

УДК 66-9

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-80-90>

Научная статья

Research article



Повышение эффективности и моделирование использования камеры дожигания в печи Ванюкова

В.А. Кирсанов¹, Ю.Ф. Побережный¹, Н.Г. Михайлов¹, М.М. Сладков², С.Н. Готенко²

¹ Уральский научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых

Россия, 620063, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87

² Среднеуральский медеплавильный завод

Россия, 623280, Свердловская обл., г. Ревда, ул. Среднеуральская, 1

✉ Николай Григорьевич Михайлов (Mikhaylov_NG@umbr.ru)

Аннотация: В исследуемом процессе повышения эффективности использования камеры дожигания в печи Ванюкова изучены различные эксплуатационные варианты работы печи и камеры, найдены режимы оптимального окисления и дожигания серы, выявлены способы снижения настылеобразования. Проведены измерения и анализ отходящих газов. Определен состав пыли. По результатам выполненных расчетов применяли ряд упрощений и допущений, позволяющих представлять движение газов, термодинамические процессы, профиль скоростей, области взаимодействия. Некоторые варианты термодинамических расчетов взаимопроникающих встречных струй построены на гипотезах, заимствованных из теории теплообмена в смешивающих аппаратах. Представлены экспериментальные результаты численного моделирования и варианты некоторых прогнозных симуляций, происходящих в камере дожигания печи Ванюкова. Проведены замеры параметров, построены графики аэродинамических характеристик фурм при среднем значении подачи кислорода в пространство камеры дожигания не более 2500 н.м³/ч (38 н.м³/т загрузки шихты). Предложены мероприятия для эффективной технологической эксплуатации. Опыт специалистов Среднеуральского медеплавильного завода, результаты испытаний и моделирования процесса способствовали выбору наилучшего распределения дутья по фурмам. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно сложных аэродинамических и термодинамических процессах, происходящих в пространстве камеры дожигания, представлении в одной проекции взаимодействий явлений динамики фурменных дутьевых потоков охлаждения, выделения тепловой энергии экзотермических реакций окисления, принудительной и естественной конвекции отходящих расплавных газов с различными температурными градиентами.

Ключевые слова: камера дожигания, повышение эффективности, моделирование, процесс Ванюкова.

Для цитирования: Кирсанов В.А., Побережный Ю.Ф., Михайлов Н.Г., Сладков М.М., Готенко С.Н. Повышение эффективности и моделирование использования камеры дожигания в печи Ванюкова. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(1):80–90. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-80-90>

Enhancing efficiency and modeling the operation of the afterburning chamber in the Vanyukov furnace

V.A. Kirsanov¹, Yu.F. Poberezhny¹, N.G. Mikhailov¹, M.M. Sladkov², S.N. Gotenko²

¹ Ural Research and Design Institute of Mining Processing, Metallurgy, Chemistry, Standardization
87 Khokhryakov Str., Ekaterinburg 620063, Russia

² Sredneuralsky Copper Smeltery

1 Sredneuralskaya Str., Revda 623280, Russia

✉ Nikolai G. Mikhailov (Mikhaylov_NG@umbr.ru)

Abstract: This study investigates the process of enhancing the efficiency of the afterburning chamber in the Vanyukov furnace. Various operational modes of the furnace and the chamber were analyzed to identify optimal conditions for sulfur oxidation and afterburning, as well as methods for reducing accretions. Measurements and analyses of off-gas compositions were conducted, and the dust content was determined.

Simplifications and assumptions were applied in the calculations, enabling the modeling of gas flow, thermodynamic processes, velocity profiles, and interaction zones. Some thermodynamic calculations of counter-penetrating gas jets were based on hypotheses derived from heat exchange theories in mixing devices. Experimental results of numerical modeling and predictive simulations within the afterburning chamber are presented. Parameters were measured, and aerodynamic characteristics of the tuyeres were charted at an average oxygen supply to the chamber of no more than 2500 n.m³/h (38 n.m³ per ton of batch load). Recommendations for effective technological operations were proposed. The expertise of specialists from the Sredneuralsk Copper Smelter, along with the results of trials and process modeling, facilitated the selection of the optimal tuyere air distribution. The findings reveal the complexity of aerodynamic and thermodynamic processes occurring within the afterburning chamber. These include interactions between tuyere cooling airflows, heat release from exothermic oxidation reactions, and forced and natural convection of off-gases with varying temperature gradients, all visualized within a single projection.

Keywords: afterburning chamber, improving efficiency, modeling, Vanyukov process.

For citation: Kirsanov V.A., Poberezhny Yu.F., Mikhailov N.G., Sladkov M.M., Gotenko S.N. Enhancing efficiency and modeling the operation of the afterburning chamber in the Vanyukov furnace. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(1):80–90. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-80-90>

Введение

Отечественная технология плавки — процесс Ванюкова, используемый для переработки сульфидно-медных концентратов, — выгодно отличается от зарубежных аналогов высокой удельной производительностью, технологической гибкостью процесса, простотой и надежностью металлургического аппарата, низкими капитальными и эксплуатационными затратами. Технологию плавки в общем возможно охарактеризовать как полуавтогенный процесс [1–3].

Состав шихты в период испытаний был следующий, мас. %: Cu — 17,97, S — 26,16, SiO — 15,28, Zn — 1,75, Pb — 0,25, прочее — 38,59.

В горизонтальном сечении печь состоит из плавления-окислительной и седиментационной зон, а в вертикальном — из надслоевой, надфурменной и подфурменной. Печь в разрезе представляет собой прямоугольно-трапециевидный аппарат, в который дутье поступает через фурмы. Шихтовые материалы через загрузочные устройства подаются в рабочее пространство агрегата. На первой стадии обработки преобладают нагрев, окисление и плавление шихтовых материалов [4]. Характер процесса сильно зависит от химического, минерального и гранулометрического составов шихты [5]. В надфурменной зоне протекают процессы плавления, растворения тугоплавких компонентов, окисления сульфидов, укрупнения капель штейна [6–8]. Окисление отходящих газов происходит в камере дожигания, где установлены четыре фурмы.

