

УДК 669.041.5:662.613.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ ПЛАМЕН И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Канд. физ.-мат. наук ДОБРЕГО К. В., чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук,
проф. ЖДАНОВ С. А., докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,
инж. КОЗЛОВ И. М., канд. техн. наук ТИЩЕНКО В. А., инж. КОТОВ И. В.

*Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси,
Белорусский национальный технический университет,
РУП «Белорусский металлургический завод»*

В связи с ростом требований, предъявляемых к тепловой работе нагревательных печей, котлоагрегатов и других энергетических установок, актуальной задачей является оценка теплоэнергетических и экологических характеристик газогорелочных устройств. В [1...3] приведены результаты энергоэкологических исследований нагревательных печей с шагающими балками станов 850, 320/150 (ныне стан 320) и 150 РУП «Белорусский металлургический завод», базирующихся на обработке экспериментальных и расчетных данных. В развитие выполненных исследований представлены результаты оценки экологических и теплотехнических показателей современных газогорелочных устройств, функционирующих на печи стана 320 РУП «БМЗ», основанные на математическом моделировании процессов сжигания, и в первую очередь, моделировании турбулентных пламен.

Основным методом моделирования факелов до 80-х гг. XX в. являлось аэродинамическое приближение, при котором геометрия фронта определяется аэродинамикой струи и эффективной диффузией компонент, при этом скорость протекания реакций принимается бесконечной (что смешалось, то сгорело). С развитием вычислительной техники получили развитие модели, учитывающие конечную скорость реакций и сложную многокомпонентную кинетику.

Модели, учитывающие более или менее точную гидродинамику струи, гидродинамику смешения и эффективную кинетику горения, дают достаточно хорошие результаты при расчете макроскопических характеристик факела (объем, длина, средняя температура). Для определения микроскопических характеристик факела, с которыми тесно связан химический состав продуктов сгорания, необходимо применение более детальных и сложных моделей, учитывающих прежде всего реальную микроструктуру

пламени. Базовой моделью этого уровня можно считать модель гидродинамики Навье–Стокса с k - ε подмоделью турбулентности и многокомпонентной химической кинетикой. В последнее время во всех мировых центрах по изучению турбулентного горения развиваются модели именно данного уровня [4]. К важнейшим достижениям в этой области исследований следует отнести классификацию турбулентных пламен по микроструктуре [5], создание моделей флеймлетов (одномерных элементов пламени, имеющих заданные свойства).

В общем случае математическое моделирование турбулентных струй базируется на уравнениях Навье–Стокса для течений вязкой жидкости, являющихся следствием закона сохранения импульса и массы (неразрывности):

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + (\nabla \vec{u})(\rho \vec{u}) + \operatorname{div} \vec{P} = \rho g, \quad (1)$$

где ρ – плотность газа; $\vec{u}$ – скорость; $\vec{P}$ – тензор плотности потока импульса.

Уравнение (1) дополняется уравнением сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} U + \vec{J}_q) + \vec{P} : \operatorname{div} \vec{u} = q_r, \quad (2)$$

где $\vec{J}_q$ – вектор плотности потока теплоты; знак «:» означает векторную свертку, приводящую к скаляру.

При наличии химических реакций уравнения (1) и (2) дополняются источниковым членом, связанным с реакциями и уравнениями сохранения массы отдельных химических компонентов:

$$\frac{\partial(\rho y_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u y_i) + \operatorname{div}(\rho D \operatorname{grad}(y_i)) = M_i w_i, \quad (3)$$

где y_i – массовые доли; M_i – молярная масса компонента; $M_i w_i$ – химический источник.

Решение системы (1)–(3) может осуществляться после предварительного временного усреднения уравнений, где подразумевается, что детальная временная и пространственная структуры полей скорости, концентраций и температуры описываются некоторыми дополнительными моделями турбулентности. Другая альтернатива – прямое численное моделирование (английский термин DNS).

