УДК 621.745.34.001

Ольга Геннадьевна Модзелевская
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», старший преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: ol.berg@mail.ru

Андрей Владимирович Феоктистов
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: feoktistov_av@sibsiu.ru

Андрей Андреевич Куценко
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Россия, Новокузнецк, e-mail: kutsenko_aa@sibsiu.ru

Вячеслав Викторович Бухмиров
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон 8(4932) 26-97-76, e-mail: bao6095@mail.ru

Михаил Викторович Темлянцев
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, 8(3843)74-89-16, e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Плавка силикатных материалов в промышленном комплексе на основе низкошахтной печи с расширенными технологическими возможностями

Авторское резюме

Состояние вопроса. В соответствии со стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года, производство минеральных теплоизолирующих материалов, в том числе минеральной ваты, включено в перечень перспективных экономических специализаций субъектов Российской Федерации. Производство минеральной ваты включает два основных технологических этапа: получение расплава необходимого химического состава и волокнообразование с формированием ковра. Плавку силикатных материалов часто реализуют в низкошахтных печах, работающих на твердом топливе (коксе, антраците, различных марках углей), обеспечивая расплаву необходимые для волокнообразования свойства: текучесть, динамическую вязкость и поверхностное натяжение. Актуальность настоящего исследования заключается в разработке технологических параметров низкошахтной плавки, позволяющей полностью заменить кокс длиннопламенными углями, а также расширить технологических возможности агрегатов за счет двухуровневой подачи и подогрева дутья, использования пылеугольного топлива и новых конструкций рекуператора и питателя-дозатора.
Материалы и методы. Экспериментальные плавки проведены в низкошахтной печи, при этом в качестве топлива использованы длиннопламенные угли ОАО «Разрез Талдинский» (Кемеровская область – Кузбасс). Низкошахтная печь оборудована радиационно-конвективным рекуператором, обеспечивающим подогрев дутьевого воздуха до температуры 550 °С, и питателем-дозатором, предназначенным для подачи пылеугольного топлива. Состав и температура газов определялись посредством газоанализатора VarioPlus Industrial фирмы MRU GmbH, температуры силикатного расплава на выпуске из печи, температуры кусков топлива в шахте низкошахтной печи – пирометром спектрального отношения С-3000.4.
Результаты. Проведена серия экспериментальных плавок в низкошахтной печи ЗАО «Изолит» (г. Новокузнецк) с внутренним диаметром 1250 мм для получения оксидного расплава из отвального доменного шлака и горной породы – диабаза, используемого для производства минераловатных изделий. Проанализирован состав газовой фазы и представлено технологическое обоснование необходимости ключевых конструкционных изменений промышленного комплекса на основе низкошахтной печи с расширенными технологическими возможностями. Установлено, что при использовании в низкошахтных печах заменителей кокса, в частности длиннопламенных углей, плавку оксидных материалов возможно реализовывать при уровне загрузки материалов (2,5–2,8) $\sqrt{D}$, подачу дутья, подогретого до 450–500 °С, в кислородную зону необходимо осуществлять в равных количествах на двух горизонтах (рядах фурм) с расстоянием между ними 250 мм. Подача в дутье пылеугольного топлива приводит к необходимости повышения температуры дутья на 10–12 °С и снижения объемного расхода на 1–1,2 % на каждый процент вводимого пылеугольного топлива.
Выводы. Проведенное исследование позволило разработать рекомендации по регулированию режимов плавки силикатных материалов с применением длиннопламенных углей в качестве топлива. Рассмотрена возможность двухуровневой подачи дутья на основе расчетных данных длины кислородной зоны с одновременным обоснованием возможностей введения пылевидных материалов и режимов подогрева дутья.

Ключевые слова: низкошахтная печь, длиннопламенные угли, пылеугольное топливо, рекуператор, питатель-дозатор мелкодисперсного топлива

© Модзелевская О.Г., Феоктистов А.В., Куценко А.А., Бухмиров В.В., Темлянцев М.В., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 12–19.