Вопросы, касающиеся повышения эффективности и моделирования использования камеры дожигания в печи Ванюкова, будут рассмотрены далее подробно, поскольку повышение эксплуатационной энергетической эффективности имеет практическое и теоретическое значение [9].

Методика исследования

Методика проведения работ по определению оптимальных режимов подачи дутья на фурменный ряд камеры дожигания и оптимизации процесса дожигания серы была разделена на практическую и методологическую части с элементами визуализационного представления.

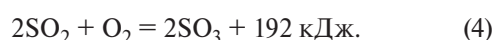
В методологической части по результатам проведенных расчетов применяли ряд упрощений и допущений, позволяющих представлять движение газов, профиль скоростей [10], тепловые процессы, поверхностные зоны взаимодействия. Некоторые варианты термодинамических расчетов взаимопроникающих встречных струй построены на идеях, заимствованных из теории теплообмена в смешивающих аппаратах [11; 12]. Для численных теоретических аспектов моделирования гидродинамических характеристик использовали некоторые представленные ниже формулы:

$$W_2 = [0,5gh^{-1}Ld^{-1}\gamma_0\mu(1 + \beta t)]^{0,5}, \quad (1)$$

$$Re = Wd_\phi/\nu, \quad (2)$$

где γ_0 — удельная масса газа; β — коэффициент объемного расширения газа; L — длина пространства; d — диаметр пространства; h — геометрический напор; g — ускорение силы тяжести; μ — коэффициент трения; t — температура; ν — коэффициент вязкости; W — скорость дутья; W_2 — скорость газового потока; d_ϕ — диаметр выходного отверстия фурмы; Re — безразмерный коэффициент.

При численном моделировании выделения тепловой энергии в пространстве камеры дожигания опирались на реакции сгорания серы и диоксида серы:



В целях определения тепловых процессов исследуемого пространства O_{xyz} область прохождения отходящих газов A разделили на сеточные участки $\Delta N_1, \Delta N_2, \dots, \Delta N_n$ объемами $\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_n$. Интегральная сумма для функции $f(x, y, z)$ для области A равна

$$M_n = \sum f(x_j, y_j, z_j) \Delta V_j. \quad (5)$$

Объемную область тепловых выделений энергии струйных потоков определяли как

$$\int dx \int dy \int f(x, y, z) dz, \quad (6)$$

$$a \leq x \leq b, c \leq y \leq e, m \leq z \leq n. \quad (7)$$

Практически по каждому из режимов выполняли мониторинг технологических данных и определяли состав отходящих газов. На основании балансовых показателей оценивали эффективность дожига (табл. 1).

В табл. 1 указаны следующие показатели: S_a — количество диоксида серы после камеры дожига; S_b — содержание серы в пыли; $S_{ш}$ — доля серы в шихтовых материалах; K_b — количество кислоро-

да после камеры дожига; K_d — количество кислорода, поступающего в камеру дожига.

В целях определения эффективности дожига фиксировали параметры дутья кислорода и газа на фурменных рядах печи. Подача кислорода на дожигание осуществлялась с расходом не более 2500 н.м³/ч (38 н.м³/т загрузки). Параметры работы определяли по показаниям измерительных приборов. Для полноценного анализа использовали данные, представленные в рапортах информационной системы по часовым и сменным показателям работы печи. Учитывали информацию по составу штейна, шлака, пыли. Анализировали состав отходящих газов.

Результаты и их обсуждение

В исследуемом процессе движения газов, несмотря на наличие термических и газодинамических неоднородностей, рассматривали особенности эксплуатации камеры дожига и динамического воздействия струй, истекающих из фурм печи. В результате изучены различные эксплуатационные варианты работы печи и камеры дожига, найдены режимы оптимального окисления, пути повышения эффективности снижения настылеобразования. Схематичное представление фурменного ряда изображено на рис. 1.

В процессе испытаний давление кислорода на фурму регулировали запорно-регулирующей арматурой, фиксируя при этом показываемое значение на установленном манометре, а также расход по показаниям информационной системы. Полученные характеристики представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Полученные и представленные характеристики фурм позволяют выставить расход кислорода через каждую фурму индивидуально в различных

Таблица 1. Оценка полноты сжигания

Table. 1. Combustion efficiency assessment

Режим	$S_{ш}$	S_a	S_b	K_b	K_d	Эффект
Базовый	const	↑	↑	↑	↑	
1	const	↑	↓	↑	↑	+
2	const	↓	↑	↓	↓	–
3	const	↑	↓	↑	↑	+
4	const	↓	↑	↑	↓	–
Примечание. ↑ – увеличение, ↓ – уменьшение, ↑ – базовые значения, «+» или «–» – достижение эффективности дожига.						



