

УДК 669.168.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-2/02>**Нежурин В.И.**

Национальная металлургическая академия Украины

**Николенко А.В.**

Национальная металлургическая академия Украины

**Куваев В.Ю.**

Национальная металлургическая академия Украины

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОДИНАМИКИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ВАННЫ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ РПЗ-48(63) ПРИ ВЫПЛАВКЕ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА

*Проблема підтримки оптимального електричного, електродного та шихтового режимів роботи шахтних руднотермічних електропечей потребує забезпечення раціонального газодинамічного режиму плавки. Проаналізовано літературні джерела з дослідження газодинаміки діючих руднотермічних печей. Найбільша кількість досліджень належить до доменного виробництва, дослідження електроферосплавних процесів обмежені характеристикою газопилових складників газів підсводового простору закритих печей, дослідженнями процесів газодинаміки в печах для отримання ферохрому, характеристиками шихт. Наразі для дослідження таких процесів використовують тільки математичні моделі. Представлена робота має на меті визначення взаємозв'язку показників роботи діючої промислової печі за допомогою факторного аналізу, експериментальне дослідження газодинамічних особливостей електропечі РПЗ-48(63) під час її роботи з високими та стійкими показниками, отримання залежностей, які описують розподілення тиску, температур, компонентів пічних газів по висоті приелектродної зони ванни печі, лабораторні дослідження впливу фракційного складу шихти на її газодинаміку з урахуванням раніше отриманих залежностей для діючої печі, підбір оптимального гранулометричного складу шихти, яка використовується, та проведення дослідної кампанії з оцінкою роботи електропечі з погляду отриманих результатів. Для дослідження впливу гранулометричного складу компонентів шихти феросилікомарганцю на загальну газодинаміку використовувалась спеціальна експериментальна установка. Виявлено оптимальний склад компонентів шихти фракції «-5мм», зокрема, для коксика не більше 7%, для агломерату – не більш ніж 15%. В цьому випадку загальний вміст фракції «-5 мм» в шихті феросилікомарганцю складе від 13% до 15%. Робота печі на запропонованому фракційному складі компонентів шихтових матеріалів забезпечує достатньо високі техніко-економічні показники виробництва товарного феросилікомарганцю.*

**Ключові слова:** рудовідновлювальна (руднотермічна) електропіч, феросилікомарганець, режими роботи, гранулометричний склад шихти, газодинамічні властивості вмісту приелектродної зони, факторний аналіз.

**Постановка проблеми.** Решение задачи поддержания оптимального электрического, электродного, шихтового, а следовательно, и газового режимов конкретного технологического процесса в рудовосстановительных электропечах (РВП) обеспечивается выбором научно обоснованных геометрических параметров ванны печи и печного контура, поддержанием необходимого электрического режима плавки, что создает рациональное,

с точки зрения термодинамики процесса, распределение вводимой энергии в рабочем пространстве ванны печи. Оптимальный шихтовый режим работы печи должен обеспечивать не только требуемое соотношение рудной части сырья и восстановителя, возможно более высокое удельное электросопротивление шихты, связанный с ним гранулометрический состав компонентов шихты, но и удовлетворительную газодинамику ванны

в процессе получения сплава. Поскольку работа электропечи сводится к наличию противотока, то есть непрерывного движения шихты вниз, в зону протекания химических реакций, и встречного движения полупродуктов и продуктов высокотемпературных процессов к колошнику в объеме зоны схода шихтовых материалов, газодинамика ванны оказывает существенное влияние на ход технологического процесса и электрический режим работы печи для каждого конкретного сплава.

