

УДК 53.072

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ПО ДОЖИГАНИЮ АНОДНОГО ГАЗА**

**П.А. НЕОБЪЯВЛЯЮЩИЙ<sup>1</sup>, А.А. ДЕКТЕРЕВ<sup>2</sup>, А.А. ГАВРИЛОВ<sup>2</sup>, Ю.И. СТОРОЖЕВ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск,*

<sup>2</sup>*Институт теплофизики СО РАН, Красноярск,*

<sup>3</sup>*Красноярский государственный технический университет*

Выполнено комплексное расчетно-экспериментальное исследование горелочных устройств для дожигания анодного газа алюминиевого производства. Выбранная математическая модель процессов аэродинамики, теплообмена и газового горения идентифицировалась и адаптировалась по данным натурных замеров. На основе вычислительных экспериментов проведена оптимизация конструкции элементов системы обезвреживания и транспортировки анодного газа. Предложена и испытана новая система дожигания анодных газов электролизного производства, состоящая из модернизированного горелочного устройства и пылесадительной камеры с возможностью регулировки объема газоотсоса.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В экологически вредных выбросах алюминиевого завода доля электролизного производства составляет более 80 %. Значительная часть из них приходится на подколольные газы. Превалирующая роль в ликвидации вредного воздействия пылегазосмолистых выбросов в окружающую среду отводится горелочным устройствам, и поэтому становятся актуальными мероприятия по интенсификации процесса сжигания смолистых веществ и окиси углерода, по совершенствованию конструкций горелочных устройств.

Сложность эксплуатации горелочных устройств любого типа обусловлена нестабильностью технологических параметров электролизного производства (расход, состав, температура анодных газов, содержание смолистых веществ, разрежение в системе газоотсоса), отсутствием автоматизированных систем регулирования процесса дожигания.

По этим причинам конструкция горелки должна отвечать всему диапазону изменения параметров процесса электролиза.

Используемые на алюминиевом заводе горелки щелевого типа увеличенного диаметра (рис. 1) положительно зарекомендовали себя при работе электролизеров на “жирной” анодной массе. При переходе на “сухую” анодную массу увеличилась частота погасания горелок, что, вероятно, связано с изменившимся составом анодного газа и содержанием в нем смолистых веществ. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование и оптимизация горелочных устройств и способов сжигания анодного газа. Согласно ранее проведенным исследованиям [1, 2] количество горючего компонента в электролизерах, работающих на жирной анодной массе, достигало по углекислому газу 69,5 %. Температура газов на входе в горелки достигала 650 °С,

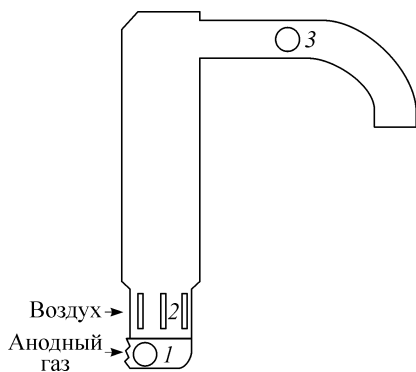


Рис. 1. Схема горелочного устройства и размещение точек измерений.

а содержание смолистых веществ —  $3 \text{ г/нм}^3$  (грамм/нормальный кубический метр при  $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{атм}} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ ). В электролизерах, работающих на сухой анодной массе, содержание СО уменьшалось до 30 %, а количество смолистых — до  $1,191 \text{ г/нм}^3$ .

Проведенные экспериментальные измерения теплотехнических параметров и газового состава на входе и выходе из горелок показали, что горелочные устройства электролизеров, расположенные на разном удалении от источника разрежения работают в различных условиях (рис. 2). Для предотвращения этого необходимо выравнивать объемы газоотсоса от горелочных устройств и регулировать расход воздуха, поступающего в горелки. О недостаточно качественном смешении в горелках анодного газа и воздуха свидетельствует тот факт, что температура газового потока в гусаке 3 в ряде горелок выше, чем в факеле 2.