Рис. 1. Фурмы камеры дожига

Fig. 1. Afterburning chamber tuyeres

Таблица 2. Расчетные скорости дутьевых режимов

Table. 2. Calculated blast velocity modes

Правая сторона камеры дожигания					Левая сторона камеры дожигания						
Фурма 1			Фурма 2			Фурма 3			Фурма 4		
W, м/с	Re, 10 ⁴		W, м/с	Re, 10 ⁴		W, м/с	Re, 10 ⁴		W, м/с	Re, 10 ⁴	
102,1	26—67	min	93,8	24—60	min	74,1	19—60	min	81,66	21—61	min
124,3			105,9			93,8			102,83		
142,2			118,0			110,4			115,69		
155,0			133,1			128,5			134,59		
166,3			143,7			139,1			146,69		
189,0			163,3			158,8			166,35		
211,7	max	max	181,5	max	max	177,7	max	max	181,47	max	max
242,7			196,6			196,6			201,13		
264,6			219,3			214,7			219,27		
			235,9			234,4			240,45		

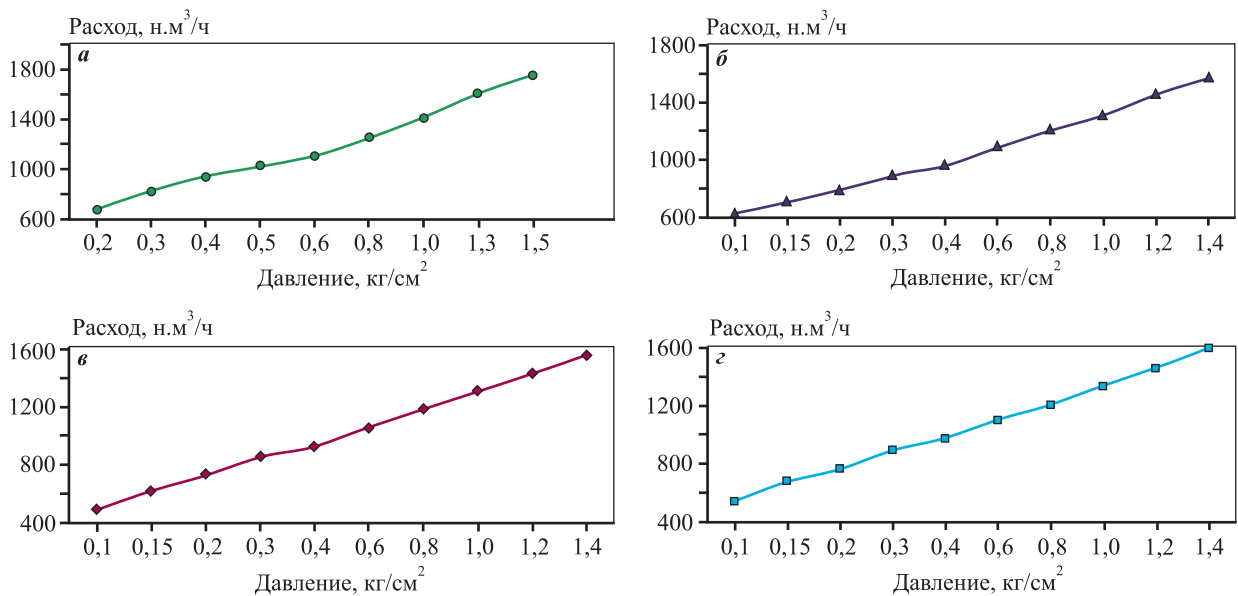


Рис. 2. Зависимости расхода кислорода от давления

а – левая сторона камеры дожигания, фурма 1; б – левая сторона камеры дожигания, фурма 2;
в – правая сторона камеры дожигания, фурма 3; г – правая сторона камеры дожигания, фурма 4

Fig. 2. Oxygen flow rate as a function of pressure

а – left side of the afterburning chamber, tuyere 1; б – left side of the afterburning chamber, tuyere 2;
в – right side of the afterburning chamber, tuyere 3; г – right side of the afterburning chamber, tuyere 4

пропорциях, сохраняя при этом ориентировочный общий расход кислорода на камеру дожигания в зависимости от загрузки печи.

Рассматривая более подробно подачу дутья через фурмы камеры дожигания, можно говорить, что вследствие турбулентности свободная струя смешивается с окружающей средой по мере удаления от источника. В струе возникает свободный

пограничный слой, расширяемый от сопла. При этом основное смешивание происходит, начиная с пограничного слоя. В результате перестройки скорости в струе внутри контура в поперечном сечении формируются вихревые области. Иными словами, наиболее активной областью взаимодействия будет место столкновения струй. Это интерпретируется тем, что скорости встречных струй

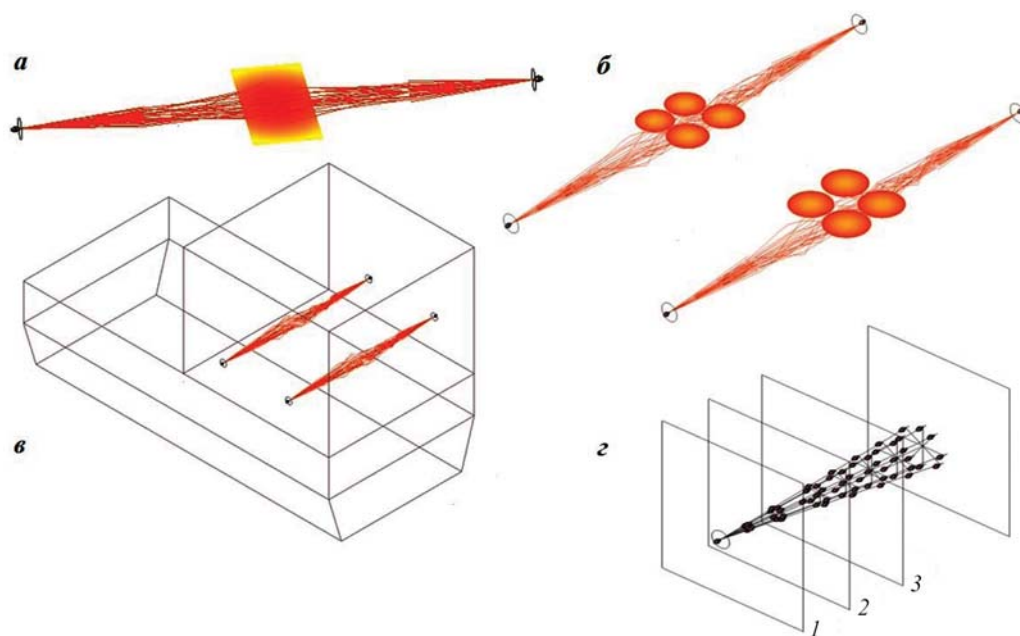


Рис. 3. Структуры вихревого соударения

a – термическая область вихревого соударения; *б* – термическая структура вихревого соударения; *в* – свободные турбулентные струи в пространстве камеры дожигания; *г* – участки свободной турбулентной струи: ламинарный (1), переходной (2) и свободный турбулентный (3)