Первый метод рассмотрения газовой динамики существенно облегчает решение задачи, но содержит большое количество явных и неявных предположений, что делает его полуэмпирическим методом со всеми вытекающими следствиями. Основной проблемой в случае усредненных моделей турбулентной газодинамики является замыкание системы усредненных уравнений, которое заключается в том, что в уравнениях для усредненных величин появляются члены типа $\langle \rho \vec{u}'' q'' \rangle$, где угловые скобки означают ус-

реднение по времени, верхний индекс «''» – импульсные составляющие величины.

Для решения проблемы замыкания используется гипотеза градиентного турбулентного транспорта скалярных величин, сформулированная еще в 20-х гг. XX в. в работах Прандтля и других исследователей и формально выражающаяся равенством:

$$\langle \rho \bar{y}'' q'' \rangle = -\langle \rho \rangle D^T \text{grad} \langle q \rangle, \quad (4)$$

где D^T – коэффициент турбулентного (эффективного) переноса. Эта гипотеза вызывает много нареканий как количественного, так и качественного характера, однако достаточно широко используется из-за своей простоты.

Одним из методов моделирования турбулентной газовой динамики и горения, получившим развитие в последнее время, является построение функций плотности вероятностей скалярных величин – PDF-моделирование. Его использование осложняется тем, что определение точных функций плотности вероятности эквивалентно точному решению полной системы уравнений газодинамики и ничуть не проще в математическом плане. Таким образом, усилия исследователей в основном направлены на генерацию аналитических эвристических форм для функций плотности вероятности (например, методами Монте-Карло). Но расчеты оказываются весьма громоздкими, и, кроме того, одночастичные функции плотности вероятности не могут содержать информацию о корреляциях в значениях скалярных величин и таким образом не дают всей полноты картины турбулентного движения.

С развитием вычислительной техники все большее внимание уделяется прямому численному моделированию горения – методу DNS. Безусловно, в настоящее время невозможно производить прямые расчеты структуры факела энергетических установок с пространственным разрешением порядка 0,01 мм. Однако, на наш взгляд, для большинства практических задач турбулентного горения такого разрешения не требуется. Действительно, геометрия (объем) диффузионного факела в целом задается эффективным турбулентным смешением, масштаб вихрей которого (так называемый тэйлоровский масштаб) на несколько порядков больше наименьшего (колмогоровского) масштаба турбулентности. Максимальная температура также малочувствительна к масштабу разрешения задачи. Чувствительным к пространственному масштабу сетки параметром является площадь высокотемпературных поверхностей горения, при этом объем высокотемпературных зон, контролирующей, в частности, генерацию термического NO_x , в меньшей степени зависит от масштаба пространственного разрешения.

Таким образом, метод DNS, являясь физически более строгим и ясным методом моделирования турбулентных пламен, не содержащим эмпирических параметров, может быть использован как универсальный при решении поставленной задачи с точки зрения оценки теплотехнических и экологических характеристик газофакельных горелок.

Модель включает уравнения газовой динамики (1)...(3), к которым добавляются уравнения химической кинетики. Выбор модели химической

кинетики проводился исходя из требований минимального числа химических компонент для моделирования диффузионных пламен. Кроме того, с целью моделирования генерации NO по механизму Зельдовича [6, 7] были добавлены необходимые компоненты. Модели химической кинетики тестировались посредством сравнения со стандартной моделью детальной химической кинетики GRI 3,0 [8]. Наилучшее согласование с полной моделью по времени зажигания и равновесным концентрациям CO, H₂, CH₄, NO показала 12-компонентная модель, составленная из брутто кинетики Басевича [9], реакций системы OH, H Борисова [10] и реакций механизма Зельдовича образования NO [7].