Olga Gennadievna Modzelevskaya
Siberian State Industrial University, Senior Lecturer of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: ol.berg@mail.ru

A**ndrey Vladimirovich Feoktistov**
Siberian State Industrial University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: feoktistov_av@sibsiu.ru

Andrey Andreevich Kutsenko
Siberian State Industrial University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: kutsenko_aa@sibsiu.ru

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: bao6095@mail.ru

Mikhail Viktorovich Temlyantsev
Siberian State Industrial University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, 8(3843)74-89-16, e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Melting of silicate materials in an industrial complex based on a low- shaft furnace with extended technological capabilities

Abstract

Background. According to the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025, the production of mineral heat-insulating materials, including mineral wool, has been included in the list of promising economic specializations of the constituent entities of the Russian Federation. The production of mineral wool includes two main technological stages; they are obtaining melt of the required chemical composition and fiber formation with the formation of a layer. Melting of silicate materials is often carried out in low- shaft furnaces operating on solid fuel (coke, anthracite, various grades of coal), providing the melt with the properties necessary for fiberization: fluidity, dynamic viscosity and surface tension. The relevance of the study is the development of process parameters for low-shaft smelting that enable the complete replacement of coke with long-flame coals. Also it is necessary to improve the operational capabilities of the units through two-level blast injection and preheating, the use of pulverized coal injection, and novel designs for the recuperator and proportioning feeder.
Materials and methods. Experimental melts have been carried out in a low-shaft furnace, while long-flame coals of OJSC Razrez Taldinsky (Kemerovo Region – Kuzbass) have been used as fuel. The low-shaft furnace is equipped with a radiation-convective recuperator, which provides heating of blast air up to 550 °C and a proportioning feeder to supply pulverized coal fuel. The composition and temperature of the gases have been determined using a VarioPlus Industrial gas analyzer of MRU GmbH. The temperatures of the silicate melt at the furnace discharge, and the temperature of fuel lumps in the shaft of the low-shaft furnace have been determined using C-3000.4 spectral ratio pyrometer.
Results. A series of experimental melts has been carried out at the low-shaft furnace of Closed Joint-Stock Company Isolit (Novokuznetsk) with an internal diameter of 1250 mm in order to obtain an oxide melt from dump blast-furnace slag and rock – diabase, used for the production of mineral wool products. The composition of the gas phase has been analyzed, and a technical justification is presented for the necessity of key design modifications for an industrial complex based on a low-shaft furnace with expanded technological capabilities. It has been established that when coke substitutes specifically long-flame coals are used in low-shaft furnaces, the smelting of oxide materials can be carried out at a material load level of (2,5–2,8) $\sqrt{D}$. The blast preheated to 450–500°C must be injected into the oxygen zone in equal amounts at two levels (rows of tuyeres) spaced 250 mm apart. Injecting pulverized coal fuel into the blast necessitates raising the blast temperature by 10–12°C and reducing the volumetric flow rate by 1–1.2% for every percent of pulverized coal fuel introduced.
Conclusions. The study conducted made it possible to develop recommendations to regulate the melting regimes of silicate materials using long-flame coals as fuel. The feasibility of a two-level blast supply has been examined based on calculated data regarding the length of the oxygen zone, alongside an assessment of the potential for injecting pulverized materials and the parameters for blast preheating.

Key words: low-shaft furnace, long-flame coals, pulverized coal fuel, recuperator, fine-grained fuel feeder

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.012-019

Введение. Твердотопливные низкошахтные печи получили широкое распространение в различных отраслях промышленности и применяются для тепловой обработки кусковых материалов. Конструкции, режимы тепловой работы низкошахтных печей и реализуемые теплотехнологии имеют существенные резервы для интенсификации процесса плавки и повышения тепло-технологической эффективности [1, 2]. В качестве основных направлений при этом рассматриваются: применение различных заменителей кокса (антрацит, тощие и длиннопламенные угли); вдувание пылеугольного топлива (ПУТ); подогрев и увлажнение дутья. Замените-

ли кокса представляют особый интерес, поскольку позволяют повысить технико-экономические показатели работы низкошахтных печей. Однако их применение требует глубокой теоретической проработки и практической апробации. В [3] проведен анализ существующего состояния тепловой и газодинамической работы минераловатной низкошахтной печи. Установлено, что ее тепловой КПД составляет всего 11,78 %. Такая низкая тепловая эффективность печи связана в первую очередь с недостатками применяемой системы подачи воздуха. Высокая неравномерность распределения воздушного дутья по сечению внутреннего пространства печи приводит к существенной неравномерности распределения газового потока по объему нагреваемой шихты. Следовательно, требуется поиск новых конструктивных особенностей различных узлов агрегатов данного типа

Кроме того, в современных промышленных комплексах на основе низкошахтной печи должны решаться задачи ресурсосбережения и повышения эффективности тепловой работы. Чтобы обеспечить рекуперацию тепла, в них должны быть предусмотрены вспомогательные устройства для вдувания пылевидного топлива и переработки мелкодисперсных отходов, в том числе собственного производства.

