



УДК 621.745

Поступила 15.02.2015

АЭРОДИНАМИКА РОТАЦИОННЫХ КОРОТКОБАРАБАННЫХ ПЕЧЕЙ AERODYNAMICS IN SHORT DRUM-TYPE ROTARY FURNACES

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь

S. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus

Представлены результаты исследования, включая компьютерное моделирование, аэродинамики и процессов тепло-массообмена плавильных короткобарабанных печей (КБП) и варианты их модернизации, направленные на повышение интенсивности теплообменных процессов и термического к.п.д. (т.к.п.д.) печей, реализованные на практике и подтвердившие свою эффективность при эксплуатации.

Results of research of aerodynamics and a heat and mass exchange, including computer simulation, in melting the short drum-type furnaces and options of their modernization directed to intensity increase of heat exchange processes and thermal effectiveness of furnaces, realized in practice and confirmed the efficiency at operation, are given in the article.

Ключевые слова. Ротационные печи, моделирование технологических процессов, теплообмен, аэродинамика, дисперсные материалы.

Keywords. Rotary furnaces, process simulation, heat and mass exchange, aerodynamics, dispersion materials.

Ротационные (вращающиеся) печи являются агрегатами, обеспечивающими наиболее интенсивный нагрев дисперсных материалов. Широкое применение вращающихся печей в металлургии, литейном производстве, производстве строительных материалов и других отраслях объясняется значительно более высокими скоростями нагрева динамического (перемешиваемого) слоя дисперсного материала по сравнению с неподвижным слоем в стационарных камерных печах [1]. В ротационных печах передача тепла осуществляется за счет радиации (от стен печи, факела и потока горячих газов), теплопроводности (от стен печи) и конвекции (от потока горячих газов), при этом решающую роль, безусловно, играет конвективный теплообмен.

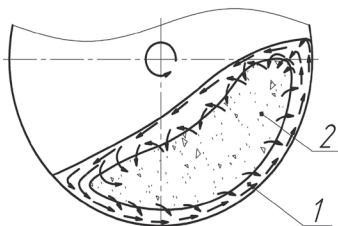


Рис. 1. Схема движения материала в ротационной печи: 1 – циркуляционная зона; 2 – скользящая зона

При вращении корпуса печи материал под действием межчастичных связей, сил внутреннего и внешнего трения занимает сегмент, соответствующий углу 125–145°. Часть слоя, увлекаемая подложкой (поверхностью футеровки корпуса печи), достигает точки отрыва (угол 90–120° к вертикали) и под действием силы тяжести скатывается (соскальзывает) по поверхности слоя. Скорость перемещения и объем материала, совершающего циркуляционное движение, определяется соотношением сил адгезии, когезии, внутреннего и внешнего трения и сил тяжести, а также скоростью вращения корпуса (рис. 1, 2).

Таким образом, образуется циркуляционный слой, интенсивно прогреваемый газами и футеровкой. Конфигурация и объем этого слоя меняются с изменением адгезионных свойств материала в процессе нагрева. При нагреве сектор, занимаемый дисперсным материалом, уменьшается, постепенно приближаясь к конфигурации, которую приобретает жидкость в подобных условиях.

Нагрев дисперсного материала в слое может быть описан параболой [2]:

$$t = t_0(h + 1)^n,$$

где t_0 – температура на поверхности слоя; h – текущая относительная толщина слоя; $n = k\alpha_v$, (α_v – объемный коэффициент теплопередачи, $\alpha_v = (1-3) \cdot 10^3$ Вт/(м³·К); k – эмпирический коэффициент, $k = (0,5-2,5) \cdot 10^{-3}$). Для дисперсных отходов $n = 0,5-4,0$.

В начальной стадии нагрева в слое отмечаются достаточно высокие градиенты температур – (до 1000–2000 К/м), что способствует быстрому его прогреву. Управляя скоростью вращения, можно изменять интенсивность перемешивания и, тем самым, интенсивность тепло- и массообмена, которая приближается к величине, характерной для печей с псевдооживленным слоем. В этих условиях коэффициент теплопередачи (α_v) достигает значения $\alpha_v = 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, что на два порядка выше, чем при нагреве неподвижного слоя.