Сформулированная задача (1)...(3) реализована в двумерных кодах, использующих метод конечных разностей. Устойчивое решение системы получено за счет применения неявной схемы совместно с ньютоновскими итерациями. Граничные условия задачи схематично приведены на рис. 1. Для верификации математической модели и метода решения системы уравнений было проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными данными М. Kunugi и Н. Jinno [11], полученными для плоского факела. В экспериментах использовалась камера сгорания размером 20×70 см, имеющая прямоугольный поперечный вырез размером 2×7 см высотой 30 см. Бытовой газ и воздух подавались снизу вверх через плоские щели с различными скоростями (толщина разделительной стенки между портами – 2 мм). Температура, скорость, давление и состав газа измерялись на расстоянии 1, 2, 5 и 10 см от среза горелки. Средний состав газа: CO₂ – 2,9 %; C_nH_m – 2,1; O₂ – 1,0; CO – 14,2; H₂ – 27,6; CH₄ – 15,4; N₂ – 36,8 %. Температура измерялась тонкой (60 мкм) платино-родиевой термопарой. Давление измерялось кварцевой трубкой Пито, скорости – анемометром 60 мкм в диаметре и длиной 3 мм. Диапазон скоростей подаваемых газов составлял: $u_g = 1,6\sim 7,6$ м/с (для газа) и $u_a = 3,2\sim 7,6$ м/с – для воздуха.

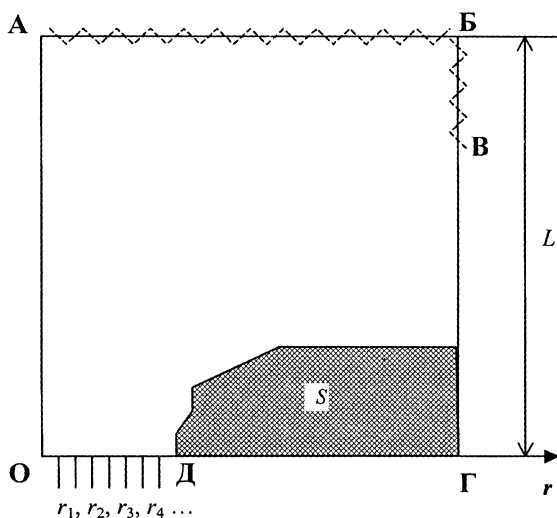


Рис. 1. Схема расчетной области и граничных условий: OABГ – расчетная область; AB или БВ – граница свободного вытекания продуктов сгорания; OA – ось симметрии системы; S – область горелочного камня и стенки; OД – область втекания компонентов смеси, $r_1, r_2, r_3, r_4 \dots$ – система каналов подачи топливной смеси, моделирующая начальное состояние (скорости и концентрации) смеси

В связи с тем, что в предлагаемой методике численного моделирования смешение и горение не могут быть адекватно промоделированы на микроуровне (масштабы $\sim 0,01 \dots 0,1$ мм) из-за относительной грубости сетки, в модель должен быть введен эмпирический или полуэмпирический параметр, характеризующий смешение на микроуровне. В качестве такого параметра нами использована степень смешения компонент горючего на начальном участке. Полуэмпирическая модель оценки смешения на начальном участке, примененная для промышленных горелок, приведена ниже (5), (6). Для сравнения с экспериментальными данными степень смешения на начальном участке длиной 1 см подбиралась так, чтобы наилучшим образом аппроксимировать экспериментально измеренные профили температуры на расстоянии 1 и 5 см от среза (рис. 2). Ячейка расчетной сетки равна 1 мм.