Методы исследования. Задачей настоящего исследования является разработка технологии плавки оксидных материалов в низкошахтной печи, позволяющей полностью заменить кокс длиннопламенными углями без нарушения технологического режима плавки. Важным аспектом технологии плавки в низкошахтной печи является возможность выбора конструктивных и технологических решений при проектировании новых и модернизации действующих низкошахтных печей [4]. Установлено, что температурный режим в топливной насадке и в зоне нагрева шихты не зависит от диаметра печи при условии выполнения полученных основных соотношений между геометрическими параметрами печи, размерами кусков кокса и шихты, вытекающих из главных требований теории подобия и натурного моделирования. Геометрическое подобие выполняется четким соотношением между высотными параметрами печи и ее внутренним диаметром D:

$$H_{\text{П}} = 4{,}345\sqrt{D};\ H_{\text{ТН}} = 1{,}165\sqrt{D};\ H_{\text{ПД}} = 3{,}18\sqrt{D},$$

где $H_{\text{П}}$, $H_{\text{ТН}}$, $H_{\text{ПД}}$ – высота полезная, топливной насадки и зоны подогрева печи соответственно, м.

Необходимо учитывать, что номинальная удельная производительность низкошахтных печей Pнп, кг/(м^2·с), не зависит от диаметра, а определяется расходом топлива k, %, содержанием углерода в топливе С, %, расходом воздуха q_0, м^3/(м^2·с), содержанием кислорода в дутье O_2, %, содержанием CO и CO_2, %, в отходящих газах. Продуваемость топливной насадки резко возрастает с увеличением размеров кусков топлива. При использовании холодного дутья в области фурм до центра топливной насадки происходит образование захолаживающих зон, которые нивелируют эффект повышения температуры расплава вследствие роста высоты кислородной зоны. С увеличением размеров кусков топлива возрастает скорость прохождения капель расплава через зону высоких температур.

При $H_{\text{ТН}} = 1{,}165\sqrt{D}$ прямой зависимости температуры расплава на выпуске от размеров кусков топлива, определяемых по соотношению $\bar{d}_к = 0{,}081\sqrt{D}$, не наблюдается. В рамках проводимых исследований использовались рекомендации по оптимальным значениям размеров кусков шихтовых и топливных материалов (табл. 1). При этом учитывалось, что подогрев дутья приводит к росту температуры газов в захолаживающих зонах. Соответственно, оптимальный размер кусков топлива может быть увеличен.

Таблица 1. **Значения оптимальных размеров кусков кокса для низкошахтных печей различных диаметров**

Показатель	Значение показателя при внутреннем диаметре печи, м									
	0,20	0,30	0,40	0,50	0,85	1,10	1,35	1,70	2,10	2,65
$H_{TH} = 1{,}165\sqrt{D}$, м	0,521	0,638	0,737	0,824	1,074	1,22	1,35	1,52	1,69	1,896
$\bar{d}_к = 0{,}081\sqrt{D}$, м	0,036	0,044	0,051	0,057	0,075	0,085	0,094	0,107	0,117	0,132

Для топливной насадки твердотопливных низкошахтных печей характерны последовательные реакции:

$$C + O_2 = CO_2 + q_1; \quad (1)$$

$$CO_2 + C = 2CO - q_2, \quad (2)$$

где q_1 = 408842 кДж/кмоль; q_2 = 162405 кДж/кмоль.

Первая реакция в кислородной зоне идет практически до конца, пока не прореагирует весь кислород дутья. Вторая реакция восстановительной зоны, как правило, заканчивается, когда прореагирует половина молекул CO_2, поступивших с газами из низлежащей кислородной зоны. Общее количество тепла, выделяющееся в топливной насадке, составляет $\Delta q = q_1 - q_2 = 408842 - 162405/2 = 327640$ кДж/кмоль.

Результаты исследования. В результате проведенных исследований установлено, что при высоких уровнях загрузки и температурах кусков топлива в кислородной зоне печи не удается

обеспечить стабильный ход плавки на заменителях кокса, теплотворная способность которых в 1,1–1,2 раза выше, а зольность в 1,3–1,5 раза ниже, чем у кокса. При использовании длиннопламенных углей уровень загрузки материалов в низкошахтной печи необходимо уменьшить до (2,5–2,8) $\sqrt{D}$, подогрев дутья повысить до 450–550 °С и подавать его в равных количествах на двух горизонтах с расстоянием между ними L_{12} = 250 мм (рис. 1).

С использованием расчетной методики, представленной в [4], определена оптимальная высота уровня загрузки кусковых материалов. Эксперименты на производственном плавильном агрегате подтвердили результаты расчетов. Установлено, что при высоте загрузки менее $2{,}5\sqrt{D}$ полный прогрев шихты до температуры плавления не происходит. Крупные куски шихты диаметром $D_ш$ > 0,081 м проваливаются в горн печи и вызывают снижение температуры шлакового расплава. Увеличение высоты загрузки (более $2{,}8\sqrt{D}$) приводит к росту давления столба шихты на топливную насадку из длиннопламенных углей. Это приводит к их растрескиванию и интенсивному истиранию, при этом мелкая фракция и шлаковый расплав образуют мощные козырьки над фурмами. В таких условиях сопротивление столба материалов резко возрастает, поступление дутья в рабочее пространство печи уменьшается, интенсивность тепломассообменных процессов снижается. Это приводит к уменьшению температуры расплава на выпуске из печи.