Проницаемость слоя дисперсного материала для газового потока определяется плотностью слоя и может быть охарактеризована критерием проточности. Проточность материалов с размером частиц $d = 0,2\text{--}5,0 \text{ мм}$ (окалина, мелкая стружка, песок и т. д.) соответствует критерию проточности K_{Π} в пределах $10^5\text{--}10^7$ и соответственно коэффициенту объемной концентрации:

$$\beta = \frac{V_{\text{ч}}}{V_{\text{сл}}} \approx 0,35 - 0,65.$$

Эти параметры относятся к подвижному верхнему слою материала толщиной 30–80 мм. В общем случае интенсивность межфазного переноса для продуваемого слоя связана с размером частиц соотношением:

$$\alpha_v = \alpha(1 + 0,2\text{Bi})^{-1},$$

где α – внешний коэффициент теплообмена; $\text{Bi} = \frac{\alpha d}{\lambda}$ – критерий Био; λ – коэффициент теплопроводности материала.

При уменьшении скорости потока газов, омывающего частицы в слое, и размеров частиц турбулентность потока уменьшается ($\text{Re} \rightarrow 0$), а так как критерий Нуссельта является функцией от числа Рейнольдса:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_{\text{г}}} = f(\text{Re}),$$

то соответственно снижается и интенсивность нагрева (α). Здесь $\lambda_{\text{г}}$ – теплопроводность газов. При этом однако сохраняется высокая степень неоднородности потока, поэтому даже в глубине динамического слоя $\text{Nu} \gg \text{Nu} = f(\text{Re}_0)$. Соответственно сохраняется и концентрационный напор на реакционной поверхности частиц.

Нагрев верхнего динамического слоя материала в ротационной печи может быть рассчитан по модифицированному уравнению нестационарной теплопроводности, где вместо коэффициента теплопроводности слоя ($\lambda_{\text{сл}}$) используется бином (αd), рассчитанный для усредненных значений процесса передачи тепла для отдельных частиц продуваемого слоя. Для одномерной схемы в этом случае можно записать [3]:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{(\alpha d)}{c\rho} \frac{d^2t}{dx^2},$$

где x – высота (толщина) слоя.

Параболический закон (при $n \approx 2,5$) распределения температур в слое сохраняется, так как плотность слоя увеличивается с глубиной и соответственно уменьшается интенсивность потока газов.

Для верхней продуваемой части слоя $\alpha_v \approx 1\text{--}3 \text{ кВт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, для внутренних слоев $\alpha_v \approx 10\text{--}30 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ при тех же диаметрах $d \leq 5 \text{ мм}$.

Максимальная интенсивность нагрева дисперсного материала достигается во взвешенном состоянии (в кипящем в слое), в таких условиях время нагрева частицы, например, чешуйки окалины или песчин-



Рис. 2. Нагрев чугушной стружки в ротационной печи, ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД «ЦЕНТРОЛИТ»

ки, составляет $\sim 0,004\text{--}0,1$ с, однако на практике режим кипящего слоя используется только для моносферных материалов.

Во вращающихся печах, где имеет место механическое перемешивание материала, тепло- и массообмен зависит от соотношения толщин внешней динамической и неподвижной внутренней части слоя. Толщину продуваемого слоя можно определить по сопротивлению, которое не должно быть больше скоростного напора потока газов в печи (Δp_c). Для потока газов, движущихся со скоростью $V_r = 13\text{--}15$ м/с, можно записать:

$$\Delta p_c \leq \frac{136v_r^2 \rho_r}{273 - t}$$

Таким образом, передача тепла и интенсивность прогрева слоя материала за счет конвекции тем выше, чем выше скорость движения газа-теплоносителя, турбулентность потока и интенсивнее перемешивание самого слоя.