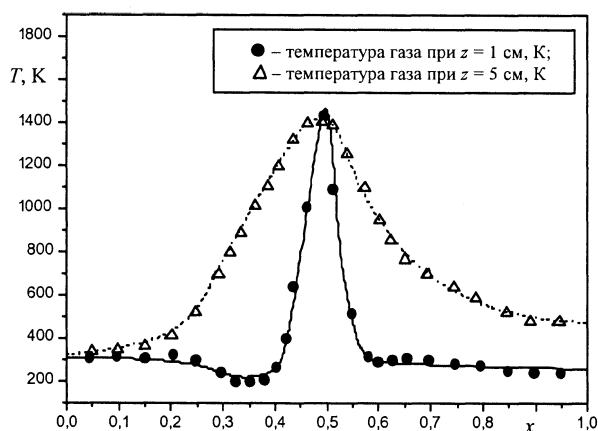


Рис. 2. Расчетные (кривые) и измеренные (маркеры) профили температуры на расстоянии 1 и 5 см от среза горелки

На рис. 2 и 3 приводятся расчетные кривые для температуры и концентраций компонент совместно с измеренными значениями соответствующих параметров. Из графиков видно, что методика прямого численного моделирования на сетках с размером ячейки ~ 1 мм при использовании одного эмпирического параметра дает очень хорошее качественное и количественное согласование с экспериментальными данными.

Разработанная методика численного моделирования турбулентного факела газогорелочных устройств была использована для сравнительной оценки экологических показателей плоскофакельных горелок, установленных в нагревательной печи стана 320 РУП «БМЗ» (BFM-G-8 фирмы Heurtey), и горелок 2110-150 фирмы Bloom (тип «standart») в связи с необходимостью замены действующих горелочных устройств. Эти горелки имеют примерно одинаковую мощность и функциональное применение. Схемы обеих горелок представлены на рис. 4, 5.

Важным моментом при моделировании горелок является задание начальных условий для газовой смеси: концентраций, степени смешения компонент, скоростей на границе расчетной области. Для сравнительного расчета характеристик горелок с аналогичными системами подачи газа целесообразно использование простейших моделей формирования крутки

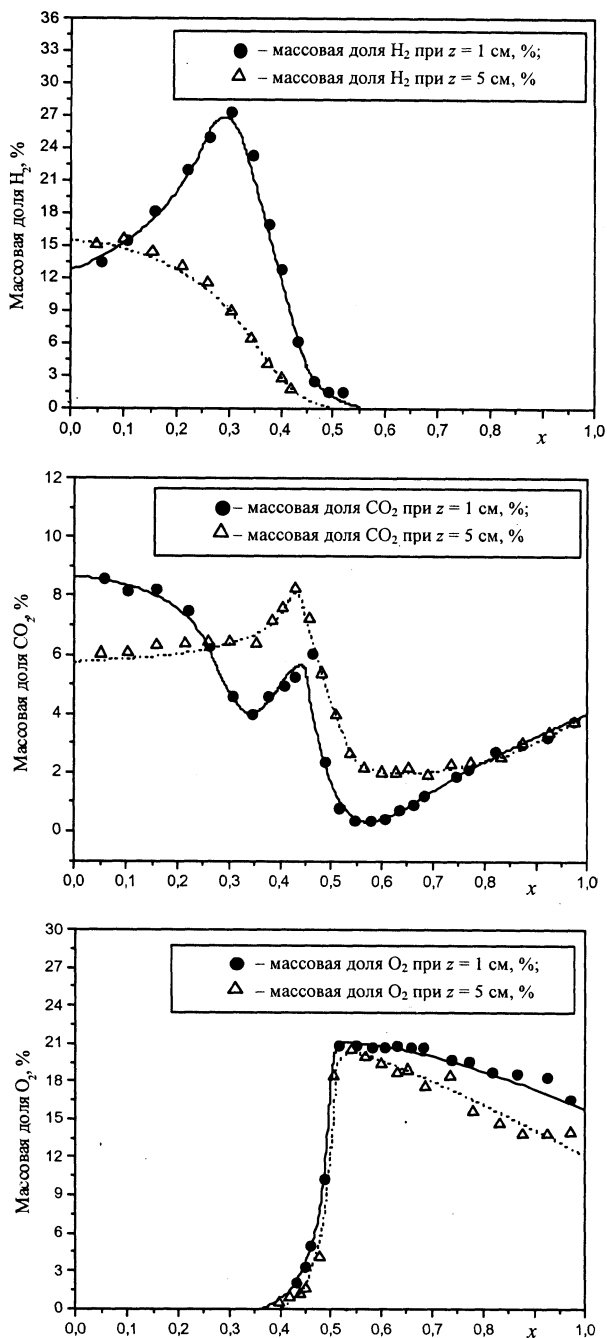


Рис. 3. Расчетные (кривые) и измеренные (маркеры) концентрации H₂, CO₂ и O₂ на расстоянии 1 и 5 см от среза горелки