Основная задача исследования газодинамики – нахождение полей скорости, давления и плотности газа, движущегося под действием внешних сил:  $v_{x,y,z} = f_{1,2,3}(x,y,z,t)$ ,  $p = f_4(x,y,z,t)$ ,  $\rho = f_5(x,y,z,t)$ . Ввиду сложности системы уравнений газодинамики нахождение ее решений аналитическим методом сопряжено с большими трудностями и возможно лишь для простых случаев движения газов. Анализ известных литературных источников [1, с. 32–56; 2; 3; 4] показывает, что вопросы газодинамики процессов наиболее разработаны в доменном и агломерационном производстве. Исследование действующих рудовосстановительных электропечей предусматривало, в основном, исследование распределения температур, потенциалов, удельной активной мощности в рабочем пространстве ванны печи. Часть работ посвящена исследованию удельного электросопротивления (УЭС) шихтовых материалов различного фракционного состава и его влияния на электрический режим технологического процесса получения сплава [5; 6]. В работе [7, с. 58–72] приведены результаты исследования газового и пылевого режимов работы электропечей лишь на их колошнике, однако исследования непосредственно в рабочем пространстве печей авторами не проводились. В работе приводится приближенная формула потери напора газа в слое шихтовых материалов на пути газов от фокусов нагрева под электродами до поверхности колошника. Приведены расчеты газодинамического сопротивления слоя шихты вокруг электрода в загрузочной воронке и обечайке над ней, рассчитаны потери колошниковога газа через зазоры вокруг электродов при давлении 0,5 мм вод. ст. под сводом печи для выплавки ферросилиция. Ряд работ [8; 9] посвящены вопросам расчета объемного расхода отходящих газов закрытых ферросплавных электропечей, влиянию влажности марганцевой руды на газопроницаемость марганцевого агломерата при производстве высокоуглероди-

стого ферромарганца, характеристикам пылегазовых выбросов при производстве ферросплавов, механизму образования пыли при выплавке кремнистых и марганцевых сплавов. Достаточно обширно вопрос исследования газодинамики ванны закрытой печи представлен в работе [10]. Отмечено, что углетермические процессы выплавки ферросплавов сопровождаются выделением большого количества газов, образующихся в результате восстановительных реакций. Очевидно, что изменение состава и количества газов непосредственно отражает ход процессов. Причем полнота полезного использования химической и физической энергии газового потока зависит от распределения газодинамического сопротивления шихты по глубине ванны. Автор проанализирован противоток шихты и газов при выплавке углеродистого феррохрома. Определено давление, состав газов и пыли по глубине ванны печи. Избыточное давление в ванне изменялось от 5 до 180 мм вод. ст. Наибольшее давление наблюдалось на глубине 1 400–2 200 мм от верхнего уровня ванны при температуре 1 200–1 600°C. Вероятно, это было связано с развитием химических реакций и измельчением кусков хромовой руды, что приводило к уменьшению порозности слоя. По исследованию автора давление возрастает по мере увеличения расстояния от колошника вглубь ванны и при приближении к электроду. Обвалы шихты, «свищи» приводят к кратковременному местному увеличению давления до 400–450 мм вод. ст. Перемещение электродов в процессе плавки не оказывает заметного влияния на давление газов на каждом из горизонтов ванны. Автор установил, что повышенное содержание двуокиси углерода на поверхности колошника связано с частичным окислением окиси углерода. На основании результатов опытов высказано предположение, что двуокись углерода в ванне печи образуется в результате взаимодействия окиси углерода с ненасыщенными сложными карбидами железа и хрома. Концентрация кислорода на поверхности колошника составляет 0,5%. В глубине ванны кислород в газовой фазе не обнаружен. Содержание окиси углерода на глубине ванны колеблется в пределах от 81 до 88% при температурах 1 300–1 400°C. До глубины 1 100 мм содержание пыли в газе остается постоянным и равным 2,35 г/м<sup>3</sup>. Резкое увеличение запыленности отмечается на глубине 1 100–1300 мм при температурах 1 100–1 350°C, что связано с началом восстановительного процесса.

Достаточно полно и обоснованно результаты лабораторных исследований газодинамических свойств шихтовых материалов ферромарганцевых и ферросиликомарганцевых печей изложены в [11]. Авторы отмечают, что при существующем качестве шихтовых материалов и глубине ванн более 4 000 мм газопроницаемость шихты существенно снижается. К увеличению количества колошниковых газов приводит и повышение единичной мощности печей. Восстановительный печной газ, накапливаясь в реакционной зоне, создает высокое давление, в результате на колошнике или у электрода наблюдается выброс газа и шихты. Это приводит к дополнительным потерям тепла и марганца с отходящими газами, затрудняет ход технологического процесса и ухудшает его технико-экономические показатели. В настоящее время работы в этом направлении ведутся на основе создания математических моделей процессов [12].

**Постановка задания.** Целью статьи является исследование особенностей газодинамики рабочего пространства ванны действующей электропечи рпз-48(63) при выплавке ферросиликомарганца.