С точки зрения организации движения газа-теплоносителя все ротационные печи можно разделить на печи с прямоточным и печи с петлеобразным движением газов. В печах с прямоточным движением газов (в трубчатых, проходных барабанных, короткобарабанных печах) скорость потока, как правило, не превышает 10 м/с, в печах с петлеобразным движением (ротационных наклоняющихся печах) скорость потока достигает 20–25 м/с и более.

В то же время скорость движения газа-теплоносителя (V_r) на выходе из печи не должна превышать скорость витания частиц ($V_{\text{вит}}$) нагреваемого материала. Нарушение этого требования приводит к значительным потерям (уносу) материала. Это ограничение скорости движения газов и соответственно вынужденное снижение коэффициента конвективной теплопередачи ($\alpha_k = t(V_r)$) и т. к. п. д. агрегата в сушилах и обжиговых вращающихся печах проходного типа преодолевают путем увеличения времени контакта газов с нагреваемым материалом за счет увеличения длины печей: соотношение длины (L) и диаметра (D) в таких печах составляет 20–30 и более. При диаметрах 2–4 м длина таких печей достигает 50–150 м.

В литейном производстве при плавке цветных сплавов, а в последнее время и при плавке чугуна используются так называемые короткобарабанные печи (КБП). Малая длина печи при сохранении прямоточного движения газов в короткобарабанных плавильных печах приводит к тому, что т.к.п.д. таких печей снижается до 10–15%, т. е. приближается к эффективности стационарных печей отражательного типа, таким образом, практически теряются преимущества, которые дает динамический слой с точки зрения интенсификации теплообменных процессов. Кроме того, для короткобарабанных печей характерны быстрый износ футеровки на выходном конусе, неравномерный разогрев шихты по длине печи, высокий пылеунос и высокая температура отходящих газов.

Все эти недостатки требуют изыскания способов интенсификации теплообменных процессов в короткобарабанных печах, снижения пыле- и теплоуноса.

Одним из эффективных инструментов при исследовании аэродинамических и теплообменных процессов, протекающих в условиях высоких градиентов, температур и скоростей, является применение прикладных программных комплексов, таких, как ANSYS и Solid Works Flow Simulation.

Компьютерное моделирование с помощью этих программных комплексов позволяет получить представление о траектории и распределении неизотермического потока газов в печи с учетом ее вращения, температур и скоростей, входящих в печь продуктов сжигания топлива, количества и расположения находящегося в печи материала.

Движение газового потока описывается при этом с помощью систем уравнений Навье-Стокса для реальных неизотермических потоков, уравнений неразрывности, сохранения энергии и состояния, а изменения температуры – в соответствии с уравнением Фурье-Кирхгофа [3].

Тепловой баланс проверяется путем совместного решения для тех же исходных данных уравнения Фурье с граничными условиями III и IV рода для динамического слоя материала при замене коэффициента теплопроводности λ на приведенный коэффициент теплопередачи α_k для продуваемого слоя.

Исходные данные, использовавшиеся для моделирования, были получены путем натурных измерений в производственных условиях на короткобарабанных печах для плавки алюминиевых сплавов и черного свинца.

Ниже приведены результаты моделирования, выполненного при разработке решений по модернизации конструкции 3-тонной короткобарабанной печи для выплавки черного свинца.