Второй уровень подачи дутья необходимо располагать в конце кислородной зоны первого уровня. Длина $L_к$ кислородной зоны рассчитывается по формуле [4]

$$L_K = AD_K \mathrm{Re}^{0,2}, \qquad (3)$$

где A – константа; D – средний размер кусков топлива; Re – число подобия Рейнольдса.

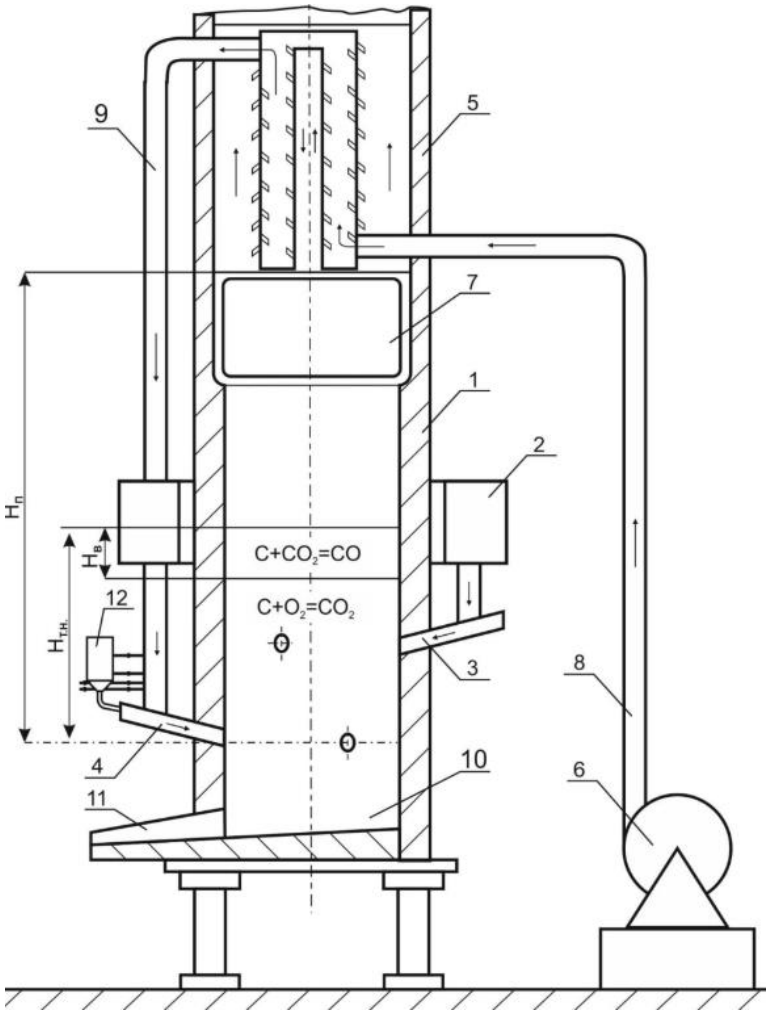


Рис. 1. Конструкция промышленного комплекса на основе твердотопливной низкошахтной печи: 1 – шахта печи; 2 – фурменный короб; 3 – нижний ряд фурм; 4 – второй ряд фурм; 5 – рекуператор «труба в трубе»; 6 – воздуходувка; 7 – загрузочное окно; 8 – воздуховод холодного дутья; 9 – воздуховод горячего дутья; 10 – горн печи; 11 – выпускная летка; 12 – питатель-дозатор мелкодисперсного топлива; $H_{к.з.}$ – высота кислородной зоны; $H_в$ – высота восстановительной (редукционной) зоны; $H_п$ – полезная высота печи

Для заменителей кокса (антрацита, тощих и длиннопламенных углей) характерна меньшая прочность кусков топлива. При движении вниз по шахте печи и опускании в кислородную зону их средний размер фактически в два раза меньше размера кусков кокса. Это связано с более интенсивным их разрушением вследствие механических и термических воздействий. Переизмельченные коксозаменители заполняют пространство между уровнями подачи дутья, которое соответствует высоте кислородной зоны $L_{12} = L_к = (0{,}175–0{,}20)D$. Для расстояния между уровнями вдувания характерны определенные оптимальные значения. В частности, при расстоянии между двумя уровнями вдувания менее 250 мм уменьшаются высоты кислородных зон, или зоны перегрева расплава, а при расстоянии более 250 мм эндотермическая реакция восстановления (2) углеродом топлива успевает развиваться в области между уровнями фурм, это сопровождается снижением эффективной температуры источника тепла и температуры перегрева шлакового расплава.