Учитывая вышеизложенное, представленная работа предполагает определение взаимосвязи показателей работы печи с помощью факторного анализа, исследование газодинамических особенностей рудовосстановительной электропечи РПЗ-48(63) во время ее работы с наиболее высокими и устойчивыми показателями, получение зависимостей изменения основных газодинамических характеристик по высоте ванны действующей печи, лабораторные исследования влияния фракционного состава шихты на ее газодинамику и подбор оптимального гранулометрического состава с учетом ранее полученных зависимостей для действующей печи, оценку работы действующей электропечи с точки зрения полученных результатов.

**Изложение основного материала исследования.** Работу по исследованию особенностей газодинамики содержимого ванны печи можно условно разделить на 4 этапа.

1. С помощью факторного анализа (ФА) [13] исследовалась взаимосвязь технологических, электрических и газодинамических режимов работы прямоугольных печей для выплавки ферросиликомарганца. Как известно, коэффициент корреляции (КК) характеризует тесноту связи двух величин. Если какие-то две величины представить как единичные векторы,

то КК – это косинус угла между этими векторами. Множество корреляций записываются как матрица коэффициентов корреляций (МКК). Геометрически – это пучок единичных векторов, выходящих из одной точки. МКК получают при корреляционно-регрессионной (первичной) обработке данных. С помощью ФА из матрицы КК выделяют факторы, которые геометрически интерпретируются как оси, выходящие из одной центральной точки, и группирующие вокруг себя пучки наиболее тесно связанных КК. Проекция каждого единичного вектора от КК на такую ось и даст факторную нагрузку, которая, также как и КК, измеряется в пределах от  $-1$  до  $+1$ . По абсолютной величине переменных (т.е. их нагрузок) представляется возможным судить о качественном содержании фактора. При этом нагрузки  $\leq 0,1$  считаются незначимыми, то есть нулевыми. В нашем случае каждая ось (фактор) – это слой соответствующих шихтовых материалов рабочего пространства печи. ФА работы печи РПЗ-48(63) позволил выделить 2 фактора (рис.1), которые группируют между собой 26 выбранных характеристик [14]. На рисунке 1 они представлены в виде координатных осей, а результаты расчётов – в табл.1. На печи имеется три фазы состояния вещества: твёрдое, жидкое – расплавы шлака и металла и газообразные продукты. По этим фазам и идёт распределение факторных нагрузок. Шлак и шихта определяют один фактор, а газ и металл – второй. Количество металла пропорционально выделенному теплу (о тепловой энергии судят по мощности (P) и по расходу электроэнергии (MWG)). Как видно, количество газа (M3) пропорционально восстановленному металлу (Me). На одной оси расположены такие переменные, как количество шлака и основные составляющие шихты: агломерат, кокс, кварцит (Agl, Koks, Kvt). На другой оси – мощность, выделяемая в объеме печи, которая влияет на выход газа. Выход водорода и кислорода говорит о влажности шихты, что согласуется с результатами исследований ряда авторов. То, что мощность (P) и расход электроэнергии (MWG) лежат рядом, говорит о минимуме простоев. Количество шлака (Slak) связано с количеством Mn в нём (Mn\_sk). При недостаточной интенсивности процесса восстановления растут и количество шлака и процент (Mn) в нём. Содержание Mn в сплаве (Mn\_me) зависит от перехода (Mn)  $\rightarrow$  [Mn], то есть перехода ведущего элемента из шлака в металл, поэтому вполне логично, что содержание Mn в металле (Mn\_me) лежит на оси шлака.