Fig. 3. Vortex collision structures

a – thermal zone of vortex collision; *б* – thermal structure of vortex collision; *в* – free turbulent jets in the afterburning chamber space; *г* – sections of a free turbulent jet: laminar (1), transitional (2), fully turbulent (3)

аналогичны, а зона ламинарного течения переходит в турбулентную [13–15]. На рис. 3 при относительно одинаковых скоростях встречных соударяющихся струй представлены структуры вихревого соударения.

В любом случае из-за особенностей движения уходящих газов и неравномерности, зависящей от подключения фурменных рядов печи и ее геометрии, моделирование струйного потока в камере дожигания будет представлять определенный частный случай [16–26].

Величину концентраций тепловой энергии в областях взаимодействия струйных потоков считали как для процессов окисления серы, так и для сжигания природного газа. При этом принимали, что число Маха для струй в процессе окисления серы не превышает значения 0,52.

Расчетные поверхностные участки определяли для областей соударения струй и струйного потока. В границах поверхностной зоны взаимодействия строили фигуру, ось которой совпадала с осью рассматриваемых областей. Используя полиномиальное распределение, предполагали, что в поверхностной зоне взаимодействия вероятно сжигается определенное количество серы.

В результате получили следующие объемные

теплонпряжения: 500–1500 кВт — для процессов окисления, 1100–2200 кВт — для сжигания природного газа. Значения по нормативному теплонпряжению в этих процессах принимали для объемного пространства камеры дожигания, фактическую теплонпряженность определяли на основании построенных поверхностных зон взаимодействия. Полученные результаты сведены в табл. 3.

На рис. 4 предложены примеры представления векторов скоростей в объемных разрезах печи вблизи осевого сечения расплава и камеры дожигания.

Таблица 3. Оценка концентраций тепловой энергии

Table. 3. Assessment of thermal energy concentrations

Процесс	Теплонпряженность, кВт/м ³		Коэффициент локальной теплонпряженности [26]
	нормативная	фактическая	
Окисление серы	40	1500	37
Сжигание природного газа	65	2200	34

Как видно, характер газовых потоков печных газов в трехмерном представлении включает многообразие зон циркуляции. Перестройка скорости приводит к тому, что в области взаимодействия струя с наиболее высоким импульсом и большей скоростью истечения перестраивает встречную струю. Происходит смещение, начиная с турбулентного пограничного слоя, возникает струйное разделение. Потоки, огибающие перестроенную струю, получают турбулентные свойства и менее низкую скорость, векторно-направленную к границам пространства камеры дожигания. Учитывая динамику встречных струй, можно говорить о том, что изменение скоростных характеристик не толь-

ко будет приводить к изменению зоны теплового взаимодействия, но и окажет влияние на поток уходящих газов. Установлено, что строение зоны соударения зависит от конструктивно-режимного параметра крутки струйного потока [26; 27].

Понимание работы встречных соударяющихся струй возможно использовать в рамках чисток и предотвращения активного настылеобразования, а также оптимизации процессов окисления серы. Параметры отходящих газов представлены в табл. 4.

Наблюдения показывают, что скорость зарастания фурм зависит от внешней среды, давления дутья, а также направления движения и состава