Исследование процессов горения твердого топлива в низкошахтных печах показывает, что с ростом высоты кислородной зоны и снижением высоты восстановительной зоны температура перегрева расплава при движении от зоны плавления до горна увеличивается. Если на расстоянии 250 мм от фурм первого уровня вдувания установить фурмы второго уровня с меньшей на 5–10 % площадью сечения всех отверстий, то высота зоны восстановления уменьшается до минимума или практически будет отсутствовать. Для организации такого способа подачи дутья площадь сечения отверстий первого уровня (нижнего) фурм должна составлять 52–57 %, а второго (верхнего) – 48–43 % от общей площади их сечения при одноуровневой подаче дутья. Такое соотношение обеспечивает подачу примерно одинакового количества дутья в оба горизонта зоны горения топлива, поскольку высота столба шихты над вторым уровнем вдувания (см. рис. 1) на 5–10 % меньше высоты столба от первого уровня. Полученные результаты позволяют определить технологические возможности применения пылеугольных материалов в процессе плавки.

Задача использования пылевидного топлива и переработки мелкодисперсных отходов, в том числе собственного производства, может быть решена с учетом организации двухрядной подачи дутья. В низкошахтной печи могут быть созданы условия применения пылеугольного топлива за счет расширенной кислородной зоны в топливной насадке. Однако в реальных условиях плавки существует целый ряд технологических сложностей, к числу которых может быть отнесено отсутствие промышленного оборудования, обеспечивающего стабильную подачу ПУТ в фурменные устройства.

В [5] установлено, что для получения максимального теплового эффекта дисперсные частицы должны сгореть в пределах кислородной зоны. Для этого проведено экспериментальное и аналитическое определение скорости движения дисперстных частиц по каналам слоя топлива. Угольные частицы, попадая в восстановительную зону, где отсутствует свободный кислород, механически взаимодействуют со оксидным расплавом, изменяют его физико-механические свойства и удаляются из печи вместе с ним. Продолжительность сгорания угольной частицы не должна быть больше времени τ ее нахождения в кислородной зоне:

$$\tau = \frac{H_{кз}}{\upsilon_т}, \qquad (4)$$

где $H_{кз}$ – высота кислородной зоны; $\upsilon_т$ – скорость движения твердой частицы по каналам топливной насадки.

Расчеты, представленные в [4], показывают, что увеличение диаметра твердых частиц сопровождается снижением скорости их движения и требует определенных технологических решений, обеспечивающих введение пылевидного топлива в фурменные устройства комплексов низкошахтных печей. Проведенные расчеты свидетельствуют, что введение пылевидных материалов наиболее целесообразно на первом уровне вдувания.

Плавка силикатных материалов в промышленном комплексе на основе низкошахтной печи с учетом аналитических расчетов требует их проектирования в соответствии с расширенными технологическими возможностями. Для обеспечения непрерывной подачи дисперсных углеродсодержащих материалов в низкошахтную печь с помощью сжатого воздуха разработана конструкция питателя пневмотранспорта пылевидных материалов [6] (рис. 2). Питатель-дозатор оборудован камерой, имеющей горловину для загрузки материалов, с клапаном и заслонкой в виде пластины, воздуховод для подачи основного сжатого воздуха и патрубки для дополнительного тангенциального подвода сжатого воздуха. В конструкции предусмотрена вторая камера, горловина которой представляет собой усеченный параллелепипед. Вторая камера находится внутри камеры питателя. Устройство имеет второй трубопровод для подвода основного сжатого воздуха. Трубы обоих трубопроводов основного сжатого воздуха соприкасаются с заслонками клапанов каждой горловины. Питатель-дозатор имеет датчики, фиксирующие верхние уровни насыпи материалов в камерах. Последовательная синхронная работа клапанов обеих камер на открытие и закрытие обеспечивает непрерывность работы питателя.