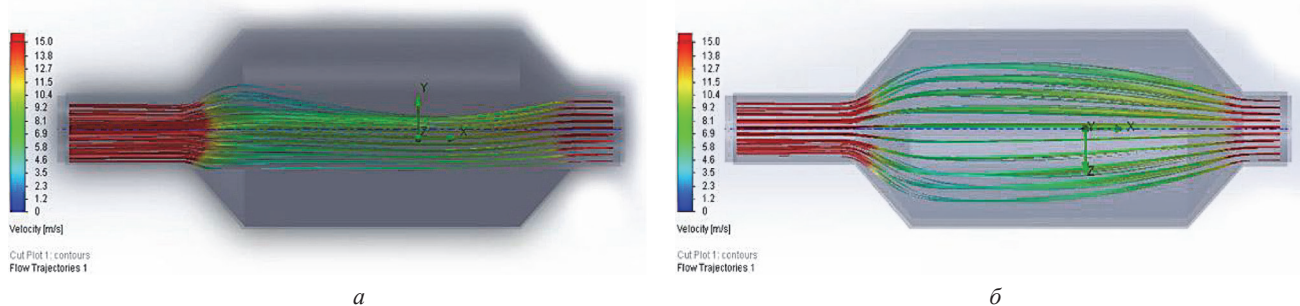


Рис. 3. Схема течения газов в КБП традиционного типа: *а* – вертикальное сечение печи; *б* – горизонтальное сечение

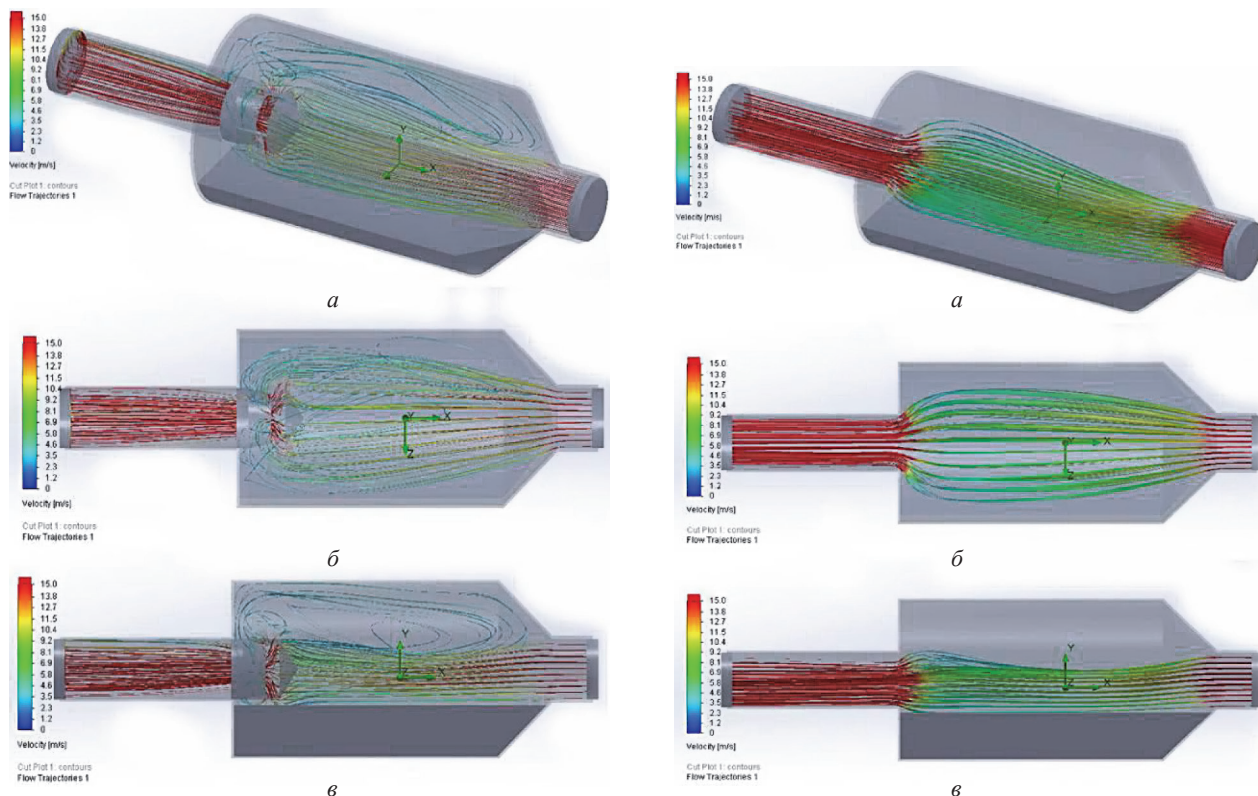


Рис. 4. Траектория движения газов в короткобарabanной печи с вертикальной торцевой стенкой: *а* – аксонометрия; *б* – горизонтальное сечение; *в* – вертикальное сечение