Исследования горелочных устройств выявили необходимость их модернизации или разработки новых устройств и способов сжигания анодного газа. Для эффективной работы горелочных устройств требуется выполнение мероприятий по улучшению смешения анодного газа и воздуха, повышению температурного уровня в горелке, по стабилизации процесса горения, регулированию расхода воздуха и объема газоотсоса, уменьшению сопротивления пылеулавливающей камеры.

В настоящей работе при исследовании режимов работы горелки и анализе вариантов ее возможной реконструкции использовался пакет компьютерных программ “σFlow” [1]. Пакет программ позволяет рассчитывать пространственные стационарные и нестационарные ламинарные и турбулентные течения, процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей, химические реакции в потоке, горение газообразного, жидкого и твердого топлива, конвективный, радиационный теплообмен и процессы теплопроводности, движение дисперсной фазы (твердые частицы, капли) в потоке газа, процессы сушки, пиролиза и горения частиц дисперсной фазы.

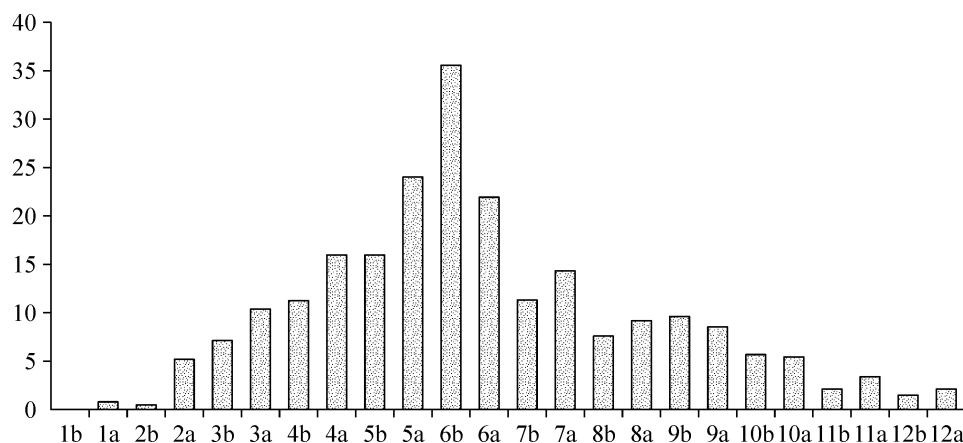


Рис. 2. Разрежение в горелках одного звена электролизного корпуса.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В качестве математической модели для описания процессов в горелочном устройстве была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. В рассматриваемой задаче течение газа считается установившимся, поэтому все уравнения записываются в стационарной постановке. Искомыми независимыми переменными являются три компоненты скорости  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , давление  $p$ , энтальпия  $h$ , концентрации газовых компонент  $Y_m$  и характеристики турбулентности  $k$  и  $\epsilon$ . Предполагалось, что электролизные газы состоят из  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ . Модель включает следующие уравнения:

– неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

– баланса количества движения по каждой из трех осей координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{ux}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{uy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{uz}}{\partial z}, \\ \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{vx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{vy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{vz}}{\partial z}, \\ \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{wz}}{\partial z} + \rho g, \end{aligned} \quad (2)$$

– переноса концентрации компонент:

$$\frac{\partial(\rho u Y_m)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Y_m)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w Y_m)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial Y_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial Y_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial Y_m}{\partial z} \right) + S_m, \quad (3)$$

$$m = 1, \dots, N$$

– переноса энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uh)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vh)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wh)}{\partial z} &= \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu C_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu C_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu C_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_{ch} + S_R, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность газа,  $Pr$  — число Прандтля,  $Sc$  — число Шмидта,  $C_p$  — удельная теплоемкость,  $\mu$  — эффективная вязкость,  $S_m$ ,  $S_{ch}$ ,  $S_R$  — источниковые члены в уравнениях за счет изменения массы и тепла в процессе реагирования и притока тепла за счет излучения соответственно.