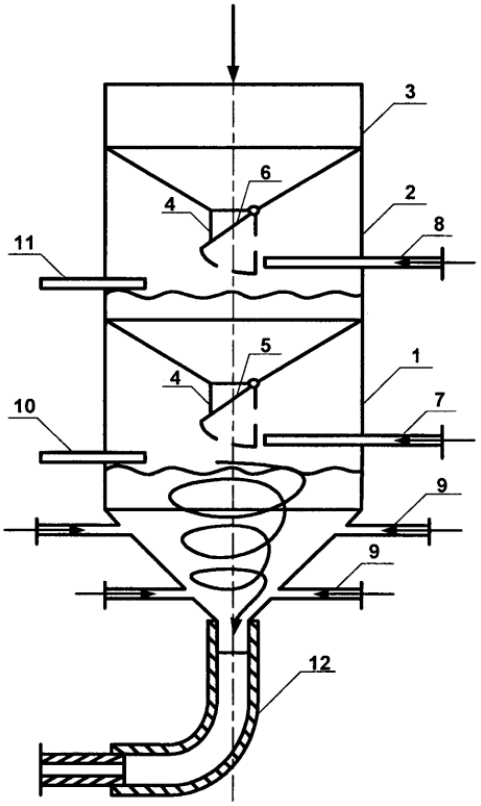


Рис. 2. Питатель-дозатор мелкодисперсного топлива: 1 – нижняя камера питателя; 2 – верхняя камера питателя; 3 – загрузочный бункер; 4 – горловины камер; 5 и 6 – заслонки клапанов; 7 и 8 – трубопроводы основного подвода сжатого воздуха; 9 – патрубки дополнительного тангенциального подвода сжатого воздуха; 10 и 11 – датчики уровня насыпи дисперсных материалов; 12 – трубопровод для выхода аэросмеси

Необходимо отметить, что внедрение ПУТ в технологию плавки в низкошахтной печи существенно изменяет условия процесса, требуя корректировки ее основных технологических параметров. При вводе ПУТ происходит частичное замещение различных видов топлива в шихтовых материалах, что приводит к изменению газодинамического и теплового баланса плавильного агрегата. Горение угольной пыли в надфурменной зоне создает дополнительный тепловой поток, распределенный по высоте шахты, улучшая тем самым теплообмен в верхних горизонтах.

Изменение газодинамических параметров связано с увеличением общего объема газового потока на 3–15 %, повышением сопротивления столба шихты, ростом скорости газов в колошниковой зоне. При этом происходит трансформация тепловых характеристик: снижается температура в окислительной зоне на 50–120 °С; повышается теплосодержание колошниковых газов; увеличиваются теплопотери с отходящими газами; изменяется распределение температур по высоте шахты за счет изменения физических параметров ваграночных газов (плотность газов снижается на 8–12 %, вязкость увеличивается на 5–8 %, теплоемкость повышается на 10–15 %).

Внедрение пылеугольного топлива в дутье низкошахтной печи кардинально меняет состав и объем колошниковых газов, что требует соответствующей корректировки режимов работы агрегата. Рекомендации по регулированию режимов плавки при различном содержании ПУТ в дутье приведены в табл. 2

Таблица 2. **Режимы плавки в низкошахтной печи при различном содержании ПУТ**

Доля ПУТ в дутье	Рекомендации по регулированию режимов работы	Изменения состава отходящих газов	Изменение теплового режима
2 %	Снизить расход дутья на 2–3 %. Повысить температуру дутья на 20–30 °С	Объем газов: +3–5 % CO: 9–11 % (– 0,5–1 %) CO_2: 13–15 % (+1–2 %) H_2: 1–2 % (появление за счет летучих ПУТ) O_2: 0,8–1,2 % (– 0,2–0,3 %)	Теплота сгорания: +3–5 %
4 %	Уменьшить расход дутья на 4–5 %. Повысить температуру дутья на 40–50 °С	Объем газов: +6–8 % CO: 8,5–10,5 % (– 1–1,5 %) CO_2: 14–16 % (+2–3 %) H_2: 2–3 % (× 2 раза) O_2: 0,6–1,0 % (– 0,3–0,5 %)	Теплота сгорания: +6–8 %. Температура отходящих газов: +15–20 °С
6 %	Снизить расход дутья на 6–7 %. Повысить температуру дутья на 60–70 °С	Объем газов: +9–11 % CO: 8–10 % (– 1,5–2 %) CO_2: 15–17 % (+3–4 %) H_2: 3–4 % (× 3–4 раза) O_2: 0,4–0,8 % (– 0,5–0,7 %) Следы CH_4 (0,1–0,2 %)	Теплота сгорания: +9–11 %. Температура отходящих газов: +25–35 °С
10 %	Снизить расход дутья на 10–12 %. Повысить температуру дутья на 100–120 °С	Объем газов: +15–18 % CO: 7–9 % (– 2,5–3 %) CO_2: 17–19 % (+ 5–6 %) H_2: 5–6 % (× 5–6 раз) O_2: 0,2–0,5 % (– 0,8–1,0 %) CH_4: 0,3–0,4 % Следы H_2S (0,01–0,02 %)	Теплота сгорания: +15–18 %. Температура отходящих газов: +45–60 °С

Введение в дутье каждого процента ПУТ приводит к необходимости повышения его температуры на 10–12 °С и снижения объемного расхода на 1–1,2 %. Параллельно наблюдается снижение концентрации оксида углерода (CO) в отходящих газах на 0,2–0,3 %.