Рис. 5. Траектория движения газов в короткобарabanной печи с патрубком и отбойником: *а* – аксонометрия; *б* – горизонтальное сечение; *в* – вертикальное сечение

На рис. 3 показана картина течения газов в КБП традиционного типа с учетом следующих исходных данных: скорость выхода газового потока из устья горелки – 25 м/с, начальный диаметр потока (диаметр устья) – 0,5 м, температура газов на входе – 900–1200 °С, диаметр выходного патрубка – 0,5 м, температура шихты начальная – 20 °С, диаметр печи в свету – 1,46 м, длина печи – 2,78 м, в том числе цилиндрической части – 2,3 м.

Из рисунка видно, что газовый поток, расширяясь по пути движения с учетом естественного раскрытия струи, достигает стенок печи лишь на некотором расстоянии от входа и затем по конфузору уходит в систему аспирации. В застойных зонах, образующихся на входе в цилиндрическую часть печи, температура газов заметно ниже, чем в ядре факела. Сечение, соответствующее зоне максимальных температур, смещено в последнюю треть печи.

Такое поведение газового потока и распределение температур объясняют перечисленные выше недостатки в работе КБП. Смещение зоны максимальных температур к задней части пространства снижает также мощность излучения от футеровки, пропорционально относительной площади перегрева.

На первом этапе работы по модернизации КБП было принято решение заменить выходной конус (конфузор) печи на плоскую вертикальную стенку (рис. 4). Эта замена привела к упрощению конструкции, повышению стойкости футеровки, удлинению межремонтных периодов и сокращению эксплуатационных расходов, заметного увеличения аэродинамического сопротивления при этом не произошло.

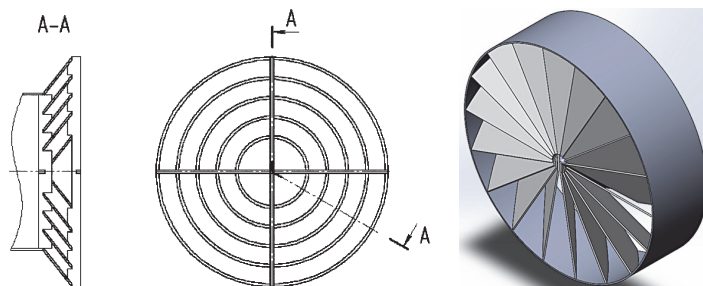


Рис. 6. Конструкция рассекателей: *а* – рассекатель; *б* – рассекатель-завихритель

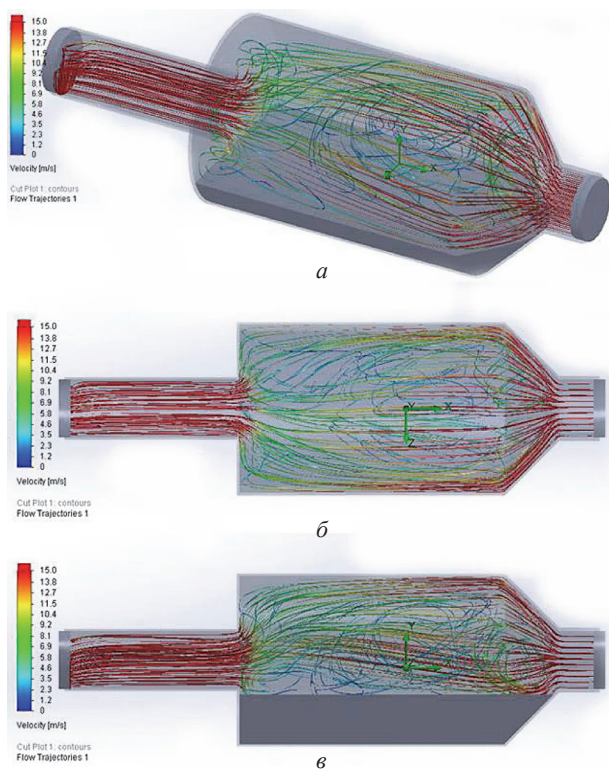


Рис. 7. Траектория движения газов в короткобарabanной печи с рассекателем: *а* – аксонометрия; *б* – горизонтальное сечение; *в* – вертикальное сечение