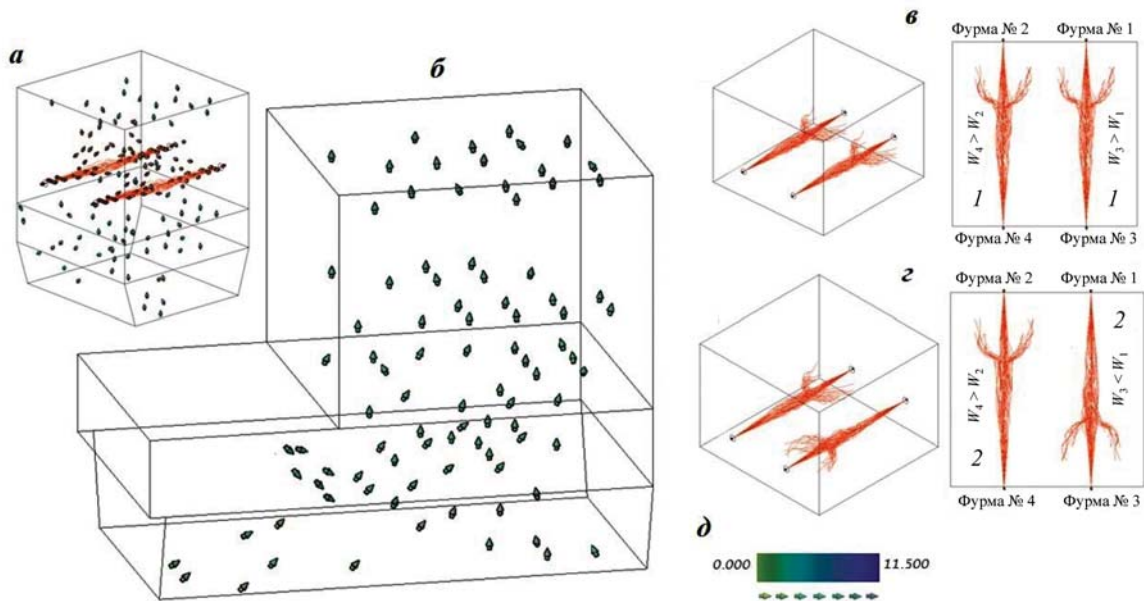


Рис. 4. Движение газов и струйный поток
а – струйный поток и движение уходящих газов; *б* – движение расплавных газов; *в, г* – формирование структур соударения на разных струйных скоростях: *1, 2* – варианты скоростных изменений струй; *д* – шкала скорости расплавных газов, м/с
Fig. 4. Gas flow and jet stream
a – jet streams and off-gas flow; *b* – flow of high-temperature gases; *в, г* – formation of collision structures at different jet velocities: *1, 2* – variations in jet velocity; *д* – velocity scale of high-temperature gases (m/s)

Таблица 4. Параметры отходящих газов

Table. 4. Off-gas parameters

Наименование газа	Плотность газов, кг/н.м ³	Массовая доля, кг/кг	Объемная доля, н.м ³ /н.м ³
N ₂	1,25	0,0483	0,0746
CO	1,25	—	—
CO ₂	1,963	0,0768	0,0755
SO ₂	2,855	0,07087	0,479
H ₂ O	0,863	0,139	0,334
O ₂	1,427	0,027	0,0365
Примечание. Температура отходящих газов 1250 °С.			

частиц отходящих газов. Отбор пыли производили на нескольких участках газового тракта: котел-утилизатор, башня охлаждения, электрофильтр. Результаты измерения состава пыли представлены в табл. 5.

Сравнительный анализ содержания серы в пыли и шихте на разных режимах работы камеры дожигания представлен на рис. 5.

В результате проведенных испытаний выявлено, что регулирование процесса дожигания серы возможно осуществлять как количественным методом, так и качественным. Повышение поступления кислорода в камеру дожигания, до определенных пределов, увеличивает содержание диоксида серы в отходящих газах и уменьшает количество массовой доли серы в пыли.

С помощью компьютерного моделирования визуализированы различные случаи настылеобразования на одной из стенок камеры дожигания (рис. 6).

Показанные варианты настылеобразования, происходящие в процессе эксплуатации в результате спекания частиц пыли отходящих газов, влияют на работу дутьевых фурм. Заращение фурменных участков выявляют изменением давления дутья или в процессе прочистки фурм, а также визуально через открытые «ложные окна».

В процессе эксплуатации может наблюдаться самопроизвольная чистка фурм: срыв настыли происходит за счет напора самой струи. Установка одной газовой горелки в фурмы 3-го ряда на данный момент будет основным способом борьбы с настылеобразованием в рабочем пространстве камеры дожигания. В табл. 6 показано изменение объема рабочего пространства камеры дожигания при настылеобразовании.

Из приведенных в табл. 6 данных видно, что объем рабочего пространства камеры дожигания в значительной степени может уменьшаться ввиду периметрального образования настыли. Это будет приводить к изменениям траектории движения частиц отходящих газов, а также к отклонениям динамического сопротивления в ходе удаления газов, снижению эффективности окисления серы.

В целях определения наиболее эффективной эксплуатационной работы камеры дожигания при определении оптимального расхода кислорода, проходящего через ее фурмы, построении расчетных схем и подборе соотношения расходов газов проработаны несколько существующих и перспективных режимов работы камеры. В результате найден оптимальный вариант для существующей

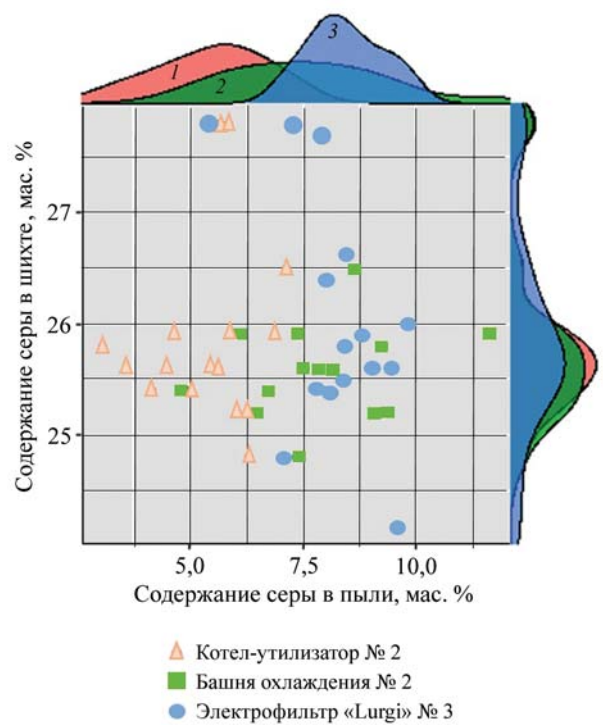


Рис. 5. Содержание серы в пыли и шихте на разных режимах работы камеры дожигания
1–3 – оценка плотности распределения содержания серы
1 – котел-утилизатор № 2; 2 – башня охлаждения № 2; 3 – электрофильтр «Lurgi» № 3

Fig. 5. Sulfur content in dust and charge under different operating modes of the afterburning chamber
1–3 – sulfur content density distribution assessment
1 – waste heat boiler No. 2; 2 – cooling tower No. 2; 3 – electrostatic precipitator “Lurgi” No. 3

Таблица 5. Состав пыли, мас. %
Table. 5. Dust composition, wt. %

Участок	Cu	S	Pb	Zn	Прочее
Башня охлаждения № 2	19,45	5,45	3,69	3,28	68,13
Котел-утилизатор № 2	18,78	7,61	4,29	3,31	66,01
Электрофильтр «Lurgi» № 3	14,84	8,43	6,93	4,65	65,15