(азимутальных скоростей) и смешения. Примером такой модели смешения на начальном участке является методика длины проникновения струй в основной поток [12, 13]. Приведем новую простую и достаточно универсальную методику, основанную на общих закономерностях смешения газовых потоков и теории размерностей. Под относительной перемешанностью двух газовых потоков будем понимать количество одного из газовых ком-

понентов, пересекшего границу смешения, отнесенное к этой же величине в случае полного перемешивания. В теории диффузии и теплопроводности показано, что концентрационное поле (и величина относительной перемешанности) может быть выражено в виде бесконечного ряда по собственным функциям краевой задачи диффузии [14], а зависимость от времени задается экспонентами, где γ_m^2 – собственные числа соответствующей задачи Штурма – Лиувилля:

$$C(r, t) = \sum_m^{\infty} R_m(r) \exp(-\gamma_m^2 t).$$

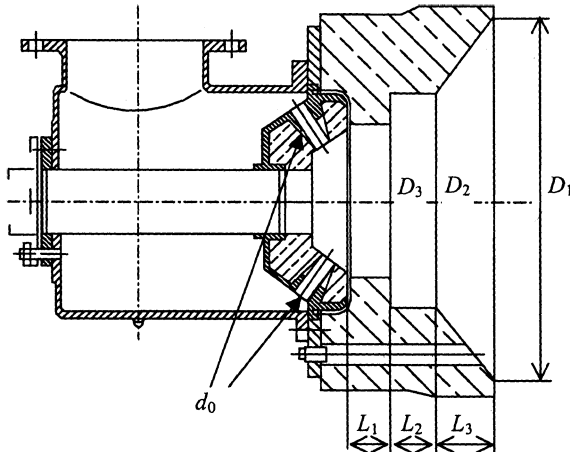


Рис. 4. Технический рисунок горелки 2110-150 фирмы Bloom

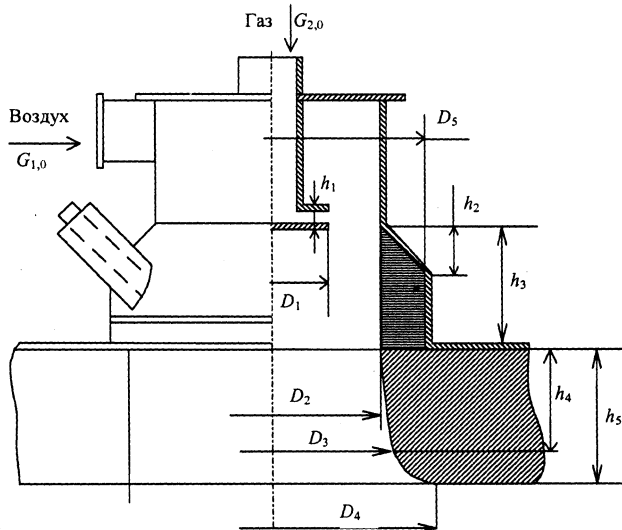


Рис. 5. Схема плоскоструйных горелок BFM-G-8 фирмы Stein-Heurtey

Временной характер изменения концентраций достаточно хорошо (при $Fo > 0,3$) описывается первым экспоненциальным множителем. Из этого следует, что относительная перемешанность может быть оценена как

$$C/C_0 = 1 - \exp\left(-\alpha \frac{D^T}{d^2} t\right), \quad (5)$$

где α – множитель порядка единицы, определяемый геометрией системы и типом граничных условий; D^T – коэффициент диффузии; d – линейный масштаб системы (длина диффузии).