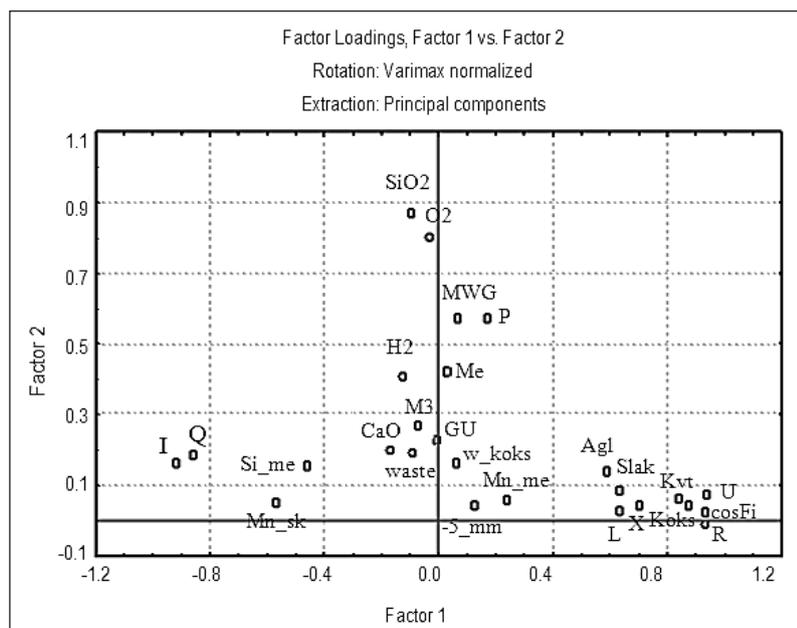


Рис. 1. Сведение 26-ти наблюдаемых переменных (с посменным усреднением) к 2-м факторам, которые соответствуют 2-м слоям рабочего пространства ванны печи (описание обозначений переменных – в табл. 1)

Также содержание [Si] указывает на горячий или холодный ход процесса, что в свою очередь связано с количеством шлака. Количество введенной энергии в большей степени влияет на процессы восстановления, а следовательно, и на состав шлака. При интенсификации процесса восстановления Mn из (Mn) шлака количество (SiO<sub>2</sub>) в шлаке будет возрастать, так как Mn восстанавливается легче, чем кремний. Поэтому (SiO<sub>2</sub>) лежит на оси «металла». При нормальной посадке электродов нижние слои ванны становятся более прогретыми, что способствует процессам восстановления. Это означает, что если имеется связь электрических параметров с выплавленным металлом (Me), то посадка электродов оптимальна. Отрицательное (или про-

Таблица 1  
Нагрузки 26-ти наблюдаемых переменных на факторные оси, которые соответствуют 2-м слоям рабочего пространства ванны печи

№	Обозначение	Физический смысл	Факторы	
1	Me	Выплавленный сплав	.03	.42
2	Si_me	Содержание кремния в сплаве	-.46	.15
3	Mn_me	Содержание марганца в сплаве	.24	.06
4	Slak	Количество шлака	.63	.09
5	Mn_sk	Содержание Mn в шлаке	-.57	.05
6	SiO2	Содержание SiO <sub>2</sub> в шлаке	-.1	.87
7	CaO	Содержание CaO в шлаке	-.17	.20
8	M3	Выходящий газ	-.04	.25
9	H2	Содержание H <sub>2</sub> в газе	-.13	.41
10	O2	Содержание O <sub>2</sub> в газе	-.03	.80
11	MWG	Расход электроэнергии	.07	.57
12	P	Активная мощность	.17	.57
13	Q	Реактивная мощность	-.86	.18
14	cosFi	Коэффициент использования мощности	.93	.02
15	Agl	Количество агломерата	.59	.14
16	Kvt	Количество кварцита	.84	.06
17	Koks	Количество кокса	.87	.04
18	GU	Количество газового угля	-.01	.23
19	waste	Количество отходов	-.09	.19
20	w_koks	Влажность кокса	.06	.16
21	-5_mm	Отсев – 5 мм	.13	.04
22	L	Перепуск электродов	.63	.03
23	R	Активное сопротивление печи	.93	-.01
24	X	Реактивное сопротивление печи	.70	.04
25	I	Ток	-.92	.16
26	U	Напряжение	.94	.07

тивоположное) значение тока на факторной оси «Металл-электропараметры» объясняется тем, что ток связан с сопротивлением обратной зависимостью. Рост перепуска должен уменьшать омическое сопротивление. Однако перепуск (L) и сопротивление (R) находятся рядом на одной оси, так как перепуск просто автоматически увеличивают при росте сопротивления. Таким образом, проведенный анализ показывает, что факторами являются два слоя объема рабочего пространства печной ванны, один из которых охватывает шихтово-шлаковую зону, а второй – шлако-металлическую зону ванны печи.

Поэтому становится возможным объяснить, почему кокс и газовый уголь относятся к разным факторам. Кокс вступает в реакцию раньше, а газовый уголь, как менее активный компонент, достигает большей глубины реакционной зоны печи (рис. 1). При обработке выборки с данными по каждому из электродов удается получить более 5-ти факторов, которые затем представляются как новые переменные для нахождения факторов 2-го порядка. Полученную структуру представляется возможным использовать для общего анализа процессов восстановления в электропечах, однако детальное изучение газодинамических процессов в ванне печи требует их глубокого экспериментального исследования.