Таблица 6. Периметральное образование настыли
Table. 6. Perimetric formation

Вариант	Объем рабочего пространства, м³	Настыль стенки, м
1	55–59	0,1–0,2
2	49–53	0,25–0,35
3	37,5–43,0	0,50–0,65
4	34,0–37,6	0,65–0,75

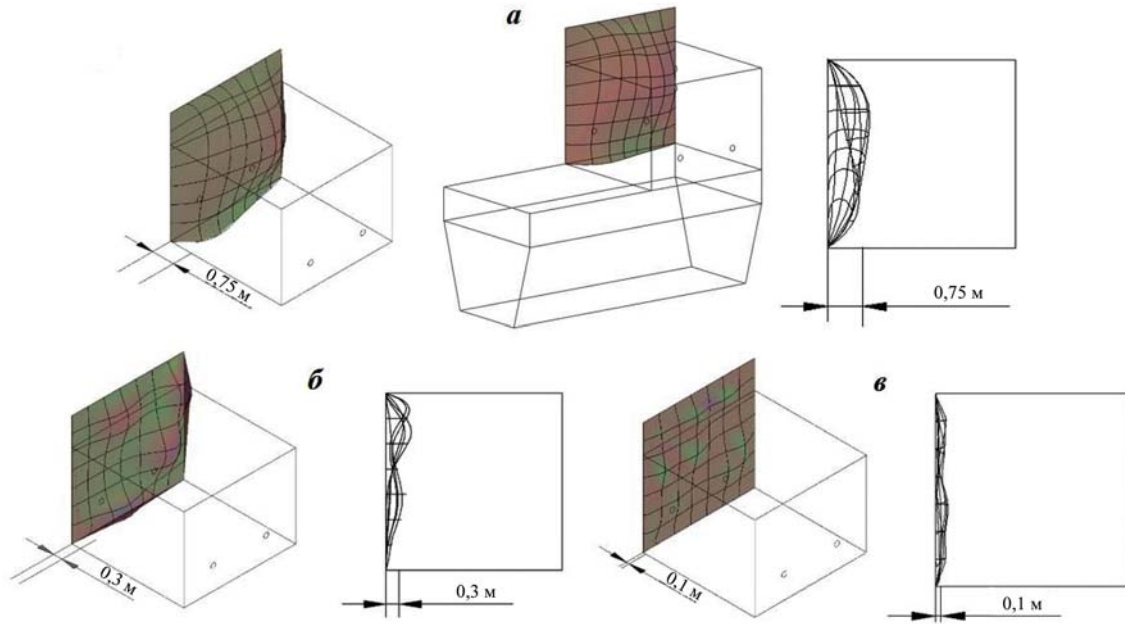


Рис. 6. Варианты настылеобразования
Толщина настыли, м: *a* – 0,75; *б* – 0,3; *в* – 0,1

Fig. 6. Variants of accretion formation
Accretion thickness, m: *a* – 0.75; *б* – 0.3; *в* – 0.1

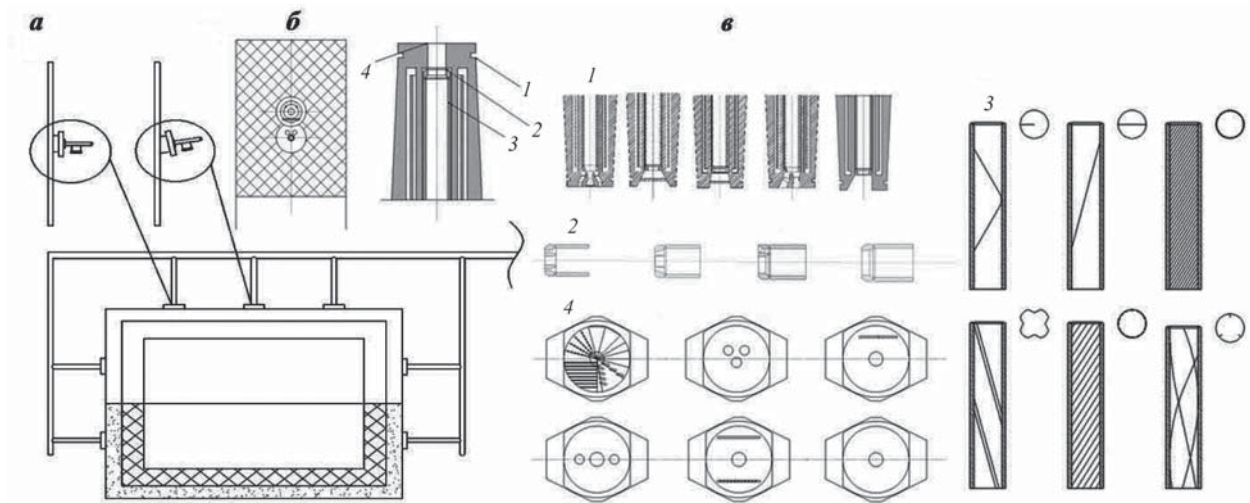


Рис. 7. Перспективные варианты направлений модернизации камеры дожигания [27–30]

a – вариант расположения фурм в камере дожигания; *б* – многоканальная фурма с двумя ярусами сопел; *в* – на участке фурмы варианты модернизации корпуса (1), втулки (2), вставок-завихрителя (3), расщепителя (4)

Fig. 7. Prospective options for modernizing the afterburning chamber [27–30]

a – arrangement of tuyeres in the afterburning chamber; *б* – multi-channel tuyere with two tiers of nozzles; *в* – modernization options for tuyere components: casing (1), sleeve (2), swirl inserts (3), and diffuser (4)

системы, отвечающий требованиям оптимального дожигания, повышения эффективности использования камеры дожигания, возрастания эффективности окисления серы. Результаты измерений на разных режимах эксплуатационной работы представлены в табл. 7.

