250^\circ\text{C}$.

Таким образом, используемые методики оценки концентрации оксидов азота в дымовых газах согласуются с известной тенденцией повышения концентрации оксидов азота с ростом температуры горения (и температуры печи) и условиями горения, близкими к стехиометрическим [5, 6].

Таким образом, с точки зрения защиты окружающей среды от вредных выбросов, наиболее предпочтительны горелки с разомкнутым факелом и частичным предварительным смешением топлива и воздуха (среднего смешения), при работе которых концентрация оксидов азота в уходящих газах, даже при использовании подогретого воздуха, не превышает предельно допустимых значений.

В ряде случаев в уходящих газах, образующихся при сжигании топлива в горелках без предварительного смешения топлива и воздуха, концентрация оксидов азота тоже не превышает допустимых величин

На рис. 2 показано прогнозируемое значение концентрации оксидов азота в продуктах горения горелок с внешним смешением (типа «труба в трубе», ПИВС и др.), работающих на подогретом воздухе, в зависимости от коэффициента расхода воздуха при использовании топлив различной теплоты сгорания. Эти горелки, устойчиво работающие при $n \geq 1,10 - 1,15$, широко используются в конструкциях печей металлургии и машиностроения при необходимости организации факельного сжигания в силу их ряда достоинств (простота конструкции, небольшие размеры, относительная дешевизна).

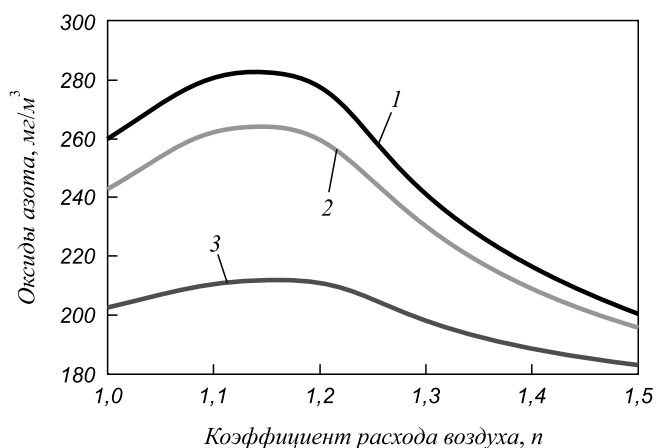


Рис. 2. Зависимость концентрации оксидов азота в уходящих газах от коэффициента расхода воздуха (горелка «труба в трубе»): 1 – природный газ $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 35,5 \text{ МДж/м}^3$; 2 – смешанный доменно-природный газ $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 25,0 \text{ МДж/м}^3$; 3 – смешанный доменно-природный газ $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 12,5 \text{ МДж/м}^3$

Fig. 2. The dependence of the nitrogen oxides concentration in smoke gases from the excess air ratio (burner “pipe in pipe”): 1 – natural gas $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 35.5 \text{ MJ/m}^3$; 2 – mixed blast furnace and natural gas $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 25.0 \text{ MJ/m}^3$; 3 – mixed blast furnace and natural gas $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 12.5 \text{ MJ/m}^3$

Все кривые имеют экстремальный характер. С одной стороны, с увеличением коэффициента избытка воздуха в зону горения попадает большее количество азота, что способствует интенсивному образованию оксидов азота в уходящих газах. С другой стороны, воздух разбавляет образующиеся дымовые газы, понижает температуру горения и, следовательно, образование оксидов азота замедляется, что, в свою очередь, приводит к уменьшению их концентрации в продуктах горения. Диапазон наибольших значений концентраций оксидов азота в дыме (уходящих газах) соответствует значениям коэффициента расхода воздуха $n = 1,1 - 1,2$. Например, для горелки, работающей на природном газе при подогреве воздуха горения до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ и установленной в термической печи ($t_{\text{п}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) прогнозируемая концентрация оксидов в этом диапазоне значений n составляет $280 - 290\text{ мг/м}^3$. Максимальное значение концентрации (290 мг/м^3) соответствует $n = 1,16 - 1,17$. Полученные расчетные данные подтверждаются экспериментально [1] – критическое (экстремальное) значение коэффициента расхода воздуха, соответствующее максимуму значения оксидов азота в уходящих газах при сжигании природного газа, угля и мазута по данным автора составляет $n = 1,17$. Во всем диапазоне изменения величины коэффициента расхода воздуха концентрация оксидов в дыме тем больше, чем выше температура зоны горения (температура печи) и теплота сгорания топлива, поскольку топлива с высокой теплотой сгорания обеспечивают наивысший уровень температур горения. При использовании топлив с меньшей теплотой сгорания прогнозируемые максимальные значения оксидов азота составляют $260 - 265\text{ мг/м}^3$ ($Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 25,0\text{ МДж/м}^3$) и 210 мг/м^3 ($Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 12,5\text{ МДж/м}^3$).