Составляющие тензора вязких напряжений  $\tau_{ij}$  находятся по соотношениям:

$$\begin{aligned} \tau_{ux} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{vy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{wz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \tau_{uy} &= \tau_{vx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{vz} = \tau_{wy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \quad \tau_{uz} = \tau_{wx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Плотность и давление связаны уравнением состояния

$$\rho = p_0 / \left( RT \sum_{m=1}^N \frac{Y_m}{M_m} \right), \quad (6)$$

где  $p_0 = 101325$  Па — заданное статическое давление,  $M_m$  — молярная масса  $m$ -го компонента,  $R = 8314,4$  Дж/(кмоль К) — универсальная газовая постоянная,  $T$  — температура газа. Температура смеси  $T$  в каждой точке поля течения получается из известных локальных значений энтальпии и состава смеси

$$h = \sum_{m=1}^N h_m(T) Y_m, \quad (7)$$

где энтальпия компонент  $h_m(T)$  представлена в виде полиномов 5-й степени от температуры.

Для описания турбулентных характеристик течения используется модифицированная  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности для высоких чисел Рейнольдса. Уравнения, которые определяют кинетическую энергию турбулентности и скорость ее диссипации для  $k$ - $\varepsilon$ -модели, имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wk)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G - \rho \varepsilon, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon}{k}. \end{aligned} \quad (9)$$

Эмпирические константы  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $C_1 = 1,43$ ,  $C_2 = 1,92$  взяты из работы [3]. Эти константы проверены для широкого класса изотермических течений ( $G$  — скорость генерации турбулентности).

$$G = \tau_{ux} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{uy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{uz} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{vx} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{vy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{vz} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{wx} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{wy} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{wz} \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Эффективная вязкость определяется суммой молекулярной и турбулентной вязкости:

$$\mu = \mu_{\text{mol}} + C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Процесс теплообмена в горелках представляет собой сложное радиационно-конвективное взаимодействие между газовой средой и поверхностями в условиях значительной неизотермичности, сложной аэродинамики и горения топлива. Высокий температурный уровень газовой среды и поверхностей обуславливает необходимость учета радиационного теплообмена. Решение уравнения переноса лучистой энергии ( $E_r$ ) базируется на P1 [4] аппроксимации метода сферических гармоник для серой среды. Достоинством этого метода является его легкая

совместимость с методами расчета аэродинамики и теплопереноса, реализованными на криволинейных сетках.

$$\alpha_g E_r = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{1}{3\alpha_g} \frac{\partial E_r}{\partial x_k} \right) + \sigma_0 \alpha_g T^4. \quad (10)$$

Источниковые члены в виде тепловых потоков за счет радиационного теплообмена для газовой компоненты имеют вид

$$S_R = 4\alpha_g (\sigma_0 T^4 - E_r). \quad (11)$$

Коэффициенты поглощения газа  $\alpha_g$  вычисляются по модели суммы серых газов.

Расчет химической кинетики горения газового топлива основан на использовании глобальных необратимых реакций между горючим и окислителем. Скорость горения  $i$ -го реагента в этой модели определяется соотношением Аррениусовского типа

$$S_{i,\text{ch}} = -A_i Y_i^{v_i} Y_{OX}^{v_{ox}} T^\beta e^{-E_a/RT}, \quad (12)$$

где  $Y_i$ ,  $S_{i,\text{ch}}$  — концентрация и скорость реакции  $i$ -го реагента,  $A_i$ ,  $E_a$  — предэкспоненциальный множитель и энергия активации реакции соответственно, степени  $v_i$ ,  $v_{ox}$ ,  $\beta$  — эмпирические константы,  $Y_{OX}$  — концентрация окислителя (кислорода). В расчетах для определения горения  $CO$  принимались следующие константы, подобранные в результате предварительного моделирования:  $A_{co} = 10^9$ ,  $v_{co} = 1,0$ ,  $v_{o_2} = 0,25$ ,  $\beta = -2$ ,  $E_{co} = 56140,0$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С учетом теории и практики сжигания газообразного топлива, опыта применения горелочных устройств для дожигания анодного газа алюминиевого производства можно сделать вывод, что повышение эффективности дожигания анодного газа возможно обеспечить улучшением аэродинамики смешения, повышением устойчивости факела и температуры горения, увеличением длительности пребывания горючих частиц в зоне горения, регулированием расхода воздуха в горелках и объема газоотсоса от горелочных устройств. Эти условия необходимо максимально полно выполнять при разработке горелочных устройств для дожигания обедненного по содержанию горючих компонентов анодного газа, получающегося в электролизерах с анодами, сформированными из “сухой” анодной массы.