Для использования оценки (5) построим безразмерный комплекс, имеющий физический смысл комплекса $D^T t / d^2$, с использованием физических параметров, определяющих первичное перемешивание в горелке. В качестве таких параметров возьмем: ΔV – разность скоростей потоков газа и воздуха в начальный момент их взаимодействия; S – площадь поверхности смешения, т. е. площадь поверхности раздела перемешивающихся компонент при отсутствии турбулентной и молекулярной диффузии; τ_L – время взаимодействия потоков, определяемое как время прохождения объема предварительного перемешивания более быстрой струей; A_L – полный объем области предварительного перемешивания. Учитывая, что коэффициент турбулентной диффузии задается произведением характерной скорости на линейный масштаб турбулентности, единственный вариант построения этого комплекса

$$M = \frac{\Delta V S \tau_L}{A_L}. \quad (6)$$

Расчетное значение параметра M оказалось равным $M = 0,5$ для горелки BFM-G-8 фирмы Heurtey и $M = 4,4$ для горелки 2110-150 фирмы Bloom и практически не зависящим от расхода топлива воздуха (в пределах рабочих режимов горелок) при выборе длины первичного перемешивания $L = 5$ см. Таким образом, согласно (5) степень предварительного смешения на участке длиной 5 см – $(C/C_0)_{\text{Heurtey}} \approx 0,4$ и $(C/C_0)_{\text{Bloom}} \approx 0,98$ для рассматриваемых горелок. В соответствии с полученными оценками задаются концентрации метана и воздуха во входном сечении горелки. При этом для простоты распределение концентраций метана и воздуха по сечению моделировалось линейной функцией.

Физический размер расчетной области соответствовал реальному размеру рабочей области горелки в печи стана 320 РУП «БМЗ» и составлял 1,8 м по высоте и 1,5 м в диаметре цилиндрической области. Несмотря на большой размер изучаемой зоны, размер расчетных ячеек в горловине горелки и вблизи горелочного камня составлял 0,5 см. Это позволило воспроизвести вихревую структуру пламени вплоть до масштабов ~ 1 см.

Результаты изменения концентраций CO и NO во времени для рассматриваемых типов горелок приведены на рис. 6 и 7.

Очевидно, что показатели содержания NO и CO в продуктах сгорания устанавливаются на протяжении двух-трех секунд после запуска горелки (без учета установления теплового режима печи, которое требует более длительного времени). Концентрации этих веществ на выходе из расчетной зоны пульсируют, что связано с нестационарным характером движения газа, формированием вихрей.

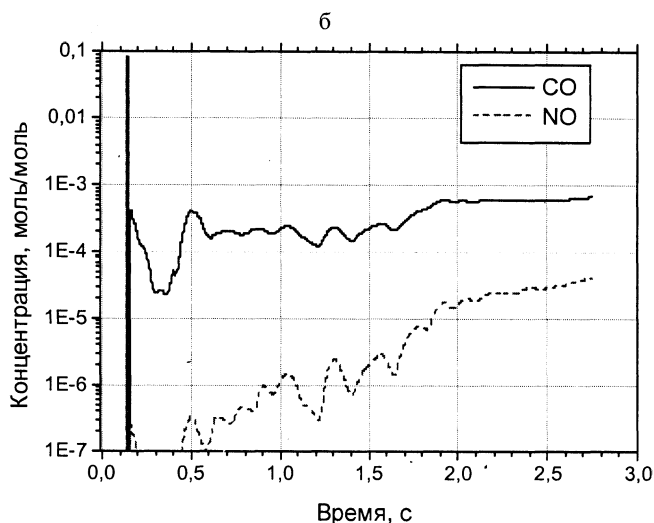
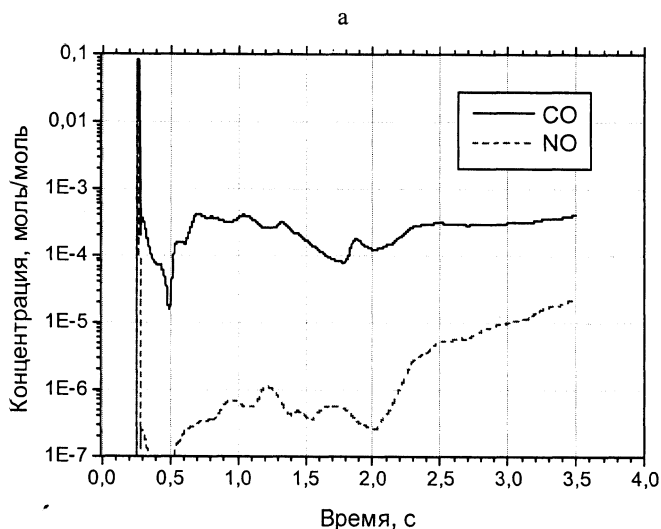