2. На действующей ферросплавной прямоугольной электропечи РПЗ-48(63), выплавляющей товарный ферросиликомарганец, выполнялись экспериментальные исследования газодинамических свойств содержимого ванны (распределения температуры, давления, состава печных газов на разном уровне от поверхности колошника) в диапазоне рабочих значений активной мощности (48-50 МВт). Исследования проводились с применением усовершенствованной методики изучения строения рабочего пространства ванны, измерения распределения температур, давления и состава печного газа в объеме зоны схода шихтовых материалов и реакционной зоны (при выплавке ферросиликомарганца ширина зоны схода составляет 0,8–1,0 м), с учетом геометрии рабочего пространства ванны и электротехнологического режима выплавки сплава [15; 16; 17; 18; 19; 20; 21].

Измерения температур и давлений осуществлялось через взрывной клапан у V-го электрода под разными углами с таким расчетом, что точки замеров располагались в одной плоскости по вертикали приэлектродной зоны (на удалении 0,35 м от боковой поверхности электрода). Нижняя точка

замеров соответствовала давлению и температуре части шихты на глубине ванны 2,5 м, где их значения соответственно составляли 2,04 атм (20,5 кПа) и 1250 С. Верхняя точка располагалась на колошнике с заглублением в шихту на 100–150 мм. Полученные результаты позволили построить графики изменения температуры и давления в сечении приэлектродной зоны печи, которые удалось описать следующими соотношениями:

$$p = 0,6646259 \exp(1,3462069 H), \text{ Па}; \quad (1)$$

$$t = 0,8093058 H^2 + 436,7442097 H + 184,8101423, \text{ }^\circ\text{C}, \quad (2)$$

где  $H$  – глубина ванны печи от поверхности колошника.

Что касается содержания основных компонентов печных газов, таких как СО и СО<sub>2</sub>, то самое высокое содержание СО отмечалось в нижней точке замеров и наоборот. Низкое содержание СО<sub>2</sub> в этой точке связано, по-видимому, с тем, что образующийся здесь же преимущественно СО полностью участвует в химических реакциях восстановления ведущего элемента. Изменение содержания СО и СО<sub>2</sub> по высоте приэлектродной зоны также удалось описать соответствующими зависимостями:

$$\text{СО, \%} = (1,4985915 \cdot 10^{-5}) t^2 + 0,0556394 t - 16,648169; \quad (3)$$

$$\text{СО}_2, \% = - (1,5143662 \cdot 10^{-5}) t^2 - 0,0012777 t + 23,7286761, \quad (4)$$

где  $t$  – температура в объеме приэлектродного пространства электропечи.

Вся серия измерений проводилась при следующих параметрах режима работы электрода: мощность на пятом электроде – 7,0–7,5 МВт, ступень печного трансформатора – 10, напряжение фазы – 200 В, ток электрода – 90–95 кА, активное сопротивление электрода 0,05–0,06 мОм, реактивная мощность печи 26–27 Мвар и одинаковом составе компонентов колоши шихты ферросиликомарганца: агломерат АМНВ-2 – 1 660 кг, газовый уголь – 50 кг, коксик сухой – 350 кг, кварцит – 320 кг, отходы – 150 кг, смесь – 50 кг. Печь работала с высокими и устойчивыми показателями.

3. Для выбора оптимального гранулометрического состава компонентов шихты ферросиликомарганца использовалась специально изготовленная с учетом критериев подобия экспериментальная установка, представляющая собой

фрагмент рабочего пространства ванны печи у электрода, включающая стальной цилиндр, снабженный равномерно расположенными импульсными трубками, в которую помещалась модель электрода, причем ширина приэлектродной зоны в соответствии с теорией подобия соответствовала размерам зоны действующей печи. Подача сжатого воздуха с подобным измеренному на действующей печи значением обеспечивалась с нижней части установки. Предложенная установка уменьшала влияние сегрегации образца на полученные результаты, что достигалось соответствующей конструкцией и расположением импульсных трубок. Установка позволила получать газодинамические характеристики шихтовых материалов (зависимость потери напора по высоте слоя), как при температуре 20°C, так в дальнейшем и при нагреве нижней части цилиндра установки (посредством устанавливаемых ленточных нихромовых нагревателей), то есть моделировались условия по возможности адекватные условиям ванны действующей печи. После нагрева до температуры 800°C (при которой начинались процессы оплавления компонентов шихты, в первую очередь агломерата) нагреватели отключались, в патрубок нижней части установки подавался сжатый воздух давлением 1,02 атм (10,25 кПа), давление в импульсных трубках измерялись манометрами. Нагрев шихтовых материалов в установке позволил получать порозность ее по высоте