Были проведены исследования ряда горелочных устройств — двух- и трехцилиндровых щелевых горелок (рис. 3) и горизонтальной горелки с тангенциальным подводом воздуха и анодного газа (рис. 4).

Во всех предлагаемых горелочных устройствах используются три типа условий для улучшения режимов дожигания газов: первый — улучшение перемешивания горючих газов и эжектируемого воздуха; второй — снижение теплотерь от горелки за счет использования изолирующих материалов; третий — подогрев воздуха, поступающего на горение. Первый тип — определяется только конструкцией горелки. Выяснение роли второго и третьего возможно на одной конструкции горелки. Оценка роли этих параметров важна, т. к. технологическая реализация как подогрева, так и покрытия изоляционными материалами усложняют конструкцию горелки, снижают ее надежность, ухудшают обслуживание. Для выяснения характера

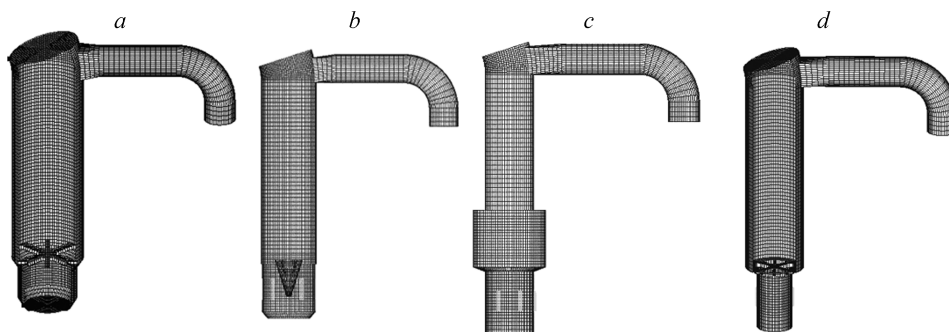


Рис. 3. Расчетная сетка горелок: базовой с узкими щелями, подогревом воздуха и решеткой (а), с тангенциальной закруткой воздуха и конусом (b), трехцилиндровой (c) и двухцилиндровой с решеткой (d).

влияния этих параметров на режим дожигания использовалась стандартная щелевая горелка с полной изоляцией стенок (адиабатическая стенка), с частичной изоляцией и без нее. Температура эжектируемого воздуха варьировалась в диапазоне  $20 \div 400$  °С.

Чтобы исследовать влияние конструкции горелки на перемешивание горючих газов и эжектируемого воздуха, проведено варьирование диаметров горелок и ширины щелей, а также моделирование твердых тел (конусная вставка и керамическая решетка), играющих роль смесителя и стабилизатора горения.

Анализ проводился по интегральным параметрам: температуре в факеле и на выходе из горелки, уровню дожигания анодных газов, тепловым потокам от горелки. При этом рассматривались три режима горения с различными стехиометрическими соотношениями воздух–топливо  $\alpha = 1,2; 2,0; 5$ .

Результаты моделирования показали, что основным фактором, влияющим на эффективность работы горелочного устройства, является соблюдение необходимого стехиометрического соотношения воздух–топливо. При невыполнении этого фактора горелочное устройство любой конструкции будет работать неэффективно. Футерование горелки приводит к повышению температуры на выходе из нее на  $20\text{--}50^\circ$  (при адиабатической изоляции горелки температура на выходе может повыситься до  $150^\circ$ ). Максимальная температура в факеле возрастает в этом же диапазоне, хотя тепловой поток на стенке горелки изменяется в пределах 25 %. Большого эффекта при футеровании горелки, по-видимому, не получить. При использовании футеровочных материалов существенно усложняется конструкция горелки, повышается ее стоимость и снижается надежность.