Рис. 6. Зависимость концентрации выходящих NO и CO от времени для режимов стандартной (а) и максимальной (б) мощностей горелок 2110-150 Bloom

Расчетные экологические показатели двух типов горелок, оцениваемые по концентрации CO и NO в продуктах сгорания, имеют существенные различия. В горелках 2110-150 фирмы Bloom наблюдается тенденция к незначительному увеличению содержания CO и NO с повышением мощности от режима средней к режиму максимальной мощности. В горелках BFM-G-8 Heurtey такая тенденция не наблюдается. При этом абсолютное содержание данных продуктов ниже в горелках 2110-150 фирмы Bloom при всех рассмотренных режимах.

Полученные результаты объясняются сочетанием характеристик предварительного смешения и газодинамики факела – структурой областей рециркуляции, масштабом вихрей и интенсивностью турбулентного смешения.

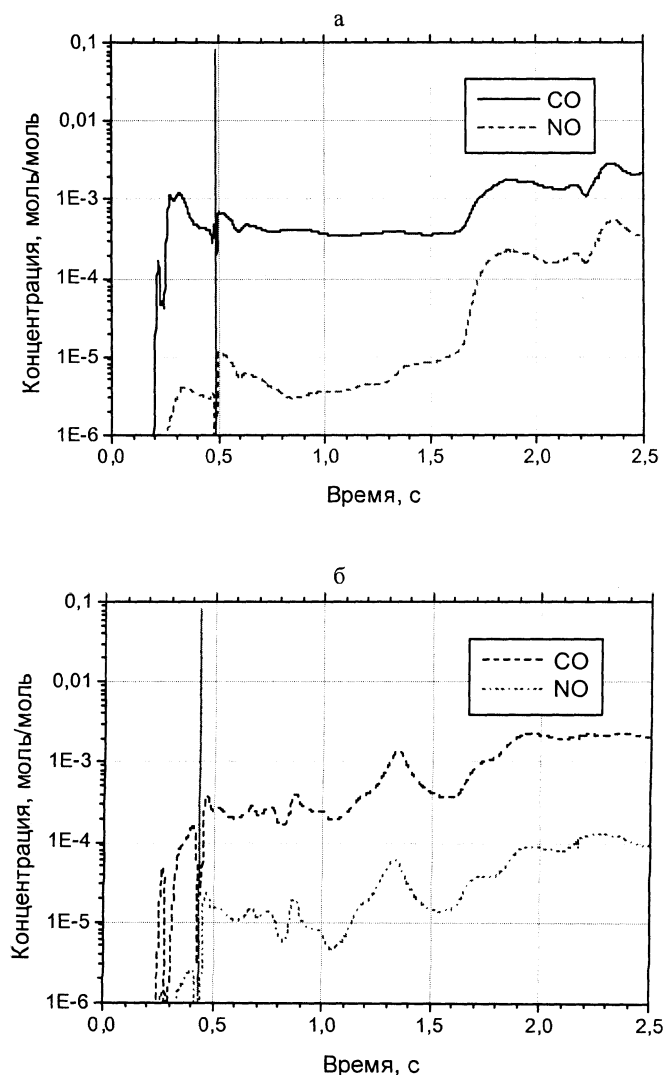


Рис. 7. Зависимость концентрации выходящих NO и CO от времени для режимов стандартной (а) и максимальной (б) мощностей горелок BFM-G-8 Heurtey