приэлектродной зоны, соответствующую действующей печи. Оптимальный грансостав шихты подбирался на основании соответствия части зависимости, ранее полученной при измерении давлений в приэлектродной зоне действующей печи. Наибольшую практическую ценность представляли результаты, полученные при нагреве образца. Проводилось три серии экспериментов по четыре опыта в каждой. Содержание фракции «-5 мм» в кварците по результатам рассевов постоянно составляло 1%. Каждой серии исследований соответствовало содержание в шихте коксика фракции «-5 мм» соответственно 0%, 5%, 10%. Каждая серия включала 4 опыта, шихта в которых характеризовалась соответственно 5%, 10%, 20%, 40%-ным содержанием в агломерате АМНВ-2 фракции «-5 мм». Содержание фракции «+5»-«+20 мм» в агломерате уменьшалось пропорционально увеличению содержания фракции «-5 мм». Содержание фракции «+20 мм» в агломерате было постоянным и составляло 31%. С увеличением содержания фракции «-5 мм» пропорционально уменьшалось содержание фракции «+5»-«+20 мм» в навеске коксика. В результате обработки полученных данных измерений установлено оптимальное содержание компонентов шихты фракции «-5 мм», в частности, для коксика -5%, но не более 7%, для агломерата – не более 15%. В этом случае общее содержание фракции «-5 мм» в шихте ферросиликомарганца составит

Таблица 2

**Технико-экономические показатели работы электропечи РПЗ-48(63) в период проведения исследований**

№ п/п дня	P <sub>п</sub> , МВт	Содержание фракции, %			Производительность		Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	Содерж. Мп в шлаке, %	Содерж. Мп в шихте, %
		Кокс «-5 мм»	Кокс «+25 мм»	АМНВ-2 «-5 мм»	физич. т	базов. т			
1	50	3-5	4-6	8-14	235.7	259.3	4080	8.2	40.1
2	50	2-4	6-8	22-25	269.2	296.1	4030	9.1	41.2
3	50	2-5	3-5	9-15	319.5	351.4	3442	10.2	40.2
4	50	4-5	3-6	7-10	294	312.5	3807	10.1	41.5
5	50	5-7	5-8	8-11	297.2	326.4	3705	10.1	41.8
6	48	3-6	5-6	7-10	282.5	309.7	3864	10.5	41.6
7	48	3-5	3-4	8-13	288.2	315.4	3819	10.2	42.0
8	48	3-5	3-5	9-10	284.5	309.4	3860	8.0	39.6
9	48	2-4	3-6	5-9	290.3	310.3	3822	8.0	40.2
10	48	3-5	3-6	10-12	279.3	300.6	3900	10.7	41.8
11	48	2-6	2-4	9-11	265.7	291.7	3990	10.5	40.0
12	48	2-5	3-4	9-11	288.9	317.6	3798	10.3	41.0
13	48	2-5	3-6	8-10	278.9	305.8	3943	9.1	38.3
14	48	3-5	5-7	17-20	264.7	291.2	3963	9.3	38.8
15	48	2-5	4-6	15-22	272.4	290.6	3937	10.1	38.2

от 13% до 15%. Полученные результаты дали возможность установить, контроль за какими фракциями компонентов шихты следует обеспечивать, чтобы оптимизировать газодинамические характеристики печи при выплавке товарного ферросиликомарганца.