Использование подачи подогретого воздуха приводит к стабилизации горения и увеличению температуры в факеле и на выходе из горелки, что сопровождается лучшим дожиганием горючих компонентов. При этом увеличение температуры воздуха до  $200^\circ\text{C}$ , а это, по-видимому, достижимо для нефутерованных горелок в режимах работы с небольшими избытками воздуха, приводит к увеличению температуры на  $70\text{--}100$  °С. Хотя использование системы с естественным подогревом воздуха и усложняет конструкцию горелки, но зато не снижает ее надежности.

Исследование влияния конструкции горелок на режимы дожигания газов показало, что при изменении диаметра щелевой горелки с 250 до 400 мм повышается

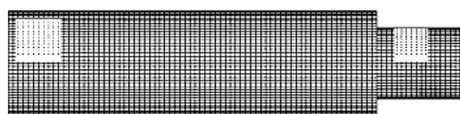


Рис. 4. Горизонтальная горелка с тангенциальным подводом газов и подогревом воздуха. Расчетная сетка.

эффективность дожигания газов. Влияние изменения ширины щелей монотонно. Данные моделирования показывают, что наилучшая интенсивность горения наблюдается при использовании узких щелей. Это связано с повышением проникающей способности воздушных струй в горелку при сохранении поперечной площади взаимодействия топлива и окислителя. При этом происходит возрастание перепада давления на горелке, что увеличивает характерный уровень необходимого разряжения перед горелкой при стехиометрических параметрах воздушно-топливной смеси, а также повышает уровень стабильности горения. Однако на практике сильное заужение щелей может приводить к их зарастанию пылевыми отложениями.

Использование турбулизаторов потока в виде решетки или тел с плохообтекаемой формой приводит к интенсификации смешения газов. Но если ввод газов и воздуха в горелку способствует интенсивному смешению, то необходимость в дополнительных турбулизаторах отсутствует. Однако введение постороннего тела в горелку может носить роль стабилизатора горения за счет выполнения функции источника зажигания.

Из предложенных вариантов наиболее эффективными конструкциями горелочных устройств являются модифицированные варианты базовой горелки, используемой на алюминиевом заводе, и тангенциальная горизонтальная горелка.

Модифицированная базовая горелка представляет собой горелку с узкими щелями, подогревом воздуха и решеткой (рис. 5). Уменьшение ширины щелей в ней по сравнению с базовым вариантом приводит к существенному снижению количества СО на выходе и увеличению высокотемпературной зоны, и это способствует более интенсивному выгоранию смолистых веществ. Дальнейшее улучшение режимов работы горелки достигается с помощью установки экрана для подогрева воздуха и решетки, все это способствует стабилизации режима горения. Модифицированный вариант горелки обладает простой конструкцией устройства, удобством в эксплуатации и надежностью.

Горизонтальная горелка безусловно интересна, поскольку она может совмещать в себе функцию дожигания и осаждения пыли, но для ее реализации требуются дополнительные исследования и соответствующая специальная привязка к конструкции электролизеров. Горелка имеет хорошие объективные показатели по всем рассмотренным параметрам. Ее можно использовать для дожигания анодных газов одного электролизера, а также группы электролизеров, например, одного полузвена при организации централизованного дожигания.

Для обеспечения эффективной работы горелочного устройства необходимо соблюдение стехиометрического соотношения воздух–топливо при  $\alpha = 2$ . Для этого необходимо выравнивание объемов газоотсоса от горелочных устройств и регулирование расходов воздуха, поступающего в них (рис. 5).

При существующей схеме газоудаления, включающей сеть собирающих газы подкорпусных газоходов, невозможно создать одинаковые условия работы для всех горелочных устройств.