В результате увеличения теплоты сгорания отходящих газов на 15–18 % происходит значительный рост их теплосодержания и, как следствие, их трансформация из побочного продукта в ценный энергоресурс. Это делает технологически и экономически целесообразной установку рекуператора для подогрева дутья за счет утилизации тепла этих газов.

Производственная практика применения питателя на предприятии ЗАО «Изолит» демонстрирует возможность непрерывной подачи пылевидных материалов в кислородную зону топливной насадки и стабильный ход печи, а также частично решает экологическую и ресурсосберегающую проблемы.

Чтобы повысить эффективность тепловой работы, современные комплексы на основе низкошахтной печи должны иметь возможность рекуперации тепла, так как подогрев дутья интенсифицирует теплообмен в зоне перегрева расплава. Подогрев дутья при использовании в качестве топлива длиннопламенных углей позволяет снижать термическое растрескивание кусков топлива посредством уменьшения неравномерности температур на его поверхности, вызванных протеканием реакции

$$C + 0{,}5O_2 \leftrightarrow CO + 117 \text{ МДж/моль}, \quad (5)$$

имеющей меньший экзотермический эффект, чем реакция

$$C + 5O_2 \leftrightarrow CO_2 + 400{,}428 \text{ МДж/моль}. \quad (6)$$

Одним из распространенных способов повышения тепловой эффективности низкошахтных печей является подогрев дутья (от 400 до 620 °С) в рекуператорах из жаропрочной стали [7]. Несмотря на свою эффективность, существующие конструкции рекуператоров имеют ряд недостатков: большая длина воздушного тракта; подсос воздуха через несплошности; засорения; прогар жаростойких труб. В связи с этим разработана более совершенная конструкция рекуператора (рис. 3), обеспечивающая подогрев дутья свыше 400 °С и работу в условиях длительных производственных циклов [8].

В усовершенствованной конструкции рекуператора герметичность обеспечивается за счет того, что внутренняя труба снабжена заглушкой и не доходит до перекрытия внешней трубы на 0,01 высоты рекуператора. Теплообменные поверхности (внешняя на внутренней трубе, внутренняя и внешняя корпуса) в целях увеличения площади поверхности и интенсификации теплообмена оборудованы стальными пластинами, расположенными по винтовой линии.

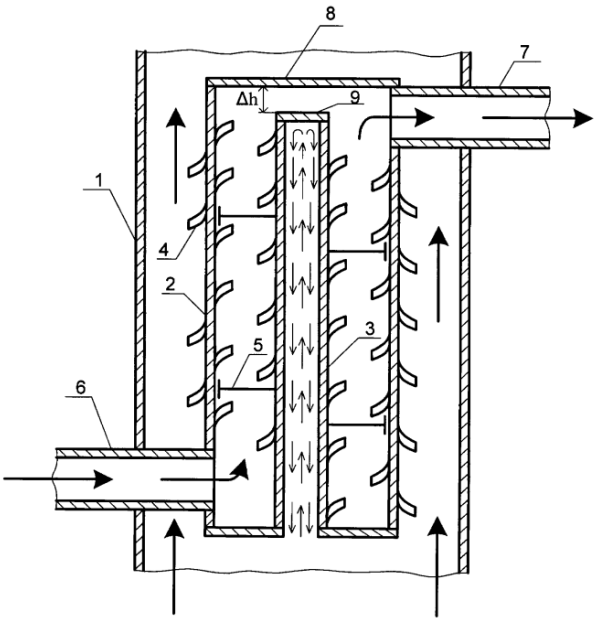


Рис. 3. Усовершенствованная конструкция рекуператора: 1 – шахта печи над завалочным окном; 2 – внешний корпус рекуператора; 3 – внутренняя труба; 4 – пластины, смонтированные по винтовой линии; 5 – распорки; 6 – воздуховод подвода холодного воздуха; 7 – воздуховод отвода горячего дутья; 8 – перекрытие; 9 – заглушка

В результате при использовании данного рекуператора прочность конструкции остается надежной, герметичность устройства не нарушается, срок службы материала теплообменника в целом увеличивается.

Выводы. В результате опытно-промышленных экспериментов на низкошахтном плавильном агрегате с внутренним диаметром 1250 мм при использовании в качестве топлива заменителей кокса, в том числе длиннопламенных углей, разработаны и промышленно опробованы новые конструкции рекуперативного устройства и питателя-дозатора мелкодисперсного топлива. Установлено, что замена топлива возможна при выполнении следующих условий:

1) уровень загрузки материалов в низкошахтную печь (2,5–2,8) $\sqrt{D}$;

2) подача в кислородную зону подогретого до 450–500 °С дутья в равных количествах на двух горизонтах с расстоянием между ними 250 мм.