4. Учитывая вышеизложенное, была проведена и проанализирована опытная кампания работы печи РПЗ-48(63), оцениваемая как с точки зрения рекомендуемого грансостава компонентов шихты, так и с точки зрения электрического режима и технико-экономических показателей процесса. Полученные результаты сведены в таблицу 2 и дают представление о целесообразности такой оценки. Содержание фракции «-5 мм» и «+25 мм» в коксике было практически одинаково в течение всего периода исследований. Анализ таблицы, электрических и газовых режимов работы печи позволил выделить наиболее представительные дни в работе печи: 13-й и 14-й, которые отличались по гранулометрическому составу шихты. При этом качественный состав исходной шихты был одинаков. Печь в обоих случаях работала на мощности 48 МВт, ток электродов-80-85 кА. Электрический и газовый режимы работы печи на 14-й день кампании характеризуется наличием пиков повышенного давления, что соответствует моментам обрушения шихты ввиду недостаточной ее газопроницаемости ввиду повышенного содержания мелкой фракции. Как следует из таблицы, работа печи на рекомендуемом фракционном составе компонентов шихтовых материалов (13-й день кампании) обеспечивает достаточно высокие технико-экономические показатели производства товарного ферросиликомарганца.

Подтверждена необходимость регулярного контроля гранулометрического состава шихты перед подачей в печь, возможность использования результатов исследований для контроля технологических параметров процесса выплавки ферросиликомарганца и в мощных герметичных электропечах.

**Выводы.** С помощью факторного анализа исследована взаимосвязь основных показателей работы прямоугольной печи РПЗ-48(63).

Выполнены исследования газодинамики рабочего пространства ванны действующей электропечи РПЗ-48(63) при работе с высокими и устойчивыми технологическими и электрическими режимами.

Получены уравнения, описывающие распределение давлений, температур, компонентов печных газов по высоте приэлектродной зоны ванны действующей печи.

На разработанной лабораторной установке проведены исследования газодинамики шихты с компонентами различного грансостава. Предложен оптимальный грансостав шихты ферросиликомарганца.

После анализа двухнедельной кампании печи РПЗ-48(63), с учетом ранее полученных результатов исследований, установлена взаимосвязь рекомендуемого фракционного состава шихты с технико-экономическими показателями выплавки ферросиликомарганца.

Предлагаемые результаты исследований могут быть использованы для оптимизации электротехнологических параметров выплавки ферросиликомарганца и в герметичных электропечах большой мощности.

#### Список литературы:

1. Коротич В.И. Газодинамика агломерационного процесса / В.И. Коротич, В.П. Пузанов. Москва : Металлургия, 1969. 208 с.
2. Мкртчян А.С. Исследование динамики доменного процесса. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1975. № 11. С. 781–786.
3. Гришкова А.А. Анализ скорости схода шихты в шахте доменной печи. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1980. № 2. С. 36–38.
4. Логинов В. И. Влияние структуры столба шихтовых материалов на ход доменного процесса. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1985. № 3. С. 11–14.
5. Кучер А.Г., Касьян В.В., Мироненко П.Ф., Садовский Н.Г. Электрическое сопротивление марганцевых концентратов и ферромарганцевых шихт. *Электротехническая промышленность. Электротермия*. 1975. № 6. С. 4–5.
6. Нежурин В.И., Махонь Г.М., Кравченко В.А., Рева С.И., Малкин Б.М. О влиянии контактных сопротивлений марганецсодержащих компонентов шихты для выплавки силикомарганца на характер изменения удельного электросопротивления при нагревании. *Металлургия и коксохимия. Республиканский межведомственный научно-технический сборник*. Киев : Техника. 1986. № 90. С. 86–88.
7. Розенберг В.Л. Рудовосстановительные электропечи. Энергетические показатели и очистка газов / В.Л. Розенберг, А.Р. Вальдберг. Москва : Энергия, 1974. 104 с.
8. Карманов Э.С. Величко Б.Ф. Методы расчета параметров ванн рудовосстановительных печей. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1985. № 6. С. 41–43.