Неэффективный газоотсос через горелки приводит к завышенным расходам газа на звеньях горелок, расположенных вблизи к сборному газоходу, и поэтому на дальних звеньях не хватает разрежения для поддержания работоспособности крайних горелок. Возникает необходимость локального регулирования сопротивления газоходных трасс в области каждого горелочного устройства. Для этих целей было предложено совместить пылесадительную камеру с устройством выравнивания объема газоотсоса, а именно — установить шиберную заслонку на входе в цилиндр меньшего радиуса камеры. Для определения эффективности

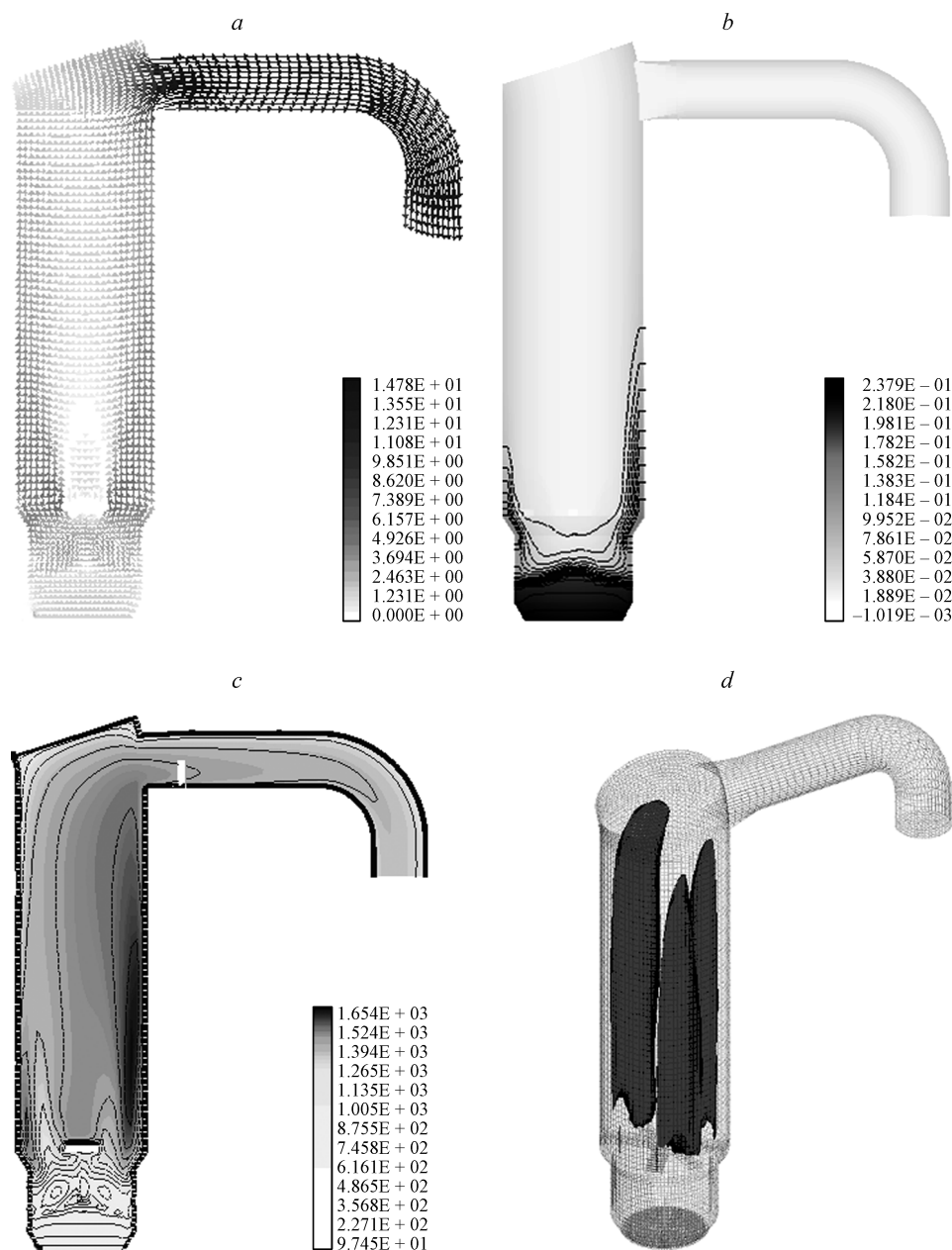


Рис. 5. Визуализация результатов моделирования модифицированной горелки ( $\alpha = 1,2$ ): картина течения газов (a), поле концентрации CO (b), распределение температуры К (c) изоповерхность температуры 1500 К (d).