На рис. 3 приведена зависимость концентрации оксидов азота в дымовых газах от коэффициента расхода воздуха при работе горелок с внешним смешением («труба в трубе»), работающих на смешанном доменно-природном газе с теплотой сгорания $12,5\text{ МДж/м}^3$ в термических и нагревательных печах с подогревом воздуха горения до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на холодном воздухе. Как уже указывалось, все кривые имеют экстремальный характер, подогрев воздуха горения по меньшей мере в 1,5 раза увеличивает содержание оксидов азота в дымовых газах даже при использовании топлива с низкой теплотой сгорания. При работе на холодном воздухе экстремальный характер зависимостей выражен слабо, область максимальных величин концентраций оксидов азота в дымовых газах, приходящаяся на диапазон значений $n = 1,1 - 1,2$, сглажена, экстремальные значения находятся в пределах $210 - 215\text{ мг/м}^3$ ($t_{\text{п}} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$) и не превышают величины 185 мг/м^3 для низкотемпературных термических печей. При подогреве воздуха горения ($t_{\text{в}} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$) концентрация оксидов в дыме увеличивается весьма существенно: до 350 мг/м^3 (высокотемпературные печи) и до 280 мг/м^3 (термические печи).

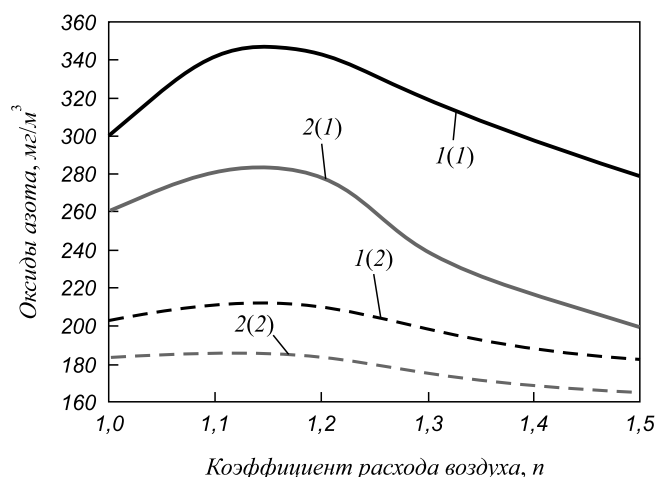


Рис. 3. Зависимость концентрации оксидов азота в уходящих газах от коэффициента расхода воздуха (горелка «труба в трубе»), топливо – смешанный доменно-природный газ $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 12,5\text{ МДж/м}^3$: 1 – воздух горения подогрев до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – холодный воздух; (1) – температура печи $t_{\text{п}} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2) – температура печи $t_{\text{п}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Dependence of the nitrogen oxides concentration in smoke gases from the excess air ratio (burner «pipe in pipe»), fuel – mixed blast furnace end natural gas $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 12.5\text{ MJ/m}^3$: 1 – combustion air, preheated to $350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – cold air; (1) – furnace temperature $t_{\text{f}} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2) – furnace temperature $t_{\text{f}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таким образом, выбирая систему отопления печей и утилизации тепла продуктов горения топлива, необходимо учитывать экологические последствия реализуемых проектных решений: подогрев воздуха горения приводит к значительной экономии топлива ($12 - 15\%$), снижает удельные затраты энергии на производство продукции, но, вместе с тем, существенно повышает концентрацию оксидов азота в дымовых газах. Валовые выбросы этих веществ могут заметно превышать аналогичные значения при работе горелок, установленных в печах и котлах, не оснащенных системой рекуперации тепла уходящих газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
2. Герцык С.И., Туктаров Д.Б. Оценка концентрации оксидов азота в продуктах горения топлива // Изв.вуз. Черная металлургия. 2014. № 5. С. 3 – 7.
3. Шульц Л.А., Говорова Н.М. Постадийное сжигание газообразного топлива – основа ресурсосберегающих и экологически совершенных технологий нагрева металла // Изв.вуз. Черная металлургия. 1996. № 5. С. 66 – 70.
4. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей. – М.: Теплотехник, 2004. – 395 с.
5. Шульц Л.А., Бунзель, Ю.М., Третьяков В.Ф. Пути решения экологических проблем при нагреве и термической обработке стального проката и деталей // Сб. «Металлургия, XXI век». – М.: Металлургия, 1991. С. 253 – 256.
6. Карп И.Н., Сорока Б.С., Дашевский Л.Н., Семернина С.Д. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах. – Киев: Техника, 1967. – 381 с.

Поступила 8 декабря 2014 г.

DEPENDENCE OF NITROGEN OXIDES CONCENTRATION IN SMOKE GASES FROM THE METHOD OF FORMING OF FUEL-AIR MIXTURE

Gertsyk S.I.¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Technology and equipment of metallurgical production”* (gertsyk@mail.ru)

Tuktarov D.B.², *Engineer*

¹ **Moscow State University of Mechanical Engineering** (38, B. Semyonovskaya str., Moscow, 107023, Russia)

² **LLC Prioritet** (57, Profsoyuznaya str., Moscow, 117420, Russia)

Abstract. The concentration of nitrogen dioxide in the smoke gases from the combustion of fuel in burners with different ways of forming the fuel-air mixture was calculated with the use of empirical procedures. It was shown, that a minimum concentration of nitrogen oxides in smoke gases was at fuel burning in burners with open torches and external mixing incineration calorific fuels. The heating of the combustion air increased the concentration of nitrogen oxides in the combustion products in several times. The extreme dependence of the concentration of nitrogen oxides was obtained in the smoke from the coefficient of the air flow, the critical value of which corresponded to the maximum concentration – 1.16 – 1.17.

Keywords: nitrogen oxides, smoke gases, burner, mixing method, heating of combustion air flow, rate of air, extreme dependence.

REFERENCES

1. Sigal I.Ya. *Zashchita vozdukhnoy basseina pri szhiganii topliva* [Protection of the air basin at fuel combustion]. Leningrad: Nedra, 1988. 312 p. (In Russ.).
2. Gertsyk S.I., Tuktarov D.B. Estimating the concentration of nitrogen oxides in combustion products. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 5, pp. 3–7. (In Russ.).
3. Shul'ts L.A., Govorova N.M. Stage-by-stage combustion of gas fuel – a basis of resource-saving and environment-protecting technologies of metal heating. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1996, no. 5, pp. 66–70. (In Russ.).
4. Gusovskii V.L., Lifshits A.E. *Metodiki rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei* [Calculating methodology for heating and thermal furnaces]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, 395 p. (In Russ.).
5. Shul'ts L.A., Bunzel', Yu.M., Tret'yakov V.F. *Puti resheniya ekologicheskikh problem pri nagreve i termicheskoi obrabotke stal'nogo prokata i detalei* [Ways of solving environmental problems in heating and heat treatment of rolled steel products and details]. *V sb. Metallurgiya, XXI vek*. In: [Metallurgy, XXI Century]. Moscow: Metallurgiya, 1991, pp. 253–256. (In Russ.).
6. Karp I. N., Soroka B.S., Dashevskii L.N., Semernina S.D. *Produkty sgoraniya prirodnogo gaza pri vysokikh temperaturakh* [The products of natural gas combustion at high temperature]. Kiev: Tekhnika, 1967. 381 p. (In Russ.).

Received December 8, 2014