ВЫВОДЫ

Разработана и протестирована методика моделирования турбулентного факела газогорелочных устройств, позволяющая рассчитывать поля скоростей и температур пламени, а также изменение концентрации компонентов (например, CO_2 , O_2 и H_2) во времени и объеме факела.

Выполнена сравнительная оценка экологических показателей газогорелочных устройств, эксплуатируемых в нагревательной печи стана 320 РУП «Белорусский металлургический завод» с целью обоснования выбора горелок. Результаты сравнения эксплуатируемых в настоящее время горелочных устройств BFM-G-8 фирмы Heurtey с горелками 2110-150 фирмы Bloom показали конструкционные преимущества более современных горелок фирмы Bloom, обеспечивающие заметное (до 50 %) уменьшение концентрации NO и CO в продуктах сгорания в стандартных режимах эксплуатации.

1. Энергоэкологические испытания печей с шагающими балками / Б. С. Сорока, Л. И. Валь, И. А. Трусова и др. // Сталь. – 1991. – № 7. – С. 52–56.
2. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических агрегатов и процессов высшего технического уровня. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 256 с.
3. Сравнительная оценка экологических характеристик печей с механизированным подом Белорусского металлургического завода / Б. С. Сорока, В. И. Тимошпольский, В. А. Тищенко и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 1. – С. 44–53.
4. Turbulent reacting flows. – Edited by P. A. Libby and F. A. Williams. – Academic Press, 1994.
5. Borghi R. Regimes of turbulent premixed flames // Progress Energy Comb. Sci. 1988. – Vol. 14. – P. 245–292.
6. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Г. Либрович, Г. И. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980.
7. Химия горения / Под ред. У. Гардинера. – М.: Мир, 1988.
8. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
9. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. Глобальные кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений // Химическая физика. – 1998. – Т. 17. – № 9. – С. 117–129.
10. Борисов А. А., Скачков Г. И., Трошин К. Я. Кинетика воспламенения и горения простейших углеводородных топлив C1–C3 в воздушных смесях // Химическая физика. – 1999. – Т. 18. – № 9. – С. 45–53.
11. Kunugi M., Jinno H. Turbulent Diffusion Flames // Proc. 8th Symp. (Int.) on Combustion. Pittsburg, PA: The Combustion Institute, 1957. – Vol. 6. – P. 311–316.
12. Иванов Ю. В. Основы расчета и проектирования газовых горелок. – М.: Гостоптехиздат, 1962.
13. Поляцкин М. А., Меньшиков В. П. Методика расчета газовадающей части круглых горелок с периферийной и центральной подачей газа // Труды ЦКТИ. – Вып. 76. – 1967.
14. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1985.

Поступила 22.07.2003

УДК 533.601

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ЦИКЛОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ЗАКРУТКИ

Канд. техн. наук, доц. ЛЕУХИН Ю. Л., засл. деят. науки и техн. России,
действ. чл. РИА, РАЕН, МИА, докт. техн. наук, проф. САБУРОВ Э. Н.,
инж. СКАЧКОВ А. С., докт., проф. ГАРЕН В., инж. ТИДЕКЕН С.

*Архангельский государственный технический университет,
Университет прикладных наук, г. Эмден (Германия)*

С точки зрения анализа закономерностей гидродинамики и теплообмена, в кольцевых каналах с закрученным течением теплоносителя большое значение имеет исследование его микроструктуры.