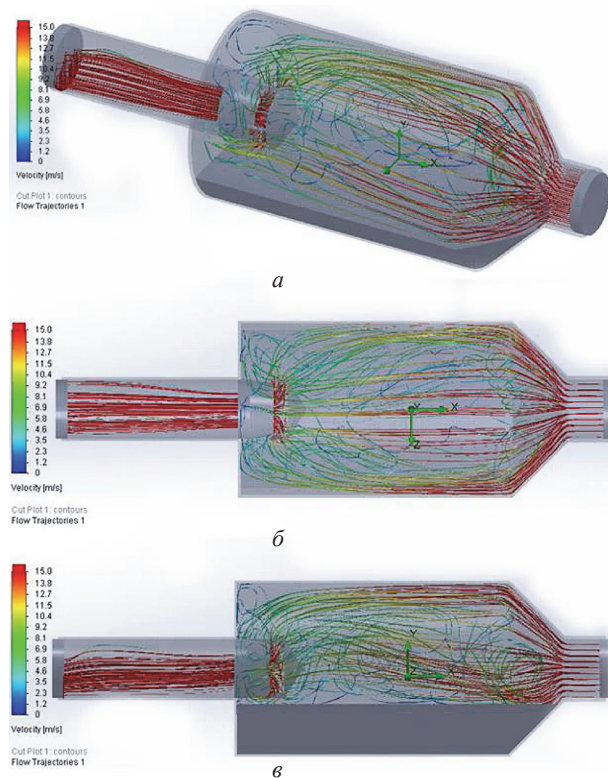


Рис. 8. Траектория движения газов в барабанной печи с патрубком и рассекателем: *а* – аксонометрия; *б* – горизонтальное сечение; *в* – вертикальное сечение

На следующем этапе в рабочем пространстве печи перед выходным отверстием был установлен патрубок с отбойником. Это привело к расширению высокотемпературной циркуляционной зоны на выходе из печи, соответственно увеличилась эффективность теплообменных процессов, а зона обратных течений в передней части печного пространства сократилась (рис. 5).

Еще более существенные положительные результаты удалось получить путем установки направляющего рассекателя на выходе из горелки.

Рассекатель, в простейшем варианте состоящий из концентрически установленных коротких конусов (рис. 6, *а*), позволяет раскрыть газовый поток, обеспечив его прилегание к материалу и стенкам печи, и максимальный прогрев рабочего пространства. Рассекатель-завихритель, образованный радиально установленными наклонными лопатками переменного сечения (рис. 6, *б*), не только раскрывает поток, но и закручивает его по спирали, что позволяет увеличить путь, который проходят горячие газы в печи, а следовательно, эффективность теплообмена и т. к. п. д. печи.

Зона максимальных температур при этом смещается в первую треть цилиндрической части печи (рис. 7). Наиболее «горячие» слои газового потока движутся вдоль поверхности материала и стенок корпуса и разогревают их до максимальной температуры, что положительно сказывается на производительности печи и обеспечивает снижение удельного расхода топлива.