предложенного устройства проводилось математическое моделирование. При этом рассматривались различные варианты конструкции пылесадительной камеры. Запыленный газ при моделировании представлялся слабозапыленным потоком, в котором присутствуют две пылевые фракции 20 и 50 мкм. По режимам работы горелок рассматривались варианты с расходами газа 91, 130, 180 и 300  $\text{нм}^3/\text{ч}$  (нормальный кубический метр в час при  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{атм}} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ ).

Результаты моделирования пылесадительной камеры показали, что она позволяет осаждать около 60–70 % частиц фракций менее 20 мкм. Исследованные конструкции камеры не приводят к существенным изменениям режима осаждения.



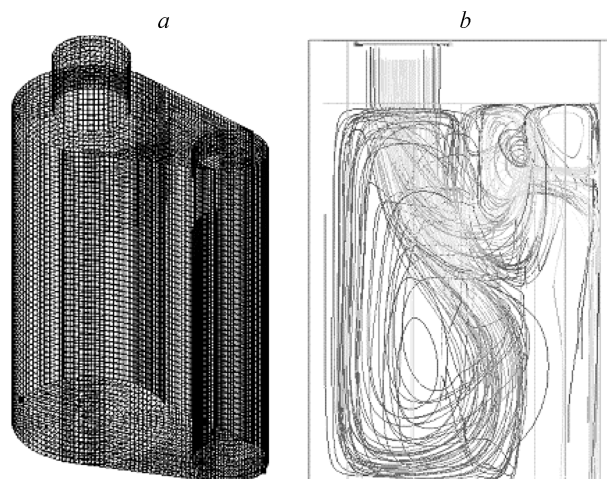


Рис. 6. Расчетная сетка и геометрия пылеосадительной камеры (а), траектории частиц  $d = 20$  мкм в камере с шибером (b).

Регулирование газоотсоса в камере не приводит к ухудшению пылеосаждения. Для производства рекомендуется модификация существующей пылеосадительной камеры с установкой шиберной заслонки для выравнивания газоотсоса в системе камера–горелочное устройство (рис. 6).

Для определения эффективности работы системы дожигания анодных газов в реальных условиях было предложено изготовить и установить на опытном полузвене электролизеров модифицированную горелку с пылеосадительными камерами новой конструкции.

#### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

В январе 2005 года было проведено экспериментальное исследование работы новой системы дожигания анодных газов (СДАГ) электролизного производства. СДАГ состоит из горелочного устройства и пылеосадительной камеры с регулируемой заслонкой.

Анализ работы СДАГ проводился в сравнении с рядовой системой дожигания, используемой на алюминиевом заводе. Сравнивались опытное полузвено и стандартное звено–свидетель.

Для выявления параметров работы СДАГ была проведена их настройка и выполнены экспериментальные измерения их теплотехнических параметров и газового состава на спусках газоходов.

Выявлено, что при одинаковом разрежении в начале газоходных трасс, 763 Па — опытное звено и 761 Па — сопоставительное звено, расходы на спусках опытного звена варьировались от 322 до 530  $\text{нм}^3/\text{ч}$ , на сопоставительных в диапазоне 306–640  $\text{нм}^3/\text{ч}$  при среднем уровне расхода 419  $\text{нм}^3/\text{ч}$  на опытных горелках и соответственно 475  $\text{нм}^3/\text{ч}$  на сопоставительных. Температуры за горелочными устройствами для опытных горелок варьировались от 320 до 805 °С, на сопоставительных — от 220 до 684 °С. При этом количество СО в уходящих газах в звене опытных горелок было в три раза ниже, чем в звене со стандартными щелевыми горелками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Литвинцев К.Ю. Использование программы  $\sigma$ Flow для численного исследования технологических объектов // Вычислительные технологии. — 2003. — Т. 8, ч. 1. — С. 250–255.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
3. Андерсон Дж., Таннехилл Р., Плетчер. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. — М.: Мир, 1990. — Т. 1-2. — 726 с.
4. Siegel R., Howell J. R. Thermal Radiation Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation. — Washington D.C. — 1992.

*Статья поступила в редакцию 2 октября 2006 г.*