Используя полученные результаты, представленные в табл. 7 по составу отходящих газов, можно утверждать, что равномерность оптимального окисления и дожигания серы зависит от струйного воздействия. В связи с этим предложены различные конструктивные варианты модернизации ка-

Таблица 7. Результаты измерений состава отходящих газов (мас. %) после дожигаания на разных режимах эксплуатационной работы камеры дожигаания

Table. 7. Off-gas composition measurements (wt.%) after afterburning in different operating modes of the afterburning chamber

Номер измерения	Первый режим			Второй режим		
	Количество кислорода, поступающего в камеру дожигания, н.м ³ /ч					
	2300			2500		
	SO ₂	CO ₂	O ₂	SO ₂	CO ₂	O ₂
1	38,0	10,4	4,0	42,4	11,0	4,5
2	40,0	10,0	4,5	41,0	10,5	4,5
3	38,0	10,4	4,6	42,0	11,0	4,5
4	39,8	10,9	4,5	42,4	11,6	5,0
5	38,4	10,4	4,7	43,0	12,0	5,0
	Средние значения					
	38,84	10,42	4,46	42,16	11,22	4,7

меры дожигаания, представленные на рис. 7. Для более точного подтверждения эффективности модернизаций необходимо проводить дополнительные моделирования и исследования.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно сложных аэродинамических и термодинамических процессах, происходящих в пространстве камеры дожигаания. В работе использованы теории турбулентных струй и физического моделирования. Оптимизировано дутье для различных опытных режимов. Проведены замеры параметров, построены графики аэродинамических характеристик фурм при среднем значении подачи кислорода в пространство камеры дожигаания не более 2500 н.м³/ч (38 н.м³/т загрузки шихты). Осуществлены измерения газового анализа. Определен состав пыли на различных участках газового тракта: котел-утилизатор, башня охлаждения, электрофильтр. Предложены различные схемы модернизации камеры дожигаания и распределения дутья по фурмам. Установлено, что наилучшая эффективность дожигаания серы возможна за счет определенного расхода кислорода на каждую фурму без изменения общего расхода кислорода.

Предложены мероприятия по эффективной эксплуатации и минимизации настылеобразования в камере дожигаания печи Ванюкова. В рамках

реализации перспективной автоматической работы рекомендовано организовать информационный учет параметров на каждую фурму (давление/расход), осуществить установку регулирующих клапанов, позволяющих изменять расход дутья на каждую фурму без ручного регулирования, внедрить автоматическую систему управления [31].

В результате ожидаемый эффект от внедрения предложенных мероприятий и рекомендаций — это улучшение энергетической составляющей и эксплуатационной безопасности, рост производительности труда и качества управления технологическим процессом.

Список литературы/References

1. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология. М.: Теплотехник, 2005. 912 с.
2. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. М.: Теплотехник, 2004. 832 с.
3. Набойченко С.С., Агеев Н.Г., Дорошкевич А.П., Жуков В.П., Елисеев Е.И. Процессы и аппараты цветной металлургии. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2005. 700 с.
4. Сборщиков Г.С., Володин А.М., Валавин В.С. Свободная конвекция расплава в печи с барботажным слоем при его продувке через боковую фурму, установленную под уровнем слоя. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015;(2):58—68.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-2-58-68>
5. Sborshchikov G.S., Volodin A.M., Valavin V.S. Free convection of the melt in the furnace with a bubble layer during its blowing through a side tuyere established under the layer level. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;(2):58—68. (In Russ.).
6. Гофман Г.О. Металлургия меди. Свердловск: ГНТИ, 1934. 475 с.
7. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Шлаки и штейны цветной металлургии. М.: Металлургия, 1969. 408 с.
8. Vaisburd S., Berner A., Brandon D.G., Kozhakhmetov S., Kenzhaliyev E., Zhalelev R. Slags & mattes in Vanyukov's process for the extraction of copper. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2002;(33):551—559.
<https://doi.org/10.1007/s11663-002-0034-1>
9. Zhang H.L., Zhou C.Q., Bing W.U., Chen Y.M. Numerical simulation of multiphase flow in a Vanyukov furnace. *Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015;(115):457—463.
9. Ануфриев В.П., Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н.,