На рис. 8 представлены результаты моделирования аэродинамики печи при совместном использовании перечисленных изменений в ее конструкции: очевидно значительное повышение турбулентности газовых потоков и эффективности их взаимодействия со слоем материала, что проявилось в первую оче-

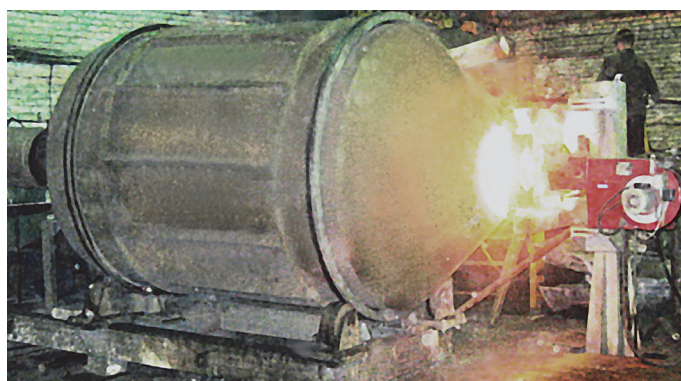
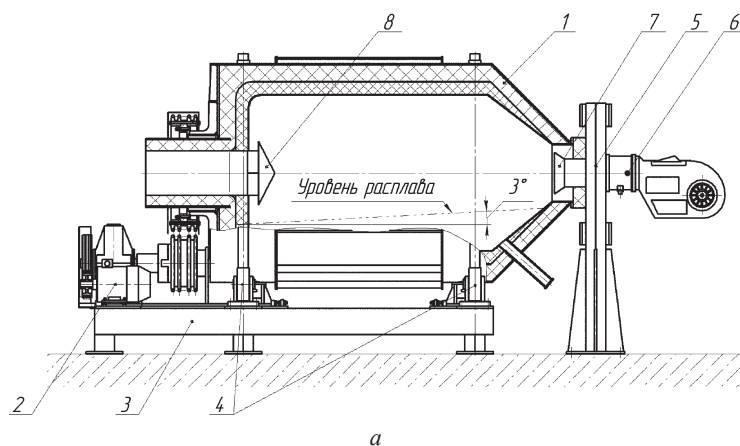


Рис. 9. 3-тонная короткобарабанная (ротаторная) печь для плавки черного свинца из аккумуляторного лома: а – конструкция печи: 1 – корпус печи; 2 – привод; 3 – рама; 4 – катки опорные; 5 – стойка поворотная с крышкой; 6 – горелка; 7 – рассекатель; 8 – конфузор; б – эксплуатация печи в литейном цехе ООО «Белинвестторгсплав» (г. Волковыск)

редь в снижении температуры отходящих газов на 100–150 °С. На практике подтвердилось также существенное (на 30–40%) снижение пылеуноса и повышение т. к. п. д. печи до 23–28%, что в 1,5 раза выше показателей традиционных КБП.

На рис. 9 показан общий вид 3-тонной короткобарабанной печи для плавки черного свинца из аккумуляторного лома, модернизированной с учетом разработанных технических решений.

Литература

1. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология. М.: Теплотехник, 2004.
2. Зобнин Б. Ф., Казяев М. Д., Китаев Б. И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1982.
3. Арутюнов В. А., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990.

References

1. Lisienco V. G., Schelokov Ya. M., Ladygichev M. G. Vraschayuschiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie, ekologiya [Rotary furnaces: heat engineering, management, ecology]. Moscow, Teploteknik Publ., 2004.
2. Zonin B. F., Kazyaev M. P., Kitaev B. I. i dr. Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechey [Heat engineering calculations for metallurgical furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982.
3. Arutyunov V. A., Buhmirov V. V., Krupennikov S. A. Matematicheskoe modelirovanie teplovoi raboty promyshlennykh pechey [Mathematical simulation of thermal activity of industrial furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990.

Сведения об авторе

Ровин Сергей Леонидович, канд. техн. наук, директор УП «Технолит», Беларусь, г. Минск, ул. Я. Колоса, 24.
Tel/fax +375 17 292 85 20. e-mail: technolit@list.ru, technolit@tut.by.

Information of the authors

Rovin Sergey, Ph.D in engineering, Director of «Technolit» company, 24 Kolasa str, Minsk, 220113, Belarus.
Tel/fax +375 17 292 85 20. e-mail: technolit@list.ru, technolit@tut.by.