Список литературы

1. **Ваграночный** комплекс с использованием в качестве топлива антрацита и тощих углей / А.В. Феоктистов, Е.В. Протопопов, С.А. Бедарев, О.Г. Модзелевская // Металлург. – 2014. – № 10. – С. 24–27.

2. **Феоктистов А.В., Скуратов А.П., Селянин И.Ф.** Особенности плавки чугуна и силикатных материалов в твердотопливной низкошахтной печи // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9, № 7. – С. 1104–1109.

3. **Матюхин В.И., Матюхин О.В., Матюхина А.В.** Особенности конструкции и тепловой работы минераловатной вагранки конструкции «гамма – мекканика» (Италия) // Базальтовые технологии. – 2014. – № 1. – С. 56–60.

4. **Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А**. Развитие теории и практики металлургических технологий. Т. 1. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.

5. **Экспериментальное** и аналитическое определение скорости движения дисперсных частиц по каналам слоя топлива / А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, И.Ф. Селянин и др. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – № 3(13). – С. 9–13.

6. **Пат.** № 150948 U1 Российская Федерация, МПК B65G 53/46. Питатель пневмотранспорта мелкодисперсных материалов: № 2014139768/11: заявл. 30.09.2014; опубл. 10.03.2015 / А.В. Феоктистов, В.В. Пашков, И.Ф. Селянин и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

7. **Феоктистов А.В.** Опыт эксплуатации ваграночного рекуператора конструкции «труба в трубе» // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 62–63.

8. **Пат.** № 158397 U1 Российская Федерация, МПК F27B 1/00. Рекуператор вагранки: № 2015122155/02: заявл. 09.06.2015; опубл. 27.12.2015 / А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, И.Ф. Селянин и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

References

1. Feoktistov, A.V., Protopopov, E.V., Bedarev, S.A., Modzelevskaya, O.G. Vagranochnyy kompleks s ispol′zovaniem v kachestve topliva antratsita i toshchikh ugley [A furnace complex using anthracite and thin coals as fuel]. *Metallurg*, 2014, no. 10, pp. 24–27.

2. Feoktistov, A.V., Skuratov, A.P., Selyanin, I.F. Osobennosti plavki chuguna i silikatnykh materialov v tverdotoplivnoy nizkoshakhtnoy pechi [Features of smelting cast iron and silicate materials in a solid-fuel low-pit furnace]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya. Tekhnika i tekhnologii*, 2016, vol. 9, no. 7, pp. 1104–1109.

3. Matyukhin, V.I., Matyukhin, O.V., Matyukhina, A.V. Osobennosti konstruktsii i teplovoy raboty mineralovatnoy vagranki konstruktsii «gamma – mekkanika» (Italiya) [Features of the design and thermal operation of the gamma-mekkanika mineral wool cupola]. *Bazal'tovye tekhnologii*, 2014, no. 1, pp. 56–60.

4. Selyanin, I.F., Feoktistov, A.V., Bedarev, S.A. *Razvitie teorii i praktiki metallurgicheskikh tekhnologiy. T. 1* [Development of theory and practice of metallurgical technologies. Vol. 1]. Moscow: Teplotekhnik, 2010. 379 p.

5. Feoktistov, A.V., Modzelevskaya, O.G., Selyanin, I.F., Kutsenko A.I., Kutsenko A.A. Eksperimental′noe i analiticheskoe opredelenie skorosti dvizheniya dispersnykh chastits po kanalam sloya topliva [Experimental and analytical determination of the velocity of dispersed particles in the fuel layer channels]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2015, no. 3(13), pp. 9–13.

6. Feoktistov, A.V., Pashkov, V.V., Selyanin, I.F., Modzelevskaya, O.G., Filinberg, I.N., Kutsenko, A.A., Bedarev, S.A. *Pitatel' pnevmotransporta melkodispersnykh materialov* [Pneumatic conveying feeder for fine materials]. Patent RF, no. 150948, 2015.

7. Feoktistov, A.V. Opyt ekspluatatsii vagranochnogo rekuperatora konstruktsii «truba v trube» [Experience in operating a tube-in-tube regenerator for cupola furnaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2012, no. 12, pp. 62–63.

8. Feoktistov, A.V. Modzelevskaya, O.G., Selyanin, I.F., Kutsenko, A.A., Bedarev, S.A. *Rekuperator vagranki* [Wagon recuperator]. Patent RF, no.158397, 2015.