- Лаптева А.В. Возможности реализации углеродной политики в российских регионах. В сб: *Материалы XII Международной конференции «Российские регионы в фокусе перемен»* (16—18 ноября 2017 г.). Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2018. Ч. 2. С. 536—550.
10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
 11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
 12. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К., Филипповский Н.Ф. Теплотехника. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
 13. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 710 с.
 14. Colagrossi A., Marrone S., Colagrossi P., Le Touze D. Da Vinci's observation of turbulence: A French-Italian study aiming at numerically reproducing the physics behind one of his drawings, 500 years later. *Physics of Fluids*. 2021;(33):1—16. <https://doi.org/10.1063/5.0070984>
 15. Проданов С.А., Воронов Г.В. Особенности движения газовой среды в надфурменной зоне печи Ванюкова. В сб. докл.: *Материалы V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* (12—13 мая 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 91—98.
 16. Oliver T. Schmidt, Aaron Towne, Georgios Rigas, Tim Colonius, Guillaume A. Bres. Spectral analysis of jet turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017;(855): 953—982. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.675>
 17. Khansa Mahjoub Mohammed Merghani. Experimental study of a human-like exhaled airflow configuration and droplets dynamics in indoor environment. Paris: Universite Paris-Est Creteil Val-de-Marne, 2021. 183 p. <https://theses.hal.science/tel-04022879>
 18. Barois T., Viggiano B., Basset T., Cal R.B., Volk R. Compensation of seeding bias for particle tracking velocimetry in turbulent flows. *Physical Review Fluids*. 2023;(8):1—16. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.8.074603>
 19. Viggiano B., Basset T., Bourgoin M., Cal R.B., Chevillard L., Meneveau Ch., Volk R. Lagrangian modeling of a nonhomogeneous turbulent shear flow: Molding homogeneous and isotropic trajectories into a jet. *Physical Review Fluids*. 2024;(9):1—13. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.044604>
 20. Xincheng Zhang, Zhen Zhang, Alfonso Chinnici, Zhiwei Sun, Javen Qinfeng Shi, Graham J. Nathan, Rey C. Chin. Physics-informed data-driven unsteady Reynolds-averaged Navier—Stokes turbulence modeling for particle-laden jet flows. *Physical Review Fluids*. 2024;(36):1—23. <https://doi.org/10.1063/5.0206090>
 21. Timothy C.W. Lau, Graham J. Nathan. Influence of Stokes number on the velocity and concentration distributions in particle-laden jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014;(757):432—457. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.496>
 22. Aitor Amatriain, Corrado Gargiulo, Gonzalo Rubio. Generalized wall-modeled large eddy simulation model for industrial applications. *Physics of Fluids*. 2024;(36): 1—21. <https://doi.org/10.1063/5.0180690>
 23. Jonathan B. Freund. Nozzles, turbulence, and jet noise prediction. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019;(860):1—4. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.823>
 24. Muppidi S., Mahesh K., Direct numerical simulation of round turbulent jets in crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2007;(574):59—84. <https://doi.org/10.1017/S00222112006004034>
 25. Yu Zhou, Dewei Fan, Bingfu Zhang, Ruiying Li, Bernd R. Noack Artificial intelligence control of a turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020;(897): 1—46. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.392>
 26. Худяков П.Ю. Газодинамика и теплообмен при соударении прямоточных газовых струй: Автореф. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: УрФУ, 2013.
 27. Phoebe Kuhn. Linear modeling of coherent structures in the self-similar region of a round turbulent jet: Diss. ... Dr. Eng. Berlin: Technischen Universität Berlin, 2023. <https://doi.org/10.14279/depositonce-18798>
 28. Велькин В.И., Школьный А.В., Кириллов М.П., Ачкеев М.В., Гурин А.А. Завихритель: Патент 2321779 (РФ). 2006.
 29. Francis B.J., Joubert H., Bakker M.L., Nikolic S., Gwynn-Jones S. Lance for use in a top submerged lance furnace. WO 2017/195105. 2017.
 30. Шатохин И.М., Кузьмин А.Л. Способ циркуляционного вакуумирования жидкого металла, система и устройства для его осуществления: Патент 2213147 (РФ). 2003.
 31. Земцов Г.А., Пучков А.Е., Фролов Л.И. Фурма: Патент 2355779 (РФ). 2009.

Информация об авторах

Владимир Андреевич Кирсанов — советник ген. директора по инжинирингу Уральского научно-исследовательского и проектного института обогащения и механической обработки полезных ископаемых

(АО «Уралмеханобр»).

E-mail: Kirsanov_VA@umbr.ru

Юрий Федорович Побережный — начальник бюро инжиниринга и инноваций АО «Уралмеханобр».

E-mail: Poberezhny_YF@umbr.ru

Николай Григорьевич Михайлов — вед. инженер отдела технологического аудита АО «Уралмеханобр».

<https://orcid.org/0009-0006-2019-019X>

E-mail: Mikhaylov_NG@umbr.ru

Максим Михайлович Сладков — гл. инженер Среднеуральского медеплавильного завода (АО «СУМЗ»).

E-mail: M.Sladkov@sumz.umn.ru

Сергей Николаевич Готенко — начальник технического управления АО «СУМЗ».

E-mail: S.Gotenko@sumz.umn.ru

Information about the authors

Vladimir A. Kirsanov — Advisor to the General Director for Engineering, Ural Research and Design Institute of Mining Processing, Metallurgy, Chemistry, Standardization (JSC “Uralmekhanobr”).

E-mail: Kirsanov_VA@umbr.ru

Yuri F. Poberezhny — Head of the Bureau of Engineering and Innovation, JSC “Uralmekhanobr”.

E-mail: Poberezhny_YF@umbr.ru

Nikolai G. Mikhailov — Leading Engineer of the Technological Audit Department, JSC “Uralmekhanobr”.

<https://orcid.org/0009-0006-2019-019X>

E-mail: Mikhaylov_NG@umbr.ru

Maxim M. Sladkov — Chief Engineer of the Sredneuralsky Copper Smelter (JSC “SUMZ”).

E-mail: M.Sladkov@sumz.umn.ru

Sergey N. Gotenko — Head of the Technical Department, JSC “SUMZ”.

E-mail: S.Gotenko@sumz.umn.ru

Вклад авторов

В.А. Кирсанов — общее руководство, редактирование текста статьи.

Ю.Ф. Побережный — участие в обсуждении результатов.

Н.Г. Михайлов — обработка результатов исследования, подготовка статьи.

М.М. Сладков — ресурсное обеспечение исследования.

С.Н. Готенко — ресурсное обеспечение исследования.

Contribution of the authors

V.A. Kirsanov — general supervision, editing of the article.

Yu.F. Poberezhny — participation in the discussion of results.

N.G. Mikhailov — data processing and preparation of the article.

M.M. Sladkov — resource support for the research.

S.N. Gotenko — resource support for the research.

Статья поступила в редакцию 21.05.2024, доработана 29.10.2024, подписана в печать 31.10.2024

The article was submitted 21.05.2024, revised 29.10.2024, accepted for publication 31.10.2024