9. Николаев Э.В. Врублевский О.П. Газовый режим закрытых ферросилициевых печей мощностью 33 МВ·А. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1973. № 11. С. 1011–1012.
10. Арбузов В.И. Характеристика газового режима закрытой электропечи. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1972. № 10. С. 915–917.
11. Кучер А.Г., Петров А.В. Исследование газодинамических свойств ферромарганцевых и силикомарганцевых шихт различного гранулометрического состава. Производство ферросплавов. Новокузнецк, 1980. С. 61–71.
12. Куцин В.С., Жаданос А.В., Гасик М.И. Анализ процессов образования и распространения пылегазовых выбросов при агломерации марганцевых концентратов и выплавке ферросплавов на основе математического моделирования и экспериментальных данных. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 4. С. 22–26.
13. Иберла К. Факторный анализ. пер з нем. Москва : Статистика, 1980. 398 с.
14. Нежурин В.І., Сиваченко В.А., Ємчицький В.Т. Застосування статистичних методів для оцінки протікання процесів в рудовідновлювальній печі. *Теорія і практика металургії*. Дніпропетровськ, 2009. № 1–2. С. 29–35.
15. Жердев И.Т., Московцев Д.П., Яськов Е.С. Метод отбора проб – метод изучения строения ванн действующих силикомарганцевых печей. *Металлургия и коксохимия. Республиканский межведомственный научно-технический сборник*. Киев : Техника. 1966. № 3. С. 125–129.
16. Жердев И.Т., Яськов Е.С. Строение ванны печи РПЗ-48. *Электротехническая промышленность. Электротермия*. 1974. № 4. С. 10–11.
17. Островский Я.Н. Газовый поток в ванне закрытой электропечи при выплавке углеродистого феррохрома. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1976. № 7. С. 618–620.
18. Карманов Э.С., Нежурин В.И. Исследование скорости и характера схода шихтовых материалов при выплавке марганцевых сплавов в закрытых руднотермических электропечах. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1991. № 7. С. 37–40.
19. Нежурин В.И., Карманов Э.С., Кучер И.Г. Исследование газодинамики содержимого ванны электропечи РПЗ – 48 (63), выплавляющей силикомарганец. *Металлургия марганца. Тезисы докладов V Всесоюзного совещания*. Никополь. С. 30–31.
20. Нежурин В.И., Карманов Э.С., Коваль А.В., Ткач Г.Д., Кучер И.Г., Чумаков А.А. Установка для определения газодинамических свойств насыпных материалов. А. с. № 1642329 СССР, МКИ G01N15/089; №4636562/26; заявл. 23.11.88; опубл. 15.04.91. Бюл. № 14.
21. Нежурин В.И., Карманов Э.С., Кучер И.Г., Ткач Г.Д. Исследование газодинамических свойств силикомарганцевых шихт различного гранулометрического состава. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1990. № 3. С. 56.

**Nezhurin V.I., Nikolenko A.V., Kuvaiiev V.Yu. THE STUDY OF THE GAS DYNAMICS OF THE WORKING SPACE OF THE EXISTING ELECTRIC FURNACE RPZ-48 (63) BATH AT THE FERROSILICON MANGANESE SMELTING**

*The problem of maintaining the optimal electric, electrode and charge operating modes of mine ore-thermal electric furnaces requires a rational gas-dynamic melting mode. The literature on the study of the gas dynamics of existing ore-thermal furnaces is analyzed. The largest number of studies relates to blast furnace practices, the studies of electroferroalloy processes are limited with the characteristics of the gases' gas-dust constituents of the under-vault space of closed furnaces, studies of gas dynamics processes in the volume of furnaces for producing ferrochrome, and characteristics of the charges. Currently, only mathematical models are used for studying such processes. This work includes determining the correlation between the operating parameters of an existing industrial furnace using factor analysis, an experimental study of the gas-dynamic features of the RPZ-48(63) electric furnace during its operation with high and stable rates, obtaining dependencies describing the distribution of pressures, temperatures, components of furnace gases by height the near-electrode zone of the furnace bath, laboratory studies of the influence of the fractional composition of the charge on its gas dynamics, taking into account the previously obtained dependences for the existing furnace, the selection of the optimal particle size distribution of the used charge, conducting an experimental campaign and evaluating the operation of the electric furnace in terms of the obtained results. A special experimental installation was used for studying the effect of the particle size distribution of the ferrosilicon manganese charge on gas dynamics. The optimum content of the “-5 mm” fraction charge components was established: it is not more than 7% of coke and not more than 15% of sinter. In this case, the total content of the “-5 mm” fraction in the ferrosilicon manganese charge will be from 13% to 15%. The operation of the furnace on the recommended fractional composition of the components of the charge materials provides fairly high technical and economic rates of commercial ferrosilicon manganese production.*

**Key words:** ore-reducing (ore-thermal) electric furnace, ferrosilicon manganese, operating modes, particle size distribution of the charge, gas-dynamic properties of the near-electrode zone content, factor analysis.